Collection @ chosun

creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

Collection

[UCI]I804:24011-200000238397

Collection @ chosun

2009年 8月

博士學位論文

스테인리스 圓形鋼管 보-기둥의 耐力에 관한 硏究

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

朴 宰 仙

Collection @ chosun

스테인리스 圓形鋼管 보-기둥의 耐力에 관한 硏究

Strength of Stainless Steel Circular Hollow Section Beam-Columns

２００９년　８월　２５일

朝 鮮 大 學 校　大 學 院

建 築 工 學 科

朴　　宰　　仙

Collection @ chosun

스테인리스 圓形鋼管 보-기둥의 耐力에 관한 硏究

指導敎授　　梁　永　晟

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함.

２００９년　　４월

朝 鮮 大 學 校　大 學 院

建 築 工 學 科

朴　　宰　　仙

dCollection @ chosun

朴宰仙의 博士學位論文을 認准함

委 員 長　東國大學校 名譽教授 金 圭石 印

委　　員　亞洲大學校 教授 李 承峻 印

委　　員　朝鮮大學校 教授 全 政燮 印

委　　員　朝鮮大學校 教授 全 義植 印

委　　員　朝鮮大學校 教授 梁 永晟 印

２００９년　６월

朝鮮大學校 大學院

Collection @ chosun

2009年8月

博士學位論文

스테인리스 圓形鋼管 보-기둥의 耐力에 관한 硏究

朴 宰 仙

Collection @ chosun

- 목 차 -

ABSTRACT

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적 ····· 1
1.1.1 연구배경 ····· 1
1.1.2 연구목적 ····· 4

1.2 연구내용 및 방법 ····· 5
1.2.1 연구내용 ····· 5
1.2.2 연구방법 ····· 7
1.2.2.1 스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험적 연구 ····· 7
1.2.2.2 스테인리스 원형강관 보-기둥의 내력평가 ····· 8

1.3 기존의 연구 ····· 9

1.4 스테인리스강 ····· 12
1.4.1 스테인리스 강종 표기 ····· 13
1.4.2 스테인리스강의 분류 ····· 14
1.4.3 주성분에 의한 분류 및 특성 ····· 16
1.4.4 금속조직상의 분류 및 특성 ····· 19
1.4.5 스테인리스강의 특징 ····· 21
1.4.6 스테인리스강의 제조공정 ····· 23
1.4.7 스테인리스강의 부식(腐蝕) ····· 25

2. 실험 및 실험방법

2.1 실험기기 ····· 30

Collection @ chosun

2.2 재료실험 ····· 31
2.2.1 인장강도실험 ····· 31
2.2.1.1 실험계획 ····· 31
2.2.1.2 실험방법 ····· 32
2.2.2 Stub-column 실험 ····· 34
2.2.2.1 실험계획 ····· 34
2.2.2.2 실험방법 ····· 35

2.3 부재실험 ····· 36
2.3.1 중심압축 하중을 받는 기둥 ····· 37
2.3.1.1 실험계획 ····· 37
2.3.1.2 실험방법 ····· 37
2.3.2 휨과 축력을 받는 보-기둥 ····· 40
2.3.2.1 실험계획 ····· 40
2.3.2.2 실험방법 ····· 43
2.3.3 휨을 받는 보 ····· 48
2.3.3.1 실험계획 ····· 48
2.3.3.2 실험방법 ····· 48

3. 실험결과

3.1 재료실험 ····· 50
3.1.1 인장강도실험 ····· 50
3.1.2 Stub-column 실험 ····· 52

3.2 부재실험 ····· 54
3.2.1 중심압축 하중을 받는 기둥 ····· 54
3.2.1.1 기둥의 최대내력 ····· 54
3.2.1.2 내력-변위 관계 ····· 55

Collection @ chosun

3.2.2 휨과 축력을 받는 보-기둥 ····· 58
3.2.2.1 최대내력 및 모멘트 ····· 60
3.2.2.2 내력-변위 관계 ····· 72
3.2.2.3 모멘트(M)-회전각(θ) 관계 ····· 96
3.2.3 휨을 받는 보 ····· 109
3.2.3.1 최대 휨내력 ····· 109
3.2.3.2 휨내력-처짐 관계 ····· 111
3.2.3.3 모멘트(M)-회전각(θ) 관계 ····· 112

3.3 소결 ····· 113

4. 보-기둥의 내력평가

4.1 전소성(全塑性) 이론해석에 의한 평가 ····· 116
4.1.1 등가(等價)좌굴길이계수(K) ····· 116
4.1.2 전소성내력(全塑性耐力) ····· 118
4.1.3 실험결과와 이론해석결과 비교 ····· 120

4.2 각국 기준식에 의한 평가 ····· 130
4.2.1 각국 기준식 ····· 130
4.2.2 실험결과와 각국 기준식 비교 ····· 136

4.3 보-기둥의 적용식 ····· 147
4.3.1 좌굴강도계수 ····· 147
4.3.2 모멘트확대계수A_F ····· 148

4.4 제안식 평가 ····· 150
4.4.1 실험결과와 제안식 비교 ····· 150
4.4.2 제안식과 각국 기준식 비교 ····· 160

Collection @ chosun

4.5 소결 ····· 162

5. 결론 ····· 165

참고문헌 ····· 168

부록1. 기호 ····· 176

부록2. 실험사진 ····· 179

Collection @ chosun

- 표 목 차 -

<표 1.1> 스테인리스 강종명 주 표기법 ····· 13
<표 1.2> 스테인리스 강종명 후기 표기법 ····· 13
<표 1.3> 대표적인 스테인리스 강종에 의한 분류 ····· 14
<표 1.4> 주성분에 의한 스테인리스강의 분류 ····· 15
<표 1.5> 대표적인 스테인리스강의 특성 비교 ····· 16

<표 2.1> 인장강도실험계획 ····· 32
<표 2.2> Stub-column압축강도실험계획 ····· 34
<표 2.3> 기둥 시험체 계획 ····· 37
<표 2.4> 보-기둥 시험체 계획 ····· 40
<표 2.5> 휨 시험체 계획 ····· 48

<표 3.1> 인장강도실험결과 ····· 50
<표 3.2> Stub-column압축강도실험결과 ····· 52
<표 3.3> 기둥 실험결과 ····· 54
<표 3.4> 보-기둥 실험결과 ····· 58
<표 3.5> 보 실험결과 ····· 109

<표 4.1> 보-기둥 실험결과와 해석결과의 비교 ····· 122
<표 4.2> 보-기둥 실험값과 기준값 비교 ····· 137
<표 4.3> 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교 ····· 151
<표 4.4> 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교 ····· 152
<표 4.5> 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교 ····· 153
<표 4.6> 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교 ····· 154
<표 4.7> 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교 ····· 155

Collection @ chosun

- 그 림 목 차 -

[그림 1.1] 스테인리스 강관의 제조과정 ····· 5
[그림 1.2] 오스테나이트(austenite) 조직 ····· 19
[그림 1.3] 페라이트(ferrite) 조직 ····· 19
[그림 1.4] 마르텐사이트(martensite) 조직 ····· 20
[그림 1.5] 이상(二相) 조직 ····· 20
[그림 1.6] 제강공정 ····· 24
[그림 1.7] 열간압연공정 ····· 24
[그림 1.8] 냉간압연공정 ····· 24
[그림 1.9] 선재(線材)압연 및 후판(厚板)압연공정 ····· 25

[그림 2.1] 인장강도시험편 개형 ····· 32
[그림 2.2] Stub-column압축강도시험체 개형 ····· 35
[그림 2.3] 기둥 시험체의 가력도 ····· 38
[그림 2.4] 엔드플레이트 상세 ····· 38
[그림 2.5] 기둥 시험체의 개형 ····· 39
[그림 2.6] 보-기둥 시험체 개형 ····· 43
[그림 2.7] 엔드플레이트와 브래킷 상세도 ····· 43
[그림 2.8] 보-기둥 시험체 가력도 ····· 46
[그림 2.9] 휨 시험체의 형상과 치수 ····· 48
[그림 2.10] 휨 시험체의 setting 현황 ····· 49

[그림 3.1] 인장강도시험편 응력-변형도 곡선 ····· 51
[그림 3.2] stub-column 응력-변형도 곡선 ····· 52
[그림 3.3] 기둥의 세장비별 최대내력 ····· 55
[그림 3.4] 기둥의 내력-축변위 곡선 ····· 56
[그림 3.5] 기둥의 내력-횡변위 곡선 ····· 57

dCollection @ chosun

[그림 3.6] 기둥의 내력-각변위 곡선 ····· 57
[그림 3.7] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력 ····· 61
[그림 3.8] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력 ····· 62
[그림 3.9] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트 ····· 62
[그림 3.10] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력 ····· 64
[그림 3.11] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력 ····· 64
[그림 3.12] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트 ····· 65
[그림 3.13] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력 ····· 66
[그림 3.14] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력 ····· 67
[그림 3.15] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트67
[그림 3.16] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력 ····· 68
[그림 3.17] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력 ····· 69
[그림 3.18] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트 69
[그림 3.19] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력 ····· 71
[그림 3.20] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력 ····· 71
[그림 3.21] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트 72
[그림 3.22] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선 ····· 74
[그림 3.23] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 축변위 75
[그림 3.24] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선 ····· 76
[그림 3.25] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위 77
[그림 3.26] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선 ····· 79
[그림 3.27] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 축변위 79
[그림 3.28] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선 ····· 81
[그림 3.29] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위 81
[그림 3.30] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선 ····· 83
[그림 3.31] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대내력시 축변위 ····· 84
[그림 3.32] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선 ····· 86

Collection @ chosun

[그림 3.33] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대내력시 횡변위 ····· 86

[그림 3.34] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선 ····· 88

[그림 3.35] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대내력시 축변위 ····· 89

[그림 3.36] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선 ····· 90

[그림 3.37] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대내력시 횡변위 ····· 91

[그림 3.38] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선 ····· 93

[그림 3.39] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대내력시 축변위 ····· 93

[그림 3.40] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선 ····· 95

[그림 3.41] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대내력시 횡변위 ····· 95

[그림 3.42] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선 ····· 98

[그림 3.43] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대단부모멘트시 회전각 ····· 98

[그림 3.44] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선 ····· 100

[그림 3.45] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대단부모멘트시 회전각 ···· 101

[그림 3.46] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선 ····· 103

[그림 3.47] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대모멘트시 회전각 ····· 103

[그림 3.48] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선 ····· 105

[그림 3.49] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대단부모멘트시 회전각 ·· 106

[그림 3.50] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선 ····· 108

[그림 3.51] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의
편심비에 따른 최대단부모멘트시 회전각 108

[그림 3.52] 휨 부재의 최대 휨내력 ····· 110

[그림 3.53] 휨 부재의 최대휨모멘트 ····· 110

Collection @ chosun

[그림 3.54] 휨 부재의 휨내력-처짐 관계 ····· 111
[그림 3.55] 휨 부재의 모멘트-회전각 관계 ····· 112

[그림 4.1] 등가좌굴길이계수 ····· 116
[그림 4.2] 원형강관 기둥의 전소성응력상태 ····· 119
[그림 4.3] 보-기둥의 실험값과 P-M 상관곡선 비교 ····· 127
[그림 4.4] 보-기둥 편심비에 따른 R값의 비교 ····· 129
[그림 4.5] AIK-LSD 보-기둥곡선 ····· 131
[그림 4.6] AISC-LRFD 보-기둥곡선 ····· 132
[그림 4.7] AIJ-LSD 보-기둥곡선 ····· 134
[그림 4.8] SIJ-ASD 보-기둥곡선 ····· 135
[그림 4.9] 보-기둥의 실험값과 기준곡선 비교 ····· 141
[그림 4.10] $L_K/r = 30$ 보-기둥 실험값과 기준값 비교 ····· 142
[그림 4.11] $L_K/r = 50$ 보-기둥 실험값과 기준값 비교 ····· 144
[그림 4.12] $L_K/r = 70$ 보-기둥 실험값과 기준값 비교 ····· 145
[그림 4.13] 스테인리스 강관 기둥의 무차원 좌굴계수 제안곡선 ····· 147
[그림 4.14] 단부모멘트와 곡률형상별 편심비에 따른 보-기둥의 제안곡선 비교 ···· 157
[그림 4.15] 단부모멘트와 곡률형상별 편심비에 따른 보-기둥의 R값 비교 ····· 159
[그림 4.16] 제안식을 적용한 보-기둥 상관곡선과 각국 기준곡선의 비교 ····· 161

dCollection @ chosun

- 사 진 목 차 -

[사진 2.1] 인장강도실험 전경 ····· 33
[사진 2.2] Stub-column실험 전경 ····· 33
[사진 2.3] 기둥 시험체 setting 전경 ····· 39
[사진 2.4] 보-기둥 시험체 setting 전경 ····· 47

[부사진 2.1] 인장강도 시험편 setting 전경 ····· 180
[부사진 2.2] 인장강도 시험편과 파단 후 시험편 전경 ····· 180
[부사진 2.3] Stub-column setting 전경 ····· 181
[부사진 2.4] Stub-column 파단 전경 ····· 181
[부사진 2.5] 기둥 시험체 setting 전경 ····· 182
[부사진 2.6] 기둥 시험체 파단 전경 ····· 182
[부사진 2.7] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥 시험체 setting 전경 ····· 183
[부사진 2.8] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥 시험체 파단 전경 ····· 183
[부사진 2.9] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥 시험체와 파단 후 시험체 전경 ····· 184
[부사진 2.10] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥 시험체 setting 전경 ····· 184
[부사진 2.11] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥 시험체 파단 전경 ····· 185
[부사진 2.12] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥 시험체와 파단 후 시험체 전경 ·· 185
[부사진 2.13] 한단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥 시험체 setting 전경 ····· 186
[부사진 2.14] 한단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥 시험체 파단 전경 ····· 186
[부사진 2.15] 한단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥 시험체와
파단 후 시험체 전경 ····· 187
[부사진 2.16] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥 시험체 setting 전경 ····· 187
[부사진 2.17] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥 시험체 파단 전경 ····· 188
[부사진 2.18] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥 시험체와 파단 후 시험체 전경 188
[부사진 2.19] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥 시험체 setting 전경 ····· 189
[부사진 2.20] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥 시험체 파단 전경 ····· 189
[부사진 2.21] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥 시험체와 파단 후 시험체 전경 190

Collection @ chosun

Stainless steel has a significance in its corrosion resistance, while it has been scarcely used in structural skeletons of building due to high prices. However, in the recent movement of social mind from mass production and abundant consumption to ecological coexistence with natural environment, sustaining a long life of building is of much concern in construction engineering. In that context, stainless steel is expected to be promising material for building.

Also stainless steel of easy maintenance and fire resistance efficiency, elongation is superior carbon steel can be used for structural members.

This study is experimental and analytical works on stainless steel tubular sections fabricated by cold-forming. The purpose of the study was to determine the buckling strength of stainless steel structural hollow sections and to develop guidelines for the design of these sections as structural members.

It is a series of experimental investigation on the compressed tests on stainless steel tubular columns and beam columns, including material tests(stub column tests, residual stress tests, coupon tests).

The experimental parameters of this study are as follows ;

1. Material tests
   - A kind of steel : Stainless steel(STK 304 TKC)
   - Section shape : Circle hollow section(○-101.6×3.0)
   - Diameter-thickness ratio : D/t - 34
2. Columns test
   - A kind of steel : Stainless steel(STK 304 TKC)
   - Section shape : Circular hollow section(○-101.6×3.0)
   - Diameter-thickness ratio : D/t - 34

dCollection @ chosun

- Slenderness ratio(L_k/r) : 30, 50, 70

3. Beam-columns test

- A kind of steel : Stainless steel(STK 304 TKC)
- Section shape : Circular hollow section(○-101.6×3.0)
- Diameter-thickness ratio : D/t - 34
- Slenderness ratio(L_k/r) : 30, 50, 70
- Eccentricity distance(e) : 0㎜, 25㎜, 50㎜, 75㎜, 100㎜
- Curvature : A Single Curvature, A Double Curvature
- On the symmetrical end-moment, On the asymmetrical end-moment

4. Beam test

- A kind of steel : Stainless steel(STK 304 TKC)
- Section shape : Circular hollow section(○-101.6×3.0)
- Diameter-thickness ratio : D/t - 34
- Slenderness ratio(L_k/r) : 30, 50, 70

The strength assessment method using theoretical analysis assessed the strength as it maintained a constant axial force on the steel hollow section column and assumed that the steel hollow section was subjected to full plastic stress according to the increase in the load of the moment when the moment was operated.

When the axial force and moment were operated, the full plastic stress block of the sectional factor of the stainless steel circular hollow section was calculated, by leading the M-P interaction from the equilibrium condition of force according to the location of the neutral axis and considering the P-δ effect based on the changes in the slenderness ratio(moment extension coefficient: A_F).

On the evaluation of the maximum strength of the stainless steel square hollow

Collection @ chosun

section, the following were assumed:

1. The shape of the section is circular hollow section;
2. The stainless steel circular hollow section should remain a plane after its strain;
3. Under the full plastic stress condition, the tensile stress and the compressive stress on the section all performed rectangular stress distribution; and
4. For the effects of the sloping of the materials and the eccentric load, the moment expansion coefficient(A_F) and the stress reduction coefficient(ϕ = 0.85) were applied.

Collection @ chosun

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

1.1.1 연구배경

21세기에 들어 고층화, 대형화 되어가고 있는 건축물의 발전은 구조 시스템 및 재료의 발전, 시공기술의 발전에 기인한다. 설계에 있어 다양하고 복잡한 형태의 계획이 가능해졌고, 복잡한 형태에 맞는 구조시스템의 개발로 강구조 건축구조물 분야도 크게 변화되고 있으며, 이러한 추세는 강구조 설계기준과 시방서의 정비가 따라가지 못할 정도로 급속하게 발전되고 있다.

건축물이 높아지고 세장비(細長比)가 커짐에 따라 바람이나 지진 등 수평하중의 영향으로 수직부재에 과다한 전단력 및 휨모멘트가 발생된다. 부재에 항복강도 이상의 응력이 작용하여 소성변형이 진행된 후 파괴되는 연성파괴보다 소성변형이 크지 않는 상태에서 취성적으로 파괴되는 경우에는 인명 및 경제적 손실을 크게 초래할 수 있다.

따라서 기둥부재의 보유내력을 충분히 크게 하고 허용범위 내에서 변형을 유지하면서 사용자에게 불편을 주지 않는 구조시스템으로 설계 되어야 한다. 이러한 요구에 대해 건축구조 분야에서는 새로운 구조시스템의 개발과 함께 기존의 재료를 적절히 조합하여 과거에는 얻을 수 없었던 성능을 건축구조에 부여하려는 노력이 활발하다.

그에 따라 강관구조에 대한 많은 연구가 이루어졌고, 실제 건축물에 적용하여 설계상의 여러 가지 문제점을 해결하고 그 디테일이나 시공법에 대해서도 많은 결과물들이 축적되었다.

강재의 경우 다양한 형상과 칫수를 가진 부재로서 설계자가 설계 시 창의력을 발휘할 수 있고 강재는 기본적으로 사용하중 하에서 탄성거동을 나타내므로 부재 및 시스템의 거동을 이해하기 쉽다. 이와 같은 강재의 장점 때문에 고성능, 고강도, 고기능화된 강재의 개발과 최첨단 구조공학기술이 모두 응용된다면 강재가 구조재로서 더욱 중요한 비중을 차지할 것이 분명하다.

그러나 강재의 특성상 강도가 높아지면 기존에 사용되던 강재에 비해 항복비가 상승하고 연신율 및 인성이 저하됨과 동시에 항복거동이 변화하여 명확한 항복점이 나타나

Collection @ chosun

지 않는 continuous yielding 현상이 일어나는 경향을 보인다. 이러한 항복참은 지금까지 많이 사용한 탄소당량(C_{eq})이 비교적 낮은 SS재, SM재에서는 항복현상이 나타났지만, 고장력강, 스테인리스강, 알루미늄 합금에는 항복참이 나타나지 않았다.

따라서 건축구조용 강재로 사용할 경우 판폭두께비에 따른 소성변형 능력이 현행 구조설계 기준에 부합하는지 검증할 필요성이 대두된다. 이러한 결과로서 일본과 유럽 등에서는 continuous yielding 현상이 일어나는 대표적인 강재인 스테인리스 강재에 대한 관심이 높아지고 있다.

스테인리스강은 1913년 Harry Brearly에 의해서 우연히 발견되었으며 내식성(耐蝕性)을 주요특성으로 하는 고합금강으로서 표면이 미려하고 가공이 용이하여 지붕재나 내·외장재로 주로 사용되고, 의장성이 뛰어날 뿐만 아니라 내력과 내마모성이 우수하며, 일반구조용 강재에 비해 항복 이후 내력상승이나 연신율이 극히 우수하고, 저온충격인성과 고온에서의 항복 강도 및 인장강도가 탁월하여 용도가 매우 다양하고 광범위하다. 이러한 기계적 특성으로 인하여 스테인리스 강재는 건축구조용 강재로 사용하고자 하는 많은 노력이 활발해지고 있다.

특히 일본에서는 1984년에 “스테인리스 구조 건축협회”를 설립하여 건설성 건축연구소와 함께 스테인리스강의 구조용 부재로의 사용을 위한 법제화를 이미 1994년 9월에 「스테인리스 건축 구조물」에 관해서 건설대신의 일반인정을 취득하였고, 현재에도 연구가 계속 진행 중에 있다. 현재 일본에서는 전시장, 아트리움, 온실, 연구소, 공장, 기념타워, 플랫폼 등 다양한 건축물 및 공작물에 건축구조용 부재로 스테인리스 강재를 사용하고 있다.

건축구조용 강재로 사용되고 있는 기둥, 보, 입체트러스 등은 내식성을 목적으로 한 스테인리스강재로 채용되고, 옥외 노출면은 의장설계의 취지에 따라 헤어라인 또는 거울면 마감을 실시하여 외관미의 특징이 강조되는 건축물이나, 입체트러스 구조의 기념물이 많이 건설되고 있다.

국내에서도 스테인리스 강재에 대한 기초적인 연구가 수행 중이나 아직까지는 초기단계에 머물러 있으므로 많은 관심을 가지고 연구를 수행하여 기초적인 자료축적이 이루어져야 하겠다.

dCollection @ chosun

우리나라는 1973년에 처음으로 허용응력설계법에 따른 “강구조 계산규준 및 해설”이 대한건축학회에서 제정되었고, 1997년에는 한계상태설계법에 의한 강구조 한계상태설계기준이 제정되었으며, 2005년 4월에는 그 동안 분리되어 관리, 운영되었던 각종 구조설계기준을 통합한 건축구조설계기준 (Korean Building Code-Structural, KBCS)를 제정하여 모든 건축구조설계의 기준이 되도록 하였다.

그러나 국내 강구조의 허용응력설계법이나 한계상태설계법에서는 스테인리스 강재에 대한 기준을 적용할 수 있는 근거가 전혀 없으므로 건축물의 구조부재로 활용하기 위해서는 국내기준을 제정할 필요가 있다.

최근 스테인리스 강관이 구조재로서의 장점을 가지고 있다는 인식하에 세계적으로 그 사용량이 점차 증가하고 있으나, 국내에서는 구조설계기준이 적용되지 않아 외장재나 창호 또는 내장재 등 마감재로만 사용되어질 뿐 구조용 강재로 사용할 수 없는 실정이다. 따라서 스테인리스강을 구조용 강재로 사용하기 위해서는 스테인리스 강재에 대한 강도, 세장비, 폭(지름)-두께비, 단면형상에 따른 역학적 특성을 파악하는 등 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 냉간 성형된 스테인리스 원형강관의 세장비와 편심비, 곡률형상 등을 변수로 하여 재료실험과 부재실험을 1차적으로 실시하고, 이러한 실험 결과를 통해 보-기둥의 각 변수에 따른 내력 및 거동특성을 파악한다.

냉간성형 강관은 모두 상온에서 성형 가공되며, 제조 후에 열처리가 실시되지 않으므로 재료는 가공경화에 의해서 항복강도의 상승과 변형능력이 저하됨과 아울려 상당히 큰 잔류응력이 생기게 된다.

따라서 재료의 기계적 성질과 소성가공 효과를 명확히 파악하여 설계에 반영해야 하며, 강구조 방식에 있어서 조합력을 받는 부재가 차지하는 비중은 대단히 크므로 보-기둥의 내력과 변형 능력을 여러 변수들을 조합하여 규명하는 것은 강구조물의 안전성 검토 및 경제적인 면에서도 매우 중요하다.

Collection @ chosun

1.1.2 연구목적

본 연구는 스테인리스 원형강관 보-기둥의 각 변수에 따른 내력 및 변형 능력에 미치는 영향을 종합적으로 파악하기 위하여 1차적으로 인장강도실험, stub-column(短柱) 압축강도실험을 통하여 기계적 성질을 조사하고, 기둥과 보-기둥 압축실험 및 휨실험을 실시하여 각 변수에 따른 내력 및 변형 능력에 미치는 영향을 파악함으로서 건축물의 보-기둥부재로서 사용하기 위한 방법을 모색한다.

또한, 보-기둥의 실험결과를 전소성 이론해석을 통한 해석결과와 비교하고, 국내 강구조 기준식인 AIK-LSD[1] (Architectural Institute of Korea-Limit State Design, 대한건축학회 한계상태설계 기준), 미국의 AISC-LRFD[63](American Institute of Steel Construction-Load and Resistance Factor Design, 미국강구조학회 하중-저항계수설계법), 일본의 AIJ-LSD[50] (Architectural Institute of Japan-Limit State Design, 일본건축학회 한계상태설계 기준)와 SIJ-ASD[52](Stainless Steel Institute of Japan-Allowable Stress Design, 일본 스테인리스 건축구조 설계·시공 기준)의 비교를 통해 건축구조용 강재로서 요구 성능 및 적합성 여부를 조사하고, 구조설계기준의 기초 자료를 확립하는데 그 목적이 있다.

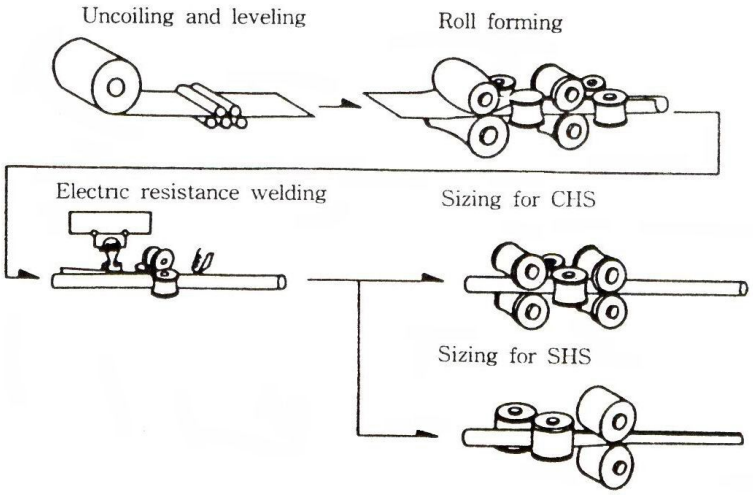
Collection @ chosun

1.2 연구내용 및 방법

1.2.1 연구내용

스테인리스 원형강관 보-기둥실험에서 사용된 스테인리스 강관은 KS D 3536(기계구조용 스테인리스 강관, Stainless steel pipes for machine and structural purposes)에 의해 제조된 오스테나이트(austenite)계 STS 304 TKC를 사용하며, KS 규격값 F_y는 205N/㎟로 규정되어 있으며, 단위무게는 7,746kg/㎥이다.

스테인리스 강관의 제조공정은 [그림 1.1]에 나타낸 바와 같이 일반구조용 강관 제조공정과 같이 제조된다. 다만, 강관용접이 크게 전기저항용접 또는 자동아크용접, 레이저용접, TIG용접[1]으로 구분된다.



[그림 1.1] 스테인리스 강관의 제조과정

본 연구의 스테인리스 강관 보-기둥은 원형강관(CHS, Circle Hollow Section)으로 세장비와 편심비, 곡률형상에 따른 내력 및 변형능력의 효과를 파악한다. 또한 세장비의 변화에 따라 축력만을 받을 때와 휨과 축력을 동시에 받을 때, 휨만을 받을 때의 축력과 모멘트 작용에 따른 거동을 조사하여 응력상태에 대한 내력 및 변형 특성을 파악하고자 한다.

1) TIG용접 : Tungsten Inert Gas의 약어, 이너트가스 아크용접의 일종으로 텅스텐 등 기타 잘 소모되지 않는 금속을 전극으로 하는 아크용접

Collection @ chosun

스테인리스 원형강관 보-기둥부재의 거동 파악에 대한 구체적인 연구내용은 다음과 같다.

(1) 인장실험과 stub-column실험을 통한 재료의 기계적 성질 파악

(2) 중심압축 하중을 받는 스테인리스 원형강관 기둥의 거동 파악

(3) 세장비와 편심비, 재단모멘트 변화에 따른 휨과 축력을 받는 스테인리스 원형강관 보-기둥의 내력 및 변형능력 파악

(4) 휨 실험을 통한 스테인리스 원형강관의 휨 거동 파악

(5) 스테인리스 원형강관 보-기둥의 전소성 이론해석

(6) 각국 기준식(AIK-LSD, AISC-LRFD, AIJ-LSD, SIJ-ASD) 비교

(7) 이론해석에 의한 스테인리스 원형강관 보-기둥의 내력평가

(8) 각국 기준식에 의한 스테인리스 원형강관 보-기둥의 내력평가

(9) 실험데이터에 의한 제안된 좌굴강도계수 평가

(10) 제안식과 각국기준식 비교

Collection @ chosun

1.2.2 연구방법

1.2.2.1 스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험적 연구

(1) 재료실험

① 인장강도실험

재료의 소성가공효과가 재료의 역학적 성질에 미치는 영향을 파악하고, stub-column 압축강도실험결과와 비교하며, 강관 기둥설계의 기준이 되는 항복강도, 인장강도, 연신율 및 탄성계수 등의 기계적 성질을 파악하기 위하여 스테인리스 강재의 인장강도실험을 실시한다.

② Stub-column압축강도실험

Stub-column의 항복강도는 세장비의 영향이 없을 때 전체 기둥거동을 보여주어 기둥거동 비교의 기본이 되므로 stub-column압축강도실험을 실시하며, 항복내력, 최대내력 및 소성가공이나 용접에 따른 잔류응력에 의한 강성(剛性)의 저하와 응력도-변형도 곡선을 파악하기 위하여 실시한다.

(2) 부재실험

강관 기둥의 내력에 미치는 영향은 강재의 강도, 단면형상, 세장비, 폭(지름)-두께비, 편심비 등을 들 수 있다. 구조체를 이루는 거의 모든 부재는 휨모멘트와 축력을 받고 있는데 기둥에 있어서 압축력 이외에 강접(剛接)된 보에서 전달되는 휨모멘트와 바람이나 지진 등 수평하중에 의해 휨모멘트를 받는 보-기둥(beam-column)이 된다.

이에 본 연구는 스테인리스 강관에 대해 중심압축 하중을 받는 기둥, 휨과 축력을 동시에 받는 보-기둥, 휨재에 대한 실험을 실시하며, 시험체의 변수는 다음과 같다.

① 중심압축 하중을 받는 기둥

- 재질 : 스테인리스 강관(STS 304 TKC)
- 단면형상 : 원형강관(CHS, Circular Hollow Section)
- 세장비(L_k/r) : 30, 50, 70
- 지름-두께비 : D/t - 34

Collection @ chosun

② 휨과 축력을 받는 보-기둥

- 재질 : 스테인리스 강관(STS 304 TKC)
- 단면형상 : 원형강관(CHS, Circular Hollow Section)
- 세장비(L_k/r) : 30, 50, 70
- 지름-두께비 : D/t - 34
- 편심거리(e) : 0㎜, 25㎜, 50㎜, 75㎜, 100㎜
- 곡률 : 단일곡률, 이중곡률
- 모멘트 : 대칭모멘트, 비대칭모멘트

③ 휨을 받는 부재

- 재질 : 스테인리스 강관(STS 304 TKC)
- 단면형상 : 원형강관(CHS, Circular Hollow Section)
- 세장비(L_k/r) : 30, 50, 70
- 지름-두께비 : D/t - 34

이상과 같은 변수들을 대상으로 강관 보-기둥 시험체를 제작하여 각 변수들이 내력에 미치는 영향을 파악하고, 내력평가와 각국 기준식과의 비교·검토를 통한 기준식 적용을 검토한다.

1.2.2.2 스테인리스 원형강관 보-기둥의 내력평가

구조물이 파괴되는 몇 가지의 경우를 고려하면 불안정문제, 피로문제 또는 하중으로 인한 지나친 변형문제를 들 수 있을 것이다. 만일 이런 문제들 중 어느 하나도 발생하지 않는다면, 구조물에 계속 하중을 가할 수 있을 것이다. 그러나 지속적으로 하중을 가하면 구조물은 점차 탄성한계를 넘어 소성변형을 거쳐 극한하중에 도달하여 결국 붕괴될 것이다. 대부분 강구조로 된 부정정 구조물은 이 같은 메커니즘(mechanism)에 의해 파괴될 것이다. 이런 붕괴메커니즘이 소성설계법의 기본이라 할 수 있다.

본 연구에서는 전소성 이론에 의한 스테인리스 원형강관의 해석결과로부터 보-기둥의 좌굴내력을 파악하여 실험결과를 평가하고, 기준식과 비교를 통해 합리적인 설계 기초 자료를 제공하고자 한다.

Collection @ chosun

1.3 기존의 연구

강관은 모든 구조용 강재 중에서 동일 압축력에 소요되는 재료가 최소이며, 동시에 비틀림과 모든 방향에 대한 휨 응력에 대해서도 다른 구조용 형강에 비해 월등한 저항성능을 가지고 있다.

이러한 사실은 강관 단면 고유의 기하학적 형상에서 비롯되는 것이며, 국부좌굴(局部挫屈, local buckling)에 대해서도 강관은 다른 압연형강에 비하여 저항성능이 매우 우수하다.

이러한 장점 때문에 초기 엔지니어들에게 널리 사용되어 교량과 기타 구조물에 사용되어오던 강관은 형강의 대량보급으로 인하여, 잠시 그 사용이 줄었으나 용접기술과 제작기술의 발전으로 다시 적극적으로 구조물에 사용되기 시작하였다.

일반구조용 강재의 압축부재에 관한 최초의 좌굴(挫屈)이론은 스위스의 수학자 Euler[74]가 1744년에 발표하였다. 그 후 1770년에 Euler와 Lagrange는 탄성거동의 좌굴 후 변형에 대한 비탄성 처짐 이론을 발표하였으며, 1889년 Considére[84]와 Engesser[73]는 Euler하중은 단지 장주(長柱)에서만 적용된다는 결론을 내렸다.

1895년 Engesser는 기둥의 비탄성좌굴(非彈性挫屈, in-elastic buckling)에 대한 유효계수로서 접선계수(Tangent Modulus)를 도입하여 접선계수이론(Tangent Modulus Theory)을 발표하였으며, 같은 해에 비탄성좌굴의 응력식에서 휨 탄성계수E와 접선계수E_t 사이에 존재하는 계수$\overline{E}$를 제안한 Condidére의 견해를 인정하여 감소계수이론(Reduced Modulus Theory, 이중계수이론, Double Modulus Theory)을 발표하였다[85].

1898년 Ostenfeld는 중심 및 편심하중을 받는 기둥의 설계공식을 유도하였으며, Kármán은 1908년 Engesser이론의 타당성을 실험으로 입증하였다.

그 후 감소계수이론이 비탄성좌굴이론으로 받아들여졌으나, 1947년 Shanley[102]는 실제 좌굴하중이 Engesser의 접선계수 이론값과 감소계수 이론값 사이에 있으나 일반적으로 전자에 더 가깝다는 사실을 알고, 이 문제에 대한 결론을 맺었다.

그러므로 접선계수 이론값은 초기 휨이 없는 강기둥의 좌굴강도의 하한값이고, 감소계수 이론값은 상한값을 나타낸다.

Bleich[69]는 비탄성역에서는 접선계수하중을 적용하는 것이 원칙이나, 실험적으로

Collection @ chosun

접선계수E_t를 구하는데 어려움이 있으므로 기하학적인 2차 곡선을 이용하여 Johnson의 포물선식을 발전시켰다.

1950년대에 Lehigh 대학의 Huber, Beedle[92] 등의 광범위한 연구결과, 잔류응력(殘留應力, residual stress)이 접선계수이론과 실험결과와의 차이를 유발하는 주 요인으로 밝혀지자, 미국의 CRC(Column Research Council, 현재는 SSRC)는 강기둥의 좌굴강도에 가장 큰 영향을 미치는 요인을 제조과정에서 발생하는 잔류응력으로 보고, 1952년에 압연 H형 강기둥을 대상으로 기본강도곡선(basic column curve)을 제안하였으며, 1969년 AISC설계기준식의 근간이 되었다.

Engesser와 거의 같은 시기에 유럽에서는 강기둥의 좌굴강도에 가장 큰 영향을 미치는 요인을 부재의 초기 휨과 하중의 불가피한 편심으로 보고, 1886년에 Aryton과 Perry[67]는 Perry공식을 제안하였으며, 1952년에 설립된 ECCS(European Convention of Constructional Steelworks)를 중심으로 수많은 강기둥의 좌굴실험을 통하여 1976년에 복수강도곡선(複數强度曲線, multiple column curves)을 제안하였다.

1976년에 미국에서도 CRC가 SSRC(Structural Stability Research Council, 미국 구조안정 연구위원회)로 바뀌면서 Bjorhovde[104]의 논문을 기초로 확률론적 방법에 의한 복수강도곡선이 제안되었으며, 그 후 Rondal[100]은 Perry타입 공식의 상수를 바꾸어 복수강도곡선을 단일공식(單一公式)으로 나타내려는 연구를 행하였다.

스테인리스강의 구조부재에 대한 설계방법은 대부분 1968년 AISI(American Iron and Steel Institute, 미국강구조학회) “Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members[64]”를 기초로 하여 만들어 1968년 AISI “Specification for the Design of Light Gage Cold-formed Stainless Steel Members[65]”로 발간하였다.

그러나 이 설계법은 스테인리스강의 특별한 특성으로 인해 특징부분을 수정하였다. 이런 특징들은 일반 냉간성형 탄소강과 차이가 있는 스테인리스강의 응력-변형도 곡선에서 볼 수 있으며, 스테인리스강의 인장과 압축응력에도 차이가 있다는 것이었다.

1968년 스테인리스강의 specification에 대한 수정본은 1974년에 발간되었다. 그 후 1986년에 AISI는 냉간성형 탄소강재에 대한 specification의 중요한 수정을 제안했다. 그것은 1974년 “Cold-formed Structural Stainless Steel Design Manual″에 대한 개정

Collection @ chosun

을 요구한 것이었다.

이러한 요구에 대해 1988년 미국의 Missouri-Rolla 대학의 Lin, Yu, Galambos[105, 106]에 의해 냉간 성형된 스테인리스강 구조 부재 설계에 대한 연구가 이루어졌으며, 1990년 ASCE(American Society of Civil Engineers, 미국토목학회)에 의해 개정 발간되었고, 개정된 specification은 한계상태설계이며, 이는 부록으로 출판되어졌다.

또한 1990년 Rasmussen과 Hancock[95, 96]은 Lin, Yu, Galambos의 연구를 기초로 스테인리스 강관 구조부재의 허용응력설계법을 제안하였고, 1993년 스테인리스 각형과 원형강관 기둥에 대한 설계방법과 각형강관 보의 설계방법을 제안하였다[97, 98].

한편, 일본은 1984년 “스테인리스구조 건축협회”를 설립하여 스테인리스강에 대한 연구를 시작했고, 1993년 10월 신스테인리스강 이용지침[53]을 마련했으며, 건축구조용 부재로 사용을 위한 규준인 “스테인리스 건축구조 설계시공기준·동해설”을 1995년 5월 제정하였다[52, 62].

국내에서 1989년 스테인리스 강재에 대한 최초의 연구로서 이명재[27, 28]에 의해 스테인리스강의 기계적성질과 좌굴내력, H형 단면보의 횡좌굴에 대한 연구가 이루어졌고, 2000년 이후 양영성[21, 22, 23, 24, 25], 장호주[32,33]에 의해 스테인리스 강관 기둥의 내력에 대한 연구와 장인화[30]의 스테인리스 304강재의 국부좌굴에 대한 연구, 이명재[29]의 스테인리스 각형강관 기둥의 최대내력에 대한 연구가 이루어졌다.

그러나 국내의 스테인리스강에 대한 연구는 현재까지 기초적인 연구에 불과하다.

Collection @ chosun

1.4 스테인리스강

스테인리스강은 철(Fe)에 보통 12%이상의 크롬(Cr)을 넣어서 녹이 잘 슬지 않도록 만들어진 강(鋼)으로 탄소(C), 니켈(Ni), 규소(Si), 망간(Mn), 몰리브덴(Mo) 등을 소량 포함하고 있는 합금강이다.

스테인리스강은 성분에 따라 크롬계와 크롬-니켈계로 구분되나, 최초로 실용화된 것은 12~13Cr강(1912년 칼날용)이고, 뒤이어 10년 후에 18Cr-8Ni강이 시장에 출현하였다. 이 강은 오스테나이트(austenite)의 조직을 가지며 내식성(耐蝕性), 가공성, 용접성 등이 우수하므로 현재 판, 코일, 관, 선 등의 형태로 가장 폭넓게 사용되고 있다.

스테인리스강은 철이 주성분이면서도 보통강이 갖고 있지 않은 여러 특성을 갖고 있는데, 표면이 미려하고 녹이 잘 발생하지 않으며, 높은 연성(延性), 고내열성(高耐熱性) 및 내충격성(耐衝擊性)이 강하며 크롬 및 니켈성분에 따라 기계적 특성 및 열처리 특성이 매우 달리 나타날 뿐만 아니라 녹이 스는 정도도 큰 차이를 보인다.

또한 함유된 성분 또는 성질을 기준으로 스테인리스강은 몇 가지 계통으로 분류된다. 같은 계통에 속하는 스테인리스강들은 서로 유사한 특징을 보이지만 자체가 녹이 슬지 않는 것이 아니라 그 표면에 생기는 산화피막이 안정되어 산화(녹)현상을 방지하는 작용을 하게 되는 것이다.

산화피막이 철과 크롬의 복합물인 $FeO \cdot Cr_2O_3$ 혹은 $(Fe, Ni)CrO_4$의 형태로 나타나며 이 피막은 소지(所持)금속과 밀착력이 강하고 또한 두께가 얇아(통상 10~30Å : 1Å (angstrom=10^{-6}μ) 육안으로 식별이 불가능하며, 이로 인해 표면이 우수한 내식성을 갖게 되는 것이다.

최근 정련기술의 발달로 극저탄소 페라이트(ferrite)강, 질소 첨가강 등 신강종이 개발되고 있으며, 현재까지 규격 상으로는 오스테나이트(austenite) 31종, 페라이트계 13종, 마르텐사이트계(martensite) 14종, 석출[2]경화계(析出硬化) 3종, 이상[3]계(二相, duplex) 2종 등 총 63종이 양산되고 있는데, 일본의 경우 약 2천여 종이 등록되어 있다.

---

2) 석출(析出) : 용액에서 고체를 분리해 내거나 화합물을 분석해서 그것을 구성하고 있는 물질을 분리해 냄
3) 이상(二相) : 서로 다른 2상 조직을 이루어져 단상강의 결점을 보완한 강

Collection @ chosun

1.4.1 스테인리스 강종 표기

(1) 주 표기법

<표 1.1> 스테인리스 강종명 주 표기법

규 격	약 어	풀 이	예
한국(KS)규격	STS	Steel Type Stainless	STS 304
일본(JIS)규격	SUS	Steel Use Stainless	SUS 304
국제 규격	**Type xxx SS**	**Type xxx Stainless Steel**	**(Type) 304 SS**

(2) 후기 표기법

<표 1.2> 스테인리스 강종명 후기 표기법

후 기	의 미	비 고
L	Low Carbon (max 0.03%) 추가	'L'없는 경우는 max 0.08%임 / 300계 SS 입계부식(粒界腐蝕[4]) 등의 내식성과 용접성 향상
S	Low Carbon (max 0.08%) 추가	'S'없는 경우는 max 0.15%임 / 400계 SS 내식성, 용접성 향상
ELC	Extra Low Carbon (max 0.015%)추가	입계부식 등의 내식성과 용접성 극히 향상, 강도 손실 가능. 주로 용접봉에 사용. 일본 압연 강재 생산
ULC	Ultra Extra Low Carbon (max 0.007%) 추가	입계부식 등의 내식성과 용접성 극히 향상, 강도 손실 가능. 주로 용접봉에 사용. 일본 압연 강재 생산
N(Nitrogen)	0.10%~0.16% N 추가	'N'없는 경우는 max 0.10%임. Mo와 동시 존재시 내식성 크게 향상
H	0.04%~0.10% Carbon 추가	High Carbon을 의미함. 고온에서 내식성 보다 내(耐)Creep 성을 요구하는 곳에 유효함. 구매시 Grain Size: ASTM No. 5 and Coarse(거칠기) 명기요
Cb (Columbium)	10(C)%min~1.10max 추가	고온 안정화원소(Cb:Columbium or Nb:Niobium) 첨가강. 내입계부식저항성향상.
Ti(Titanium)	5(C+N)%min ~0.70%max 추가	고온 안정화원소(Ti:Titanium) 첨가강. 내입계 부식 저항성 향상. C의 고용도가 Nb(Niobium)보다 크므로 적은 양으로도 가능.
Mo (Molybdenum)	2.0~3.0%Mo 추가	질산 등의 산화성 산을 제외한 분위기에서 내식성 향상.
Se(Selenium)	0.15%Se 추가	기계 가공면 향상
LMN(MoLN)	Low Carbon, Mo & N 첨가	고온 내황산, 내산화 Scaling성 향상
F(Fluorine)	강종별 Sulfur(유황) 증가 (0.06%~0.15%)	기계절삭가공성 향상
J(Japan)	일본의 독자 강종	-
XM	ASTM규격에서의 특허강종	-

4) 粒界腐蝕 : 결정립 간을 관통하여, 또는 결정립 내부를 지나서 부식이 진행되어, 외관적 부식과 같이 육안으로 판정이 어려운 것도 재료적으로는 파괴 구역에 달한 것을 말한다.

Collection @ chosun

강종 기호는 스테인리스 강재의 경우 약어(예:STS)에 이어서 3자리 숫자가 있다. 이 숫자는 국제적으로 널리 사용되고 있는 AISI(American Iron and Steel Institute)에서 사용되고 있는 타입3자리 숫자에 준하고 있다.

- 200번대 : 크롬·니켈·망간계
- 300번대 : 크롬·니켈계
- 400번대 : 크롬계
- 600번대 : 고온 고강도 합금계

3자리 숫자의 처음 숫자는 강종(鋼種)의 대분류를 나타내고 있고, 다음 두 자리 숫자에 대해서는 특히 정해진 규칙은 없지만, 보통 304는 18Cr-8Ni, 430은 18Cr과 같다.

1.4.2 스테인리스강의 분류

<표 1.3>은 대표적인 스테인리스 강종에 의한 분류이다.

<표 1.3> 대표적인 스테인리스 강종에 의한 분류

분류	강종	대표조성	성질 및 용도
오스테나이트계 스테인리스강	STS 301	17Cr-7Ni	Ni이 STS 304보다 낮아 마르텐사이트화가 쉽게 되는 강종. 냉간가공에 의해 인장강도, 경도가 높아짐. 차량 패널, 각종 스프링재, 구조부품, 수송설비
	STS 301L	17Cr-7Ni-Low C	STS 301 보다 저탄소강으로 내입계 부식성, 용접성이 양호. 철도차량용 소재, 압판(press plate), 각종 스프링재
	STS 304	18Cr-8Ni	가장 널리 사용되는 강종. 식품, 일반화학, 원자력설비, 가정용기구 등
	STS 304L	18Cr-9Ni-Low C	STS 304의 저탄소강. 내입계 부식성이 우수하고 용접 후 열처리할 수 없는 부품류
	STS 304J1	17Cr-7Ni-2Cu	STS 304보다 Cr, Ni을 낮추고 Cu(copper)를 첨가. 냉간성형시 특히 deep drawing성을 개선. 싱크대, 보온병, pot 등
	STS 304N1	18Cr-8Ni-N	STS 304에 N을 첨가하여 연성의 저하를 억제하면서 강도를 높여 사용재료의 두께 감소 효과. 주로 구조용 강재로 사용
	STS 305	18Cr-13Ni-0.1C	STS 304에 비하여 가공경화성이 낮음. 특수 인발, 냉간압조용
	STS 316	18Cr-12Ni-2.5Mo	각종 산에 STS 304보다 우수한 내식성이 있고 주로 내공식(耐孔蝕:pitting)재료로 사용
	STS 316L	18Cr-12Ni-2.5Mo-Low C	STS 316의 성질에 내입계 부식성을 부여한 것
	STS 321	18Cr-9Ni-Ti	Ti를 첨가하여 내입계부식성을 높게 한 재질

Collection @ chosun

<표 1.3> 계속

분류	강종	대표조성	성질 및 용도
페라이트계 스테인리스강	STR 409L	11Cr-2Mo-Low-C	저탄소, Ti 함유강으로 내산화성, 내열성, 가공성 우수. 자동차 가스 처리 부품, 각종 열교환기, 농업축산기기용
	STS 430	18Cr	내식성이 우수한 범용 강종. 건축내장재, 가정용 기구, Oil Burner 부품, 가전부품용
	STS 430J1L	18Cr-Cu, Nb-Low C	STS 430에 Cu, Nb를 첨가하여 내식성, 성형성, 용접성을 개선. 자동차외장재, 배기가스처리부품, 세탁조용
	STS 430LX	18Cr-Ti, Nb-Low C	STS 430에 Ti 또는 Nb를 첨가하여 성형성, 가공성 개선. 자동차외장재(moulding), 가전제품, 온수탱크,건자재용
	STS 434	18Cr-1Mo	STS 430의 개량강종으로 430보다 염분에 강함. 자동차외장재
	STS 436L	18Cr-1Mo-Ti, Nb-Low C	STS 434에서 C, N을 낮추고 Ti, Nb, Zr(Zirconium)을 단독 또는 복합으로 첨가시켜 가공성과 용접성을 개량한 강종. 건축내외장재, 자동차 Muffler, 배기관등 차량부품
	STS 444	19Cr-2Mo-Ti, Nb Zr-Ultra Low C, N	STS 436L보다 Mo를 많게 하고, 내식성을 높임. 저수조, 태양열온수기, 열교환기, 식품기기, 염색기기용 내응력 부식 균열용
마르텐사이트계 스테인리스강	STS 410	13Cr	양호한 내식성, 기계가공성이 있음. 일반용도, 나이프 소재용
	STS 420J1	13Cr-0.2C	STS 410보다 내식성이 양호. turbine blade 용
	STS 420J2	13Cr-0.3C	STS 420J보다 경도가 높은 강종. 나이프류, nozzle, valve류 등

스테인리스강은 성분에 따라 Cr계와 Cr-Ni계로 구분되지만, 금속조직상으로는 페라이트계, 오스테나이트계, 마르텐사이트계, 이상계, 석출경화계 등으로 나누어지며, 이밖에도 스테인리스강을 사용기능성에 따라서 나눌 수 있다.

<표 1.4> 주성분에 의한 스테인리스강의 분류

주성분에 의한 분류					금속조직상으로 본 분류
구분	명칭	대표적인 강종	구 강종	조성	
크롬계 스테인리스강	13Cr계	STS 410	51종	13%Cr	마르텐사이트계
	18Cr계	STS 430	24종	18%Cr	페라이트계
크롬-니켈계 스테인리스강	18Cr-8Ni계	STS 304 STS 316	27종 32종	18%Cr-8%Ni 18%Cr-8%Ni-2.5%Mo	오스테나이트계
	16Cr-7Ni-1Al계	STS 631	-	16%Cr-7%Ni-1%Al	석출경화형

Collection @ chosun

<표 1.5> 대표적인 스테인리스강의 특성 비교

특성 \ 강종	STS 410 (13Cr계)	STS 430 (18Cr계)	STS 304 STS 316 (18-8계)	STS 631 (16Cr-7-1Al계)
자성(磁性)	있음	있음	없음 (단, 냉간가공 후 다소 자성이 있음)	없음 (단, 열처리경화 후 자성이 있음)
녹발생 여부	발생하는 경우가 있음	옥내에서는 녹 발생이 거의 없으나 옥외 사용 시 다소 문제가 있음	뛰어난 내식성을 가지고 있음	18-8계와 거의 동일
충격, 신장(伸長)	18-8계에 비해 떨어짐	18-8계에 비해 떨어짐	극히 양호하며 성형성이 풍부함	열처리경화 후 높은 경도와 강도를 갖는다.
열팽창	보통강과 거의 동일	보통강과 거의 동일	보통강의 약 1.5배	보통강과 거의 동일
열전도도	보통강의 1/2배	보통강의 1/2배	보통강의 약 1/3배	보통강의 약 1/3배
열처리 경화성	있음	없음	없음	있음

1.4.3 주성분에 의한 분류 및 특성

(1) 크롬(Cr) 스테인리스강

크롬스테인리스강은 18Cr과 13Cr 등이 있으며, 결정구조가 18Cr 스테인리스강은 체심입방격자[5](體心立方格子, Body Centered Cubic lattice)로 페라이트 조직을 갖고 있으며 13Cr 스테인리스강은 체심입방격자이나 마르텐사이트 조직을 갖고 있다. 두 가지 모두 자성을 갖고 있으며 특히 마르텐사이트가 자성이 강하다.

크롬스테인리스강은 온도범위와 시간에 따라 재질의 연성이 떨어져 부스러지듯이 파단 되는 여러 취성현상이 일어난다. 따라서 크롬스테인리스강의 사용은 상온에서 350℃까지가 적당하다.

1) 475℃취성(脆性)

크롬함량이 15%이상인 크롬스테인리스강은 400~500℃에서 장시간 가열하면 취성이 나타나는데, 특히 475℃에서 유지시킨 경우 이러한 취성현상이 가장 심하게 나타나며,

5) 체심입방격자(體心立方格子) : 입방체의 8개의 구석에 각1개씩의 원자와 입방체의 중심에 1개의 원자가 있는 것을 단위포로 하는 결정격자이며, 실제의 결정에서 가장 많이 볼 수 있는 구조의 하나이다.

Collection @ chosun

강도 및 경도는 증가하고, 연신율과 충격치가 감소하게 되고, 내식성이 저하된다.

그러나 이것을 700~800℃로 재가열하여 급랭시키면 회복된다. 475℃취성은 비교적 얇은 판재에는 문제가 없으나, 대형물에는 냉각속도가 느리기 때문에 이러한 영향을 받기 쉽다.

2) 시그마(sigma)상 취성(σ phase 취성)

시그마상은 Fe-Cr의 화합물로써 크롬스테인리스강을 600℃전후에서 장시간 가열하면 이 화합물이 금속조직의 입계에 나타나게 되며 상온에서 쉽게 부스러지게 된다.

이 화합물이 나타나는 속도는 475℃ 취성에 비해 대단히 느리기 때문에 실용 강종에는 별문제가 되지 않으며, 취화된 것은 800℃전후에서 재가열한 후 급랭시키면 회복된다.

3) 고온취성(高溫脆性)

950℃이상의 고온으로 가열시키면 결정립이 커져 상온에서 부서지기 쉽게 되나, 800℃전후에서 급랭(急冷)시키면 그 영향은 대부분 제거되지만, 완전히 제거하기 위해서는 상당한 냉간가공을 한 후 800℃전후에서 열처리해야 한다.

이 취성의 가장 문제가 되는 것은 스테인리스강 주물(鑄物)이며, 주물제품은 고온취성이 필연적이기 때문에 가급적 고온에서 급랭할 필요가 있다.

4) 저온취성(低溫脆性)

일반강과 마찬가지로 상온(常溫)에서 연신율이 감소하는 현상으로 크롬함량이 많을수록 연성-취성 천이온도(遷移溫度)가 고온 쪽으로 이동하게 되며, 표면에 긁힌 흠(scratch)에서 균열이 발생하기 쉽다.

크롬스테인리스강을 가공할 경우 천이온도 이상에서 가공하는 것이 필요하며, 18Cr강의 경우 가공 전에 약간 가열한 후 가공하는 것이 좋다.

(2) 크롬-니켈(Cr-Ni) 스테인리스강

Cr-Ni 스테인리스강은 18-8스테인리스강이 대표적이며, 오스테나이트 조직으로 결정격자(結晶格子)가 면심입방격자[6](面心立方格子, face centered cubic lattice)이고 자성

6) 면심입방격자(面心立方格子) : 정입방체의 8개의 모서리와 6면의 중심에 각각 하나씩 원자가 배열된 공간격자

Collection @ chosun

이 없다. 18-8스테인리스강은 오스테나이트강이라고도 부른다.

Cr-Ni스테인리스강은 기계적 성질과 내식성 저하를 방지하기 위해 950~1,100℃까지 가열한 후 급랭시키는 고용화열처리[7](固溶化熱處理), solution heat treatment)를 통해 안정한 오스테나이트조직을 유지시킨다. 그러나 가공상 또는 사용상 문제를 일으킬 수 있는 여지가 있다.

1) 페라이트(ferrite) 생성

18-8스테인리스강은 8%정도의 니켈량으로는 완전한 오스테나이트조직이 되지 않으며, 약간만 가공해도 자성(磁性)이 나타나는 준안정화 오스테나이트로 된다.

준안정화 오스테나이트조직을 가진 STS 301, STS 302, STS 304 등은 1,100℃이상의 온도에서 페라이트조직이 나타나며, 페라이트조직이 발생되면 열간 및 냉간가공시 균열이 발생되기 쉽다.

오스테나이트 중에 소량 페라이트가 존재하면 가공성은 저해되지만, 내식성에는 거의 영향을 받지 않게 된다. 그러나 페라이트가 450~870℃범위로 가열되면 시그마상이나 석출물이 나타나 내식성과 기계적 성질을 저해한다.

2) σ상 생성

18-8스테인리스강은 오스테나이트와 페라이트 이외에 제 3의 상이 나타나는데, 이러한 상을 시그마(σ)라고 하며, 대단히 가볍고 취약한 비자성의 성질을 가지고 있고, Fe-Cr 화합물로써 크롬을 약 45% 갖고 있다.

시그마상이 형성되는 온도는 600~840℃이며 페라이트가 많으면 석출되기 쉽고, 강도가 증가하고, 인성(靭性)이 감소하며, 내식성에 악영향을 준다.

3) 크롬-카바이드 석출(析出)

450~870℃온도로 장시간 유지하면 성분 중에 탄소와 크롬이 결합하여 크롬-카바이드(크롬탄화물)가 석출된다.

특히 입계 부근의 내식성이 감소하는데, 크롬탄화물 생성을 방지하기 위해서는 탄소량을 극소로 하는 것과 티타늄(Ti), 니오븀(Nb)등을 첨가하는 방법이 있으며, 이러한 강종으로는 STS 304L, STS 321, STS 347 등이 있다.

---

7) 고용화열처리(固溶化熱處理) : 강을 용융온도 이상까지 가열한 후 급랭하여 고용체의 조직 상태를 그대로 상온까지 지속시키는 처리

Collection @ chosun

4) 냉간가공경화성

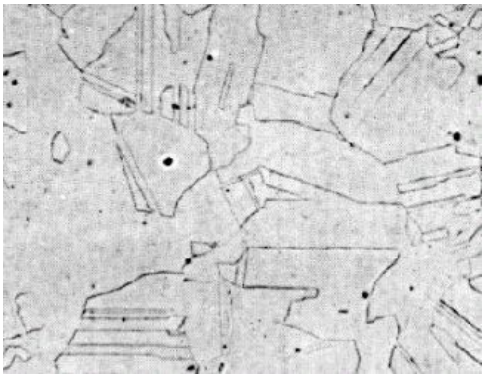
18-8스테인리스강은 18Cr 스테인리스강에 비해 상온에서 가공할 경우 가공경화도가 높아 쉽게 경화된다.

가공 경화도를 낮추기 위해서는 탄소의 함량을 적게 하고, 오스테나이트조직을 안정화시키기 위해 니켈이나 합금성분을 첨가시키며, 냉간가공경화를 받은 스테인리스강은 내부응력을 제거하고 부분적으로 발생한 마르텐사이트 조직을 오스테나이트조직으로 변태[8](變態)시키기 위해 950~1,100℃에서 가열시켜 급랭(急冷)하는 것이 바람직하다.

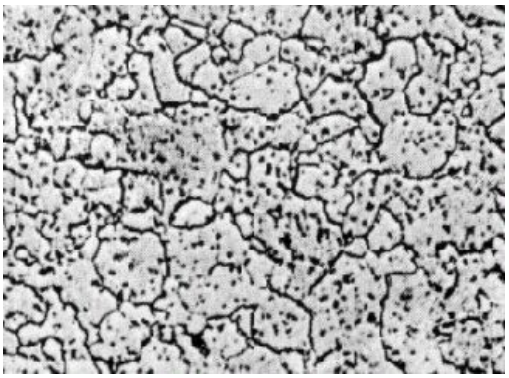
1.4.4 금속조직상의 분류 및 특성

(1) 오스테나이트(austenite)계 스테인리스강

결정구조가 면심입방이며 열처리에 의해 경화되지 않고 가공에 의해 경화되며, 대표강종으로는 STS 304 강종으로 18Cr-8Ni이 기본조성이다. 상온과 고온에서 안정한 금속조직이기 때문에 열간압연 중에 변태현상(變態現狀)을 일으키지 않으며 비자성이다.



[그림 1.2] 오스테나이트(austenite) 조직



[그림 1.3] 페라이트(ferrite) 조직

그러나 304강종은 용강으로부터 고상(固相)으로 응고할 때 δ-페라이트[9]가 우선 석출되며, 온도에 따라 오스테나이트상이 안정한 상으로 되기 때문에 상온에서 완전한 오스테나이트조직이 존재해야 하나, 화학성분에 따라 주편(周偏) 내에 δ-페라이트가 5~

8) 변태(變態) : 온도를 상승 또는 하강시킴으로서 공간격자가 다른 공간격자로 변화하는 현상. 변태가 일어 나는 온도를 변태점이라 한다. 변태는 공간격자의 변화이므로, 이에 따라서 금속의 물리적, 기계적, 화학적 성질이 많이 변동되는 것이 상례이다.

9) δ-페라이트 : 페라이트 속에 δ철이 탄소 등을 고용함으로서 생기는 고용체. δ고용체는 침입형에 속하는 고용체이다.

Collection @ chosun

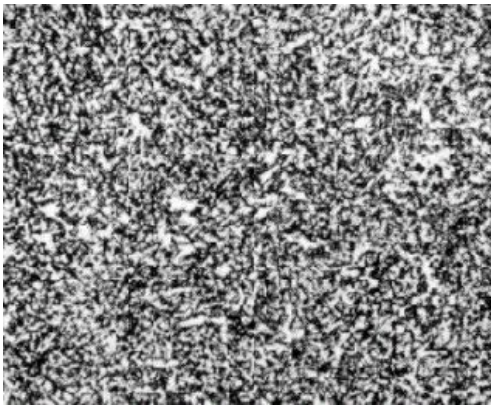
12%정도 잔류하게 되어 열간가공성을 해칠 수 있으며 가공 후 약간의 자성을 가질 수 있다.

오스테나이트상을 안정하게 유지하기 위해서는 17% 크롬의 경우 7%의 니켈이 필요하고, 26% 크롬의 경우 20%의 니켈이 필요하다. 침입형 오스테나이트 안정화원소인 탄소함량을 낮춘 강종을 L등급 오스테나이트 스테인리스강이라고 한다.

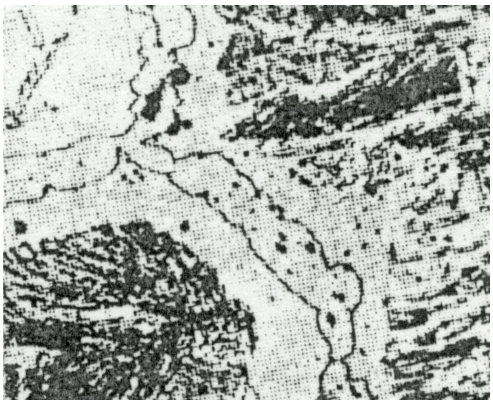
(2) 페라이트(ferrite)계 스테인리스강

체심입방구조로 오스테나이트계 스테인리스강보다 내식성이 떨어지지만, 내응력부식(耐應力腐蝕) 균열성이 우수하다. 또한 상온에서 강자성(强磁性)이며 열처리에 의해 경화되지 않고 냉간가공성이 우수하다.

크롬함량은 14.5~27%범위이고 탄소함량은 마르텐사이트계보다 적다. 용접성이 나쁘기 때문에 제한이 있으며, 일반적으로 건축소재, 싱크대, 가정용 기구 및 건축테두리에 사용되며, 후물(厚物)형태로는 liner(선재), deck plate(덱크판), spill ways(방수로), chain conveyors(체인 기계장비), dust frame extractor(먼지 방출구) 등에 쓰인다. 박물(薄物)형태로 널리 사용되고, 시트나 코일(coil)형태로 제조되며, 후판(厚板)이나 용접형태로는 거의 제조되지 않는다.



[그림 1.4] 마르텐사이트(martensite) 조직



[그림 1.5] 이상(二相) 조직

(3) 마르텐사이트(martensite)계 스테인리스강

상온에서 강자성을 보이며 일반적으로 내식성이 떨어지나, 강도가 우수하고, 고강도 구조용강으로 사용된다. 고온에서는 안정한 오스테나이트 조직을 보유하며, 공랭(空冷) 또는 유냉(油冷)에 의해 마르텐사이트 변태를 일으켜 상온에서 완전한 마르텐사이트

Collection @ chosun

조직을 갖는다.

비교적 높은 탄소량과 12~18%의 크롬을 함유하고, 중간 정도의 내부식성을 갖고 있으며, 열처리에 의해 경화됨으로 상당수준의 고강도를 얻을 수 있으나, 고탄소를 함유하고 있어 용접성이 나쁘다.

강도(强度)와 경도(硬度)가 동시에 요구되는 칼날, 수술용 기구, 패스너(fastener), 스핀들(spindle), 노즐(nozzle), 샤프트(shaft) 및 스프링(spring) 등에 사용되며, 일반적으로 봉재(棒材)나 판재(板材)로도 사용이 가능하다.

(4) 이상(二相, duplex)계 스테인리스강

상온에서 오스테나이트계와 페라이트계의 혼합조직으로 강도가 우수하고, 결정립이 미세화 되며, 응력부식 균열에 대한 저항성이 줄어든다. 통상 20~25%의 크롬과 4~7%의 니켈을 함유하고 있다.

(5) 석출경화(析出硬化)계 스테인리스강

대표적인 조성으로 17%Cr-4%Cu, 17%Ni-1.2%Al 등이 있으며, 열처리시효(熱處理時效)에 의해 니켈(Ni)과 동(Cu), 알루미늄(Al), 티타늄(Ti), 니오븀(Nb) 등의 금속간화합물을 석출시켜 강도를 향상시킨다.

1.4.5 스테인리스강의 특징

(1) 내식성(耐蝕性)이 우수하다.

일반강의 최대 결점인 부식되기 쉬운 점을 해결한 것으로 일반강에 비해 수천배 이상 내식성이 있어 내식성을 필요로 하는 용도에 적합하다. 예) 수조, 기초철골

(2) 강도가 크다.

다른 금속에 비해 인장력(引張力)이 매우 크며, 박판(薄板)으로 가공할 수 있어 경제적이다. 일례로 18-8계 스테인리스의 인장강도는 550~650N/㎟로 일반강의 350~450N/㎟, 황동의 280~350N/㎟, 알루미늄합금의 150~250N/㎟ 등 보다 크다.

(3) 연성이 크다.

스테인리스강은 보통강에 비하여 항복내력 이후의 내력상승(耐力上昇)이나 신장(伸

Collection @ chosun

長)성능이 극히 우수하다. 예로 탄소강 STK 400의 경우 연신율이 28%정도인데 반해, 18-8계 스테인리스의 경우 60%정도로 월등히 우수함을 알 수 있다.

(4) 표면이 미려하며 표면가공이 다양하다.

표면이 아름다우며 청결하여 안정된 분위기를 느끼게 하며 표면처리가공은 거울면 상태로부터 무광택(無光澤), 헤어라인(hair line), 에칭(etching), 엠보싱(embossing), 화학착색 등 다양한 표면가공이 가능하다.

(5) 내마모성(耐摩耗性)이 뛰어나다.

스테인리스강은 장시간 사용해도 마모가 매우 적은 기계적 성질을 갖고 있기 때문에 마모되기 쉬운 건축물의 외장, 문손잡이, 창호 등에 적합한 재료이다.

(6) 내화성(耐火性) 및 내열성(耐熱性)이 크다.

1) 용융온도

스테인리스강의 용융온도는 18크롬강의 경우 1,427~1,510℃, 18-8계의 경우 1,400~1,454℃이므로 고온에서 견딜 수 있다. 따라서 화재가 발생해도 내화성(耐火性)을 충분히 발휘할 수 있다.

2) 내산화성(耐酸化性)

스테인리스강은 800~850℃까지는 거의 산화되지 않기 때문에 화재가 발생하거나 오염물질이 묻은 경우에도 재연마하는 정도로 본연의 광택을 찾을 수 있다.

3) 고온강도

고온에서도 강도가 높아 일반강과는 달리 500℃를 넘어서도 휘어지는 일이 없다.

(7) 가공성(加工性)이 뛰어나다

절단, 구부림, 프레스(press) 등 가공이 용이하고, 각종 접합도 용이하게 할 수 있다.

(8) 경제적이다.

스테인리스강은 내식성(耐蝕性)과 광택 있는 미관을 유지함으로 도장이 필요 없다. 또한 내식성이 우수하므로 다른 금속에 비해 수명이 길다. 따라서 스테인리스강은 설

Collection @ chosun

치할 당시는 비용이 비싸지만, 장기적으로는 보수비용이 거의 발생하지 않기 때문에 오히려 경제적이다.

(9) 유지비가 적다.

스테인리스강은 유리청소와 마찬가지로 매우 간단히 청소할 수 있기 때문에 건축구조물의 청소비가 적게 들어간다.

이와 같이 스테인리스강은 우수한 특성으로 인해 광범위한 용도로 사용되는데, 크게 대별해 보면 화학공업, 식품공업 등의 플랜트(plant)설비에서 내식을 필요로 하는 건축, 차량 등의 내후성(耐候性)을 필요로 하는 곳에 사용된다.

1.4.6 스테인리스강의 제조공정

스테인리스강 제조공정은 고철, 체로크롬(Chero Cr), 페로니켈(Ferro Ni) 등을 원료로 전기로에서 용선하고 아르곤희석탈탄법(AOD, Argon Oxygen Decarburization) 또는 진공탈탄법(VOD, Vacuum Oxygen Decarburization)으로 제강한 후, 열간압연을 거쳐 고용화열처리 및 산세공정[10](酸洗工程), 센지미어밀[11](Z-Mill)로 압연하여 생산한다.

(1) 제강공정

제강공정은 제품의 품질과 제조 원가에 가장 큰 영향을 미치는 공정으로 전기로, AOD·VOD 정련로, 연속주조설비 등으로 구성된다.

(2) 열간압연공정

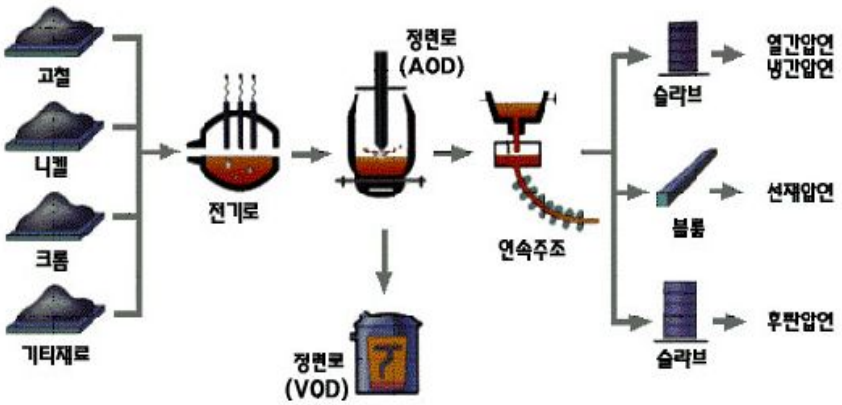
제강공장에서 제조된 슬래브는 열연공장에서 고정된 두께 및 형상의 블랙코일(black coil)로 압연된 후, 소둔, 산세(酸洗)공정을 거쳐 고객의 요구에 알맞은 화이트 코일(white coil)로 생산되어 냉연소재(冷然素材) 및 파이프, 절판(折板)용으로 공급된다.

---

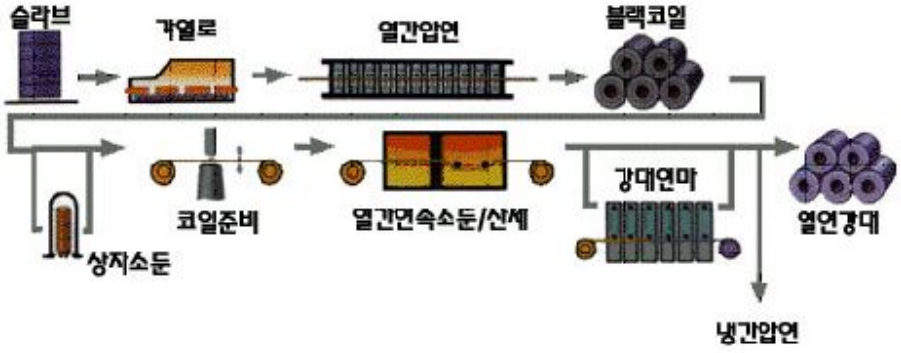
10) 산세공정(酸洗工程) : 중요한 주철품, 단조품, 압연품의 흑피(黑皮)면에 대한 모상균열(毛狀龜裂, 실균열, hair crack)을 발견하기 위해서 산액에 침지한 후에 세정(洗淨)하는 조작공정을 산세공정이라고 한다.

11) 센지미어 밀(Sendzimir mill) : Tadeusz Sendzimir의 발명에 의한 압연기로 열간용 및 냉간용이 있는데, 보통은 냉간용을 가리킨다. 견고한 일체형 단조제 하우징 안에 직경이 매우 작은 워크롤과 이를 둘러싸듯이 보강하는 다단롤의 조합으로 이루어져 있다.

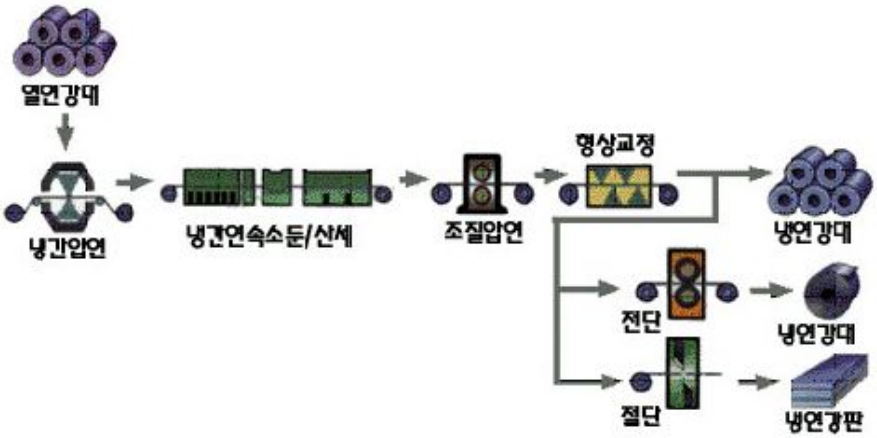
Collection @ chosun



[그림 1.6] 제강공정



[그림 1.7] 열간압연공정



[그림 1.8] 냉간압연공정

Collection @ chosun

(3) 냉간압연공정

크러스트(crust) 압연기와 광휘소둔[12](光輝燒鈍)설비, 평탄도 조정설비, 형상조정설비, 두께 조정설비 등을 거쳐 두께 0.1~3.0㎜, 최대폭 1580㎜의 제품과 다양하게 표면 처리된 제품을 생산한다.

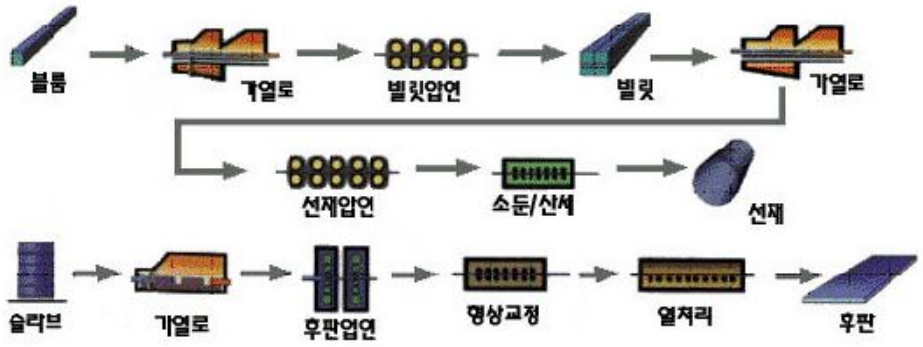
(4) 선재(線材)압연 및 후판(厚板)압연공정

1) 선재(線材)공정

제강공정에서 제조된 블룸(bloom)은 빌레트(billet)로 압연한 후 다양한 크기의 블랙 코일 선재로 제조하여 적정한 열처리 및 산세 처리를 거쳐 고객에게 공급된다.

2) 후판(厚板)공정

제강공정에서 나온 슬래브를 압연한 후 열처리, 산세(酸洗) 및 최종 주문사이즈로 전단하여 고객에게 공급된다. 후판제품은 내식성이 요구되는 석유화학, 발전설비, 제지, 섬유, 특수조선 등 중화학 산업설비의 소재로 사용된다.



[그림 1.9] 선재(線材)압연 및 후판(厚板)압연공정

1.4.7 스테인리스강의 부식(腐蝕)

(1) 스테인리스강의 부식형태

부식의 형태는 외관상으로 나타나는 형상에 의해 분류되는데, 스테인리스강에서 관찰되는 부식은 주로 다음과 같은 형태로 많이 발생한다.

12) 광휘소둔(光輝燒鈍) : 강 표면의 산화 탈탄을 방지하고 금속광택을 잃지 않게 하기 위해 중성 가스 또는 진공 속에서 하는 풀림. 주로 얇은 판 또는 다듬질이 끝난 제품의 풀림에서 응용한다.

Collection @ chosun

1) 전면부식(全面腐蝕, General corrosion)

재료의 표면 전체가 균일하게 부식되는 현상으로 산용액에 의한 재료 용해나 고온산화가 이 범주에 속한다.

스테인리스강은 질산과 같은 산화성 산에 대해 전면부식이 잘 일어나지 않는 반면, 묽은 황산과 같은 비산화성 산에 대해서는 일부 강종(마르텐사이트계, 페라이트계)에서 전면부식 현상이 현저하게 발생한다.

2) 틈부식(Crevice corrosion)

물, 부식성 용액 등과 같은 수용액 형태의 전해액(電解液)에 금속이 노출되었을 때, 어떤 틈 또는 재료들 간의 겹쳐진 부분에서 국부적으로 심한 부식이 발생하는 현상을 틈부식 또는 간극부식(間隙腐蝕)이라 한다.

틈부식의 원리는 전해액과 접촉하고 있는 틈 바깥 부분과 틈 안쪽 깊숙한 위치에서의 산소 이동 차이가 발생하여 농담전지(濃淡電池, concentration cell)를 형성하는 것과 관련되어 있다. 틈 바깥과 안쪽사이에 산소농도 차이가 발생하면, 틈 내부에서는 전기적 농담전지가 즉각적으로 형성되며, 전자반응을 통해 반응한 금속이 이온형태로 용출하게 된다.

이러한 과정이 상당 기간 지속되면 틈 내부에서는 심한 부식 현상이 나타나는데, 이것이 틈부식이다.

3) 공식(空蝕, Pitting corrosion)

이 부식은 스테인리스강의 보호성 산화피막이 국부적으로 손상을 받은 후 부식성 원소들과 재료가 직접 반응함으로서 극히 작은 면적의 깊은 구멍(pit)을 형성하는 부식이다. 공식은 가장 파괴적이고, 무서운 부식으로 그 크기가 작고, 부식생성물에 의해 자주 가려지기 때문에 발견하기가 매우 힘들다.

공식을 유발시키는 환경은 염화(Cl)이온과 용해산소가 존재하는 경우가 대부분이며, 공식되기 시작하면, 그 부분은 자기증식(磁氣增殖) 및 자기촉매(磁氣觸媒) 작용에 의해 계속적으로 성장하는 특성이 있다. 이때 구멍 형상은 주로 중력방향으로 성장하는 모습으로 나타난다.

공식에 대한 저항성이 높은 원소로는 몰리브덴(Mo)이 잘 알려져 있으며, 공식을 저감시키기 위해서는 스테인리스강에 Mo을 첨가한 강종들이 개발되어 있다.

Collection @ chosun

4) 입계부식(粒界腐蝕, Intergranular corrosion)

입계부식이란 금속을 구성하고 있는 결정립과 결정립 사이의 경계면인 입계가 결정립 내부보다 심하게 부식되는 현상이다. 이런 현상은 어떤 조건하에서 결정입계 부근의 화학조성이 본래 조성과는 상당히 다른 상태로 변화하게 되고, 이때 존재하는 부식환경과의 반응성이 크게 됨으로서 나타난다.

입계부식의 기본적인 원인은 결정입계의 성분변화(한 성분의 과다존재 혹은 결핍)에 의해 발생되는 것으로 300계 스테인리스강에서의 Cr 함량 결핍에 의한 입계부식이 대표적으로 알려져 있다.

특히 450~850℃ 구간에서 열적인 영향을 많이 받을 때, 300계 스테인리스강의 결정입계에 형성되는 크롬탄화물(주로 $Cr_{23}C_6$ 화합물, 70% 이상의 크롬을 함유)이 상당한 영향을 미친다는 사실이 다양하게 보고 되고 있다.

결정입계에 크롬함량이 70% 이상을 갖는 크롬탄화물이 형성되면, 이 화합물 주변은 반대로 크롬함량이 낮아지는 형상이 발생하며, 부식 환경에 대한 내식성이 급격히 저하되는 결과를 초래한다. 심한 경우에는 크롬함량이 10% 미만으로 낮아지는 경우도 나타난다.

부식 환경에 의한 저항성을 확보하기 위해서는 10% 이상의 크롬이 필요하다는 사실은 여러 연구자들에 의해서 이미 발표된 적이 있다. 따라서 화합물 주변의 낮은 크롬함량 부위에서는 부식이 집중적으로 진행되며, 결과적으로 결정입계 전체를 따라 부식되는 현상이 나타난다.

5) 응력부식균열(應力腐蝕龜裂, Stress corrosion crack)

응력부식균열은 인장응력과 부식성 용액이 동시에 존재할 때 야기되는 균열로서 전면에 걸쳐 일어나지 않고 국부적이 부분으로 발생하며, 결정립을 관통하는 미세한 균열이 다수 포함되는 형태로 나타난다.

이런 형태의 균열은 보일러 탱크, 터빈 날개 등과 같은 설치구조물 혹은 용접구조물로서 구조적 응력이 존재하면서 부식 환경이 덧붙여지는 조건에서 관찰되고 있다.

응력부식균열을 방지하기 위해서는 응력제거 열처리 및 용접구조물의 디자인 변경으로 응력발생을 최소화 시키거나, Ni, Mo 등과 같은 성분이 높은 오스테나이트계 스테인리스강을 사용하여 재료를 보강시키는 방법이 고려될 수 있다.

Collection @ chosun

(2) 부식에 영향을 미치는 인자(因子)

스테인리스강의 부식에 영향을 미치는 주요 인자는 다음과 같다.

- 화학성분의 영향 : 재료에 함유된 Cr, Ni, Mo, Nb, Ti, Si, P, S, C 등이 영향을 미침
- 온도의 영향 : 온도의 증가는 부식 경향을 현저하게 증가시킴
- 재료표면조건의 영향 : 재료표면의 거칠기가 증가될수록 부식 경향은 증가됨

(3) 부식유발 환경요인

다음과 같은 환경조건들과 접촉하는 경우 스테인리스강의 부식이 높게 나타나는 경향을 보인다.

- HCl(염산), H_2SO_4(황산) 등과 같은 산성분위기와의 접촉
- NaCl(염화나트륨), Fe_2Cl_3(염화 제2철) 등과 같은 염화물의 접촉
- 철분을 주로 함유한 이종금속의 표면부착
- 토사, 먼지 등과 같은 이물질들의 장기간 표면부착

(4) 부식 방지

1) 표면처리

표면의 거침성 정도는 이물질의 부착여부를 결정하는 중요한 변수로 작용하기 때문에 부식 발생 저감을 위해서는 가능한 한 매끄러운 표면이 향상 유지되도록 하는 것이 좋다. 따라서 표면성이 뛰어난 No. 6~8 가공면의 경우에는 우수한 내부식적 성향을 보여준다. 또한 녹발생 방지를 위한 표면처리의 한 방법으로 수지(樹脂)코팅이 일부 적용된다.

2) 용접부 표면처리

용접시 발생되는 용접 불똥, 슬래그(slag)성 물질, 산화스케일 등과 같은 물질은 스테인리스강의 내식성을 저하시키는 요인으로 작용한다.

이들 물질은 보호성이 약한 표면을 갖고 있어 먼저 부식 발생이 시작되고, 부식이 더 진행되어 스테인리스강으로 전이되는 양상을 보이거나, 부착된 부위에서 틈부식을 유발시켜 부식발생을 촉진하기도 한다.

따라서 스테인리스강의 충분한 내식성 확보를 위해서는 이들 물질이 철저히 제거되어야 한다. 이들을 제거하는 방법으로 솔질, 연마(硏磨), shot blasting과 같은 물리적

Collection @ chosun

힘을 사용하여 제거하거나, 산세(酸洗) 용액으로 물질을 녹여 제거하는 방법이 있다.

그러나 이때 주의할 점은 제거과정 중에 발생될 수 있는 철분성의 미세한 입자들이 스테인리스강 표면에 잔류하는 것을 방지하여야 한다.

3) 부동태화 처리

부동태(不動態)화 처리는 표면의 불순물을 깨끗하게 제거한 후 산화성 산으로 표면에 균일하고 얇은 부동태 피막(치밀하고 얇은 산화피막)을 형성시켜 외부의 부식 환경이 내부로 침투하는 것을 방지하는 개념이다.

스테인리스강의 부동태화 처리시에는 질산용액이 주로 사용된다. 이유는 질산은 스테인리스강 표면에 Cr_2O_3 피막을 균일하고 치밀하게 형성시킬 수 있기 때문이다.

4) 예민화 현상방지

용접후 용접부에서 일정한 거리를 두고 열영향부가 발생함으로서 스테인리스강의 내식성이 저하되는 현상이 나타난다. 특히 300계 스테인리스강에서는 이 현상이 현저하기 때문에 용접 후 후처리가 중요하게 취급되고 있다.

용접 열영향부에서 나타나는 내식성 저하는 열영향부에 형성되는 $Cr_{23}C_6$와 밀접한 관계가 있다. 즉, 다량의 크롬(70% 이상)이 함유된 탄화물이 형성됨으로서 상대적으로 탄화물 주위의 크롬 농도는 저하되고 이로 인해 내식성이 저하된다는 사실이다.

크롬탄화물의 형성은 온도와 유지시간의 함수로 결정되기 때문에 적정한 조치만 취하면 형성이 억제될 수 있다. 현재 가장 효과적이고, 손쉬운 방법으로 알려진 것은 용접 후 매우 빠른 냉각조건을 적용하여 크롬탄화물의 형성 가능성 자체를 극히 억제하는 방법이 있다.

Collection @ chosun

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험기기

실험은 조선대학교 건설계열 공용실험실 소재 유압식 만능재료 실험기(Universal Testing Machine, 이하 U.T.M이라 함)로 실시하며, 실험기구들은 다음과 같다.

- U.T.M(Shimadzu Co.) : 최대하중 1000kN, 최대유효높이 3m, 테이블길이 4.2m
- Structural Reaction Frame(1000kN)
- Dataletty 402(Shimadzu; Japan)
- 동적변형률 측정기(MDS-2000, 16 channel)
- Datalogger(TDS-601, Tokyo Sokki; Japan)
- Note book computer : pentium-Ⅲ 650
- Load Cell(1000kN, 500kN)
- Automatic Switch Box(30 channel)
- Displacement Transducer(200㎜, 100㎜, 50㎜)
- Bend Saw Machine(DBS-320A; Korea)
- Micrometer(Mitutoyo Co.; Japan)
- Vernier Calipers
- Hand Grinder
- Wheel Cutter
- Drilling Machine
- Hoist crane(50kN)
- Chuck(Instron type, 50kN, 100kN)
- Ratchet socket set
- Wire Strain Gauge(YFLA-5-1L, Tokyo Sokki; Japan)
- Strain Gauge Terminal : TP4(Tokyo Sokki; Japan)

Collection @ chosun

2.2 재료실험

재료실험(材料實驗, materials testing)은 재료가 사용 목적 및 사용 조건에 적당한가, 또한 안전한 하중의 한계와 재료의 변형 능력을 검토하는데 있다. 보통 재료실험이라 함은 넓은 의미에서 생각할 때 기계적(機械的) 및 물리적, 화학적 성질 등을 파악하기 위한 것이다.

실험은 KS D 3536(기계구조용 스테인리스 강관)에 의해 제조된 오스테나이트(austenite)계 STS 304 TKC로 KS 규격항복강도(F_y)는 205N/㎟인 원형강관을 사용한다.

시험편 및 시험체의 명칭은 다음과 같다.

T - 1
- 1 : 시험체 번호
- T : 인장시험편
  S : Stub-column 시험체

2.2.1 인장강도실험

2.2.1.1 실험계획

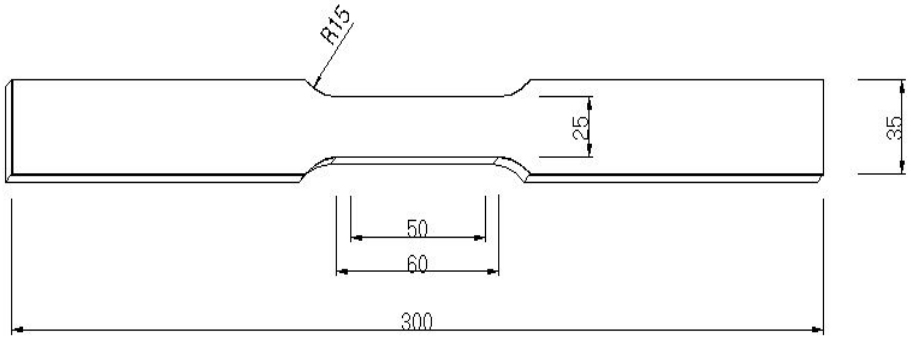
소성 가공된 냉간성형 스테인리스 원형강관 시험체에서 절취한 인장시험편으로부터 구한 응력-변형도 곡선은 잔류응력이 거의 제거된 상태이므로 강관 보-기둥의 이상적 강도곡선을 구하기 위해 사용된다. 냉간성형 스테인리스 강관은 모두 상온에서 가공되어 가공경화에 의해서 항복강도가 상승되며, 상당히 큰 잔류응력을 가지게 된다.

인장강도실험은 이러한 재료의 소성가공효과가 강재의 기계적 성질에 미치는 영향 및 stub-column의 항복강도와 비교하기 위한 실험으로, 강관 보-기둥의 강도 및 거동 파악을 위한 기준이 되는 인장강도, 항복강도, 탄성계수 및 연신율 등의 기계적 성질을 파악하는데 그 목적이 있다.

인장강도시험편은 단면형상 및 규격에 따라 원형강관은 비용접부에서 3개를 절취하여 KS B 0801(금속재료 인장시험편)에 규정된 12B호(원형강관)에 의해 제작하여, KS B 0802(금속재료 인장시험편)에 의해 실험한다.

dCollection @ chosun

[그림 2.1]은 시험편의 형상 및 치수이고, <표 2.1>은 시험편 계획이다



[그림 2.1] 인장강도시험편 개형

<표 2.1> 인장강도실험계획

시험편명	단면규격	폭(㎜)	두께(㎜)	갯수	절취위치	시험편제작
T-1	○-101.6×3.0	24.85	2.75	1	비용접부	KS B 0801 12B호 시험편
T-2		24.85	2.70	1		
T-3		24.85	2.75	1		
소 계	3					

2.2.1.2 실험방법

실험은 U.T.M을 이용하여 KS B 0802(금속재료 인장시험방법)에 의해 실시하며, 시험편을 실험기에 고정하기 위해 시험편 상부는 Instron Type의 척(chuck)을 사용하고, 하부는 쐐기형 척(weged chuck)을 사용한다. 원형강관 인장시험편은 잔류응력의 영향으로 완전히 평평하지 않아 척에 완전히 물리지 않으므로, 제작 후에 평형부에 영향이 미치지 않도록 물림부를 평평하게 한다.

측정방법은 응력-변형도 관계를 살펴보고자 시험편의 중앙부 양면에 변형게이지(wire strain gauge, 이하 W.S.G라 함)를 부착하고, 연신율 측정을 위하여 평형부에 표점거리를 50㎜로 표시하고, 실험기에 500kN급 인장용 load cell을 설치한다.

실험속도는 재료의 기계적 성질에 영향을 주므로, 본 실험에서의 가력속도는 예상항복강도의 1/2까지는 적절한 속도로 가력하고, 예상 항복 강도의 1/2부터 항복강도까지는 20N/㎟/s의 응력 증가율로 하고, 항복 이후에는 5㎜/min의 변형 증가율로 가력한다.

Collection @ chosun

[사진 2.1] 인장강도실험 전경

[사진 2.2] Stub-column압축강도실험 전경

2.2.2 Stub-column 실험

Collection @ chosun

2.2.2.1 실험계획

Stub-column압축강도실험은 강관의 냉간 가공에 의한 잔류응력의 영향을 파악하고, 세장비의 영향이 거의 없는 순수 압축력에 대한 국부좌굴내력 및 항복내력과 폭(지름)-두께비, 단면형상에 대한 영향 등을 파악하기 위해 실시한다.

Stub-column의 항복강도는 세장비의 영향이 없을 때, 전체 기둥의 거동을 보여주어 기둥의 거동과 비교할 수 있는 기본이 되며, 또한 stub-column압축강도실험에 의하여 국부좌굴의 영향이 고려된다면 보-기둥의 거동을 합리적으로 설명할 수 있다.

시험체의 길이는 좌굴의 영향을 받지 않도록 미국의 SSRC(Structural Stability Research Council)의 추장에 따라 모재에서 잔류응력을 충분히 포함하고 압축시 탄성역이나 소성역에서 좌굴하지 않도록 강관 지름의 3배로 정한다.

SSRC의 stub-column test procedure에 의하면 stub-column의 길이가 짧기 때문에 소성화에 따른 유효단면 2차 모멘트의 감소는 좌굴거동에 영향을 미치지 않으며, 오히려 변형도 경화에 따른 좌굴하중의 증가가 저감계수하중에 접근한다고 한다.

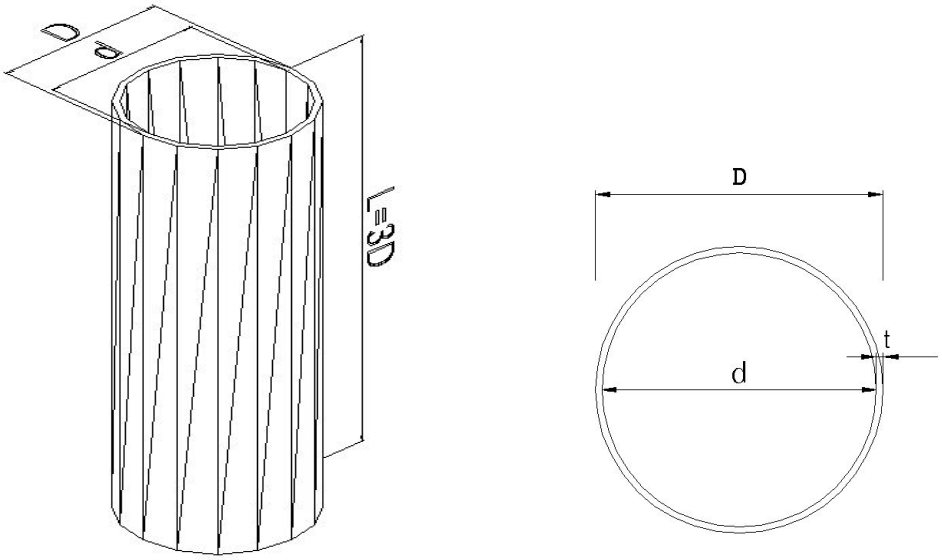
Stub-column 시험체 계획 및 단면성능은<표 2.2>와 같으며, [그림 2.2]는 stub-column 시험체의 개형이다.

<표 2.2> Stub-column압축강도실험계획

시험체명	단면규격	D (㎜)	t (㎜)	L (㎜)	D/t	A (㎟)	I (×10⁴㎟⁴)	r (㎜)	S (㎣)	Z (㎣)	f
S - 1	○-101.6×3.0	101.55	2.81	304.00	36.14	871.2	106.11	34.90	20,899	27,394	1.31
S - 2		101.69	2.82	303.53	36.06	875.4	106.91	34.95	21,028	27,564	1.31
S - 3		101.68	2.80	303.35	36.31	869.3	106.18	34.95	20,887	27,374	1.31
평 균		**101.64**	**2.81**	**303.63**	**36.17**	**872.0**	**106.40**	**34.93**	**20,938**	**27,444**	**1.31**

주) D : 원형강관의 지름, L : 시험체 길이, t : 두께, D/t : 지름-두께비, A : 단면적, I : 단면2차모멘트, r : 단면2차반경, S : 탄성단면계수, Z : 소성단면계수, f : 형상계수

dCollection @ chosun



[그림 2.2] Stub-column 시험체 개형

2.2.2.2 실험방법

Stub-column압축강도실험은 U.T.M을 이용하며, 편심에 대한 영향을 최소화하기 위해 시험체 단부를 면처리(capping)하고, 단면 내 등분포 하중을 받도록 시험체 하단부에 구좌(球座, spherical block)를 설치하여 단순 재하 한다.

하중측정은 1000kN급 load cell을 이용하여 하중을 측정하고, 시험체의 변형을 측정하기 위해 시험체 중앙부에 용접부를 대칭으로 양면에 W.S.G를 2개 부착하며, 또한 전체적인 평균 축변위를 측정하기 위하여 D.T(변위계, Displacement Transducer)를 설치한다.

Collection @ chosun

2.3 부재실험

구조부재의 강도나 강성을 구조해석으로 명확하게 밝히는 것이 곤란한 경우에 부재실험을 실시하며, 그 결과가 이론해석의 실증성을 확인하게 된다. 또한 구조해석에 의해 탄성범위내의 부재 거동은 확인되더라도 소성역에서 파괴에 도달할 때까지 구조적 거동의 검증은 과거의 실험 자료나 새로운 부재실험결과에 의존하는 방법뿐일 경우가 많다.

본 연구에서는 스테인리스 원형강관의 부재에 대한 중심압축 하중을 받는 기둥과 휨과 축력을 받는 보-기둥 그리고 휨 부재실험을 실시하여, 스테인리스 원형강관 부재의 내력 및 거동에 관하여 확인하고자 한다.

다음은 각 부재에 대한 시험체의 명칭은 다음과 같다.

C A 25 - 30

- 30 : 세장비 : 30, 50, 70
- 25 : 편심거리(mm) : 25, 50, 75, 100(보-기둥 시험체만 해당)
- A : 양단편심 대칭 단일곡률(A-type)
  B : 양단편심 대칭 이중곡률(B-type)
  C : 일단중심 타단편심 비대칭 단일곡률(C-type)
  D : 양단편심 비대칭 단일곡률(D-type)
  E : 양단편심 비대칭 이중곡률(E-type)
  (보-기둥 시험체만 해당)
- C : 중심압축 하중을 받는 기둥
  BC : 휨과 축력을 받는 보-기둥
  B : 휨 부재

Collection @ chosun

2.3.1 중심압축 하중을 받는 기둥

2.3.1.1 실험계획

중심압축 하중을 받는 스테인리스 원형강관 기둥의 역학적 특성을 파악하기 위해, 세장비(細長比, slenderness ratio, L_k/r)는 비탄성역에서 좌굴하는 중간기둥이 많이 사용되므로 한계세장비(λ_p) 이하인 30, 50, 70으로 계획하여 각 기둥의 최대내력 및 거동특성을 평가한다.

<표 2.3>은 기둥 시험체 계획을 나타낸 것이다.

<표 2.3> 기둥 시험체 계획

시험체명	단면규격	A(㎟)	D/t	L_K/r	L_o(㎜)	L(㎜)		K	L_K(㎜)
						계획	실측		
C-30	○-100.6×3.0	872	36.17	30	817	1,046	1,045	0.976	1,020
C-50				50	1,513	1,743	1,741	0.991	1,726
C-70				70	2,211	2,440	2,439	0.996	2,428

주) A : 단면적, D/t : 실측 지름-두께비, L_o : 순수 시험체 길이, L_K/r : 세장비
L : 좌굴길이(L_o+end plate 두께(9㎜)×2+knife edge 높이(105㎜)×2), K : 유효좌굴길이계수,
L_K : 유효좌굴길이(K×L)

2.3.1.2 실험방법

실험은 시험체 양 단부에 나이프에지(knife edge)를 부착하여 양단 단순지지조건으로 단순재하 실험을 한다.

각 시험체의 유효좌굴길이(L_K)는 시험체 단부에 부착된 아답터(adapter)를 강역(剛域)으로 에너지법에 의해 등가좌굴길이계수(K)를 산출하여 기둥 시험체의 좌굴길이에 곱하여 구하고, 세장비는 유효좌굴길이를 좌굴축에 대한 단면 2차 반경(r)으로 나눈 값으로 한다. 양단 단순지지 조건에서 기둥 좌굴실험을 할 경우 가력시 편심 및 단부의 회전에 대한 구속을 최소화할 필요가 있다.

이에 본 실험에서는 한 방향을 구속하고 구속방향의 직각으로만 회전이 가능한 단부조건으로 좌굴축을 미리 결정하여, 단부구속을 최소화할 수 있는 나이프 에지를 사용

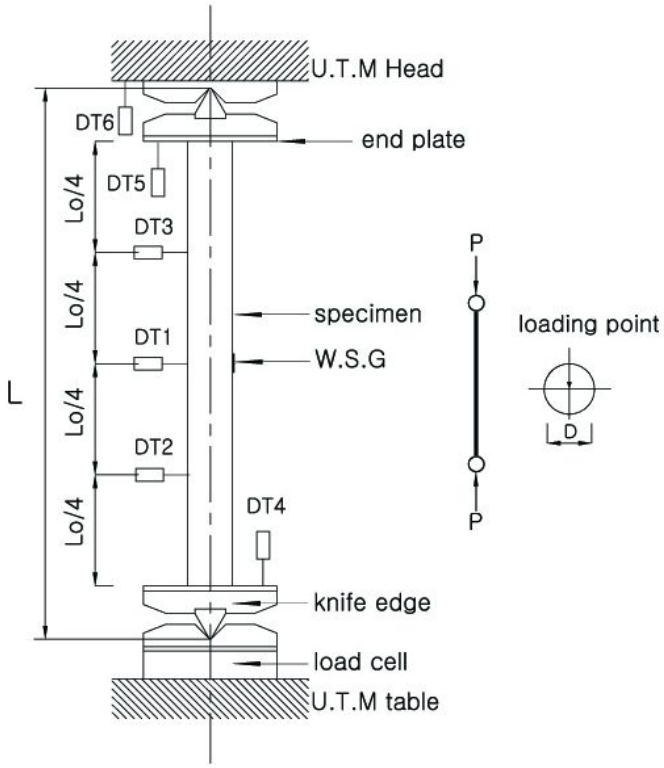
Collection @ chosun

한다. 나이프에지와 시험체를 정확히 부착시키기 위해 시험체의 단부에 두께 9㎜(300㎜×300㎜)인 엔드플레이트(end plate)를 용접 부착하고, 엔드플레이트와 나이프 에지를 볼트(M16)로 체결한다.

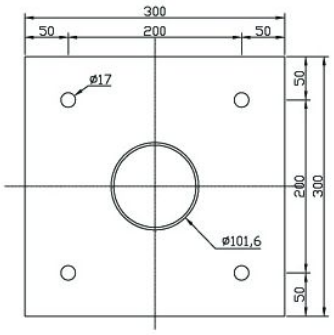
가력장치는 시험체 길이 및 내력을 예상하여 U.T.M을 사용하며, 하중 측정은 시험체 하부에 설치한 1000kN 용량의 load cell을 이용하여 측정하고, 변위와 단부회전각을 측정하기 위해 D.T를 [그림 2.3]과 같이 설치한다.

또한 시험체 중앙부의 변형도 분포를 측정하기 위해 W.S.G를 시험체의 중앙부에 부착한다.

[그림 2.4]와 [그림2.5]는 엔드플레이트 상세도와 기둥시험체의 개형이며, [사진 2.3]은 기둥 시험체의 setting 전경이다.

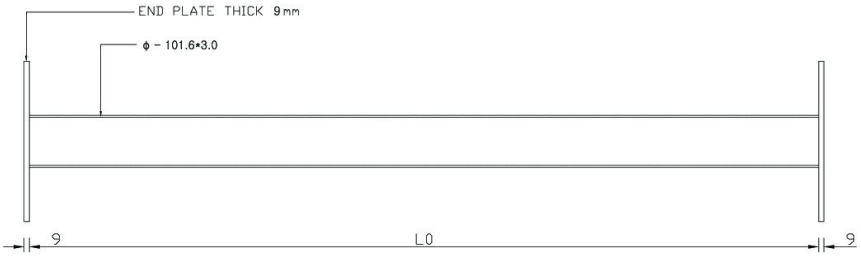


[그림 2.3] 기둥 시험체의 가력도



[그림 2.4] 엔드플레이트 상세

dCollection @ chosun



[그림 2.5] 기둥 시험체의 개형

[사진 2.3] 기둥 시험체 setting 전경

Collection @ chosun

2.3.2 휨과 축력을 받는 보-기둥

2.3.2.1 실험계획

보-기둥 부재는 골조를 구성하는 한 요소로서 다른 부재와 연속체로 되어 있으므로, 축력과 휨모멘트 및 전단력이 발생한다. 휨과 축력을 동시에 받는 보-기둥은 역학적으로 등가인 편심압축 하중이 작용하는 기둥 부재라고 생각할 수 있다.

따라서 본 연구는 실제 보-기둥의 응력상태를 가정한 편심압축 하중을 받는 기둥으로 비탄성역에서 좌굴되는 세장비 30, 50, 70으로 하여 각 세장비별로 편심거리 25, 50, 75, 100㎜인 총 60개의 시험체에 대해 실험을 실시하여, 변수에 따른 내력 및 변형능력 등을 파악한다.

<표 2.4>는 보-기둥 시험체 계획이다.

<표 2.4> 보-기둥 시험체 계획

시험체명	L_K/r	L_o(㎜)	e(㎜)		e/k		L(㎜)	K	L_K(㎜)
			일단	타단	일단	타단			
BCA25-30	30	816	25	25	2	2	1,050	0.946	993
BCA50-30			50	50	4	4			
BCA75-30			75	75	6	6			
BCA100-30			100	100	8	8			
BCA25-50	50	1,514	25	25	2	2	1,748	0.979	1,711
BCA50-50			50	50	4	4			
BCA75-50			75	75	6	6			
BCA100-50			100	100	8	8			
BCA25-70	70	2,211	25	25	2	2	2,445	0.989	2,417
BCA50-70			50	50	4	4			
BCA75-70			75	75	6	6			
BCA100-70			100	100	8	8			

주) L_o : 순수 시험체 길이, e : 편심거리, e/k : 편심비(단면핵반경 : k=16.6㎜)
L : L_o+end plate 두께(9㎜,12㎜)×2+knife edge 높이(105㎜)×2, K : 유효좌굴길이계수,
L_K : 유효좌굴길이(L×K)

dCollection @ chosun

<표 2.4> 계속

시험체명	L_K/r	L_o(㎜)	e(㎜)		e/k		L(㎜)	K	L_K(㎜)
			일단	타단	일단	타단			
BCB25-30	30	818	25	25	2	2	1,050	0.946	993
BCB50-30			50	50	4	4			
BCB75-30			75	75	6	6			
BCB100-30			100	100	8	8			
BCB25-50	50	1,514	25	25	2	2	1,748	0.979	1,711
BCB50-50			50	50	4	4			
BCB75-50			75	75	6	6			
BCB100-50			100	100	8	8			
BCB25-70	70	2,221	25	25	2	2	2,445	0.989	2,417
BCB50-70			50	50	4	4			
BCB75-70			75	75	6	6			
BCB100-70			100	100	8	8			
BCC25-30	30	818	0	25	0	2	1,050	0.946	993
BCC50-30			0	50	0	4			
BCC75-30			0	75	0	6			
BCC100-30			0	100	0	8			
BCC25-50	50	1,514	0	25	0	2	1,748	0.979	1,711
BCC50-50			0	50	0	4			
BCC75-50			0	75	0	6			
BCC100-50			0	100	0	8			
BCC25-70	70	2,211	0	25	0	2	2,445	0.989	2,417
BCC50-70			0	50	0	4			
BCC75-70			0	75	0	6			
BCC100-70			0	100	0	8			

주) L_o : 순수 시험체 길이, e : 편심거리, e/k : 편심비(단면핵반경 : k=16.6㎜)
L : L_o+end plate 두께(9㎜,12㎜)×2+knife edge 높이(105㎜)×2, K : 유효좌굴길이계수,
L_K : 유효좌굴길이(L×K)

dCollection @ chosun

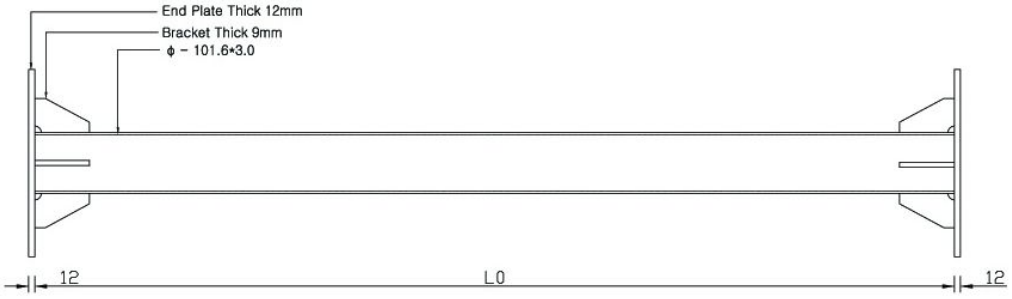
<표 2.4> 계속

시험체명	L_K/r	L_o(㎜)	e(㎜)		e/k		L(㎜)	K	L_K(㎜)
			일단	타단	일단	타단			
BCD25-30	30	818	25	12.50	2	1	1,050	0.946	993
BCD50-30			50	25.00	4	2			
BCD75-30			75	35.25	6	3			
BCD100-30			100	50.00	8	4			
BCD25-50	50	1,514	25	12.50	2	1	1,748	0.979	1,711
BCD50-50			50	25.00	4	2			
BCD75-50			75	35.25	6	3			
BCD100-50			100	50.00	8	4			
BCD25-70	70	2,211	25	12.50	2	1	2,445	0.989	2,417
BCD50-70			50	25.00	4	2			
BCD75-70			75	35.25	6	3			
BCD100-70			100	50.00	8	4			
BCE25-30	30	818	25	12.50	2	1	1,050	0.946	993
BCE50-30			50	25.00	4	2			
BCE75-30			75	35.25	6	3			
BCE100-30			100	50.00	8	4			
BCE25-50	50	1,514	25	12.50	2	1	1,748	0.979	1,711
BCE50-50			50	25.00	4	2			
BCE75-50			75	35.25	6	3			
BCE100-50			100	50.00	8	4			
BCE25-70	70	2,211	25	12.50	2	1	2,445	0.989	2,417
BCE50-70			50	25.00	4	2			
BCE75-70			75	35.25	6	3			
BCE100-70			100	50.00	8	4			

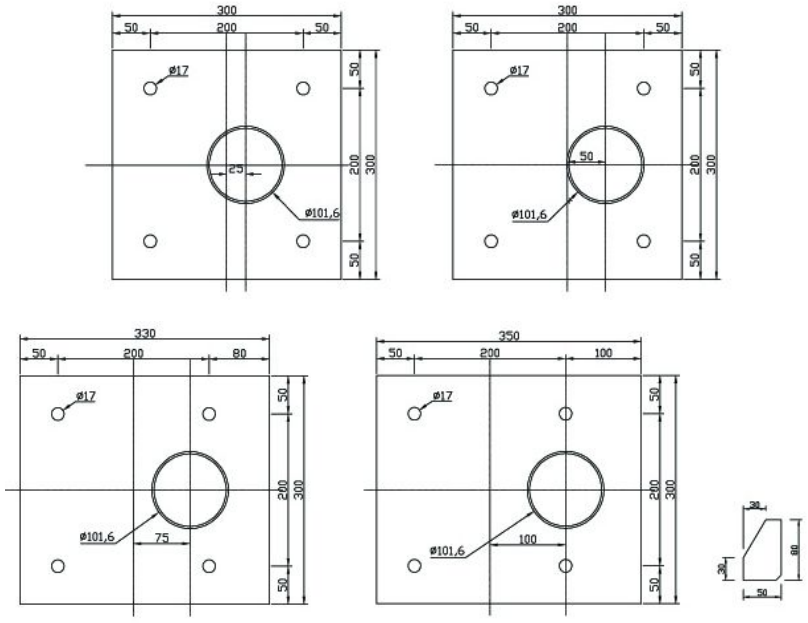
주) L_o : 순수 시험체 길이, e : 편심거리, e/k : 편심비(단면핵반경 : k=16.6㎜)
L : L_o+end plate 두께(9㎜,12㎜)×2+knife edge 높이(105㎜)×2, K : 유효좌굴길이계수,
L_K : 유효좌굴길이(L×K)

[그림 2.6]은 시험체의 개형이며, [그림 2.7]은 엔드플레이트와 브래킷 상세도이다.

dCollection @ chosun



[그림 2.6] 보-기둥 시험체 개형



[그림 2.7] 엔드플레이트와 브래킷 상세도

2.3.2.2 실험방법

실험은 시험체 양 단부에 나이프 에지를 부착하여 양단 단순지지조건으로 단순재하 실험을 한다.

각 시험체의 유효좌굴길이(L_K)는 시험체 단부에 부착된 아답터를 강역(剛域)으로 하여 에너지법으로 등가좌굴길이계수(K)를 산출하여 보-기둥 시험체의 좌굴길이에 곱하여 구하고, 세장비는 유효좌굴길이를 좌굴축에 대한 단면 2차 반경(r)으로 나눈 값으로 한다. 양단 단순지지 조건에서 보-기둥 좌굴실험을 할 경우 가력시 편심 및 단부의 회

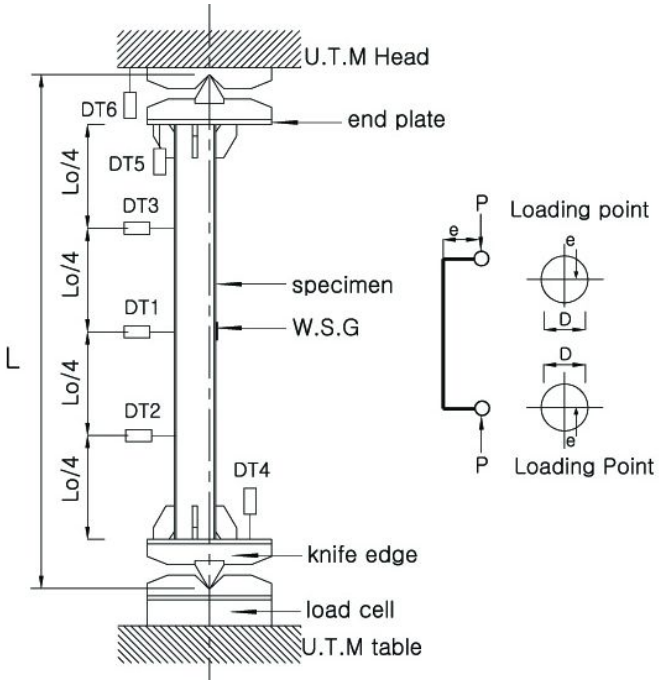
Collection @ chosun

전에 대한 구속을 최소화할 필요가 있다.

본 실험에서는 한 방향을 구속하고, 구속방향의 직각으로만 회전이 가능한 단부조건으로 좌굴축을 미리 결정하여, 단부구속을 최소화할 수 있는 나이프 에지를 사용한다. 또한 시험체는 단부모멘트에 의해 볼트로 연결된 강역의 변형을 최소화하고, 용접부위의 국부좌굴의 발생을 방지하기 위해 두께 12㎜인 엔드플레이트와 브래킷을 4면의 중심부에 용접하여 나이프에지와 볼트를 체결하여 고정한다.

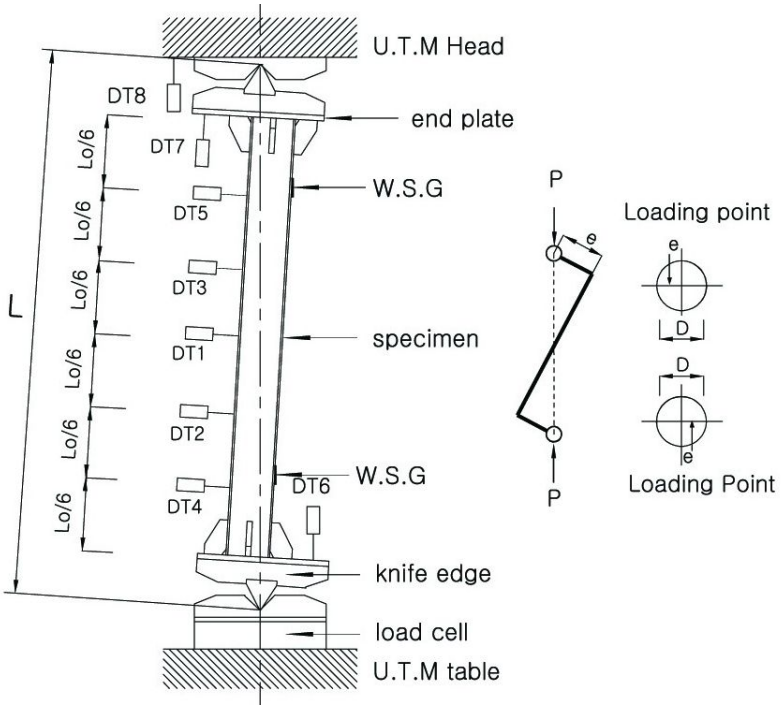
가력장치는 시험체 길이 및 내력을 예상하여 U.T.M을 사용하며, 하중 측정은 시험체 하부에 설치한 1000kN 용량의 load cell을 이용하여 측정하고, U.T.M 하중을 참고로 한다. 측정은 최대변형이 예상되는 부분에 W.S.G를 부착하고, 변위와 단부회전각을 측정하기 위해 D.T를 [그림 2.8]과 같이 설치한다.

[그림 2.8]은 보-기둥 시험체의 가력도이다.

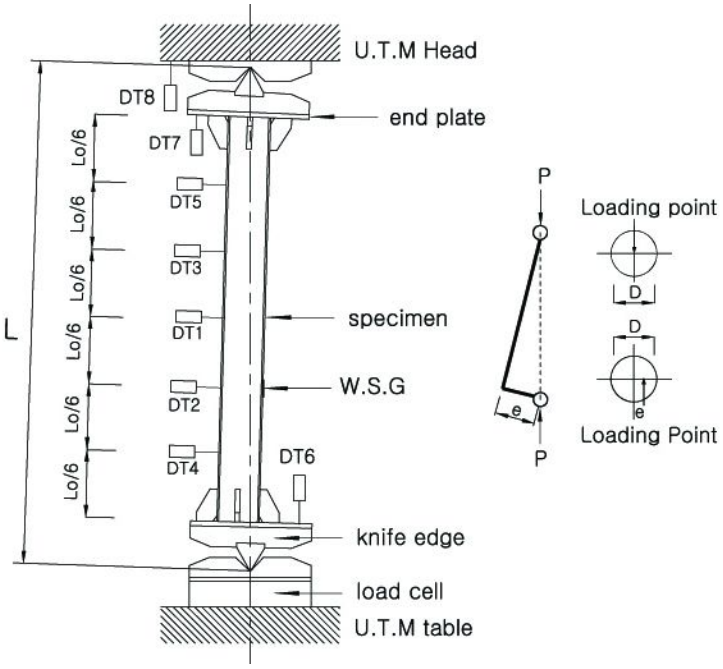


(a) 양단편심 대칭 단일곡률

dCollection @ chosun

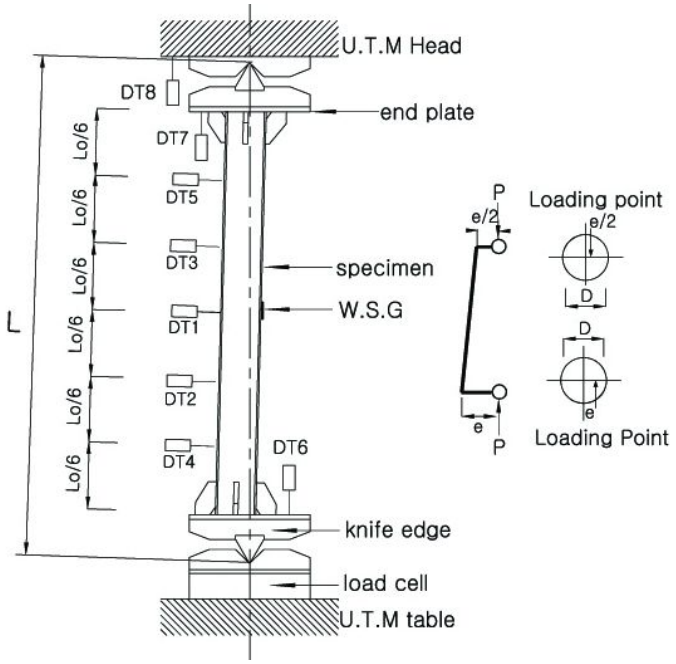


(b) 양단편심 대칭 이중곡률

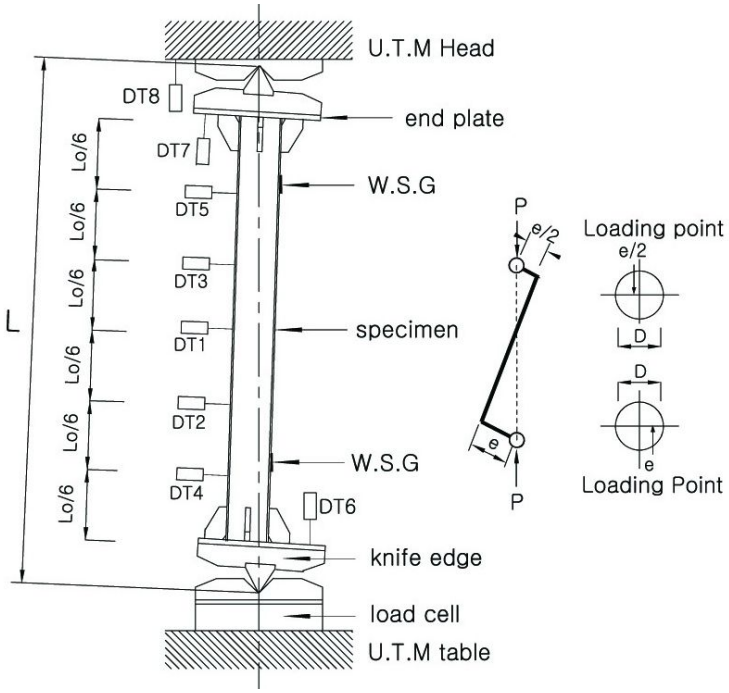


(c) 일단중심 타단편심 단일곡률

dCollection @ chosun



(d) 양단편심 비대칭 단일곡률



(e) 양단편심 비대칭 이중곡률

[그림 2.8] 보-기둥 시험체 가력도

Collection @ chosun

[사진 2.4] 보-기둥 시험체 setting 전경

Collection @ chosun

2.3.3 순수 휨을 받는 보

2.3.3.1 실험계획

스테인리스 원형강관 휨 부재의 휨에 대한 내력 및 변형 능력을 파악하기 위해 시험체의 길이는 기둥의 세장비와 같은 길이로 계획하였으며, 부재의 명칭을 통일하기 위해 30, 50, 70으로 한다.

휨 시험체의 계획은 <표 2.5>와 같다.

<표 2.5> 휨 시험체 계획

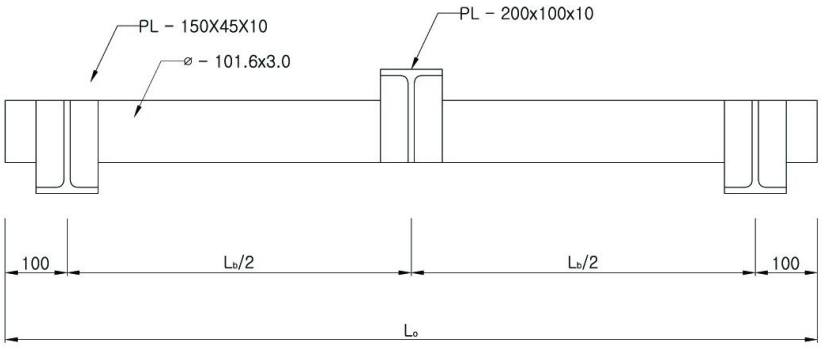
시험체명	단면규격	A(㎟)	D/t	L_b/r	L_o(㎜)		L_b(㎜)
					계획	실측	
B-30	○-101.6×3.0	872	36.17	30	1,012	1,016	818
B-50				50	1,715	1,714	1,515
B-70				70	2,412	2,413	2,212

주) A : 단면적, b/t : 실측 폭-두께비, L_b/r : 세장비, L_o : 순수 시험체 길이, L_b : 보의 비지지길이

2.3.3.2 실험방법

각 시험체는 양쪽에 단순지지 한다.

휨 시험체는 <그림 2.9>와 같이 제작하며, 가력은 시험체 중앙부에 [그림 2.10]과 같이 수직으로 가력 한다. 보의 가력점과 지지점은 지압에 대해서 영향이 없도록 10㎜ 플레이트로 덧판을 대어 보강한다.

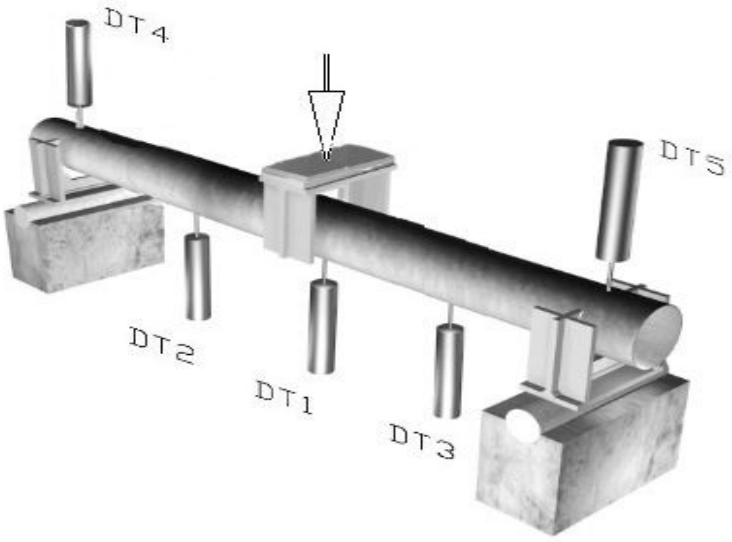


[그림 2.9] 휨 시험체의 형상과 치수

보의 중앙부 상하단부에 W.S.G를 부착하여 변형률을 측정하며, 또한 중앙점 하단,

Collection @ chosun

가력점 하단, 지지점 상단에 D.T를 설치하여 변위량 및 부재 변형각을 측정한다. 가력에는 1000kN 용량의 U.T.M을 사용한다.



[그림 2.10] 휨 시험체의 setting 현황

Collection @ chosun

3. 실험결과

3.1 재료실험

3.1.1 인장강도실험

강재의 인장강도실험결과, 소성흐름(plastic flow)이 나타나지 않을 경우, KS 규격에서는 항복내력을 0.2% 옵셋(offset) 내력으로 결정하도록 규정하고 있으나, 스테인리스강에 대한 별도의 규정은 없다. 그러나 일본의 "스테인리스 건축구조 설계시공기준 및 동해설"에 따르면 SUS 304 스테인리스강에 대해 0.1% 옵셋 내력과 설계기준강도 235N/㎟로 규정하고 있어, KS 규격과 비교하기 위해 0.1% 옵셋법과 0.2% 옵셋법에 의해 항복내력을 구하였다.

각 인장강도시험편의 실험결과인 인장내력(σ_u) 항복내력(σ_y), 항복비(σ_y/σ_u), 연신율(ε) 등을 <표 3.1>에 나타냈고, 인장강도시험편의 응력-변형도 곡선(stress-strain curve)을 [그림 3.1]에 나타냈다.

<표 3.1> 인장강도실험결과

시험편명	A (㎟)	σ_u (N/㎟)	ϵ_u (%)	0.1% 옵셋 내력			0.2% 옵셋 내력			E_s (MPa)	ε (%)
				σ_y (N/㎟)	σ_y/σ_u	ϵ_y (%)	σ_y (N/㎟)	σ_y/σ_u	ϵ_y (%)		
T-1	68.34	841	0.5133	340	0.4047	0.0031	390	0.4643	0.0044	167,471	53.00
T-2	67.10	858	0.4860	402	0.4678	0.0032	439	0.5112	0.0044	183,117	52.70
T-3	68.34	850	0.4846	350	0.4119	0.0030	390	0.4590	0.0043	176,536	52.20
평 균	**67.92**	**850**	**0.4946**	**364**	**0.4183**	**0.0031**	**406**	**0.4781**	**0.0044**	**175,709**	**52.63**

주) A : 단면적, σ_u : 인장내력, ϵ_u : 인장내력시 변형도, σ_y : 항복내력, σ_y/σ_u : 항복비, ϵ_y : 항복내력시 변형도, E_s : 탄성계수, ε : 연신율

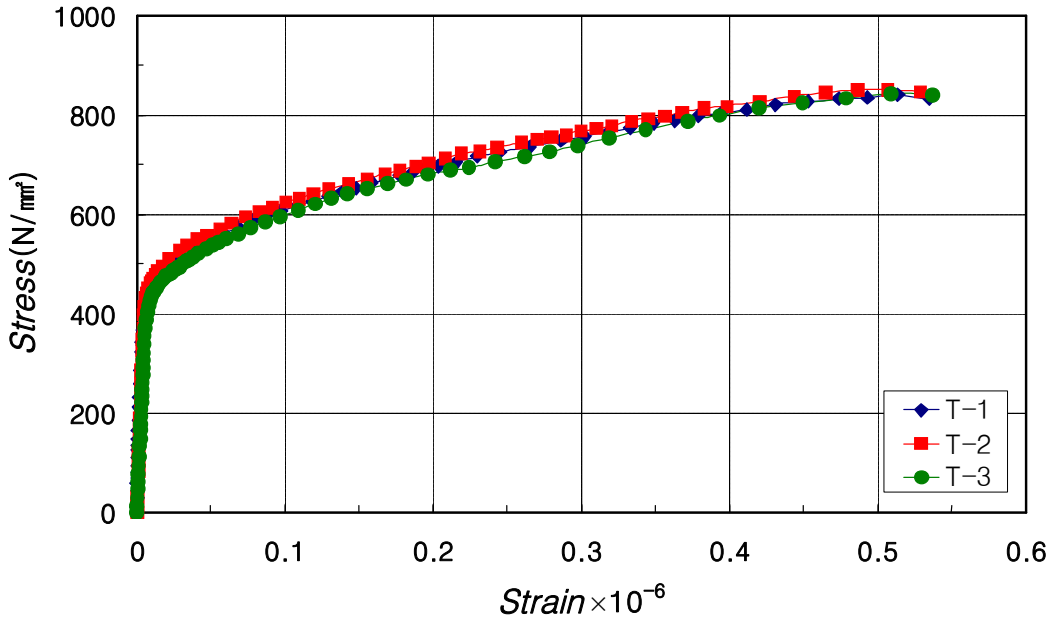
인장강도 실험결과 시험편에 항복참(yield plateau)이 나타나지 않았고, 스테인리스강관은 항복이후에도 점차 내력이 증가하여 인장내력이 평균 850N/㎟로 매우 높은 값과 최대내력시 변형도는 0.5($\times 10^6$ strain, 이하 단위생략)정도의 값을 보였다.

스테인리스 원형강관 인장시험편의 각각 산정된 항복내력을 KS에 규정된 스테인리스 강관 항복기준강도와 비교해 보면, 0.1% 옵셋 내력으로 산정된 스테인리스 원형강

Collection @ chosun

관의 항복내력의 평균은 364N/㎟로 기준내력보다 각각 1.78배 높은 값을 보였으며, 0.2% 옵셋 내력으로 산정된 항복내력은 406N/㎟로 기준내력보다 2배 정도의 값으로 높게 나타났다. 연신율 또한 52.63%로 매우 높은 연신능력을 보였다. 그러나 탄성계수는 175,709MPa로 일반구조용 강재의 탄성계수보다 낮은 값을 보이고 있다. 이는 원형강관에서 절취한 인장시험편의 물림부가 정확히 평판을 이루지 못하여 실험 중 슬립(slip)현상에 의한 것으로 판단된다.

[그림 3.1]은 스테인리스 원형강관 인장강도시험편의 응력-변형도 곡선으로서 소성흐름(plastic plateau)이 나타나지 않았고, 항복내력이후 인장내력에 이르기까지 내력증가와 함께 변형도가 크게 증가함을 나타내는데, 이는 스테인리스 원형강관이 소성변형능력(에너지 흡수능력)이 매우 우수함을 보여주고 있다.



[그림 3.1] 인장강도시험편 응력-변형도 곡선

이상의 인장강도실험에서 스테인리스 원형강관은 인장내력, 항복비, 연신능력 등 구조용 강재로서 갖춰야할 충분한 기계적 성질을 가지고 있는 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

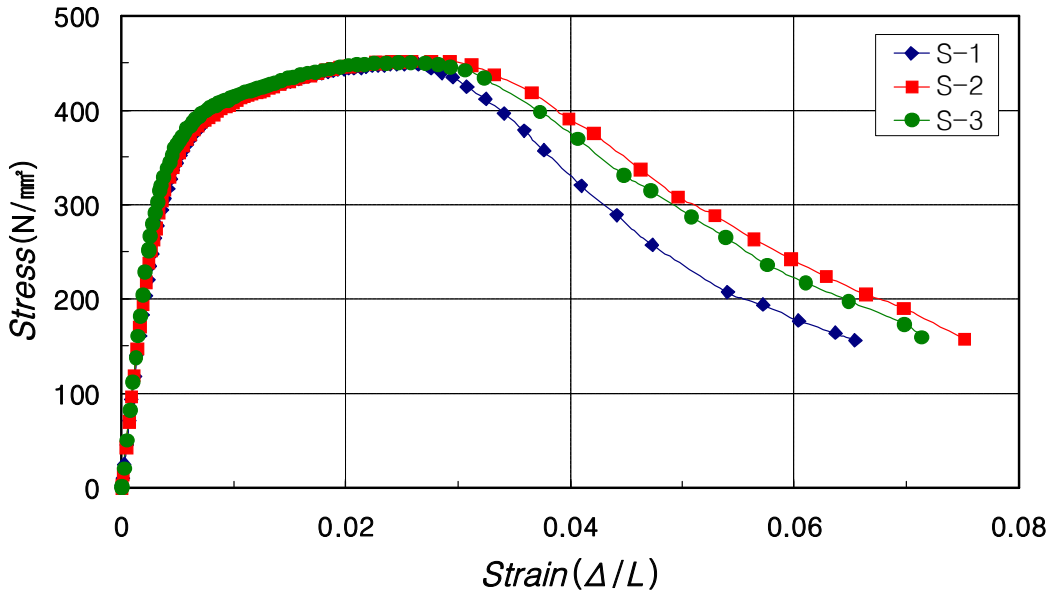
3.1.2 Stub-column 실험

스테인리스 원형강관 stub-column 각 시험체의 최대내력은 최대하중으로 하여 실험결과를 <표 3.2>에 나타냈으며, 항복참이 나타나지 않아 항복내력은 0.1% 옵셋내력과 0.2% 옵셋 내력에 의해 결정하여 함께 나타내었다.

<표 3.2> Stub-column압축강도실험결과

시험체명	σ_u (N/㎟)	ϵ_u	0.1% 옵셋 내력				0.2% 옵셋 내력			
			σ_y (N/㎟)	σ_y/σ_u	ϵ_y	$\sigma_y/{}_t\sigma_y$	σ_y (N/㎟)	σ_y/σ_u	ϵ_y	$\sigma_y/{}_t\sigma_y$
S - 1	448	0.0177	307	0.6849	0.0024	0.8434	353	0.7864	0.0036	0.8695
S - 2	452	0.0169	314	0.6948	0.0023	0.8626	352	0.7796	0.0034	0.8670
S - 3	448	0.0155	322	0.7182	0.0022	0.8846	363	0.8094	0.0034	0.8941
평 균	**450**	**0.0167**	**314**	**0.6993**	**0.0023**	**0.8635**	**356**	**0.7918**	**0.0035**	**0.8769**

주) σ_u : 최대내력, ϵ_u : 최대내력시 변형도($\Delta/L\times100$), σ_y : 항복내력, σ_y/σ_u : 항복비,
ϵ_y : 항복내력시 변형도(Δ/L), ${}_t\sigma_y$: 인장강도 시험편의 항복내력



[그림 3.2] stub-column 응력-변형도 곡선

Collection @ chosun

Stub-column 실험에 의한 평균최대내력은 450N/㎟이고, 최대내력시 변형도는 0.0167로 나타났다. 0.1% 옵셋 평균항복내력은 314N/㎟, 항복비 0.6993이고, 0.2% 옵셋 항복내력은 356N/㎟, 항복비 0.7918로 나타났다.

Stub-column의 항복내력을 인장강도실험에 의한 항복내력의 86.35%와 87.69%의 값으로 나타났는데, 이는 소성가공 및 용접에 의한 잔류응력 등의 영향으로 사료된다.

[그림 3.2]는 스테인리스 원형강관 stub-column의 응력-변형도 곡선으로서 인장강도 시험편의 곡선은 항복내력 이후 최대내력까지 꾸준한 내력증가와 아주 우수한 변형능력을 보여주고 있는 반면, stub-column 곡선은 항복내력을 지나 최대내력에 이르기까지 일정한 내력의 증가와 함께 소성변형을 보이다 최대내력에 이후 국부좌굴에 의한 급격한 내력저하를 보이고 있다. 이는 스테인리스 원형강관의 냉간성형 가공에 따른 잔류응력과 용접에 의한 영향으로 판단된다.

이상에서 스테인리스 원형강관의 stub-column은 최대내력이후 국부좌굴에 의해 급격한 내력저하를 보이나, 최대내력과 내력비, 소성변형능력에서 구조용 강관으로서 충분한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

3.2 부재실험

3.2.1 중심압축 하중을 받는 기둥

중심압축 하중을 받는 스테인리스 원형강관 기둥실험에서 얻어진 각 시험체의 최대내력과 최대내력시 축변위, 횡변위, 각변위 그리고 국부좌굴내력, 최대내력의 비 등의 실험결과를 <표 3.3>에 나타냈고, 세장비별 최대내력과 내력-변위관계를 [그림 3.3]~[그림 3.6]과 같이 표현하였다.

<표 3.3> 기둥 실험결과

구 분	λ_c	σ_u(N/㎟)	Δ_u(㎜)	δ_u(㎜)	Θ(rad)	σ_{loc}(N/㎟)	$\sigma_u/{}_s\sigma_y$	$\sigma_u/{}_s\sigma_u$	σ_{loc}/σ_u
C-30	0.35	344	3.77	3.48	0.0073	239	1.10	0.77	0.70
C-50	0.61	297	4.32	4.15	0.0042	-	0.95	0.66	-
C-70	0.86	224	4.11	12.89	0.0100	-	0.71	0.50	-

주) λ_c : 무차원세장비 $\left(\lambda_c=\frac{1}{\pi}\cdot\frac{L_k}{r}\cdot\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}\right)$, Δ_u : 최대내력시 축변위, δ_u : 최대내력시 횡변위,
σ_u : 최대내력, σ_{loc} : 국부좌굴내력, ${}_s\sigma_y$: stub-column 0.1% 옵셋 내력, ${}_s\sigma_u$: stub-column 최대내력
(-) : 부재좌굴에 의해 국부좌굴 발생하지 않음

3.2.1.1 기둥의 최대내력

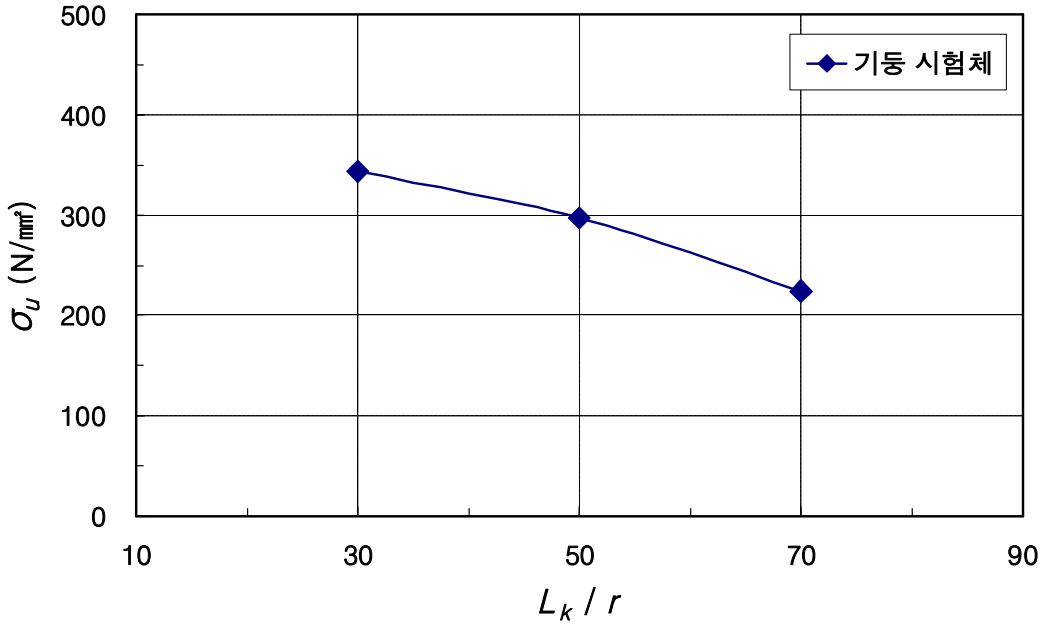
기둥의 최대내력은 실험에서 얻어진 기둥이 견딜 수 있는 최대하중에 의해 결정되는 것으로 하였으며, 원형강관 기둥의 최대내력은 모든 시험체에서 부재좌굴에 의해 결정되었고, 국부좌굴내력의 산정은 실험결과 내력-변위곡선에서 최대내력이후 급격한 내력저하가 시작되는 점을 찾아 산정하였으므로 다소 불확실한 점이 있으나, 세장비30 시험체의 경우 최대내력이후 급격한 내력저하에 의한 국부좌굴점이 발생하였다. 국부좌굴내력은 최대내력의 69.5%의 값을 나타냈다. 그러나 세장비50과 70시험체는 부재좌굴에 의한 횡변위의 증가로 측정기구의 측정한계치를 초과하여 산정할 수 없었다.

또한 최대내력을 stub-column의 최대내력으로 나누어 비교하였을 때, 부재좌굴에 의해 기둥의 내력이 결정된 시험체는 스테인리스 원형강관의 세장비가 증가할수록 내력저하가 더 크게 나타나고 있다.

Collection @ chosun

[그림 3.3]은 기둥 시험체의 최대내력을 세장비별로 나타낸 곡선이다.

기둥의 최대내력은 세장비 30 시험체는 344N/㎟이며, stub-column의 최대내력의 76.5% 정도의 저하된 값을 보이고 있으며, 세장비 50 시험체는 세장비 30의 66.1%, 세장비 70 시험체는 49.5%의 값을 나타냈다. 이는 세장비가 증가할수록 내력저하가 더 크게 나타내는 것이며, 기둥의 세장효과에 의한 것으로 판단된다.



[그림 3.3] 기둥의 세장비별 최대내력

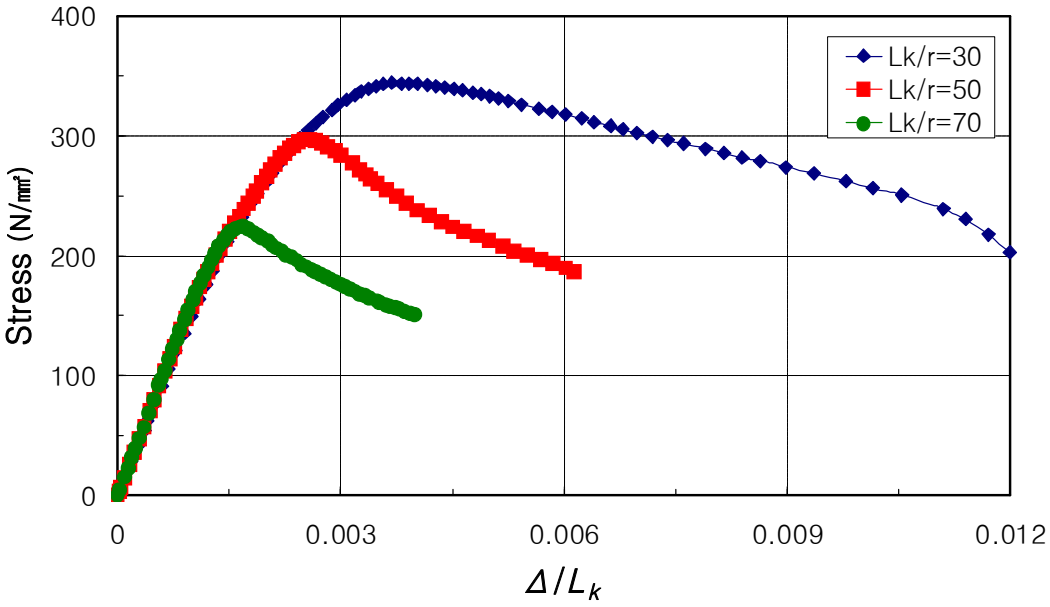
3.2.1.2 내력-변위 관계

기둥 시험체의 내력-변위 곡선은 각 시험체의 세장비별로 축변위와 횡변위, 단부의 각변위에 대해 [그림 3.4]~[그림 3.6]에 나타냈고, 종축은 시험체의 내력, 횡축은 축변위(Δ)와 횡변위(δ)를 기둥의 유효좌굴길이로 무차원화 하였고, 각변위(θ)를 라디안(radian)으로 표현하였다.

[그림 3.4]의 스테인리스 원형강관의 내력-축변위 관계는 세장비의 증가에 따라 최대내력은 감소하고, 세장비30 기둥은 최대내력 이후 완만한 내력저하현상을 보이며, 국부좌굴이 발생한 후 급격한 내력저하를 보이고 있다. 세장비50과 70 기둥은 최대내력이후 국부좌굴은 발생하지 않았으나, 횡변위의 증가에 의한 급격한 내력저하를 보이고

Collection @ chosun

있다. 최대내력시 무차원 축변위는 세장비30 기둥에 비해 세장비50은 67.72%, 세장비 70은 45.87%로 감소하는 것으로 나타났다.



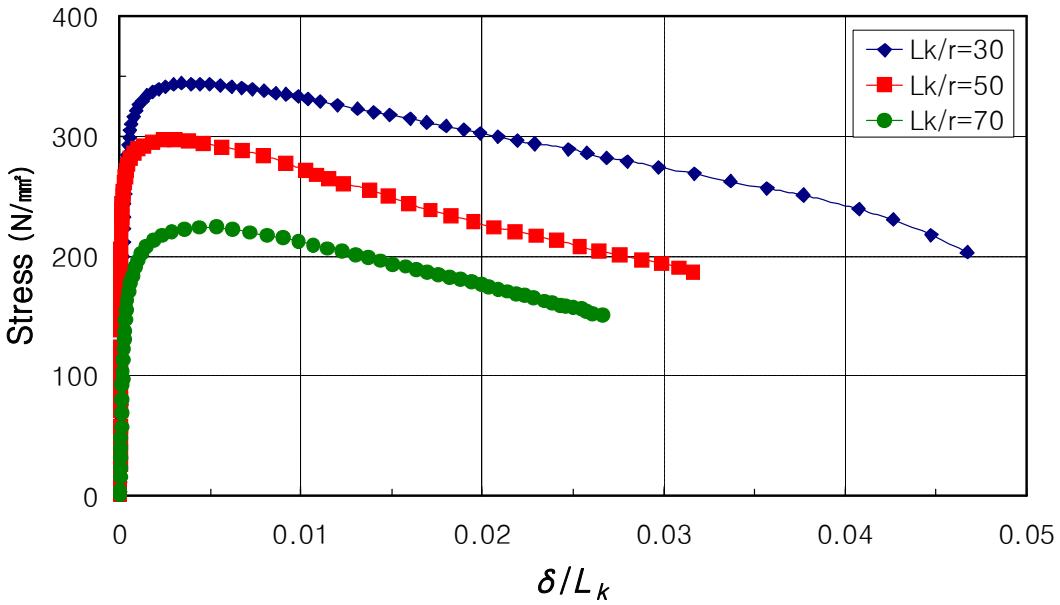
[그림 3.4] 기둥의 내력-축변위 곡선

[그림 3.5]의 내력-횡변위 관계 또한 세장비의 증가에 따라 최대내력 이후 소성변형 횡변위가 크게 증가하는 현상을 보이고 있으나, 최대내력시 무차원 횡변위는 세장비 30에 비해 세장비 50은 70.36%로 감소하고, 세장비 70은 155.47%로 크게 증가하는 것으로 나타났다.

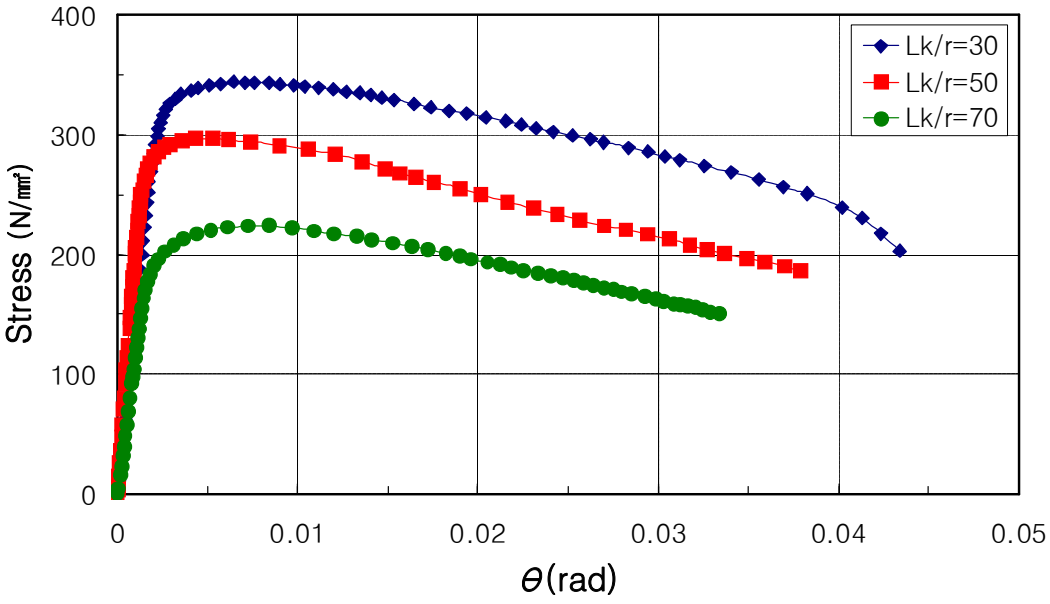
[그림 3.6]은 내력-각변위 곡선으로서 각변위는 양단부의 회전각의 평균으로 결정하였으며, 세장비의 증가에 따라 최대내력이후 소성변형에 따른 단부 회전각은 증가하는 것으로 나타났다. 최대내력시 회전각은 세장비 30에 대해 세장비 50은 67.44%로 감소하는 반면, 세장비 70은 131.15%로 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 [그림 3.3] ~ [그림 3.6]에서 알 수 있듯이 스테인리스 원형강관 기둥은 부재 좌굴에 의해 최대내력이 결정되며, 최대내력이후 우수한 소성변형능력을 가지고 있는 것으로 판단된다.

Collection @ chosun



[그림 3.5] 기둥의 내력-횡변위 곡선



[그림 3.6] 기둥의 내력-각변위 곡선

dCollection @ chosun

3.2.2 휨과 축력을 받는 보-기둥

휨과 축력을 받는 보-기둥실험에서 얻어진 각 시험체 최대내력과 국부좌굴내력, 편심과 최대내력에 의해 구해지는 모멘트, 변위 등의 실험결과를 <표 3.4>에 나타냈다.

<표 3.4> 보-기둥 실험결과

시험체명	λ_c	σ_u (N/㎟)	σ_{loc} (N/㎟)	M_u1 (kN m)	M_u2 (kN m)	Δ_u (㎜)	δ_u (㎜)	θ_u1 (rad)	θ_u2 (rad)	σ_{loc}/σ_u	$\sigma_u/{}_s\sigma_u$
BCA25-30	0.35	221	170	4.81	4.81	5.89	14.12	0.04	0.04	0.77	0.49
BCA50-30		157	126	6.85	6.85	7.91	15.35	0.05	0.05	0.80	0.35
BCA75-30		121	101	7.90	7.90	12.00	18.60	0.06	0.06	0.84	0.27
BCA100-30		97	80	8.43	8.43	14.62	17.88	0.06	0.07	0.83	0.22
BCA25-50	0.61	172	-	3.75	3.75	5.99	23.06	0.04	0.05	-	0.38
BCA50-50		127	-	5.53	5.53	10.64	32.73	0.06	0.06	-	0.28
BCA75-50		101	-	6.59	6.59	14.09	33.46	0.07	0.07	-	0.22
BCA100-50		82	-	7.13	7.13	20.62	40.40	0.08	0.09	-	0.18
BCA25-70	0.86	121	-	2.64	2.64	6.29	33.61	0.04	0.05	-	0.27
BCA50-70		87	-	3.81	3.81	10.95	44.84	0.06	0.06	-	0.19
BCA75-70		72	-	4.70	4.70	15.51	49.88	0.07	0.07	-	0.16
BCA100-70		60	-	5.24	5.24	20.68	53.77	0.08	0.08	-	0.13
BCB25-30	0.35	326	305	7.11	7.11	6.60	5.97	0.02	0.03	0.94	0.73
BCB50-30		246	237	10.73	10.73	6.41	6.76	0.01	0.04	0.96	0.55
BCB75-30		207	198	13.57	13.57	7.24	6.30	0.02	0.04	0.96	0.46
BCB100-30		165	160	14.38	14.38	8.54	7.52	0.02	0.05	0.97	0.37
BCB25-50	0.61	255	147	5.55	5.55	5.12	9.46	0.01	0.03	0.58	0.57
BCB50-50		205	160	8.93	8.93	7.87	11.53	0.02	0.05	0.78	0.46
BCB75-50		170	156	11.11	11.11	11.68	13.80	0.03	0.06	0.92	0.38
BCB100-50		137	133	11.96	11.96	13.43	12.05	0.05	0.07	0.97	0.31
BCB25-70	0.86	137	-	4.30	4.30	5.05	9.13	0.01	0.02	-	0.44
BCB50-70		162	-	7.08	7.08	8.75	13.73	0.02	0.04	-	0.36
BCB75-70		133	-	8.67	8.67	11.20	17.86	0.02	0.06	-	0.30
BCB100-70		106	102	9.23	9.23	14.72	17.01	0.04	0.07	0.96	0.24

주) λ_c : 무차원세장비 $\left(\lambda_c=\frac{1}{\pi}\cdot\frac{L_k}{r}\cdot\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}\right)$, σ_u : 최대내력, σ_{loc} : 국부좌굴내력,

M_u1 : 편심거리와 최대내력에 의해 결정된 작은 쪽 단부모멘트,

M_u2 : 편심거리와 최대내력에 의해 결정된 큰 쪽 모멘트,

Δ_u : 최대내력시 축변위, δ_u: 최대내력시 횡변위, θ_u1 : 편심거리가 작은 쪽 최대모멘트시 단부회전각,

θ_u2 : 편심거리가 큰 쪽 최대모멘트시 단부회전각, ${}_s\sigma_u$: stub-column 최대내력

(-) : 부재좌굴로 인한 국부좌굴점 산정불가

dCollection @ chosun

<표 3.4> 계속

시험체명	λ_c	σ_u (N/㎟)	σ_{loc} (N/㎟)	M_u1 (kN m)	M_u2 (kN m)	Δ_u (㎜)	δ_u (㎜)	θ_u1 (rad)	θ_u2 (rad)	σ_{loc}/σ_u	$\sigma_u/_s\sigma_u$
BCC25-30	0.35	263	197	0	5.74	4.44	10.71	0.03	0.04	0.75	0.59
BCC50-30		205	179	0	8.92	6.06	13.10	0.03	0.05	0.88	0.46
BCC75-30		163	151	0	10.68	7.94	13.89	0.04	0.07	0.93	0.36
BCC100-30		130	125	0	11.38	9.14	13.03	0.03	0.08	0.96	0.29
BCC25-50	0.61	206	-	0	4.49	4.88	19.60	0.03	0.04	-	0.46
BCC50-50		163	-	0	7.09	6.58	22.42	0.03	0.06	-	0.36
BCC75-50		133	-	0	8.69	9.02	26.17	0.04	0.07	-	0.30
BCC100-50		109	-	0	9.52	13.39	29.84	0.04	0.11	-	0.24
BCC25-70	0.86	148	-	0	3.23	4.82	26.23	0.03	0.04	-	0.33
BCC50-70		116	-	0	5.07	6.80	31.94	0.04	0.05	-	0.26
BCC75-70		97	-	0	6.35	9.72	38.26	0.04	0.08	-	0.22
BCC100-70		84	-	0	7.30	12.78	40.05	0.04	0.09	-	0.19
BCD25-30	0.35	189	137	2.07	4.13	3.89	10.50	0.03	0.03	0.72	0.42
BCD50-30		174	145	3.79	7.58	7.17	16.12	0.04	0.04	0.84	0.39
BCD75-30		129	-	4.21	8.42	8.43	15.84	0.03	0.05	-	0.29
BCD100-30		103	-	4.48	8.96	11.42	17.54	0.04	0.06	-	0.23
BCD25-50	0.61	151	-	1.64	3.29	4.66	19.13	0.03	0.03	-	0.34
BCD50-50		110	-	2.41	4.82	7.82	25.39	0.04	0.05	-	0.25
BCD75-50		98	-	3.21	6.42	10.92	27.83	0.04	0.05	-	0.22
BCD100-50		86	-	3.75	7.50	15.62	31.99	0.05	0.08	-	0.19
BCD25-70	0.86	134	-	1.46	2.92	5.01	28.49	0.03	0.04	-	0.30
BCD50-70		104	-	2.27	4.53	7.59	35.30	0.04	0.05	-	0.23
BCD75-70		86	-	2.80	5.59	10.63	40.21	0.04	0.06	-	0.19
BCD100-70		76	-	3.29	6.59	16.16	48.53	0.05	0.08	-	0.17

주) λ_c : 무차원세장비 $\left(\lambda_c=\frac{1}{\pi}\cdot\frac{L_k}{r}\cdot\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}\right)$, σ_u : 최대내력, σ_{loc} : 국부좌굴내력,

M_u1 : 편심거리와 최대내력에 의해 결정된 작은 쪽 단부모멘트,

M_u2 : 편심거리와 최대내력에 의해 결정된 큰 쪽 모멘트,

Δ_u : 최대내력시 축변위, δ_u: 최대내력시 횡변위, θ_u1 : 편심거리가 작은 쪽 최대모멘트시 단부회전각,

θ_u2 : 편심거리가 큰 쪽 최대모멘트시 단부회전각, $_s\sigma_u$: stub-column 최대내력

(-) : 부재좌굴로 인한 국부좌굴점 산정불가

Collection @ chosun

<표 3.4> 계속

시험체명	λ_c	σ_u (N/㎟)	σ_{loc} (N/㎟)	M_u1 (kN m)	M_u2 (kN m)	Δ_u (㎜)	δ_u (㎜)	θ_u1 (rad)	θ_u2 (rad)	σ_{loc}/σ_u	$\sigma_u/_s\sigma_u$
BCE25-30	0.35	267	220	2.91	5.83	3.89	8.23	0.01	0.03	0.83	0.59
BCE50-30		200	188	4.35	8.71	5.04	10.10	0.01	0.05	0.94	0.44
BCE75-30		166	162	5.42	10.85	5.82	10.06	0.00	0.05	0.98	0.37
BCE100-30		126	122	5.48	10.97	6.56	9.36	0.01	0.05	0.97	0.28
BCE25-50	0.61	208	-	2.27	4.53	4.05	12.24	0.01	0.03	-	0.46
BCE50-50		181	-	3.95	7.90	6.77	20.74	0.02	0.06	-	0.40
BCE75-50		126	93	4.12	8.23	7.99	18.39	0.01	0.07	0.74	0.28
BCE100-50		90	82	3.92	7.84	10.71	20.12	0.02	0.08	0.91	0.20
BCE25-70	0.866	176	-	1.91	3.83	4.25	16.96	0.01	0.04	-	0.39
BCE50-70		133	-	2.89	5.79	6.12	25.90	0.02	0.05	-	0.30
BCE75-70		123	-	4.04	8.07	8.91	30.84	0.02	0.07	-	0.27
BCE100-70		93	-	4.07	8.13	13.10	33.61	0.02	0.09	-	0.21

주) λ_c : 무차원세장비 $\left(\lambda_c=\frac{1}{\pi}\cdot\frac{L_k}{r}\cdot\sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}\right)$, σ_u : 최대내력, σ_{loc} : 국부좌굴내력,
M_u1 : 편심거리와 최대내력에 의해 결정된 작은 쪽 단부모멘트,
M_u2 : 편심거리와 최대내력에 의해 결정된 큰 쪽 모멘트,
Δ_u : 최대내력시 축변위, δ_u: 최대내력시 횡변위, θ_u1 : 편심거리가 작은 쪽 최대모멘트시 단부회전각,
θ_u2 : 편심거리가 큰 쪽 최대모멘트시 단부회전각, $_s\sigma_u$: stub-column 최대내력
(-) : 부재좌굴로 인한 국부좌굴점 산정불가

3.2.2.1 최대내력 및 모멘트

보-기둥의 최대내력은 실험에 얻어진 보-기둥이 견딜 수 있는 최대하중에 의해 결정되는 것으로 하며, 편심거리와 최대하중에 의해 단부모멘트를 산정하였다.

(1) 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥

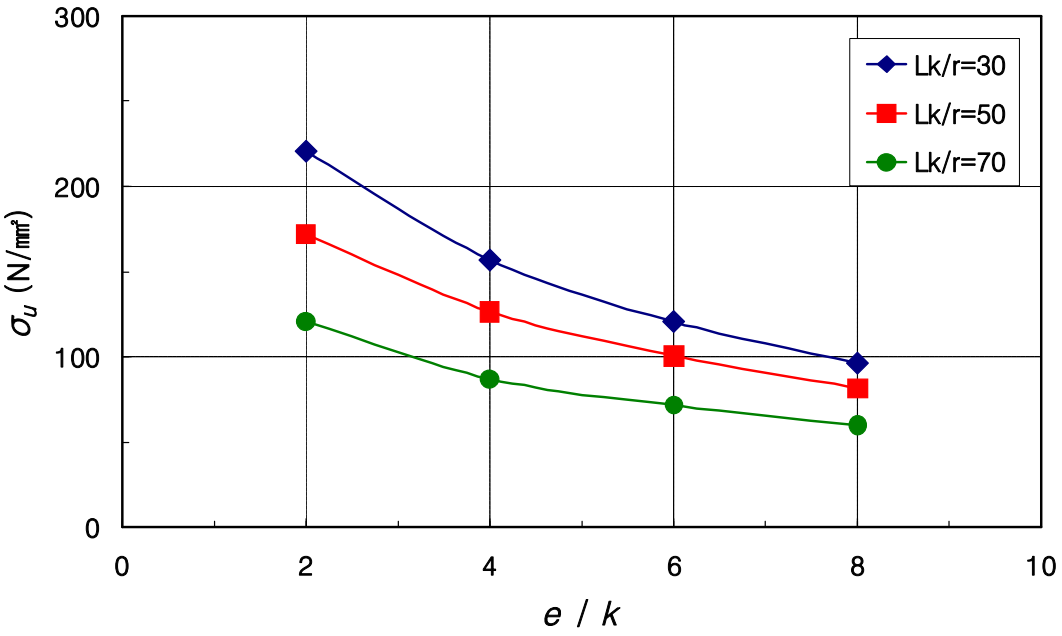
보-기둥의 최대내력은 세장비와 편심비가 증가하면서 내력은 감소했고, 원형강관의 최대내력이 가장 크게 나타난 시험체는 세장비 30에 편심비가 2인 BCA25-30 시험체가 221N/㎟로 가장 높은 값을 보였고, 세장비가 70에 편심비가 8인 BCA100-70 시험체가 가장 낮은 60N/㎟의 결과 값을 보였다.

양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 최대내력은 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하현상이 뚜렷하게 나타났다.

Collection @ chosun

[그림 3.7]은 편심비에 따라 보-기둥의 최대내력을 나타낸 곡선이다.

각 세장비의 시험체 모두 편심비가 증가할수록 초기는 급격한 내력저하를 보이다 점차 완만한 저하를 보이고 있다. 세장비 30에 비해 세장비 50은 77.89~84.58%의 내력값을 보이고, 세장비 70은 54.85~62.16%의 내력값으로 편심비가 증가할수록 점차 저하비율이 감소했다.

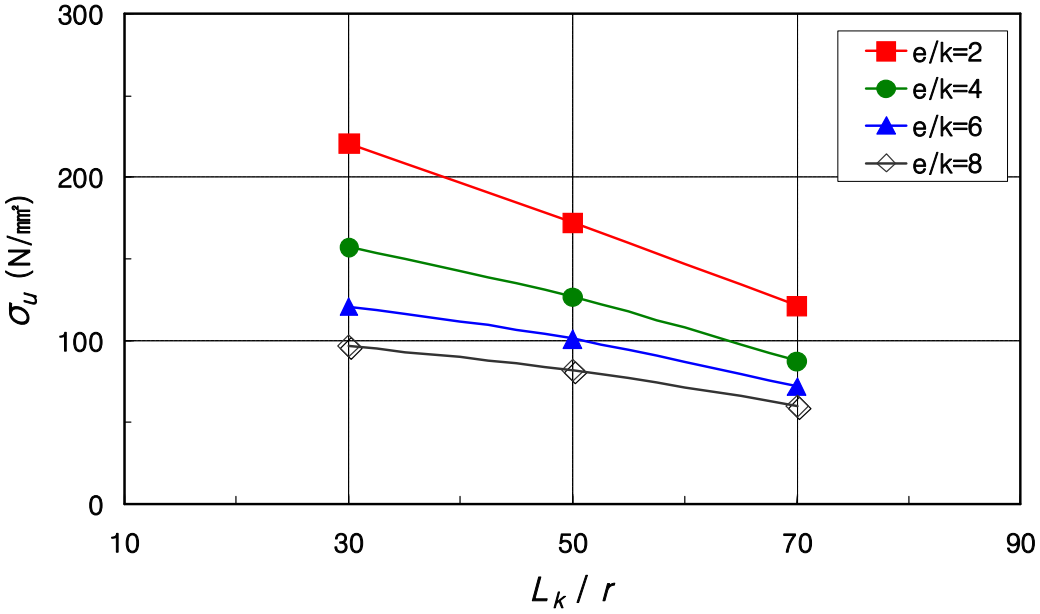


[그림 3.7] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력

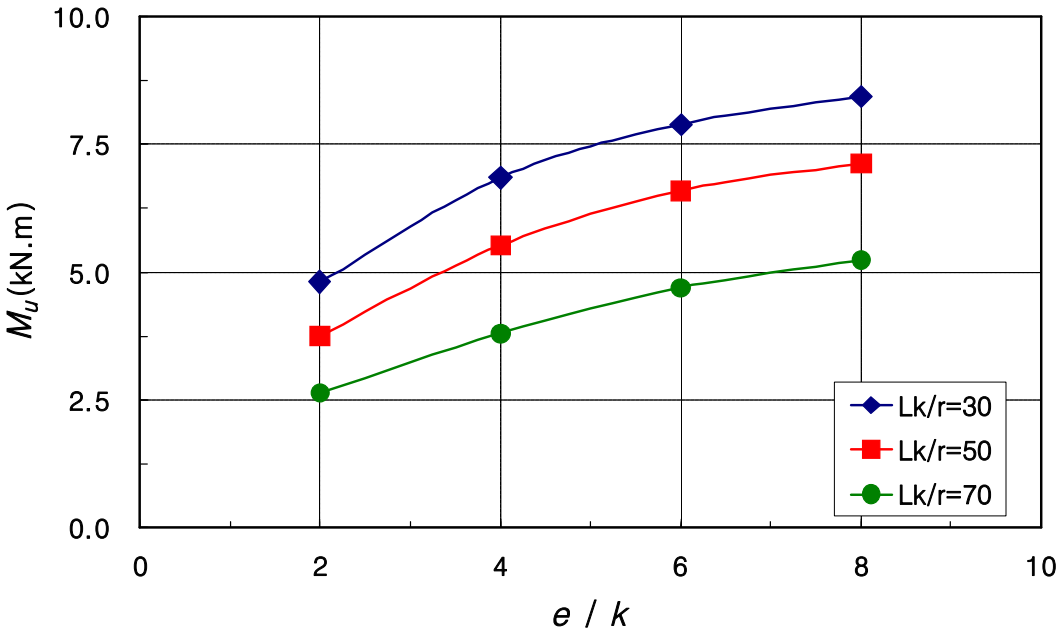
[그림 3.8]은 세장비의 변화에 따라 각 편심비의 최대내력을 비교한 곡선으로서 각 편심비 모두 세장비가 증가할수록 내력저하현상을 보이고 있을 뿐만 아니라, 편심비가 커질수록 최대내력은 작게 나타나나 세장비 증가에 따른 내력저하는 점점 완만해짐을 알 수 있다. 이는 편심비의 증가에 따른 기둥의 최대내력이 압축력보다는 휨의 영향이 상대적으로 커지기 때문으로 사료된다.

[그림 3.9]는 편심거리와 최대내력에 의해 구해지는 최대단부모멘트를 편심비에 따라 나타낸 곡선으로, 편심비가 증가할수록 단부모멘트 또한 증가하며, 세장비가 증가할수록 단부모멘트는 감소한다.

Collection @ chosun



[그림 3.8] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력



[그림 3.9] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트

Collection @ chosun

이상에서 양단편심 대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 각 편심비 모두 세장비가 증가할수록 내력저하현상을 보이고 있을 뿐만 아니라 편심비가 커질수록 최대내력은 작게 나타났으나, 세장비 증가에 따른 내력저하는 점점 완만하게 나타나고 있다. 그러나 보-기둥 단부모멘트는 세장비가 증가할수록 작아지고, 편심비가 증가할수록 완만한 증가를 보였다.

국부좌굴내력은 최대내력이후 변위의 증가와 함께 급격한 내력저하의 시작점으로 산정하였으며, 세장비가 증가할수록 국부좌굴 발생시점은 최대내력이후 변위가 증가하며 발생하였다. 양단편심 대칭 단일곡률 원형강관 보-기둥의 국부좌굴내력은 세장비30 BCA25-30 시험체가 170N/㎟로 가장 높은 값을 보였고, BCA100-30 시험체가 가장 낮은 81N/㎟의 결과 값을 보였다. 그 외 세장비50과 70 시험체는 부재좌굴에 의해 국부좌굴이 발생하지 않았다. 이는 스테인리스 원형강관의 연성적인 거동에 의해 세장비의 증가에 따라 국부좌굴이 발생하지 않은 결과로 판단된다.

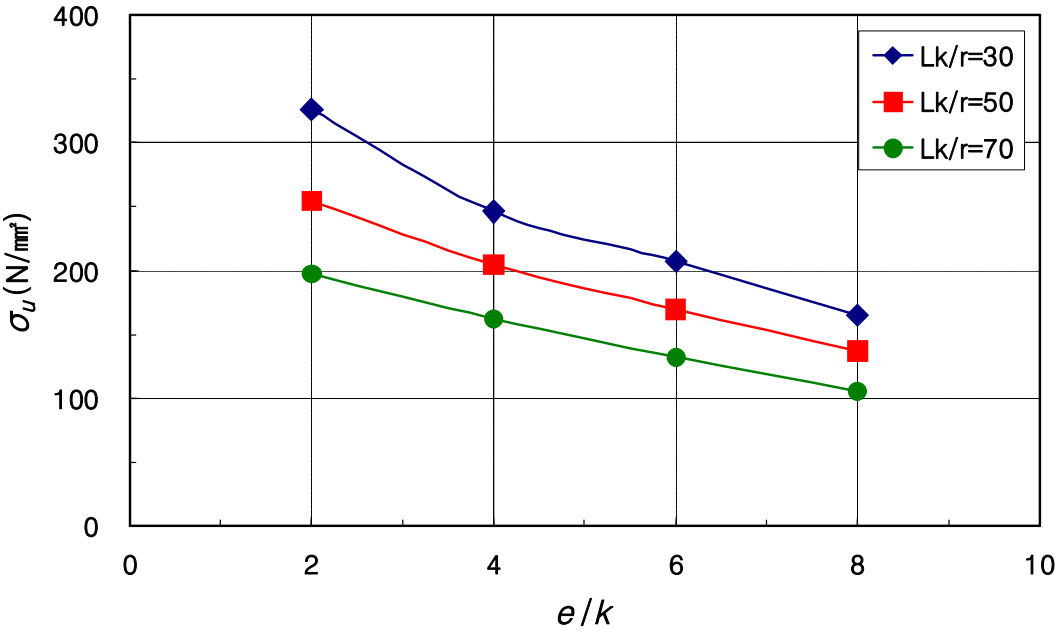
(2) 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥

양단편심 대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관보-기둥의 최대내력은 세장비 30에 편심비가 2인 BCB25-30 시험체가 326N/㎟로 가장 높은 값을 보였고, 세장비가 70에 편심비가 8인 BCB100-70 시험체가 가장 낮은 106N/㎟의 결과 값을 보였다. 위의 결과 값에서 보-기둥의 최대내력은 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하현상이 뚜렷하게 나타났다.

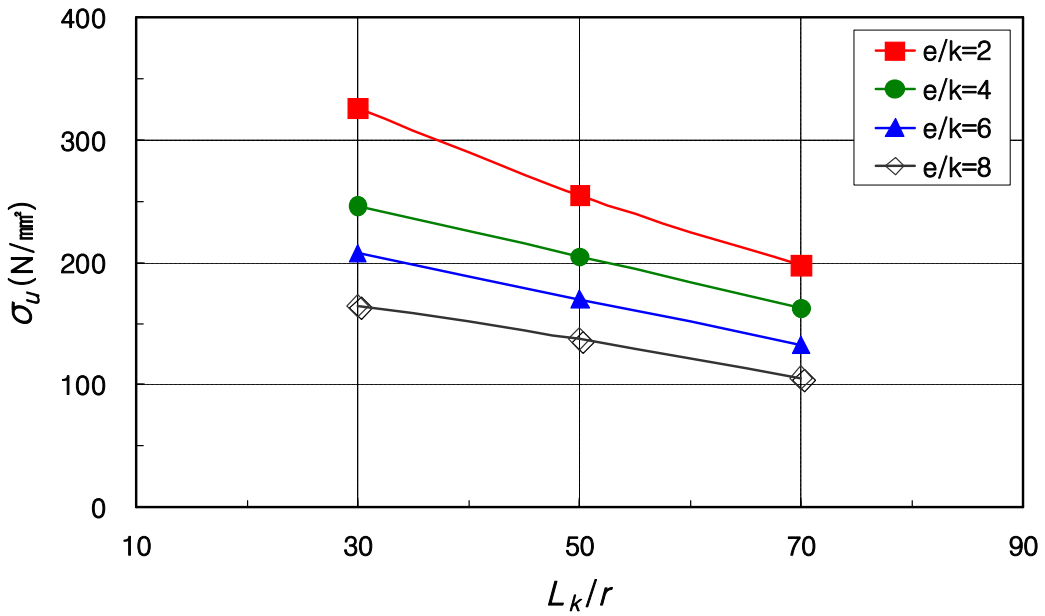
[그림 3.10]은 세장비별로 편심비 변화에 따른 최대내력을 나타내는 것으로 세장비30과 50의 시험체는 편심비가 증가할수록 내력저하를 보이고 있으나, 세장비70은 낮은 편심비에서는 거의 같은 값을 보이다 편심비가 증가할수록 내력저하를 보이고 있다. 세장비30 시험체에 비해 세장비50 시험체는 86.12~93.78%의 내력값을 보이고, 세장비70 시험체는 74.40~81.37%의 내력값으로 편심비가 증가할수록 점차 저하비율이 감소하는 것으로 나타났다.

[그림 3.11]은 세장비의 변화에 따라 각 편심비의 최대내력을 비교한 곡선으로서 각 편심비 모두 세장비가 증가할수록 내력저하현상을 보이고 있을 뿐만 아니라, 편심비가 커질수록 최대내력저하 또한 일정한 저하율로 나타났다.

dCollection @ chosun



[그림 3.10] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력

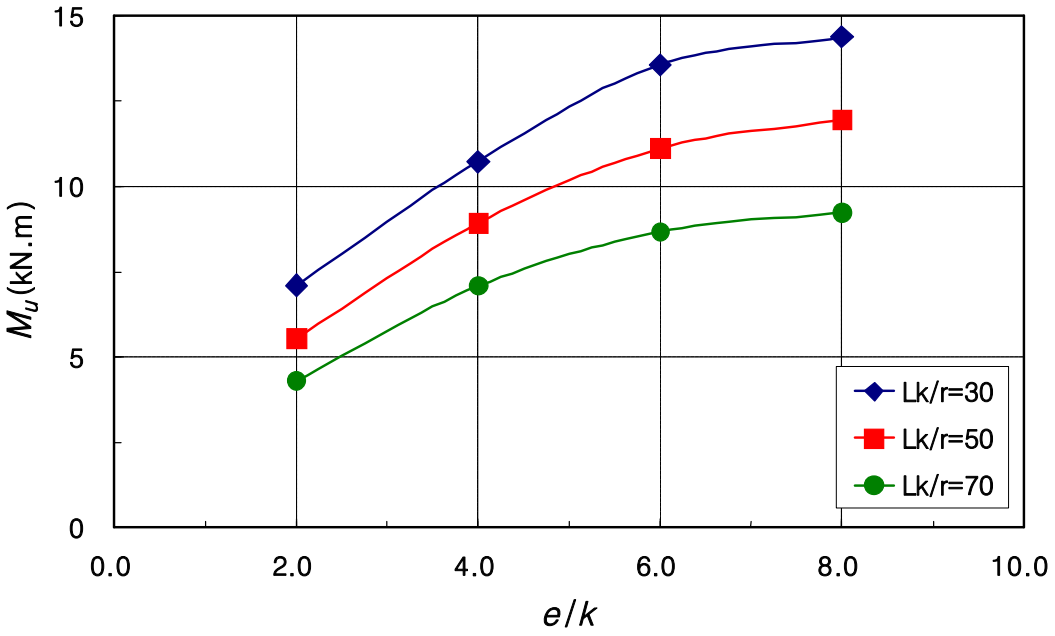


[그림 3.11] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력

Collection @ chosun

최대단부모멘트는 편심거리와 최대하중에 의해 산정하였으며, 편심비가 증가할수록 모멘트는 증가하고, 세장비가 커질수록 감소함을 나타낸다.

[그림 3.12]는 편심비의 증가에 따른 최대단부모멘트의 변화를 나타낸 것으로서 세장비의 증가에 따른 모멘트의 감소는 세장비 30에 비해 세장비 50은 78.10~83.20%, 세장비 70은 60.55~65.99%로 대부분 편심비의 증가에 따른 감소폭이 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.



[그림 3.12] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트

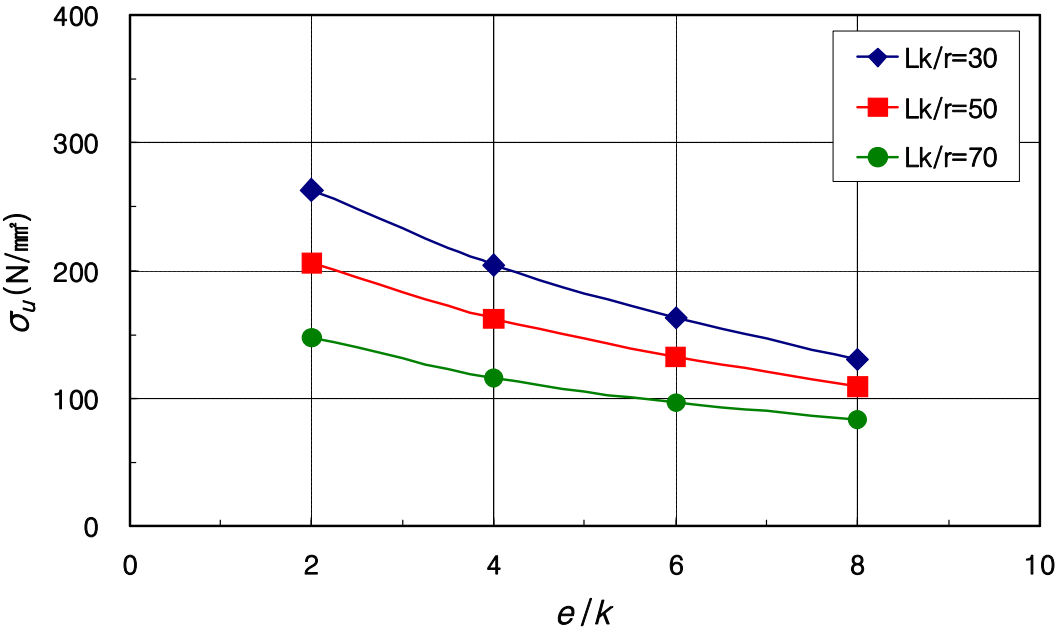
국부좌굴내력은 세장비70의 편심비 2, 4, 6인 시험체는 부재좌굴로 국부좌굴이 발생하지 않았다. 국부좌굴이 발생한 시험체는 최대내력이후 발생하였으며, 보-기둥의 국부좌굴내력은 BCC25-30 시험체가 305N/㎟로 가장 높은 값을 보였고, BCC100-70 시험체가 가장 낮은 102N/㎟의 결과 값을 보였다. 이 결과 값은 최대내력의 평균 89.20%로 나타났다.

(3) 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥

일단중심 타단편심 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 최대내력은 세장비 30

Collection @ chosun

에 편심비가 2인 BCC25-30 시험체가 263N/㎟로 가장 높은 값을 보였고, 세장비가 70에 편심비가 8인 BCC100-70 시험체가 가장 낮은 84N/㎟의 결과 값을 보였다. 보-기둥의 최대내력은 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하현상이 뚜렷하게 나타났다.



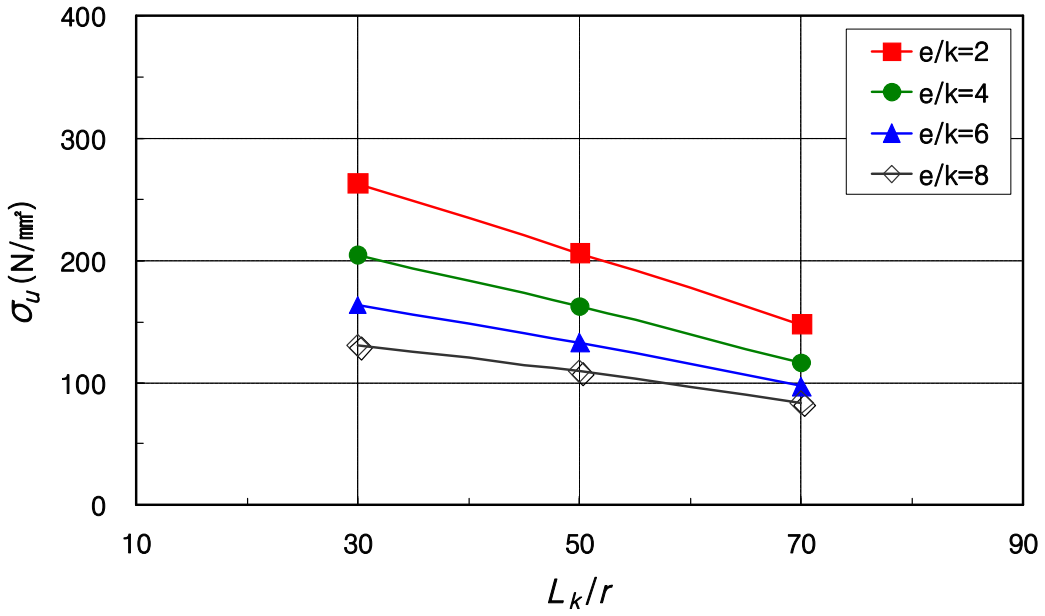
[그림 3.13] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력

[그림 3.13]은 세장비별로 편심비 변화에 따른 최대내력을 나타내는 것으로 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하를 보이고 있으며, 편심비의 증가에 따라 점점 완만한 내력저하를 보이고 있다. 세장비30 시험체에 비해 세장비50 시험체는 78.32~83.67%의 내력값을 보이고, 세장비70 시험체는 56.21~64.17%의 내력값을 보였다.

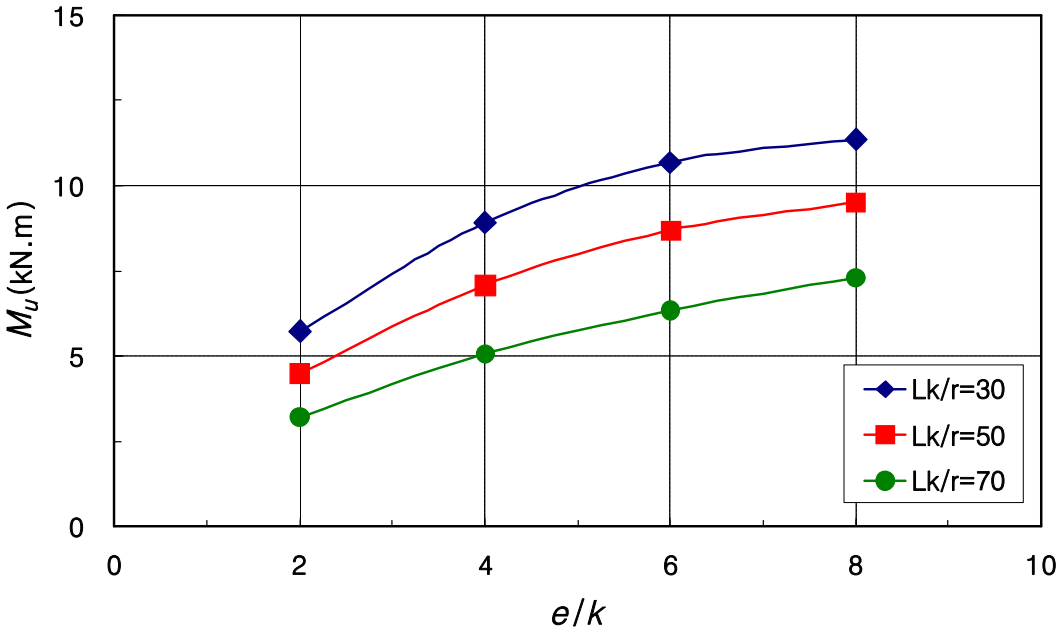
[그림 3.14]는 세장비의 변화에 따라 각 편심비의 최대내력을 비교한 곡선으로서 각 편심비 모두 세장비가 증가할수록 내력저하현상을 보이고 있을 뿐만 아니라, 편심비가 커질수록 최대내력은 작게 나타남을 알 수 있다.

[그림 3.15]는 편심비의 증가에 따른 최대단부모멘트의 변화를 나타낸 것으로서 최대단부모멘트는 편심비가 증가할수록 단부모멘트는 증가하고, 세장비가 커질수록 감소함을 나타낸다.

Collection @ chosun



[그림 3.14] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력



[그림 3.15] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대모멘트

일단중심 타단편심 단일곡률 원형강관 보-기둥의 국부좌굴은 세장비30 시험체의 경

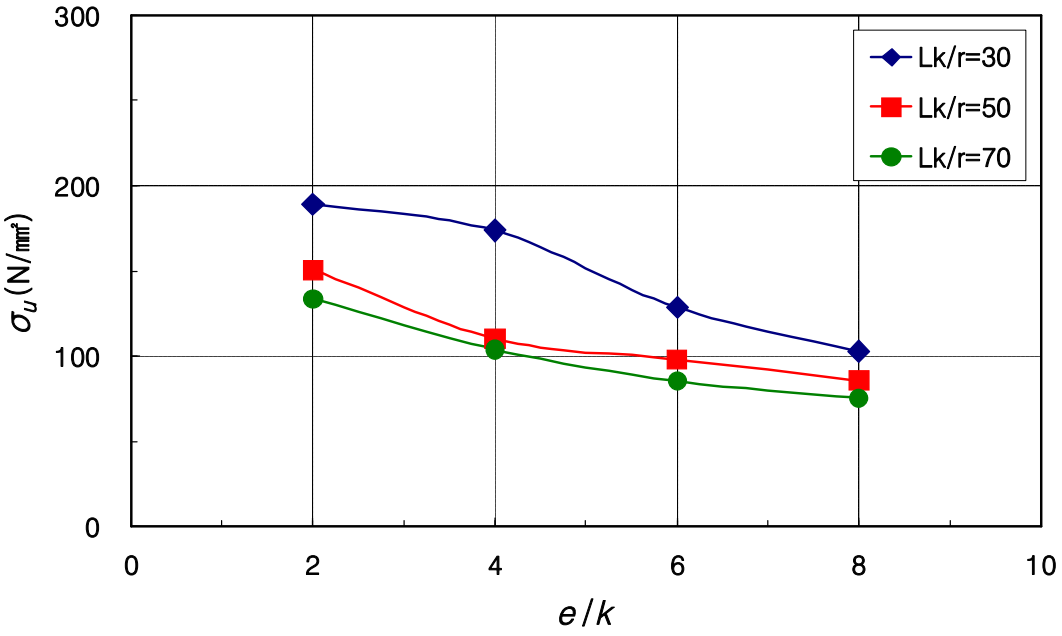
Collection @ chosun

우만 나타났으며, 국부좌굴내력은 BCC25-30 시험체가 197N/㎟로 가장 높은 값을 보였고, BCC100-30 시험체가 가장 낮은 125N/㎟의 결과 값을 보였다. 그 외 세장비50과 70 시험체는 부재좌굴에 의해 국부좌굴이 발생하지 않았다.

(4) 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥

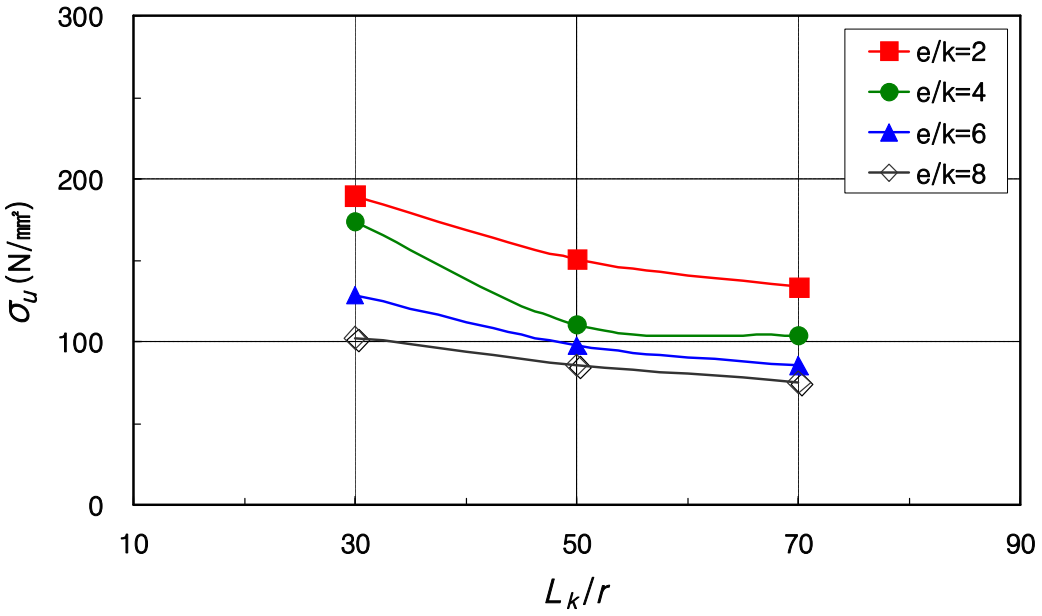
양단편심 비대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 최대내력은 세장비 30에 편심비가 2인 BCD25-30 시험체가 189N/㎟로 가장 높은 값을 보였고, 세장비가 70에 편심비가 8인 BCD25-30시험체가 가장 낮은 76N/㎟의 결과 값을 보였다. 보-기둥의 최대내력은 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하현상이 뚜렷하게 나타났다.

[그림 3.16]은 세장비별로 편심비 변화에 따른 최대내력을 나타내는 것으로 각 세장비의 시험체 모두 편심비가 증가할수록 내력저하를 보이고 있다. 세장비30 시험체에 비해 세장비50 시험체는 63.54~83.67%의 내력값을 보이고, 세장비70 시험체는 59.79~73.50%의 내력값으로 감소했다. 또한 세장비50과 70 시험체의 최대내력은 큰 차이를 보이지 않고 있다.

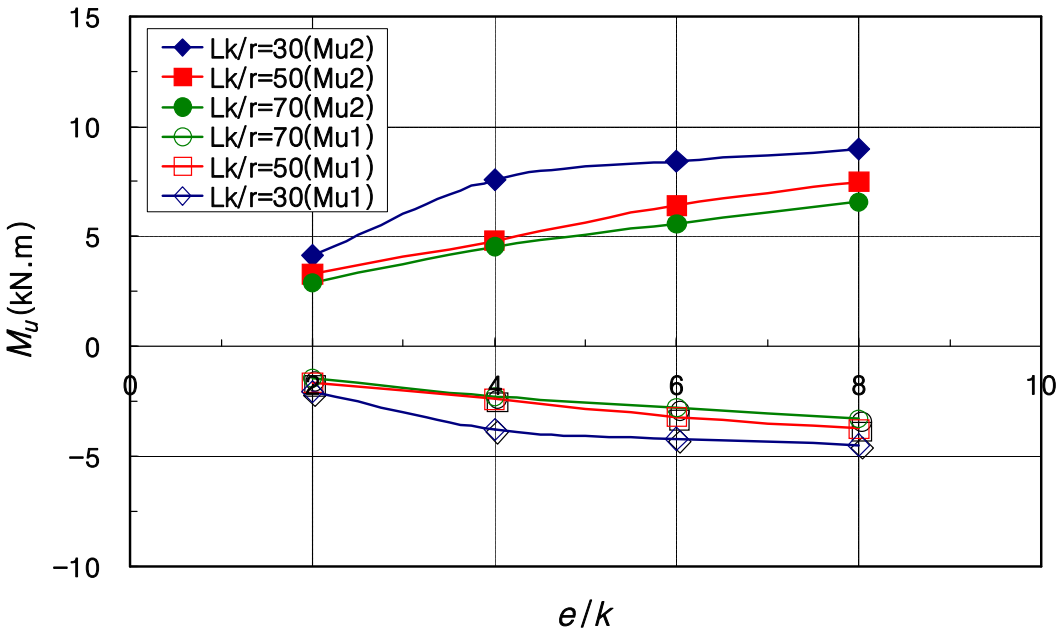


[그림 3.16] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력

Collection @ chosun



[그림 3.17] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력



[그림 3.18] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트

Collection @ chosun

[그림 3.17]은 세장비의 변화에 따라 각 편심비의 최대내력을 비교한 곡선으로서 각 편심비 모두 세장비가 증가할수록 내력저하현상을 보이고 있을 뿐만 아니라, 편심비가 커질수록 최대내력은 작게 나타나나 세장비 증가에 따른 내력저하는 점점 완만해짐을 알 수 있다.

[그림 3.18]은 편심비의 증가에 따른 최대단부모멘트의 변화를 나타낸 것으로서 단부모멘트가 비대칭이므로 각각 표현하였으며, 세장비의 증가에 따른 최대단부모멘트의 감소하나, 편심비의 증가에 따라 단부모멘트는 증가함은 점차 완만해짐을 알 수 있다.

양단편심 비대칭 단일곡률 원형강관 보-기둥의 국부좌굴내력은 대부분의 시험체는 부재좌굴에 의해 국부좌굴이 발생하지 않았으나, BCD25-30 시험체가 197N/㎟, BCD50-30 시험체가 145N/㎟의 국부좌굴내력을 보였다.

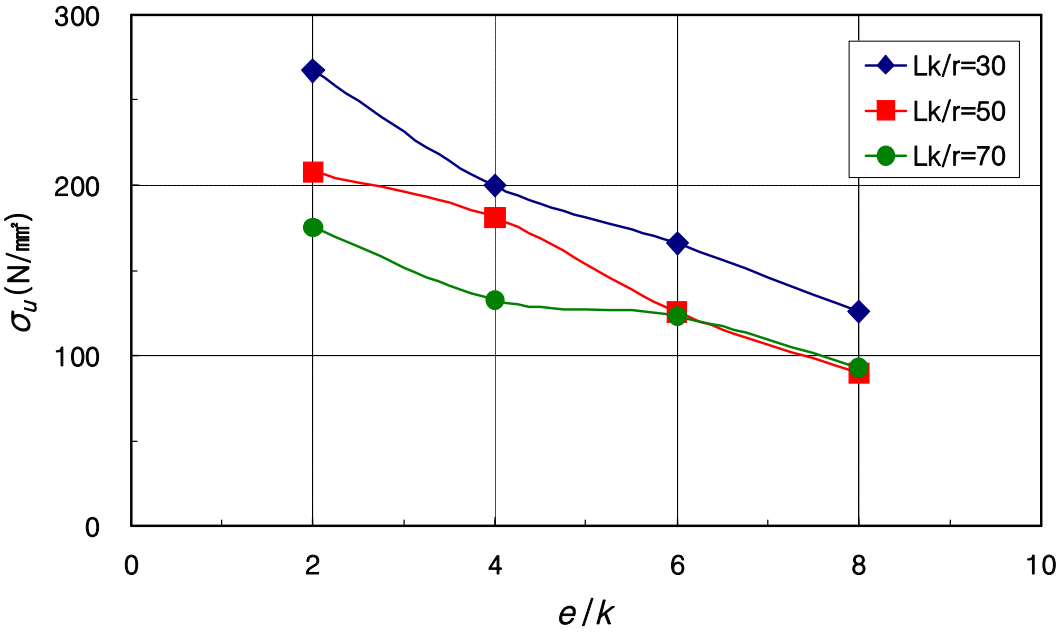
(5) 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥

양단편심 비대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 최대내력은 세장비 30에 편심비가 2인 BCD25-30 시험체가 267N/㎟로 가장 높은 값을 보였고, 세장비가 70에 편심비가 8인 BCD100-70 시험체가 가장 낮은 93N/㎟의 결과 값을 보였다. 보-기둥의 최대내력은 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하현상이 뚜렷하게 나타났다.

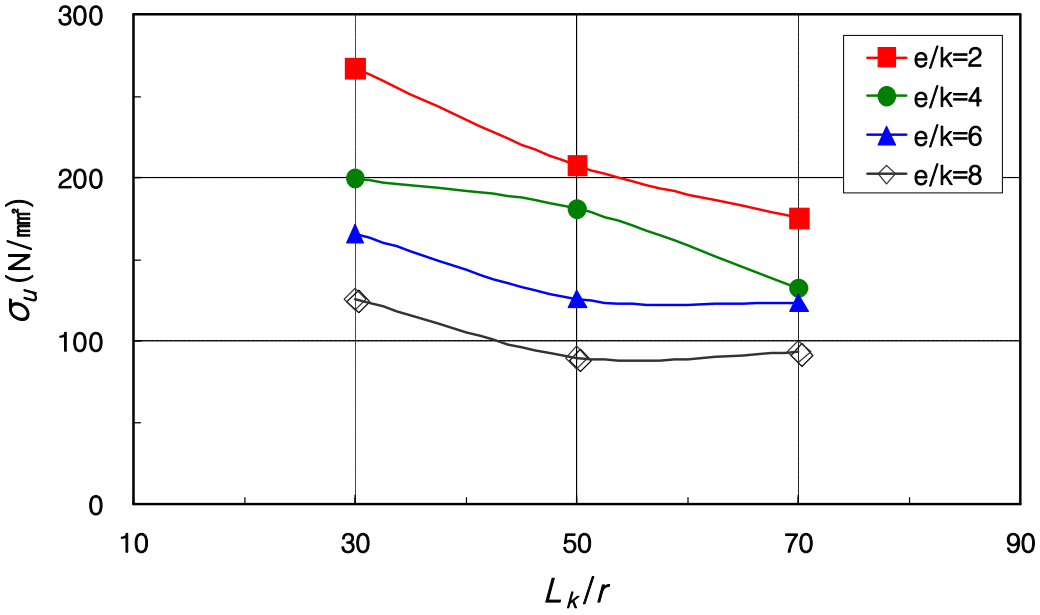
[그림 3.19]는 세장비별로 편심비 변화에 따른 최대내력을 나타내는 것으로 각 세장비의 시험체 모두 편심비가 증가할수록 내력저하를 보이고 있다. 세장비30 시험체에 비해 세장비50 시험체는 71.54~90.71%의 내력값을 보이고, 세장비70 시험체는 65.69~74.39%의 내력값으로 감소했다.

[그림 3.20]은 세장비의 변화에 따라 각 편심비의 최대내력을 비교한 곡선으로서 각 편심비 모두 세장비가 증가할수록 내력저하현상을 보이고 있을 뿐만 아니라, 편심비가 커질수록 최대내력은 작게 나타나고, 세장비 증가에 따른 내력저하는 편심비에 따라 차이가 있으나 편심비6과 8은 세장비50과 70은 거의 같은 값을 나타내고 있다.

Collection @ chosun



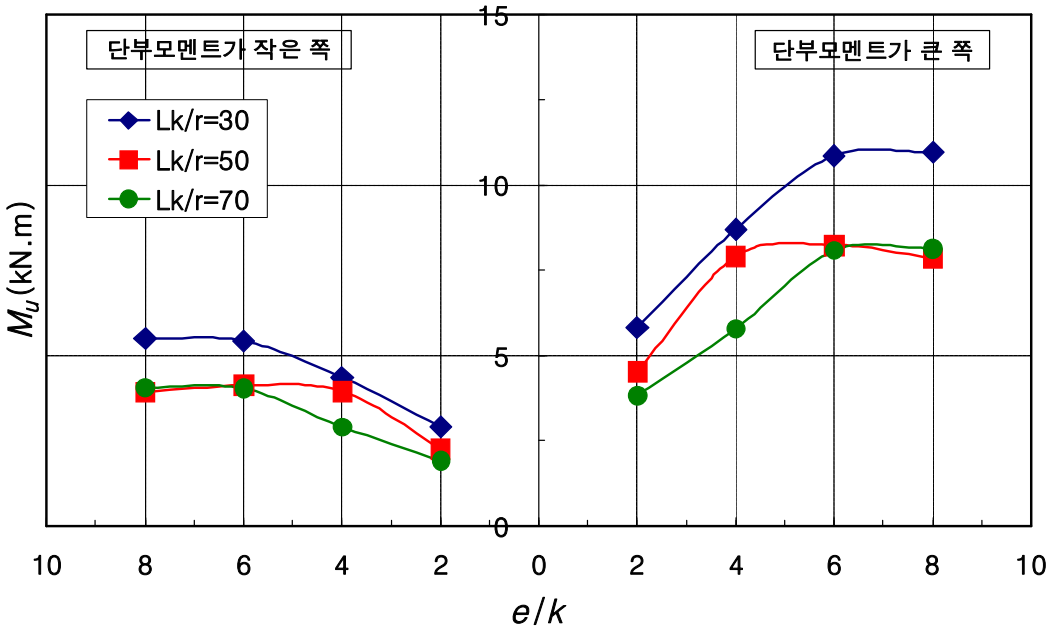
[그림 3.19] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력



[그림 3.20] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 세장비에 따른 최대내력

Collection @ chosun

[그림 3.21]은 편심비의 증가에 따른 최대모멘트의 변화를 나타낸 것으로서 단부모멘트가 큰 쪽과 작은 쪽으로 나타냈으며, 세장비의 증가에 따른 단부모멘트의 감소하고 있으나, 세장비50과 70의 편심비6과 8 시험체는 거의 같은 값을 보이고 있다. 세장비 30에 비해 세장비 50은 81.61~101.93%, 세장비 70은 65.87~89.71%이며, 대부분 편심비의 증가에 따른 모멘트는 증가함을 알 수 있다.



[그림 3.21] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트

양단편심 비대칭 이중곡률 원형강관 보-기둥의 국부좌굴은 세장비30 시험체 모두와 BCE75-50, BCE100-50 시험체에서 발생하였으며, 그 외 시험체에서는 발생하지 않았다. 국부좌굴내력은 BCE25-30 시험체가 220N/㎟로 가장 높은 값을 보였고, BCE100-50 시험체가 가장 낮은 82N/㎟의 결과 값을 보였다. 이 결과 값은 최대내력의 73.83~97.56%이며, 평균적으로 최대내력의 89.36% 정도에서 국부좌굴이 발생한 것으로 나타났다.

3.2.2.2 내력-변위 관계

스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 내력-변위 곡선은 축변위(Δ)와 횡변위(δ)를 기둥의 유효좌굴길이(L_K)로 무차원화 하여 나타냈다.

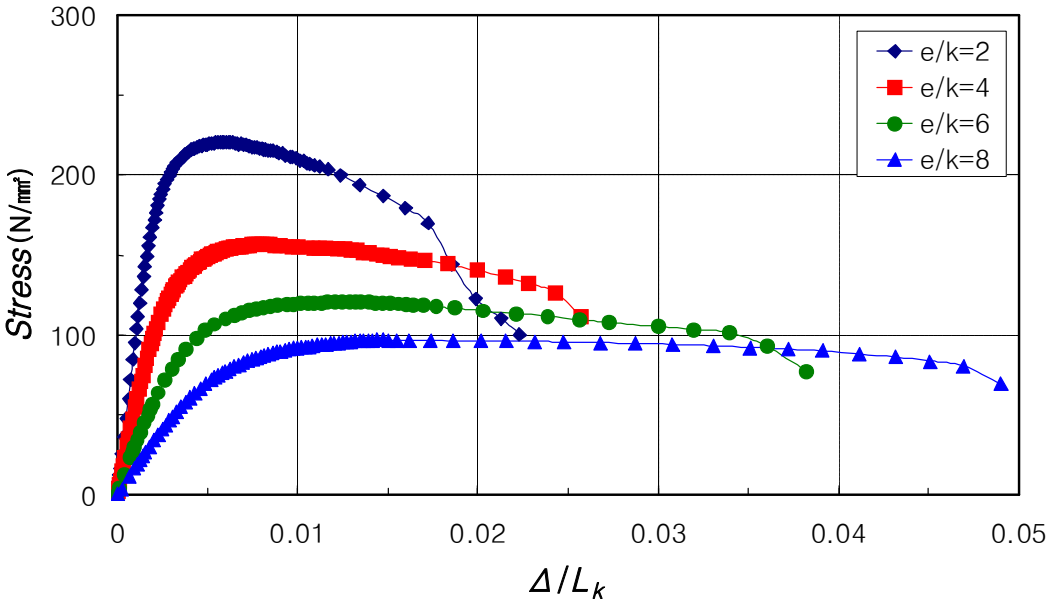
Collection @ chosun

(1) 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥

[그림 3.22]는 양단편심 대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 편심비에 대한 내력-축변위 관계곡선으로서 각각의 세장비에 대해 표현하였는데, 편심비가 증가할수록 최대내력은 감소하는 반면 축변위는 최대내력 이후 완만한 내력저하와 함체 꾸준히 증가하는 현상을 보였다.

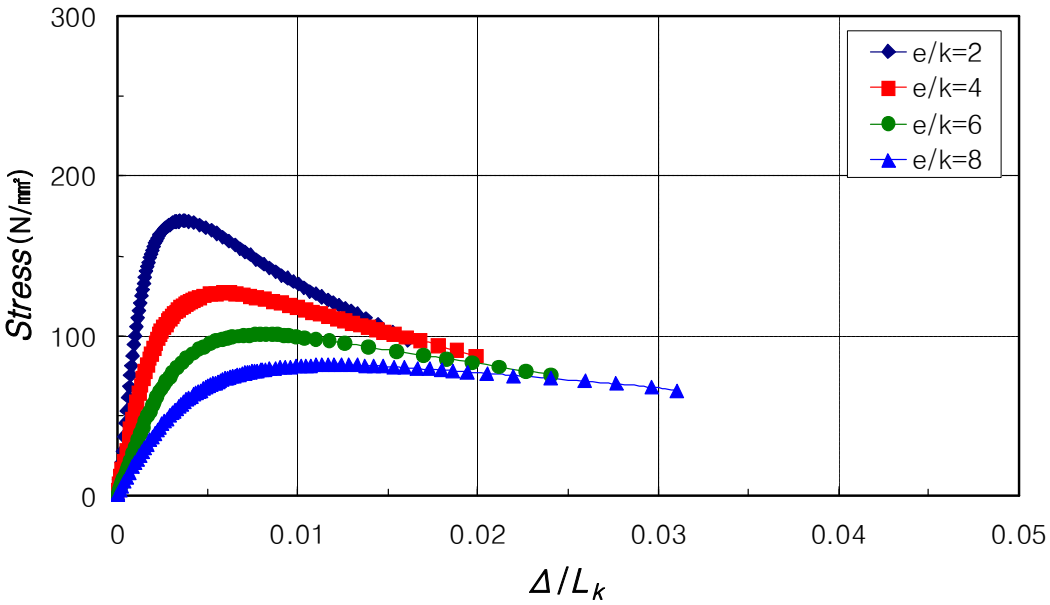
[그림 3.23]은 양단편심 대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 편심비에 따른 최대내력시 축변위의 관계를 나타낸 것으로서 편심비가 증가할수록 함께 축변위가 증가하고 있고, 세장비의 증가에 따라 내력과 축변위의 감소를 보이고 있다. 세장비30 시험체에 비해 세장비50 시험체는 59.06~81.84%, 세장비70 시험체는 43.89~58.10%의 축변위 값을 보이고 있다.

[그림 3.24]는 양단편심 대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 편심비에 대한 내력-횡변위 관계곡선으로서 각각의 세장비에 대해 표현하였는데, 편심비가 증가할수록 최대내력은 감소하는 반면 횡변위는 크게 증가하는 현상을 보였다.

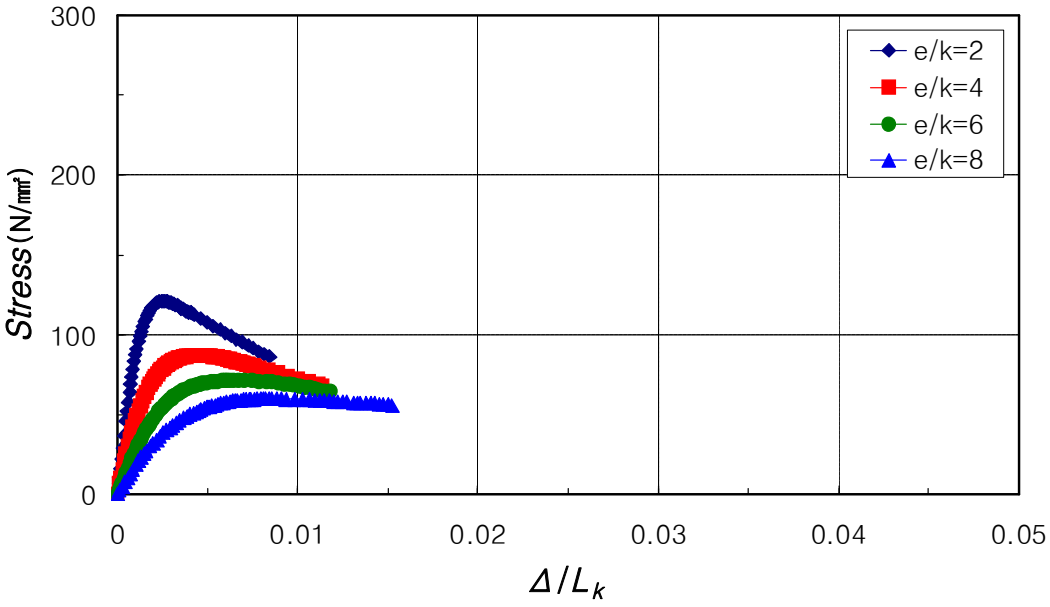


(a) 세장비 30 시험체

Collection @ chosun



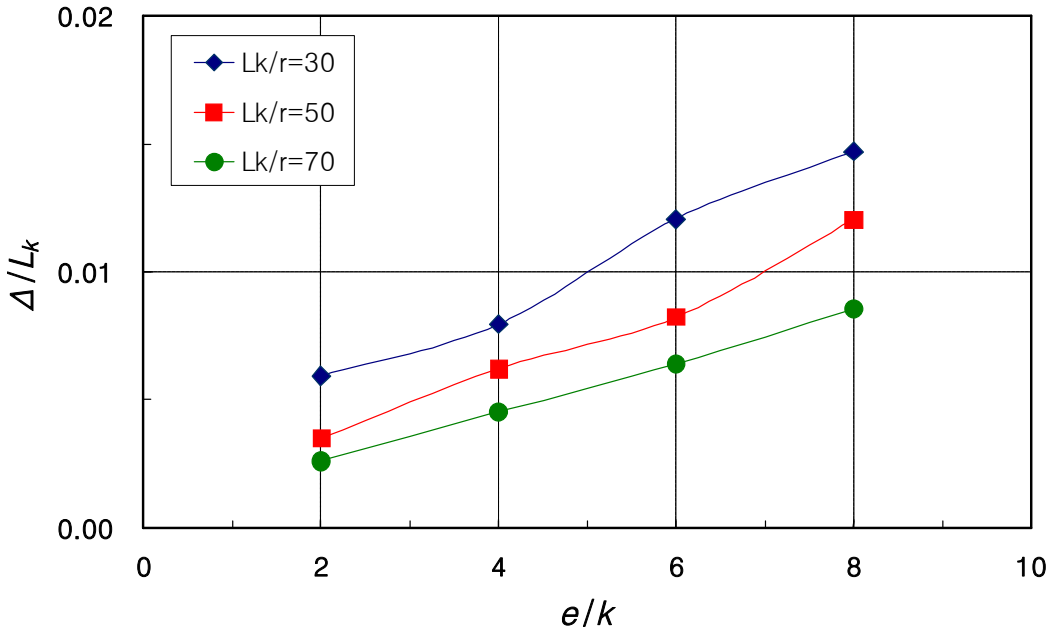
(b) 세장비 50 시험체



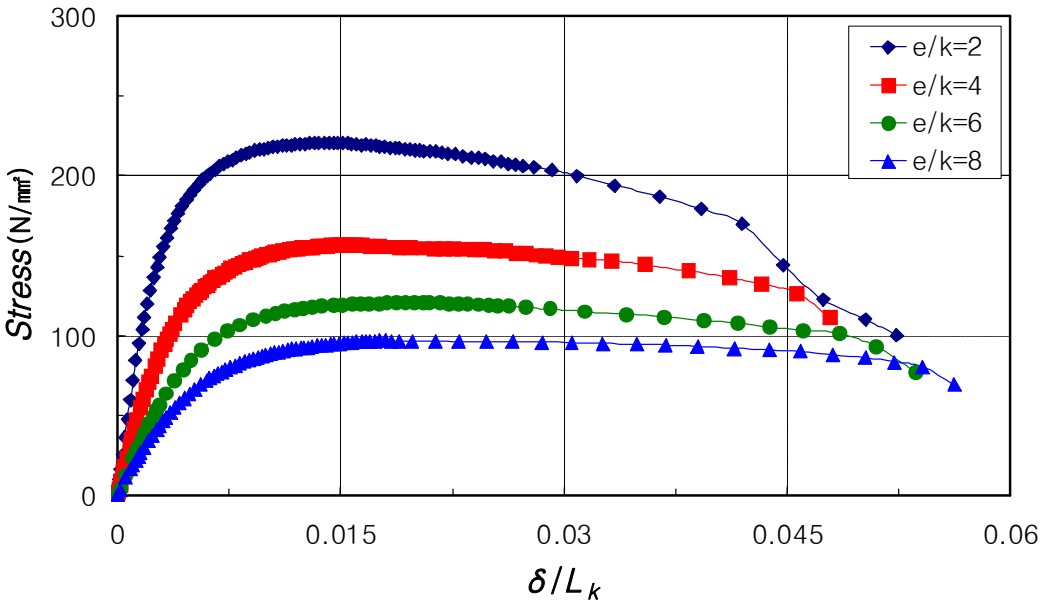
(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.22] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선

Collection @ chosun

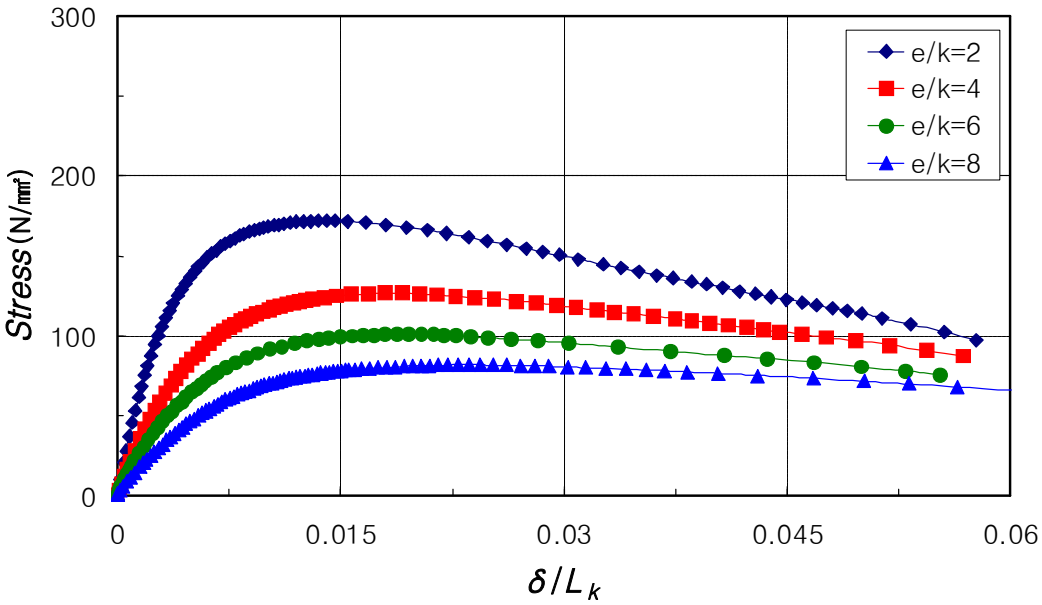


[그림 3.23] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 축변위

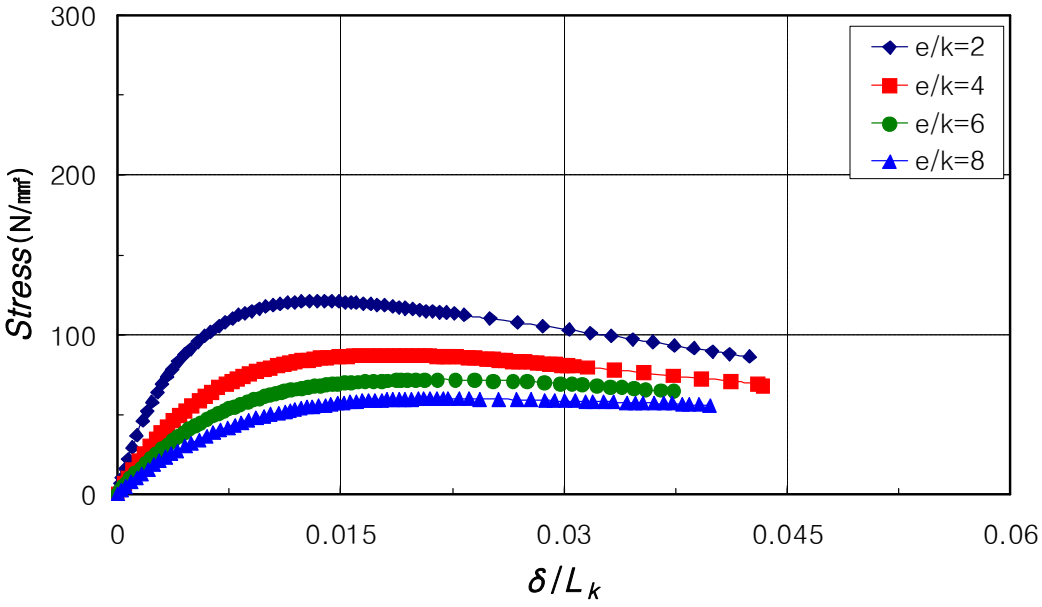


(a) 세장비 30 시험체

Collection @ chosun



(b) 세장비 50 시험체

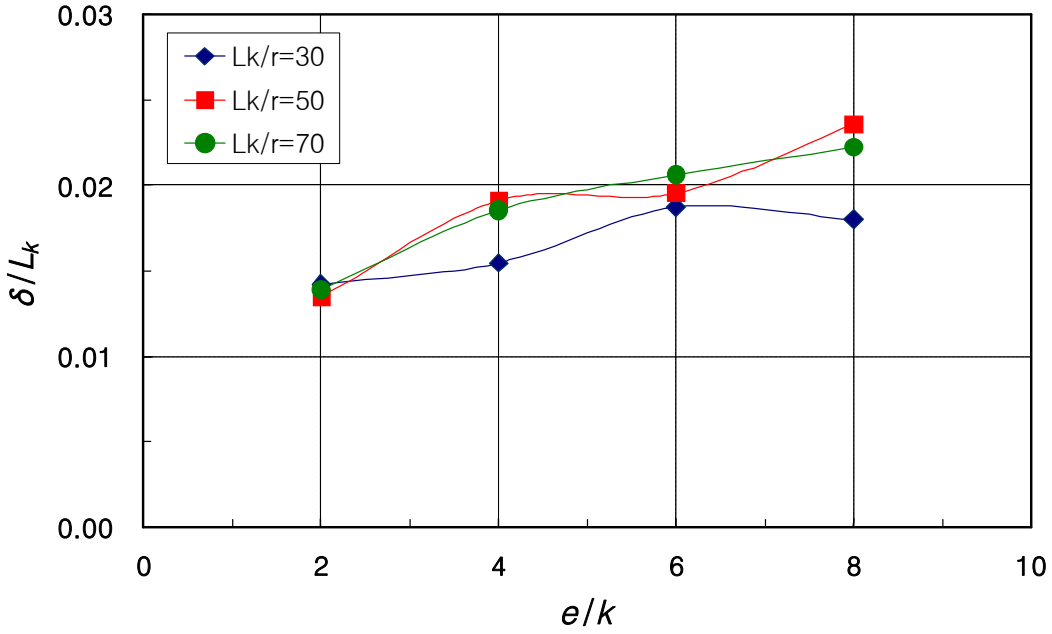


(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.24] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선

Collection @ chosun

[그림 3.25]는 양단편심 대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위의 관계를 나타낸 것으로서 편심비가 증가할수록 횡변위가 점차 증가하고 있으나, 세장비30의 경우는 다소 낮은 반면 세장비50과 70은 거의 같은 곡선을 보이고 있다. 이는 세장비의 증가보다는 편심비의 증가가 양단편심 대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 횡변위에 큰 영향을 주는 것으로 보여진다.



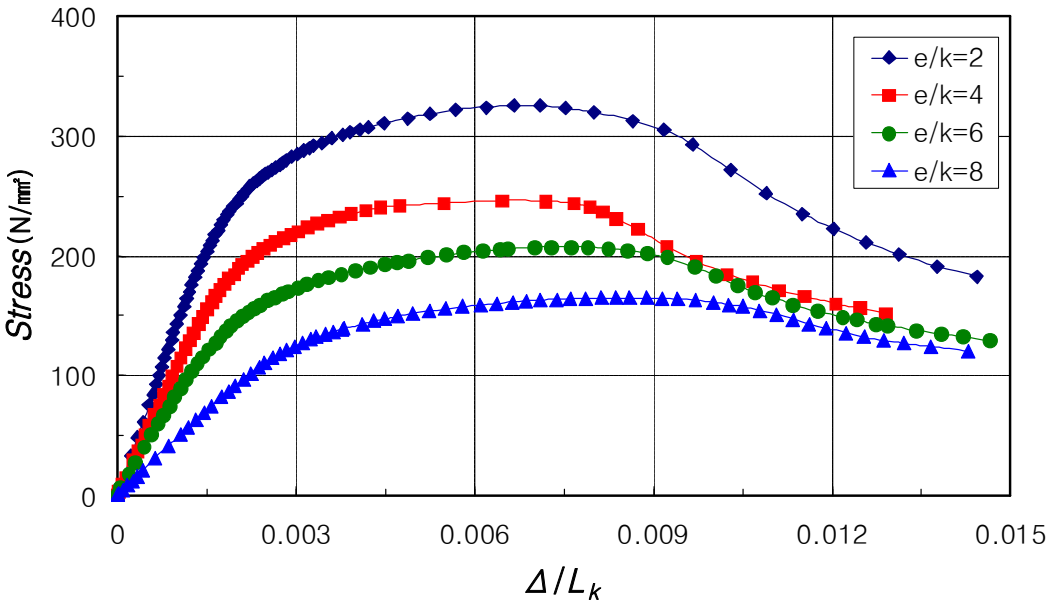
[그림 3.25] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위

(2) 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥

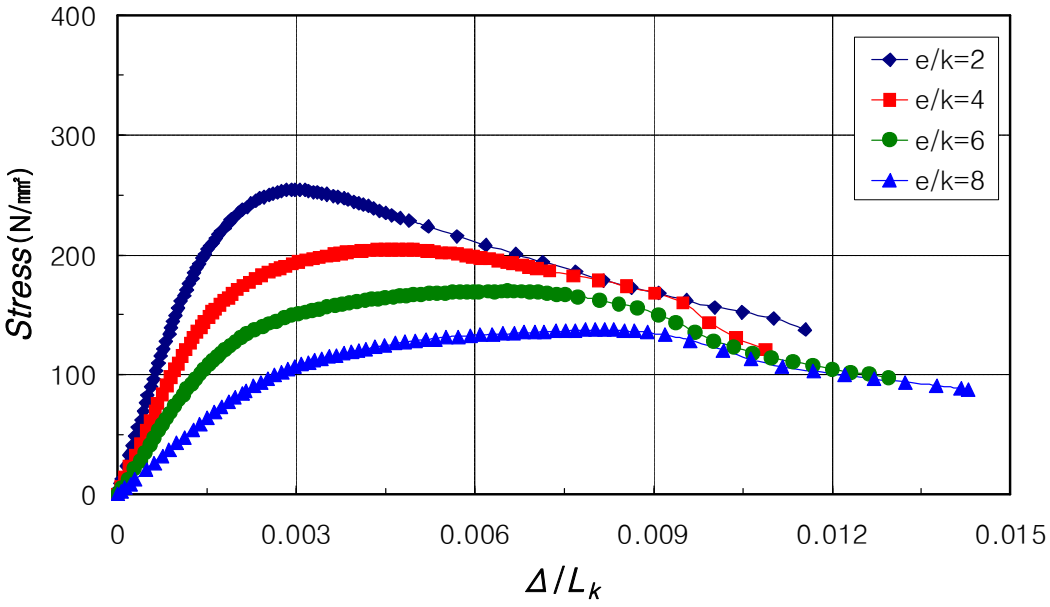
[그림 3.26]은 양단편심 대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 편심비에 따른 내력-축변위 곡선으로서 각각의 세장비에 대해 표현하였으며, 각 세장비에 대해 편심비가 증가할수록 내력은 감소하고, 축변위는 증가하는 추세를 보이고 있음을 알 수 있다.

[그림 3.27]은 양단편심 대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 편심비에 따른 최대내력시 축변위의 관계를 나타낸 것으로서 편심비가 증가할수록 축변위가 증가하고 있고, 최대내력시 세장비의 증가에 따라 축변위는 세장비30에 비해 세장비50은 44.94~93.65%, 세장비70은 31.41~80.83%의 값을 보이는 것으로 나타났다.

Collection @ chosun

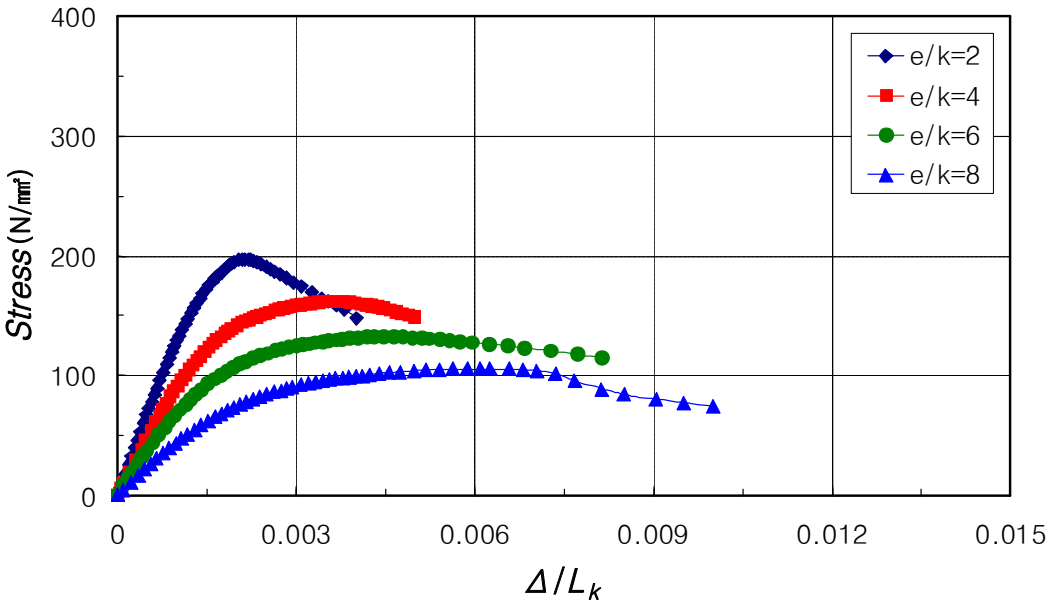


(a) 세장비 30 시험체



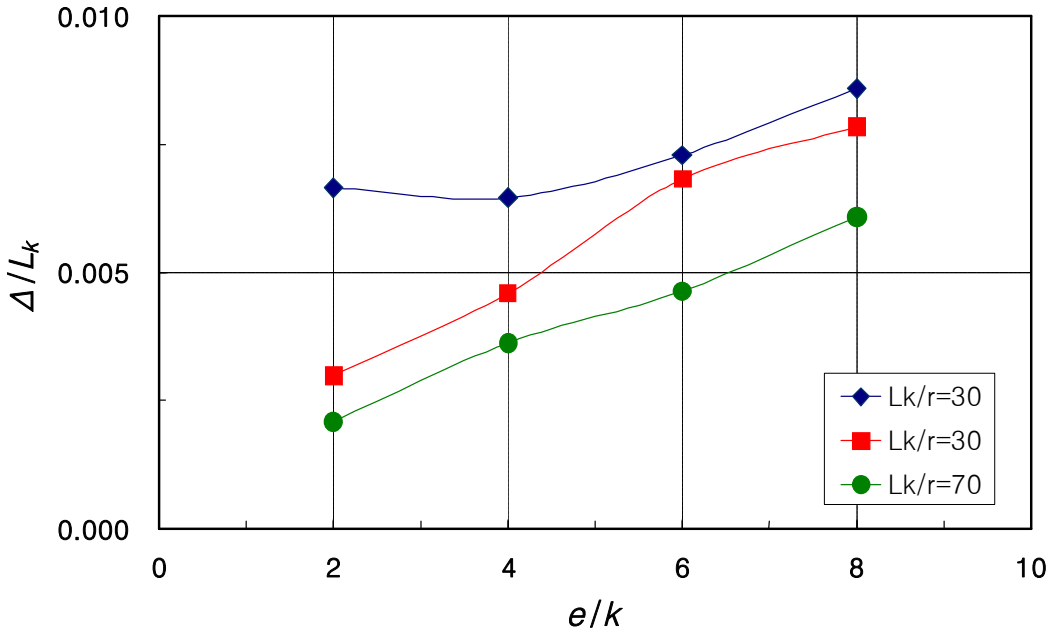
(b) 세장비 50 시험체

Collection @ chosun



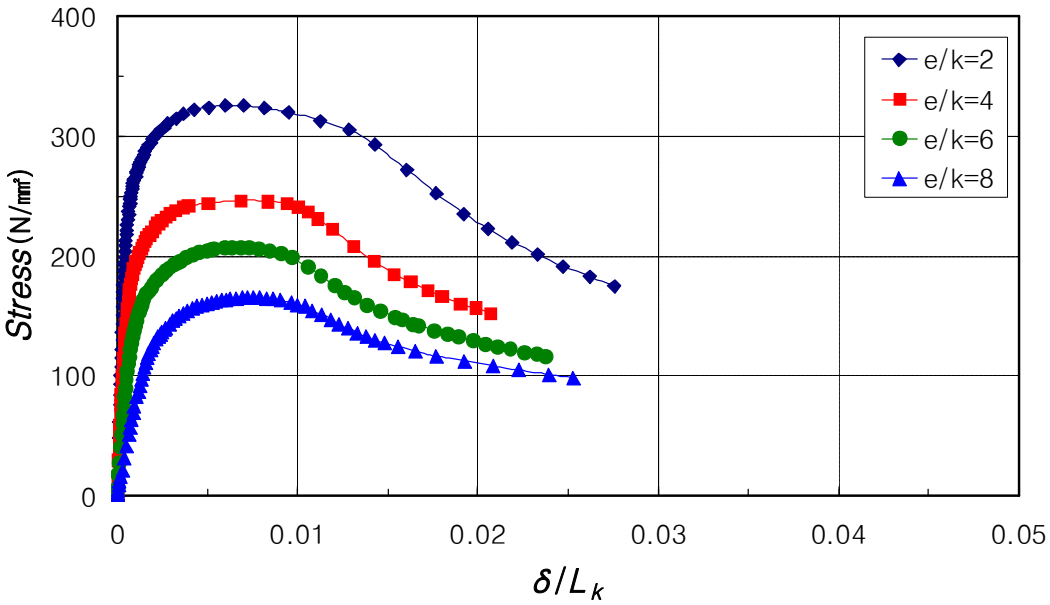
(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.26] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선

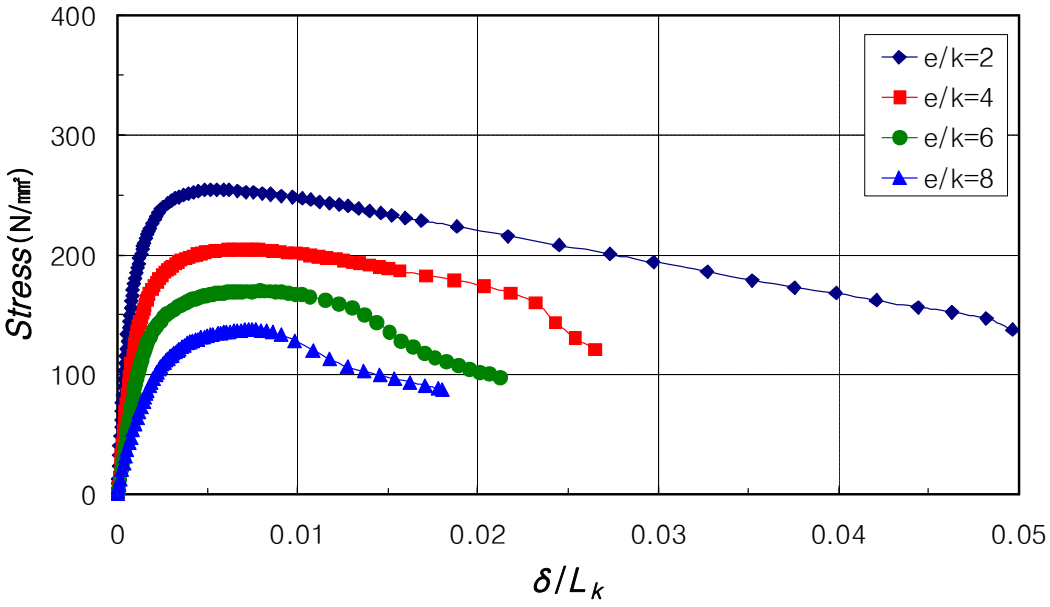


[그림 3.27] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 축변위

Collection @ chosun

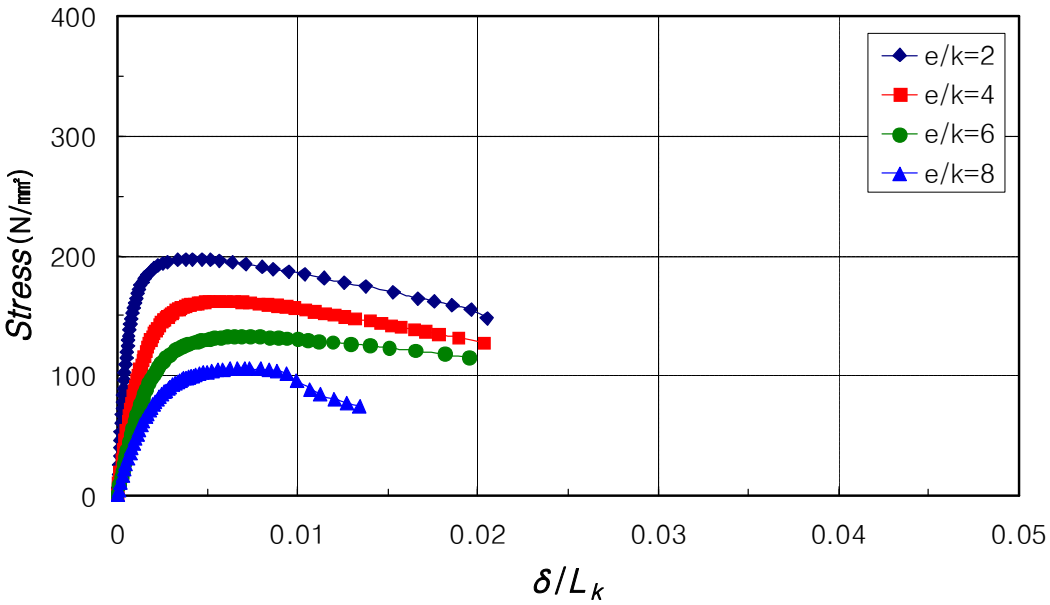


(a) 세장비 30 시험체



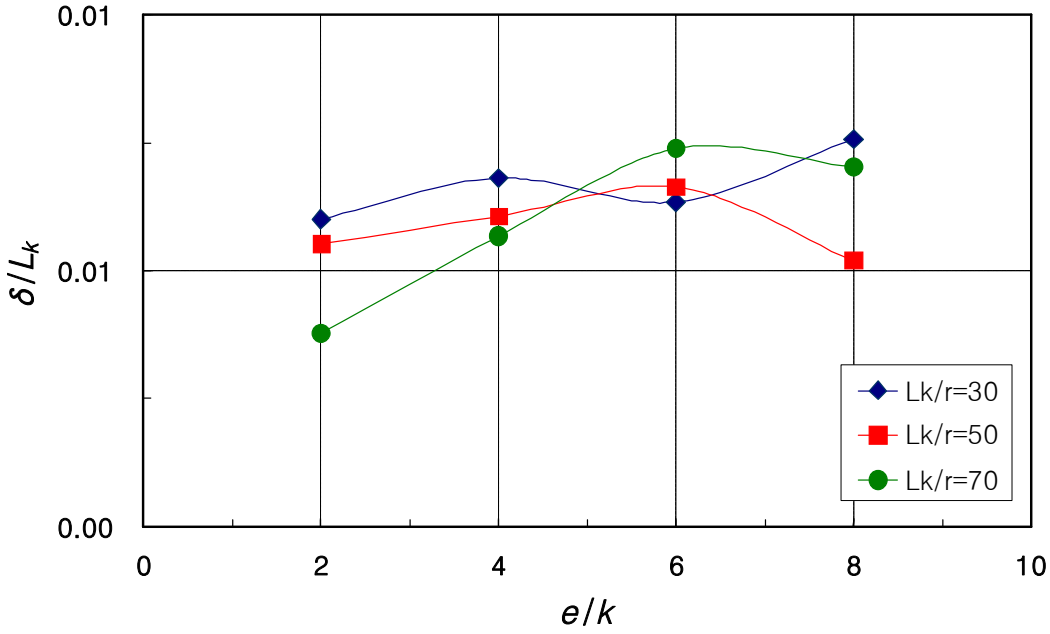
(b) 세장비 50 시험체

Collection @ chosun



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.28] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선



[그림 3.29] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위

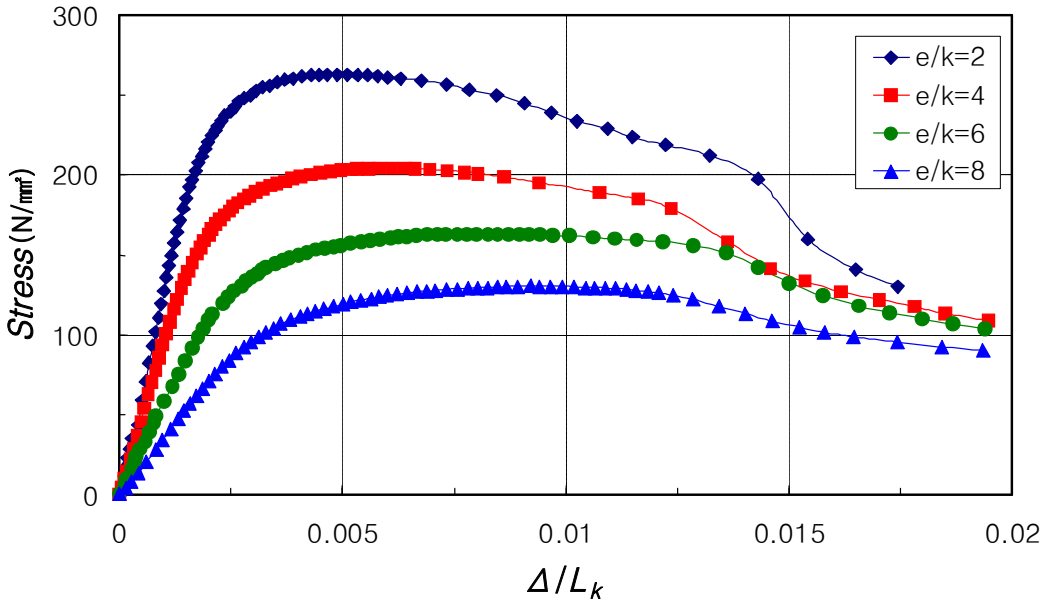
Collection @ chosun

[그림 3.28]은 양단편심 대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 편심비에 대한 내력-횡변위 관계곡선으로서 각각의 세장비에 대해 표현하였는데, 편심비가 증가할수록 내력과 횡변위가 감소하는 증가하는 현상을 보였다. 이는 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심에 의한 양단의 단부모멘트에 의해 횡변위의 제한을 받는 것으로 판단된다.

[그림 3.29]는 양단편심 대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위의 관계를 나타낸 것으로서 각 세장비 모두 편심비 증가에 따라 횡변위가 점차 증가하고 있으나, 세장비와는 크게 관계성을 보이지 않고 불특정한 증감을 보이고 있으며, 세장비50과 70 시험체의 편심비가 6이상에서는 오히려 감소하는 현상을 보이고 있다.

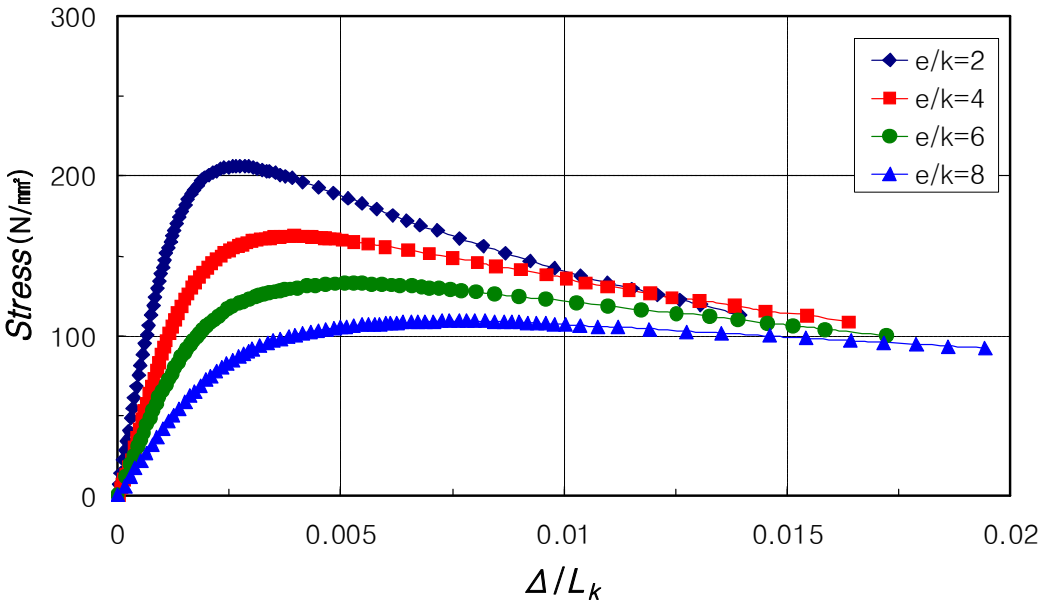
(3) 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥

[그림 3.30]은 일단중심 타단편심 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 편심비에 대한 내력-축변위 관계곡선으로서 각각의 세장비에 대해 표현하였는데, 편심비가 증가할수록 내력은 감소하고, 축변위는 완만한 증가와 최대내력이후 꾸준한 증가를 보이고

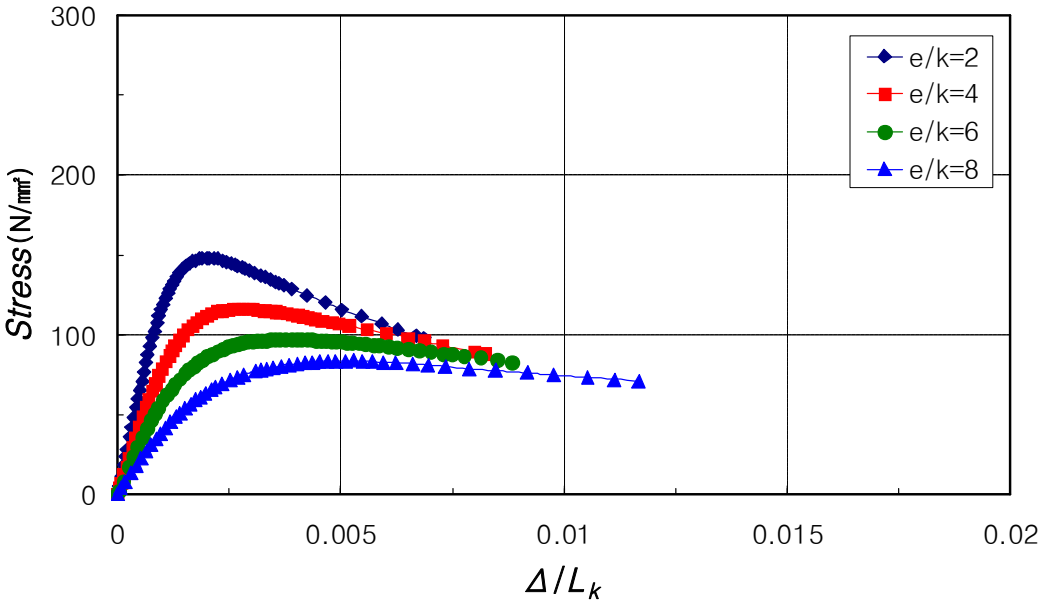


(a) 세장비 30 시험체

dCollection @ chosun



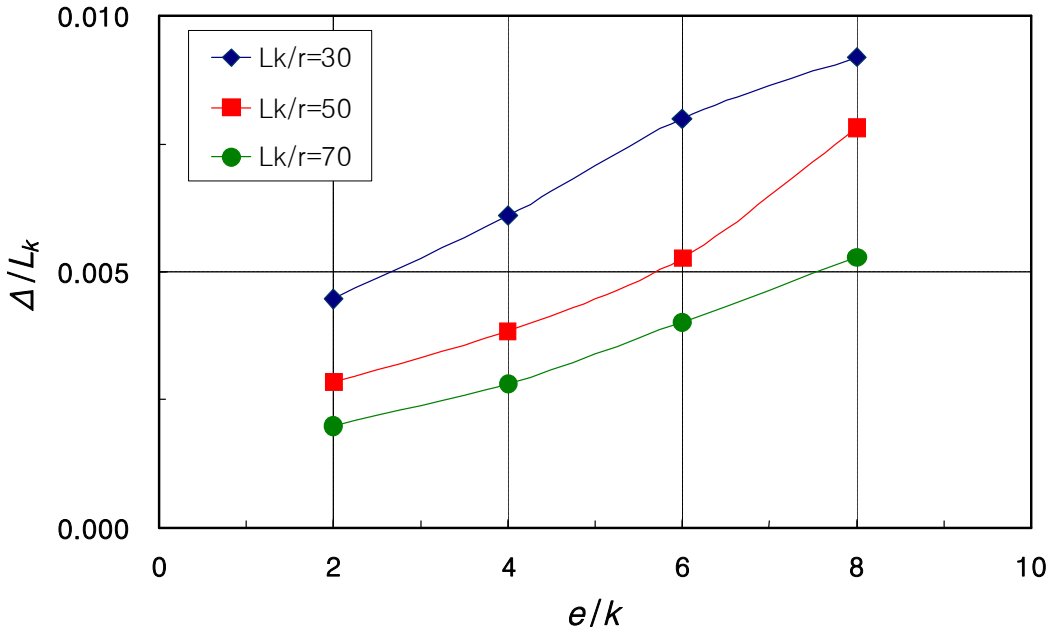
(b) 세장비 50 시험체



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.30] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선

Collection @ chosun



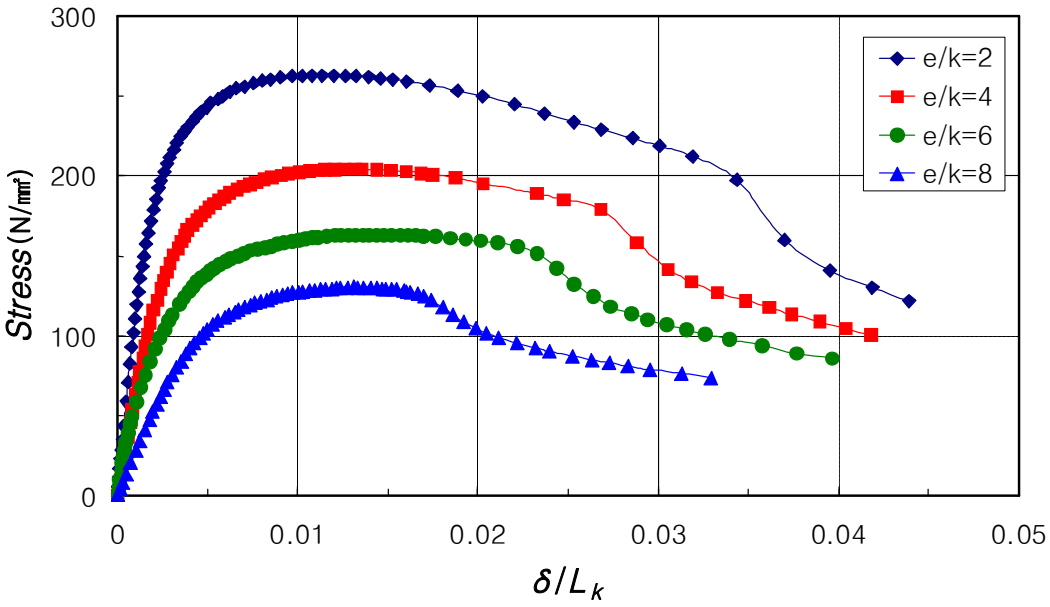
[그림 3.31] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 축변위

있으며, 세장비의 증가에 따라 축변위 더욱 완만한 증가를 보이고 있으나 국부좌굴이 발생하는 점을 알 수 없으므로 증가폭을 알 수 없다.

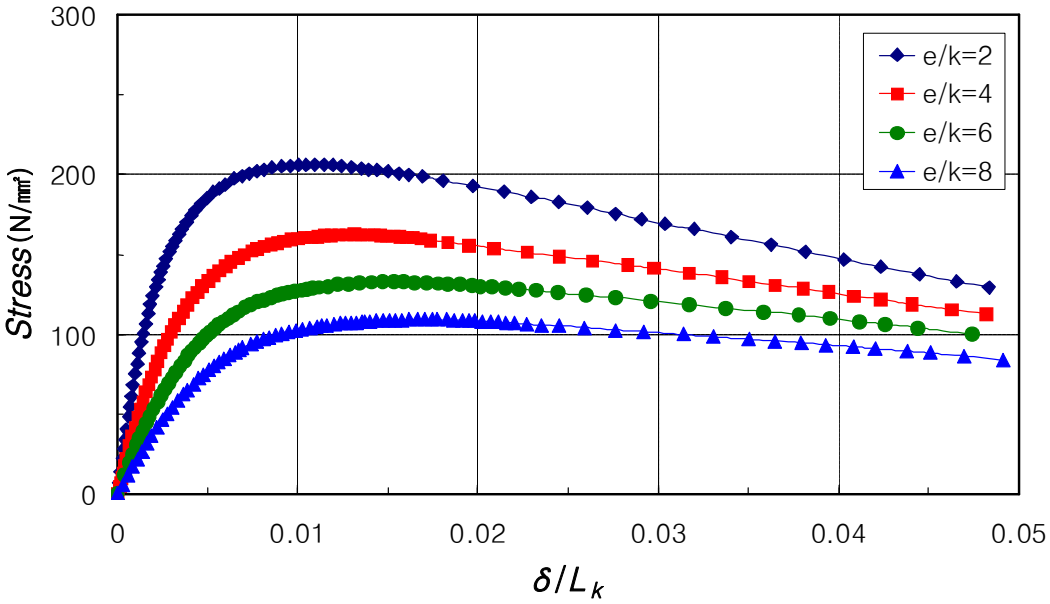
[그림 3.31]은 일단중심 타단편심 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 편심비에 따른 최대내력시 축변위의 관계를 나타낸 것으로서 편심비가 증가할수록 축변위가 증가하고 있고, 세장비가 증가할수록 감소하고 있다. 최대내력시 세장비의 증가에 따라 축변위는 세장비30에 비해 세장비50은 63.03~85.04%, 세장비70은 44.52~57.46%의 값을 보이는 것으로 나타났다.

[그림 3.32]는 일단중심 타단편심 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 편심비에 대한 내력-횡변위 관계곡선으로서 각각의 세장비에 대해 표현하였는데, 세장비30 시험체는 국부좌굴이 발생할 때까지 편심비가 증가할수록 최대내력은 감소하고, 횡변위 또한 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 세장비50과 70 시험체는 국부좌굴이 발생하지 않아 횡변위의 증감을 단언할 수 없으나 편심비의 증가에 따라 내력의 감소 없이 꾸준히 횡변위가 증가함을 알 수 있다.

Collection @ chosun

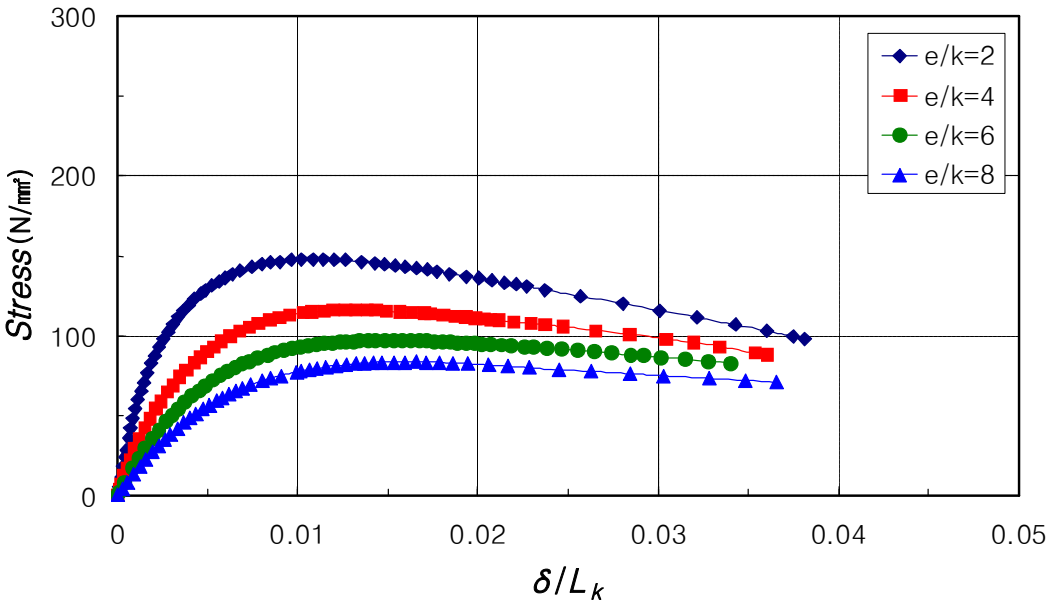


(a) 세장비 30 시험체



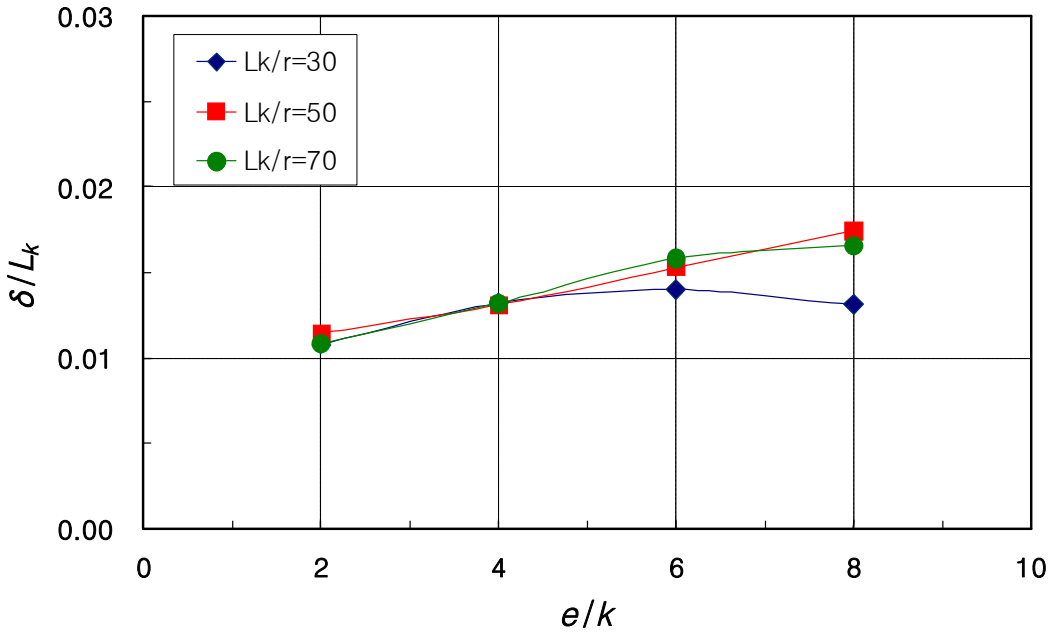
(b) 세장비 50 시험체

Collection @ chosun



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.32] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선



[그림 3.33] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위

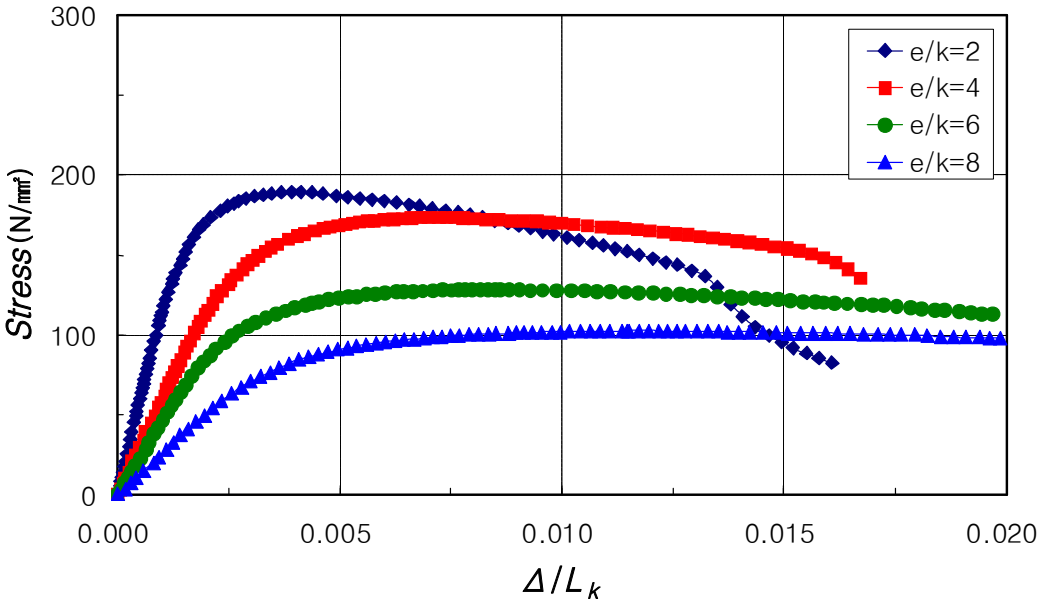
Collection @ chosun

[그림 3.33]은 일단중심 타단편심 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위의 관계를 나타낸 것으로서 세장비50과 70 시험체는 거의 같은 횡변위로 편심비의 증가에 따라 증가하고 있으나, 세장비30 시험체는 편심비와 관계없이 거의 일정한 값을 보이고 있다.

(4) 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥

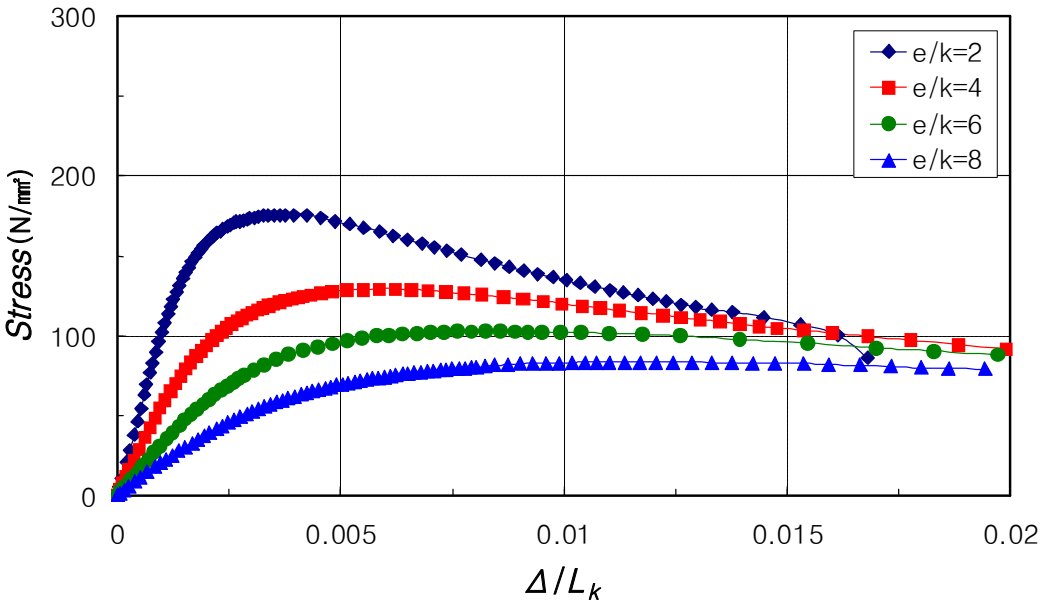
[그림 3.34]는 양단편심 비대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 각 세장비별로 편심비에 따라 나타낸 내력-축변위 곡선으로서 각각의 세장비에 대해 편심비가 증가할수록 최대내력은 감소하고 축변위는 국부좌굴이 발생할 때까지 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

[그림 3.35]는 양단편심 비대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관보-기둥 시험체의 편심비에 따른 최대내력시 축변위의 관계를 나타낸 것으로서, 편심비가 증가할수록 축변위가 증가하고 있으나, 세장비의 증가에 따라 감소하는데 세장비30 시험체에 비해 세장비50은 63.31~79.36%, 세장비70은 43.48~58.13%의 값을 보이고 있다.

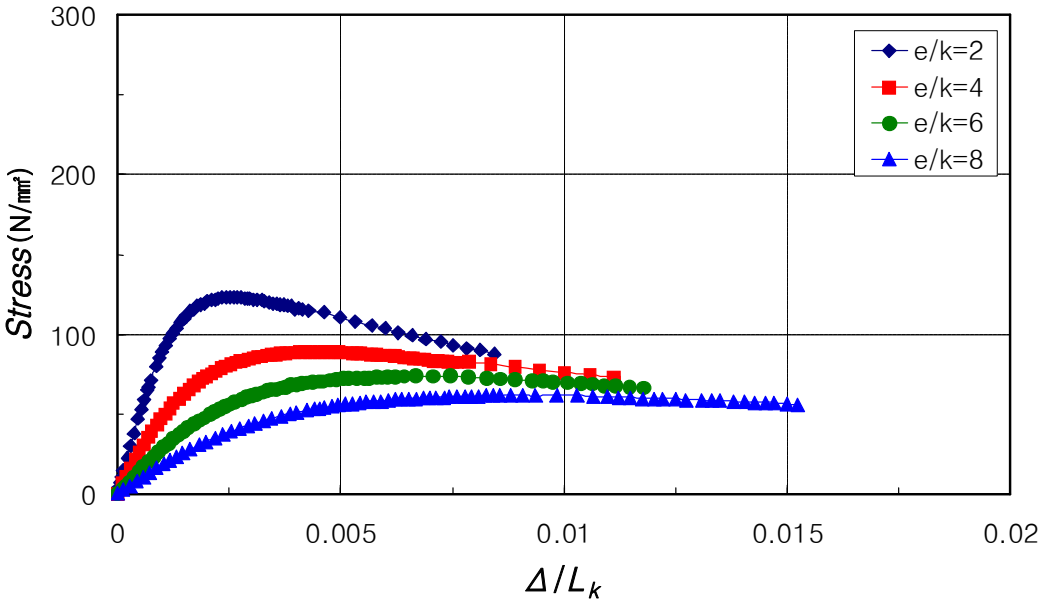


(a) 세장비 30 시험체

dCollection @ chosun



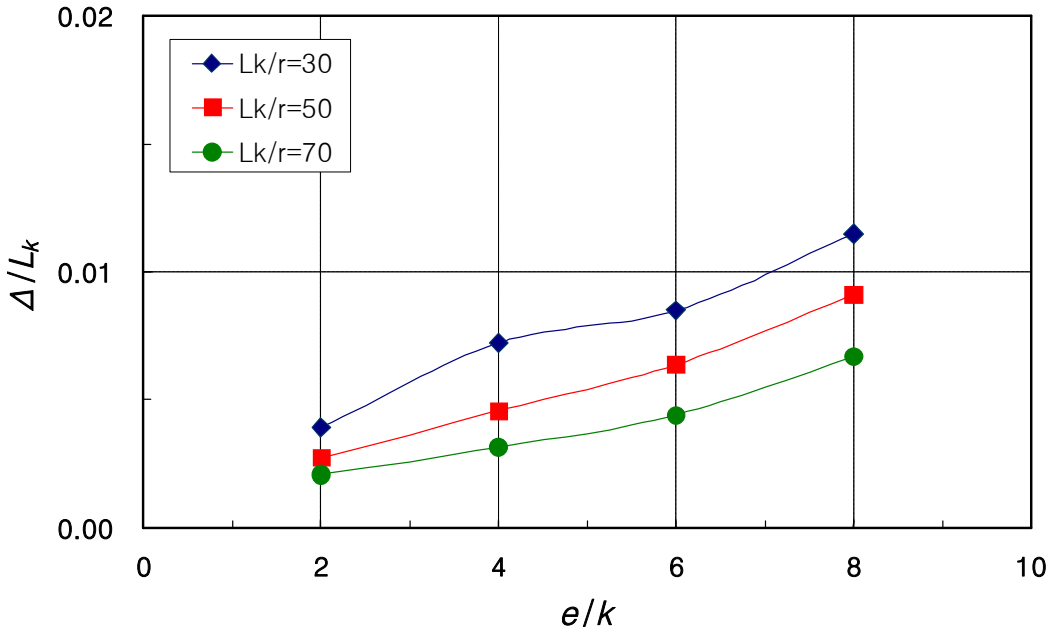
(b) 세장비 50 시험체



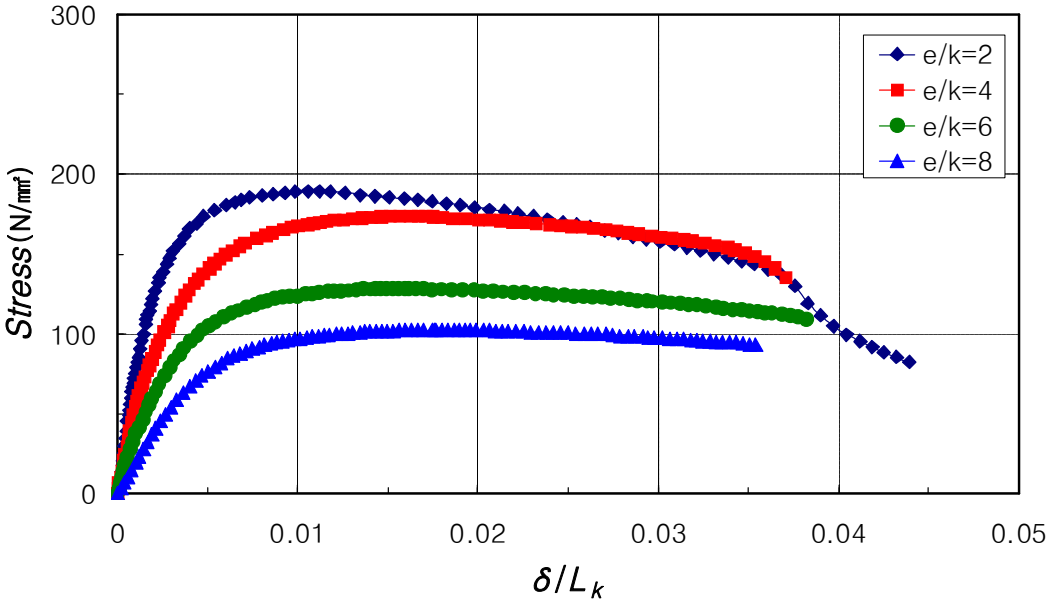
(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.34] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선

Collection @ chosun

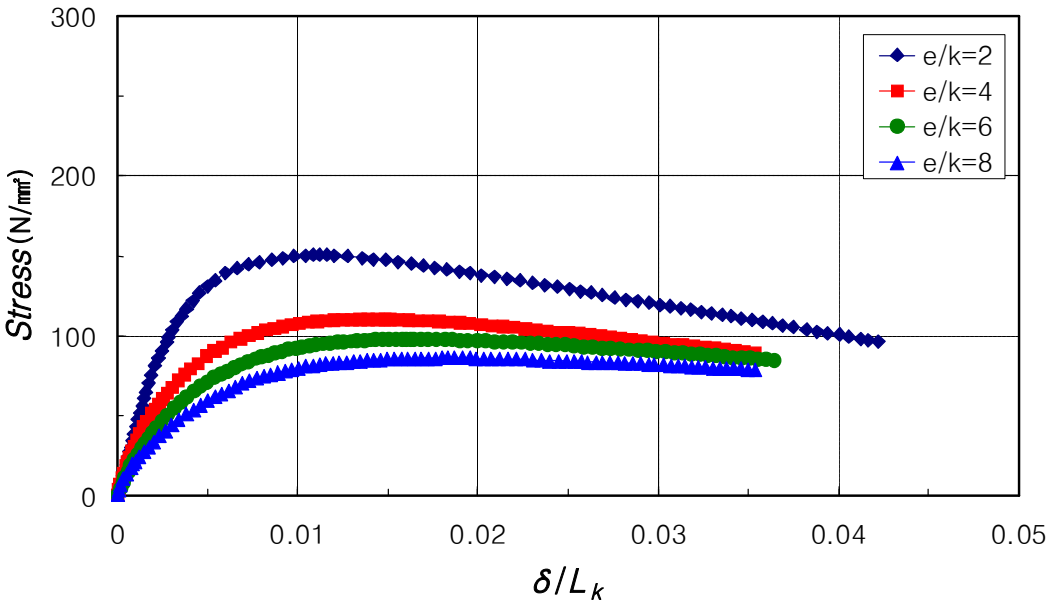


[그림 3.35] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 축변위

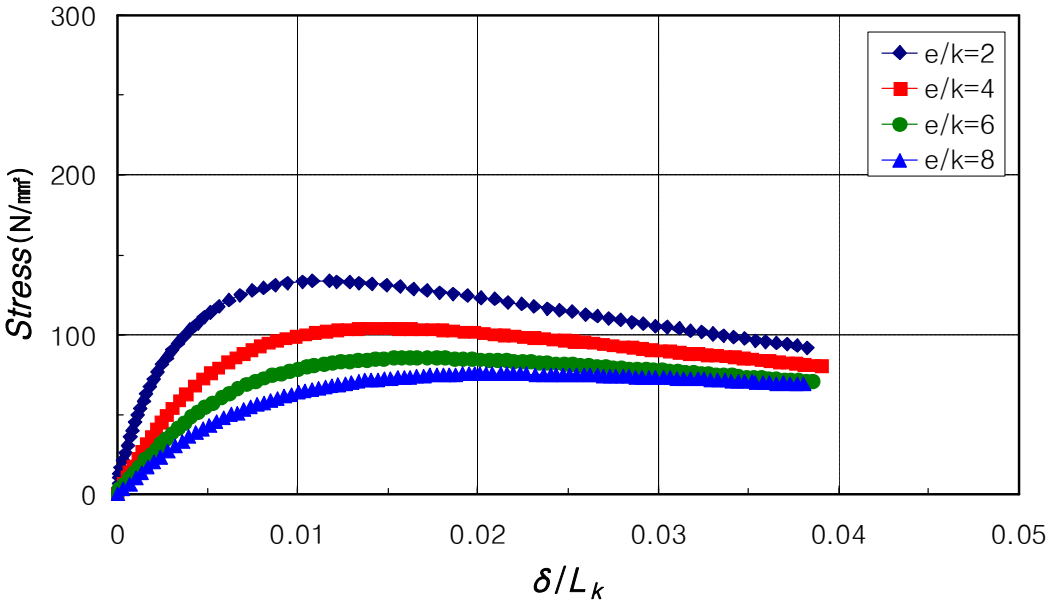


(a) 세장비 30 시험체

Collection @ chosun



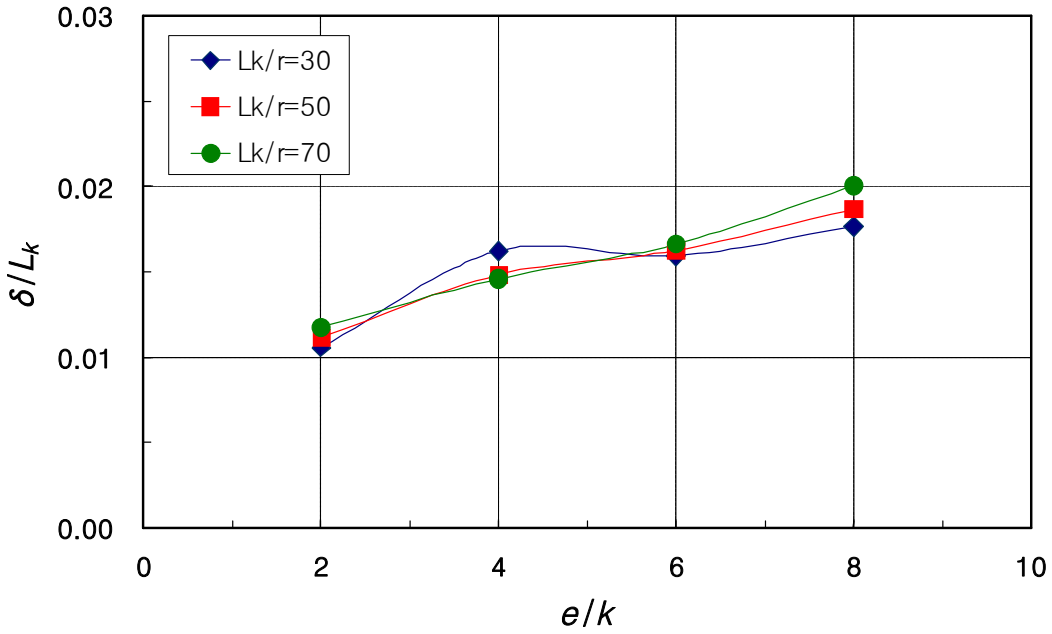
(b) 세장비 50 시험체



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.36] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선

Collection @ chosun



[그림 3.37] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위

[그림 3.36]의 횡변위는 세장비와 편심비가 증가할수록 횡변위의 증가를 보이고 있으며, [그림 3.37]의 최대내력시 횡변위 또한 편심비의 증가에 따라 횡변위는 다소 증가하는 것으로 나타났으나, 세장비와는 크게 관계없이 거의 동일한 값을 보이고 있다. 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 최대내력시 횡변위는 세장비 보다는 편심비의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타냈다.

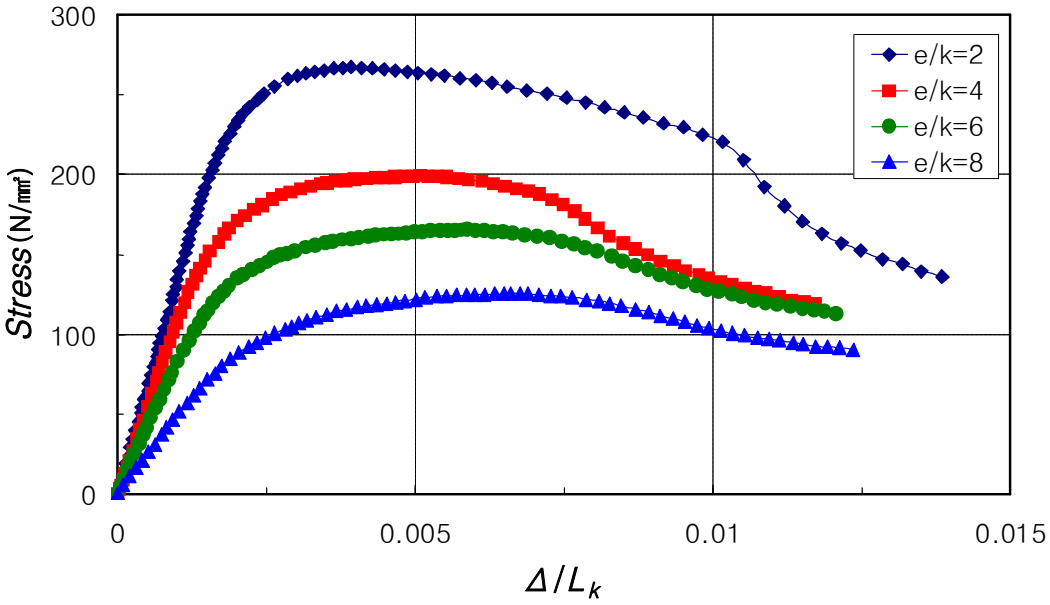
(5) 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥

[그림 3.38]은 양단편심 비대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 세장비별로 편심비에 따라 나타낸 내력-축변위 곡선으로서 각각의 세장비에 대해 편심비가 증가할수록 최대내력이후 내력은 완만히 감소하면서 꾸준한 축변위의 증가를 보이고 있으며, 국부좌굴이 발생한 시험체의 국부좌굴시 축변위는 편심비에 따라 불특정한 증감을 보이는데 이는 단부모멘트의 영향을 크게 받는 결과로 판단된다.

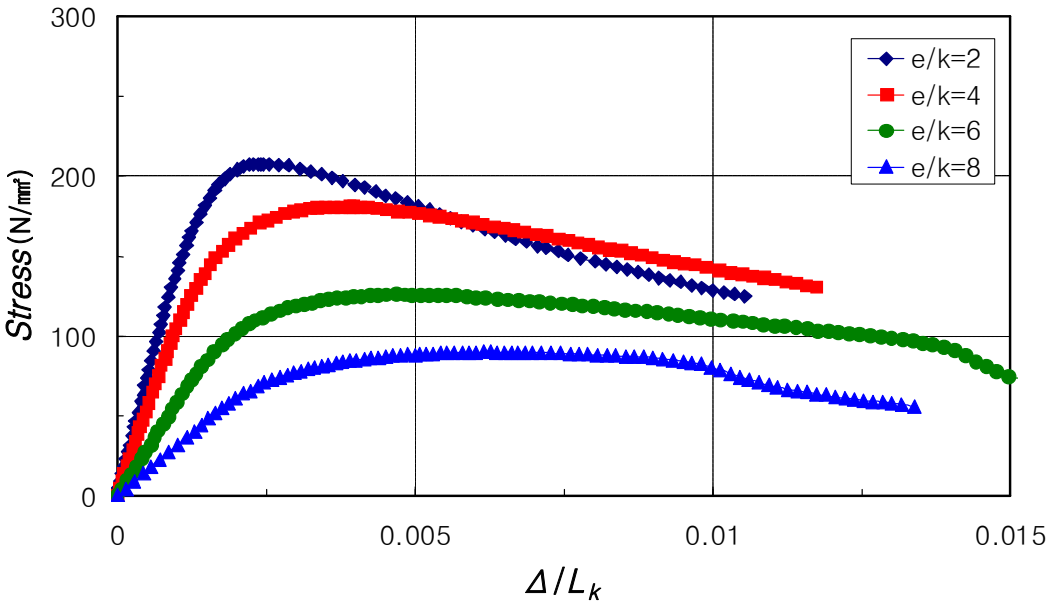
[그림 3.39]는 양단편심 비대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관보-기둥 시험체의 편심비에 따른 최대내력시 축변위의 관계를 나타낸 것으로서 최대내력시 축변위는 편심비의 증가에 따라 증가하나, 세장비에 증가에 따라 감소하며, 세장비30 시험체를 기준으

Collection @ chosun

로 세장비50은 60.30~94.73%, 세장비70은 44.77~82.01% 값을 보였다.

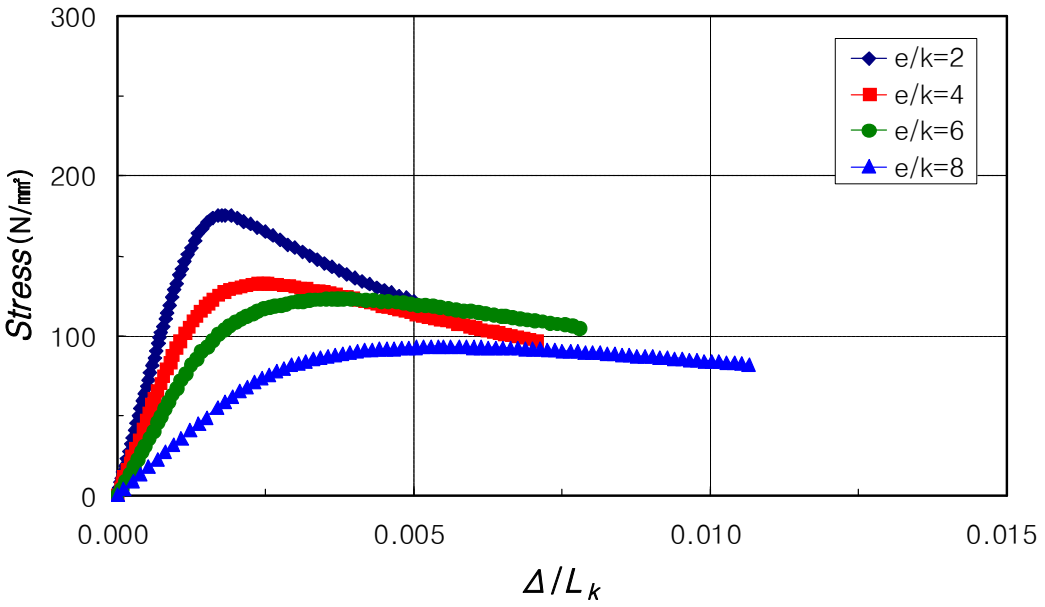


(a) 세장비 30 시험체



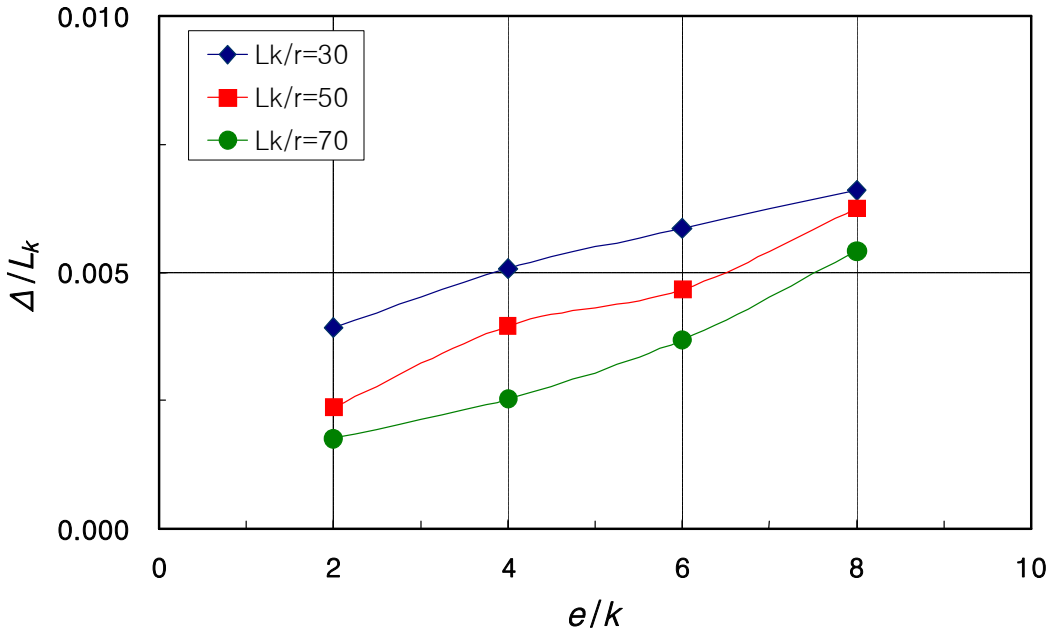
(b) 세장비 50 시험체

Collection @ chosun



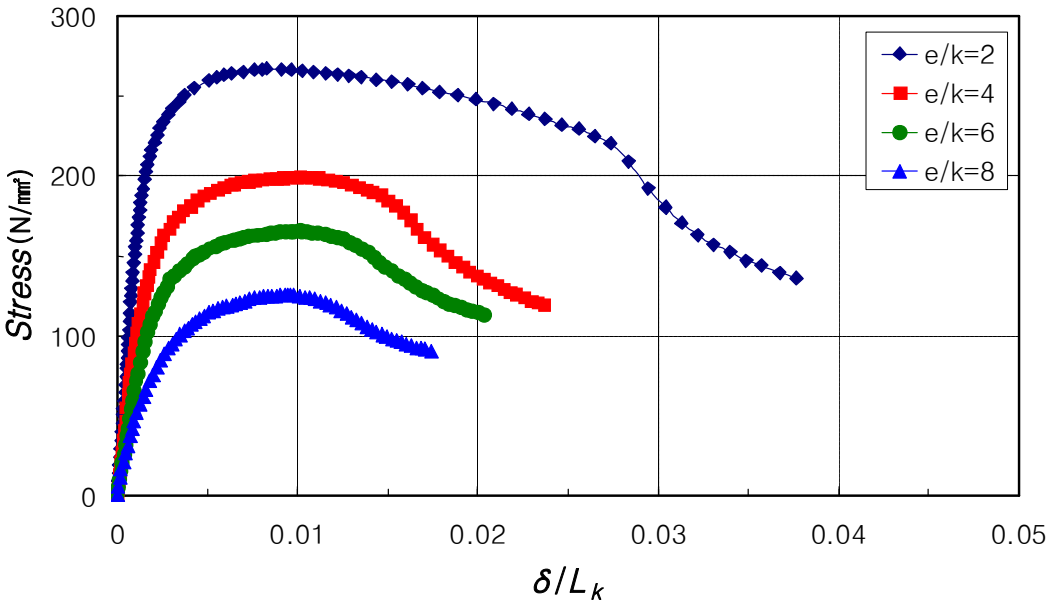
(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.38] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 내력-축변위 곡선

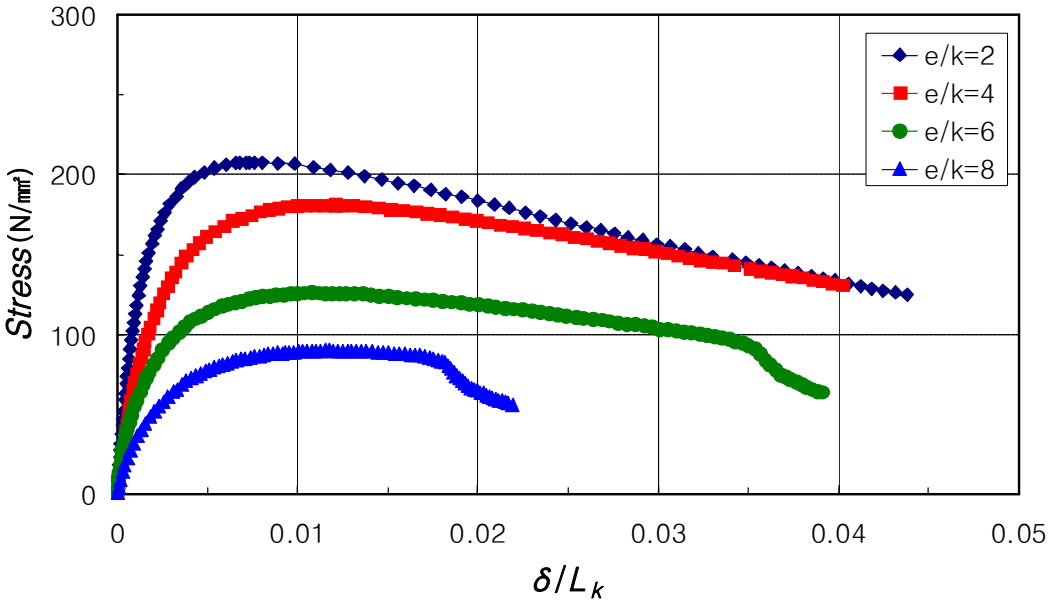


[그림 3.39] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 축변위

Collection @ chosun

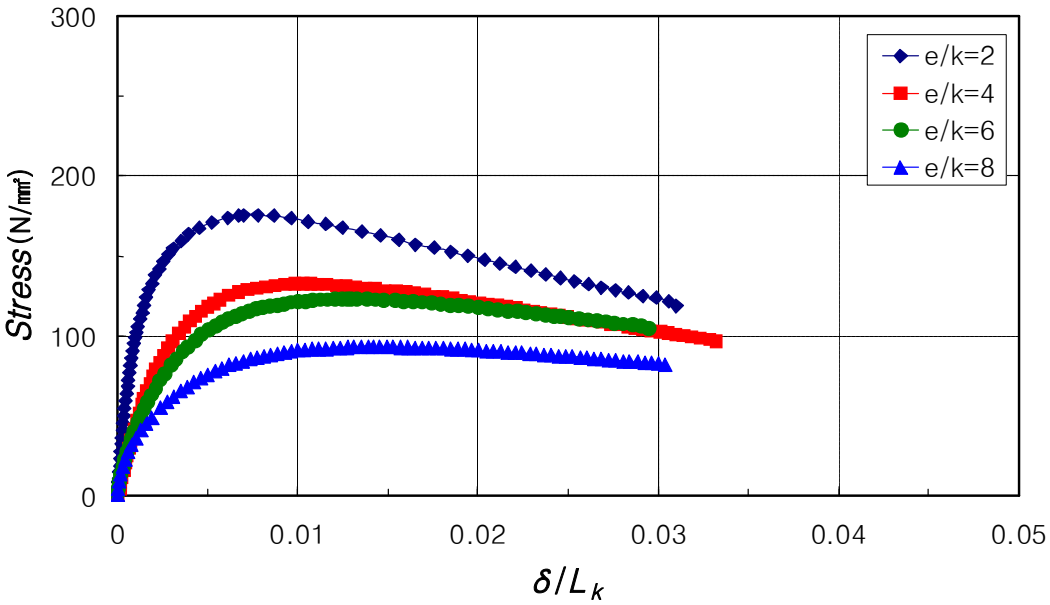


(a) 세장비 30 시험체



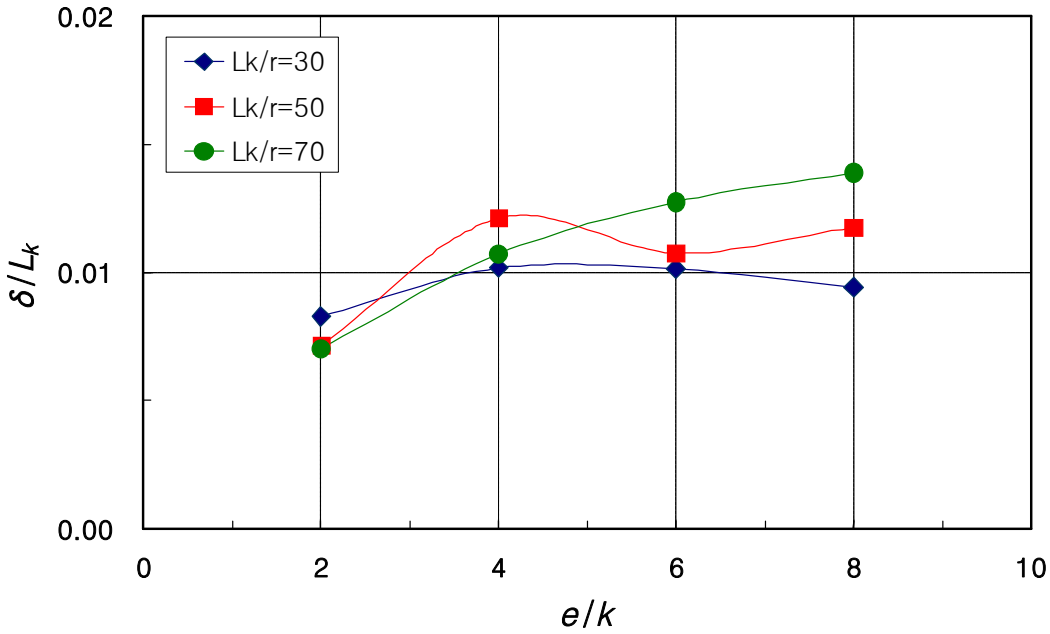
(b) 세장비 50 시험체

Collection @ chosun



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.40] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 내력-횡변위 곡선



[그림 3.41] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위

Collection @ chosun

[그림 3.40]의 양단편심 비대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 내력-횡변위 관계곡선으로 편심비와 세장비가 증가할수록 최대내력이후 내력의 완만한 감소와 꾸준한 횡변위의 증가를 보이고 있으며, 국부좌굴이 발생할 때까지 세장비와 편심비가 증가할수록 국부좌굴시 횡변위의 감소를 보이고 있다.

[그림 3.41]은 양단편심 비대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥 시험체의 편심비에 따른 최대내력시 횡변위의 관계를 나타낸 것으로서 세장비 50과 70 시험체 중 편심비 4 이상의 횡변위는 거의 일정한 값을 보인반면, 세장비 70은 편심비의 증가에 따라 횡변위의 증가를 보이고 있다.

3.2.2.3 모멘트(M)-회전각(θ) 관계

세장비에 따른 보-기둥 시험체의 모멘트와 회전각의 관계를 알아보기 위해 편심비에 따라 단부모멘트를 시험체 단부 회전각(θ)과의 관계로 나타냈다.

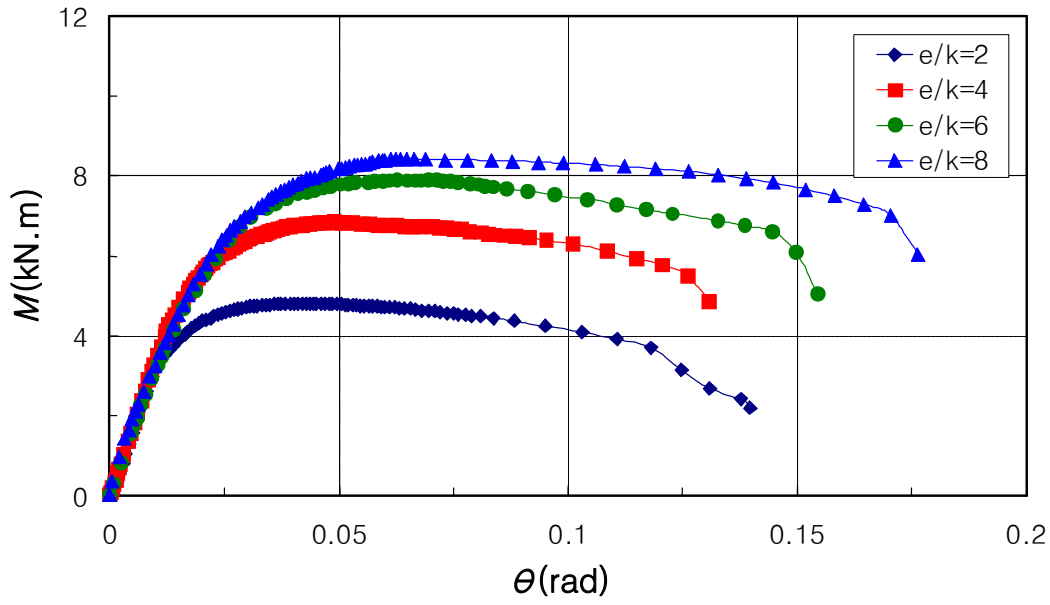
(1) 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥

[그림 3.42]는 양단편심 대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 모멘트-회전각 관계를 나타낸 것으로 각 세장비에 대한 시험체 모두 편심비의 증가에 따른 모멘트와 회전각은 증가하는 것으로 나타났으며, 증가율이 거의 같은 것으로 나타났다.

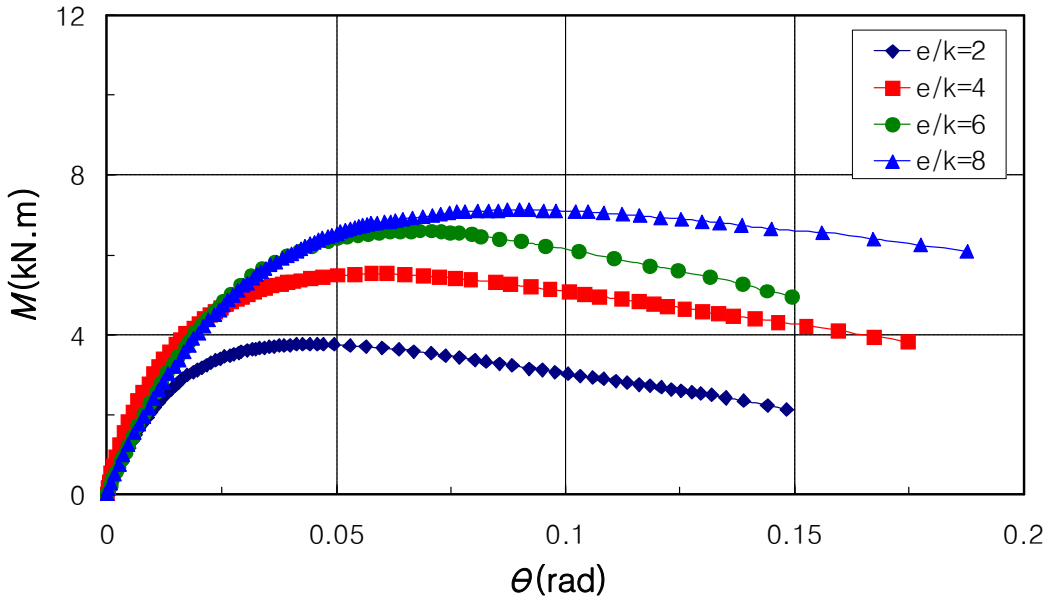
[그림 3.43]은 편심비에 따른 최대단부모멘트시 단부의 회전각을 나타낸 것으로 편심비의 증가에 따라 최대모멘트는 증가하는 것으로 나타났으나, 세장비 30 시험체의 회전각을 기준으로 비교한 결과, 각각의 편심비에 따라 세장비 50은 1.06～1.34배, 세장비 70은 1.09～1.29배의 값으로 세장비50과 70 시험체는 거의 같은 값으로서 세장비의 증가가 최대모멘트의 증가로 이어지지는 않았다.

양단편심 대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥은 편심비의 증가에 따른 단부의 모멘트 증대에 영향을 미치나 세장비는 단부모멘트에 큰 영향을 주지 않는 것으로 보여 진다.

Collection @ chosun

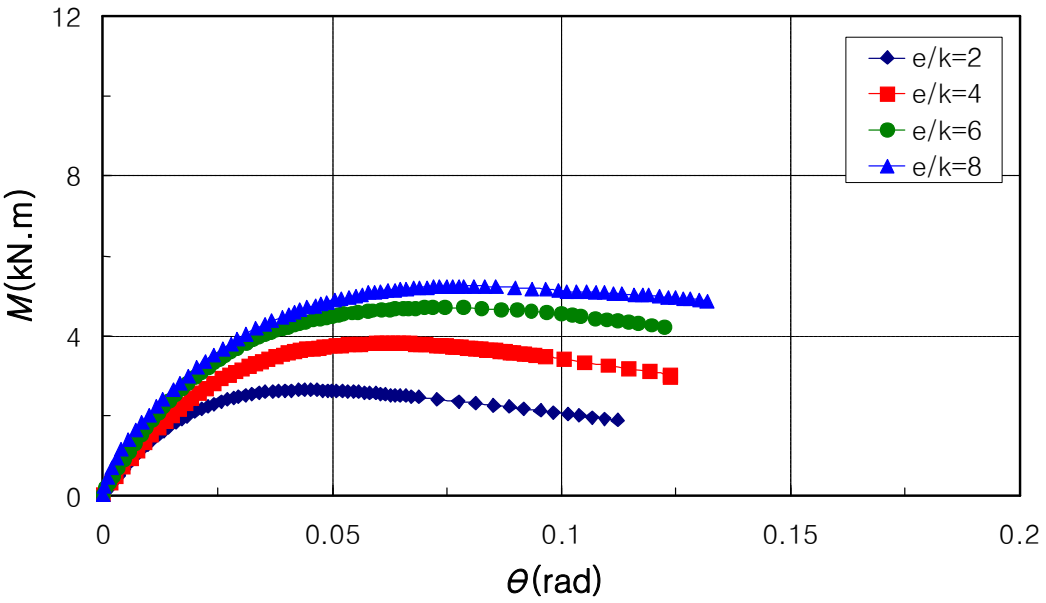


(a) 세장비 30 시험체



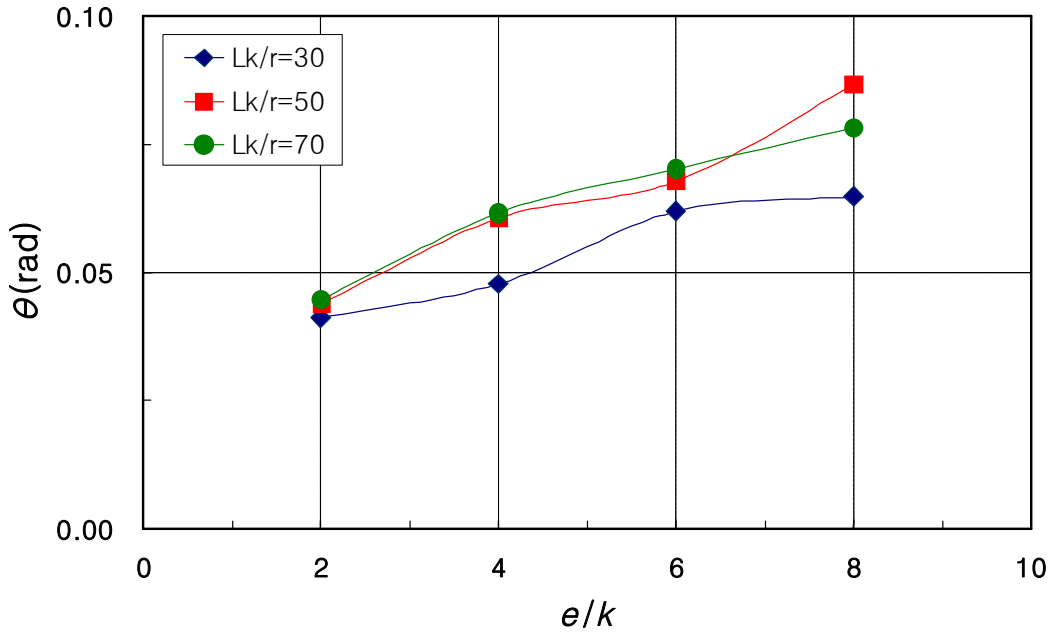
(b) 세장비 50 시험체

Collection @ chosun



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.42] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선



[그림 3.43] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트시 회전각

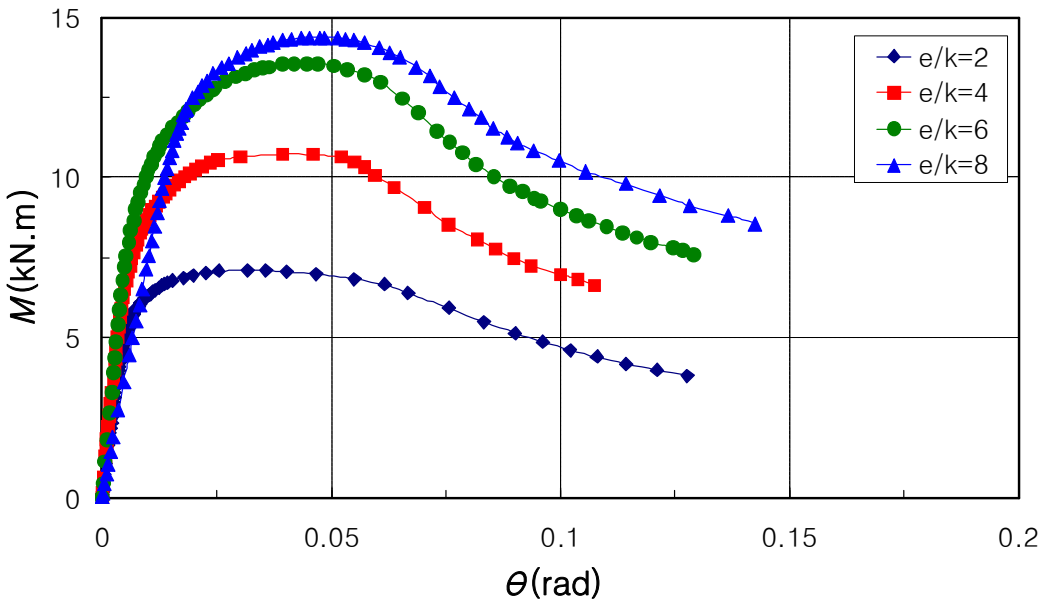
Collection @ chosun

(2) 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥

[그림 3.44]는 양단편심 대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 모멘트-회전각 관계로 각 세장비에 대한 단부모멘트는 세장비의 증가에 따라 감소하고 있으며, 편심의 증가에 따른 회전각은 세장비와 편심비의 증가에 따라 더욱 증가하는 것으로 나타났다.

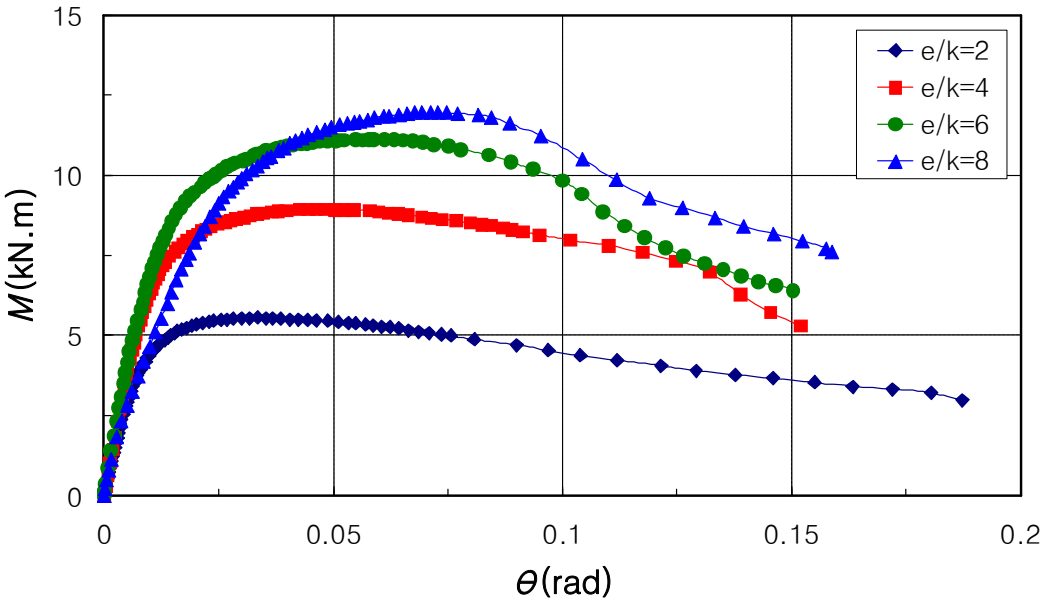
[그림 3.45]는 편심비에 따른 최대단부모멘트시 단부의 회전각을 나타낸 것으로 편심비의 증가에 따라 각 세장비별로 단부모멘트는 증가하는 것으로 나타났으며, 세장비50과 70은 거의 비슷한 결과를 보이며, 세장비30은 편심비 증가에 따라 다소 낮은 단부모멘트의 증가율을 보이고 있다.

양단편심 대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 모멘트-회전각 관계에서 세장비의 증가에 따른 세장효과에 의한 영향보다는 편심비의 증가에 따른 단부모멘트 영향에 의한 회전각의 증대가 보-기둥의 좌굴에 큰 영향은 미치는 것으로 판단된다.

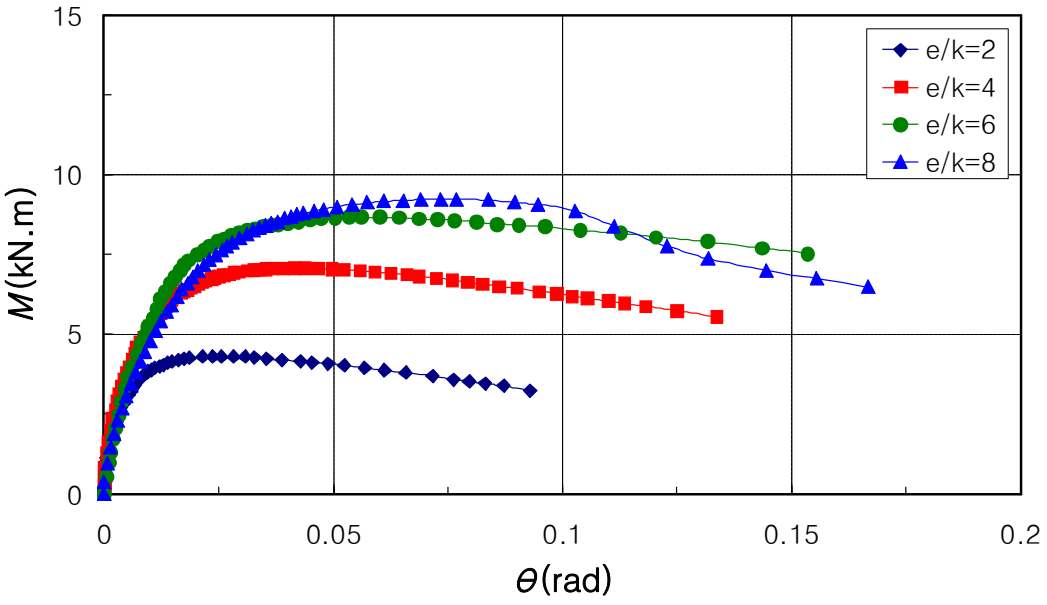


(a) 세장비 30 시험체

Collection @ chosun



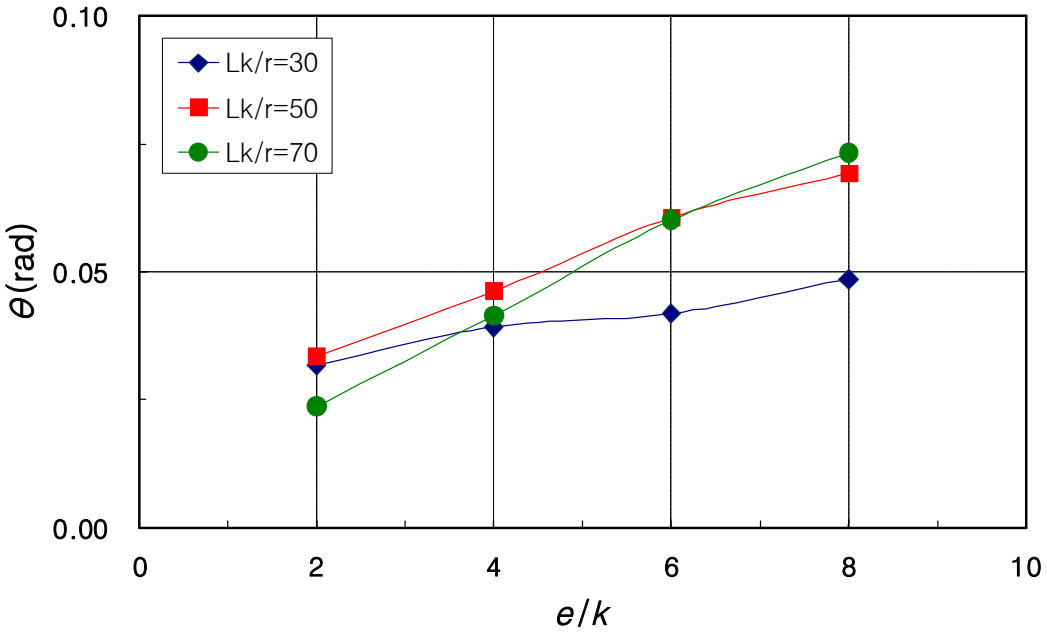
(b) 세장비 50 시험체



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.44] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선

Collection @ chosun



[그림 3.45] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대모멘트시 회전각

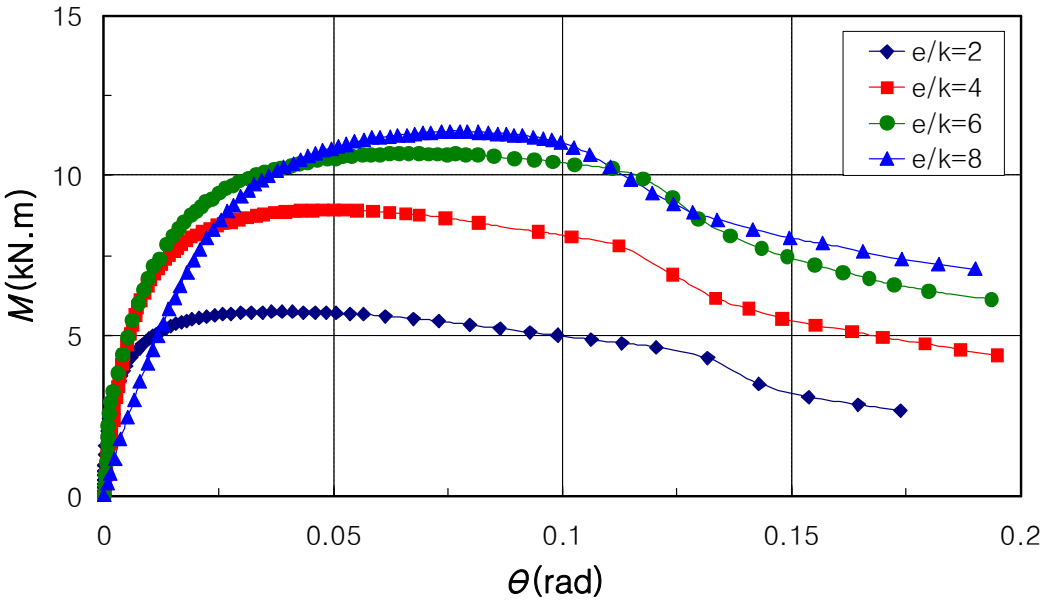
(3) 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥

[그림 3.46]은 일단중심 타단편심 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 모멘트-회전각 관계로 각 세장비에 대한 단부모멘트는 세장비의 증가에 따라 감소하고 있으며, 편심의 증가에 따른 회전각은 세장비와 편심비의 증가에 따라 더욱 증가하는 것으로 나타났다.

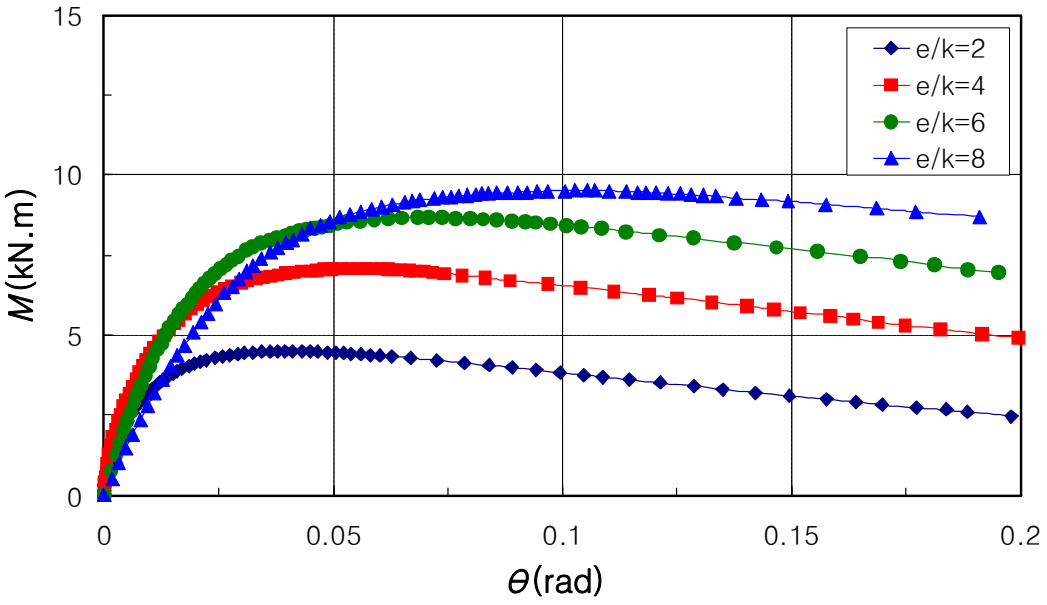
[그림 3.47]은 편심비에 따른 최대단부모멘트시 단부의 회전각을 나타낸 것으로 편심비의 증가에 따라 각 세장비별로 단부모멘트는 증가하는 것으로 나타났으며, 세장비30과 50, 70시험체의 결과는 거의 비슷한 값을 보이며, 편심비8에서 약간의 차이를 보이고 있다.

일단중심 타단편심 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 모멘트-회전각 관계에서 세장비의 증가에 따른 세장효과에 의한 2차모멘트의 영향보다는 편심비의 증가에 따른 단부모멘트 영향에 의한 회전각의 증대가 보-기둥의 좌굴에 큰 영향은 미치는 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

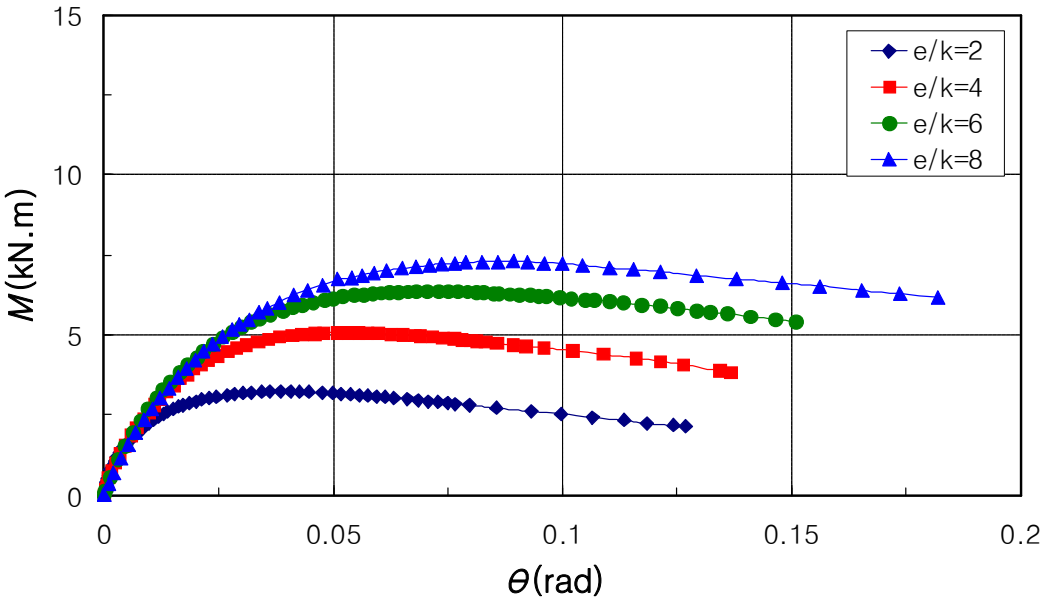


(a) 세장비 30 시험체



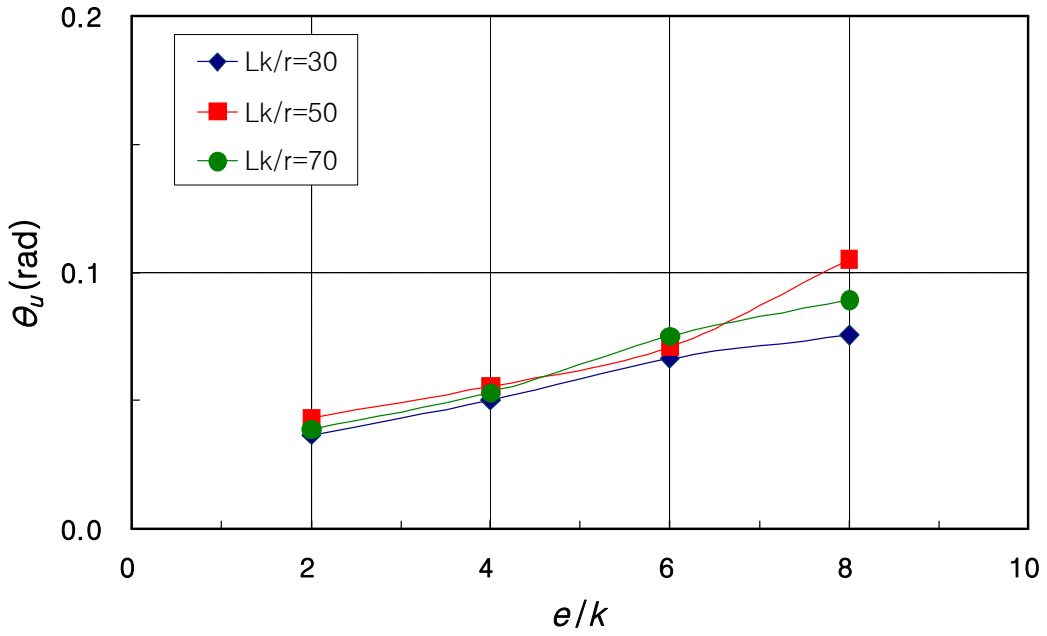
(b) 세장비 50 시험체

Collection @ chosun



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.46] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선



[그림 3.47] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트시 회전각

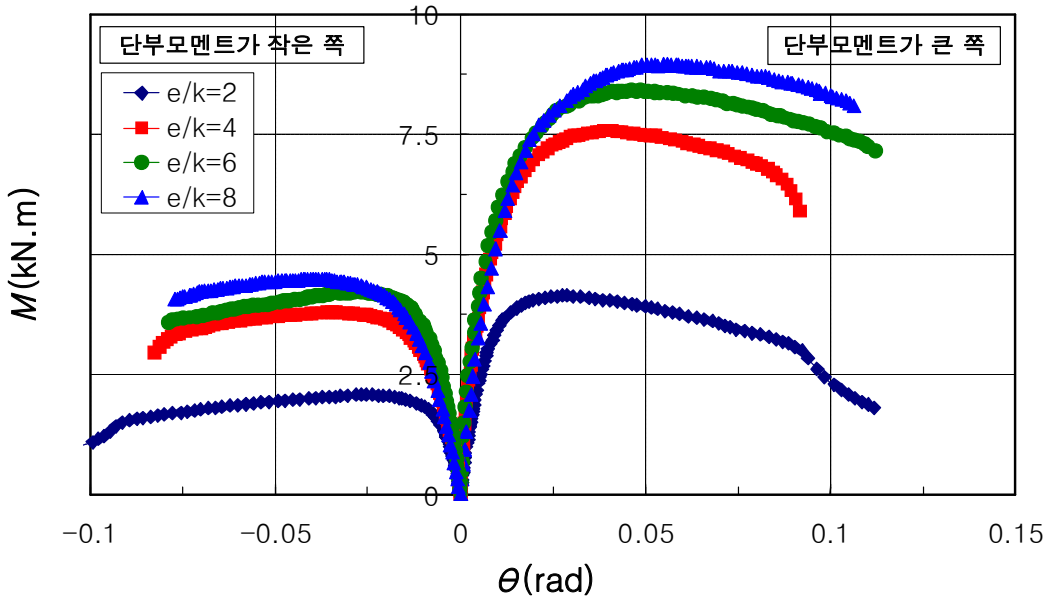
Collection @ chosun

(4) 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥

[그림 3.48]의 양단편심 비대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 모멘트-회전각 관계는 양단 모멘트가 서로 다른 관계로 양 단부를 모두 표현하였으며, 각 세장비에 대한 단부모멘트는 세장비의 증가에 따라 감소하고 있으며, 편심의 증가에 따른 회전각은 세장비와 편심비의 증가에 따라 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 편심의 증가에 따른 회전각은 세장비와 편심비의 증가에 따라 더욱 크게 나타났다.

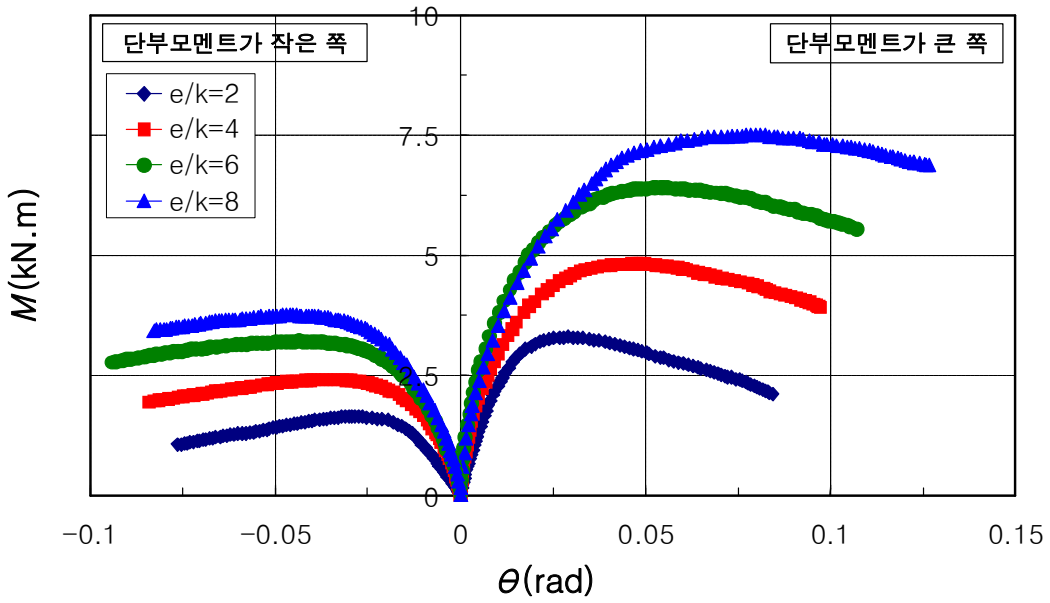
[그림 3.49]는 편심비에 따른 최대단부모멘트시 단부의 회전각을 나타낸 것으로 편심비의 증가에 따라 모멘트의 증가를 보이나, 세장비의 증가에 따라 불특정한 모멘트의 증감을 보이고 있어 보-기둥의 최대단부모멘트는 세장비의 영향보다는 편심비에 대한 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.

양단편심 비대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 모멘트-회전각 관계에서 세장비의 증가에 따른 세장효과에 의한 휨의 증가로 단부모멘트의 감소와 편심비의 증가에 따른 단부모멘트 영향에 의한 회전각의 증대가 보-기둥의 좌굴에 큰 영향은 미치는 것으로 판단된다.

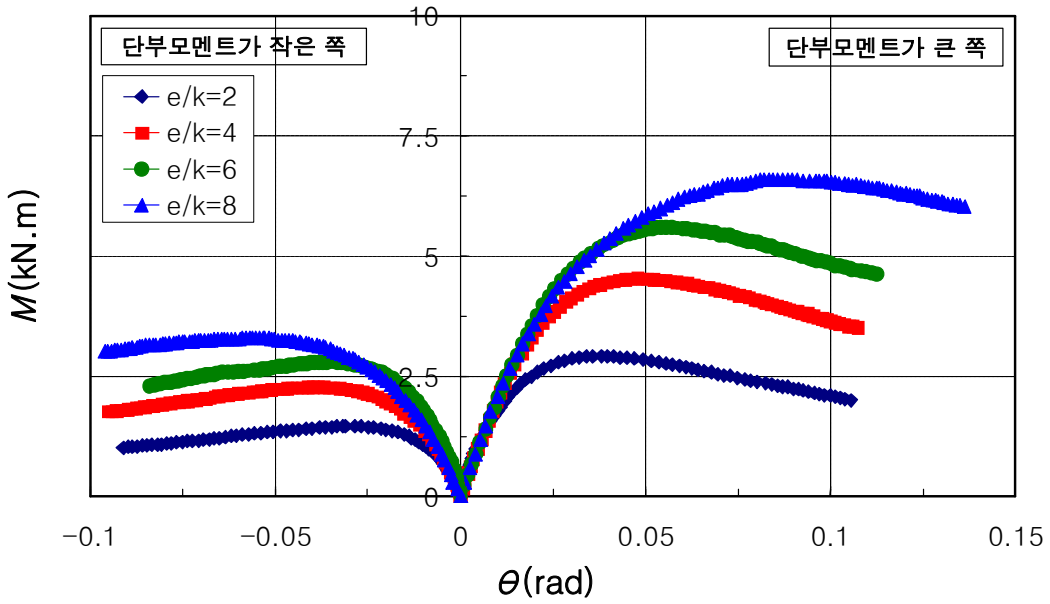


(a) 세장비 30 시험체

dCollection @ chosun



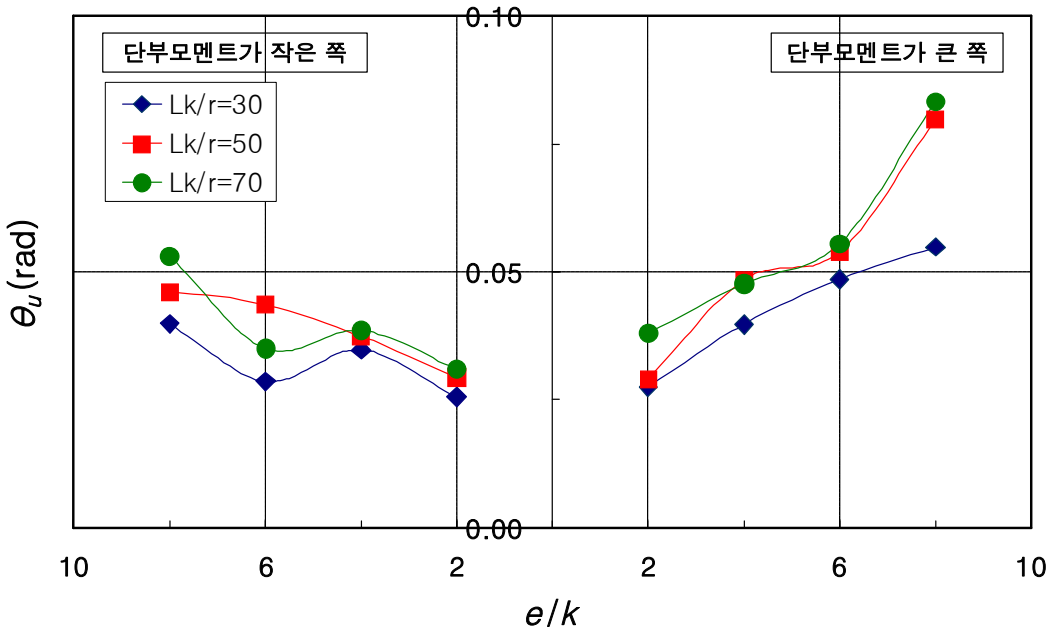
(b) 세장비 50 시험체



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.48] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선

dCollection @ chosun



[그림 3.49] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대모멘트시 회전각

(5) 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥

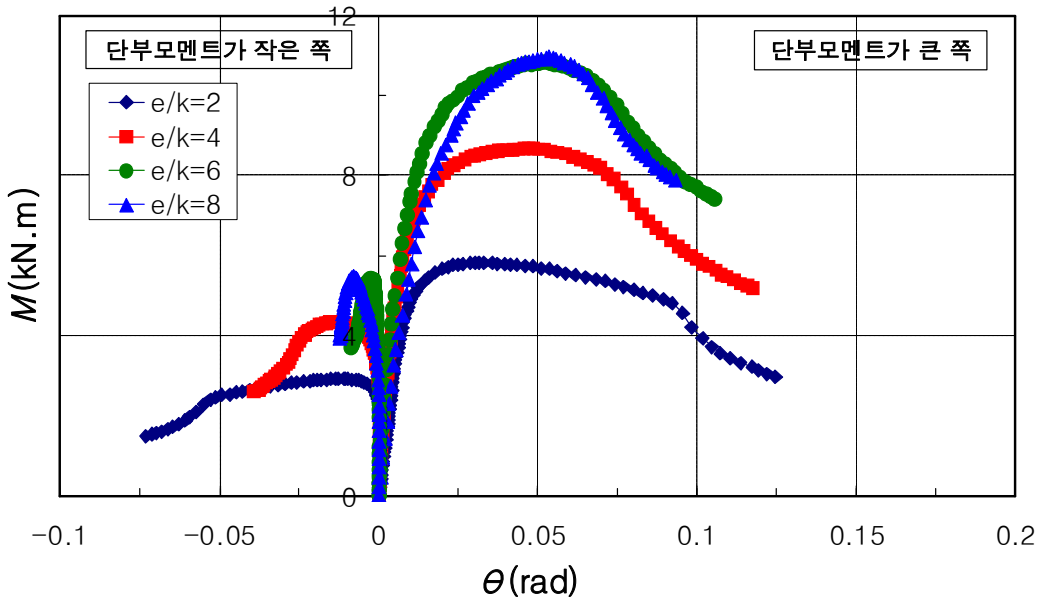
[그림 3.50]의 양단편심 비대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 모멘트-회전각 관계는 양단 모멘트가 서로 다른 관계로 양 단부를 모두 표현하였으며, 각 세장비에 대한 모멘트는 세장비의 증가에 따라 감소하고 있으며, 편심의 증가에 따른 회전각은 각 세장비별로 편심비가 클수록 거의 같은 회전각을 보이고 있다.

[그림 3.51]은 편심비에 따른 최대단부모멘트시 단부의 회전각을 나타낸 것으로 편심비의 증가에 따라 모멘트의 증가를 보이나, 세장비 50과 70은 거의 같은 회전각을 보인반면, 세장비 30은 다소 낮은 회전각으로 편심비의 증가에 따라 그 증가율이 더 완만한 값을 보이고 있으나, 보-기둥의 최대단부모멘트는 세장비의 영향보다는 편심비에 대한 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.

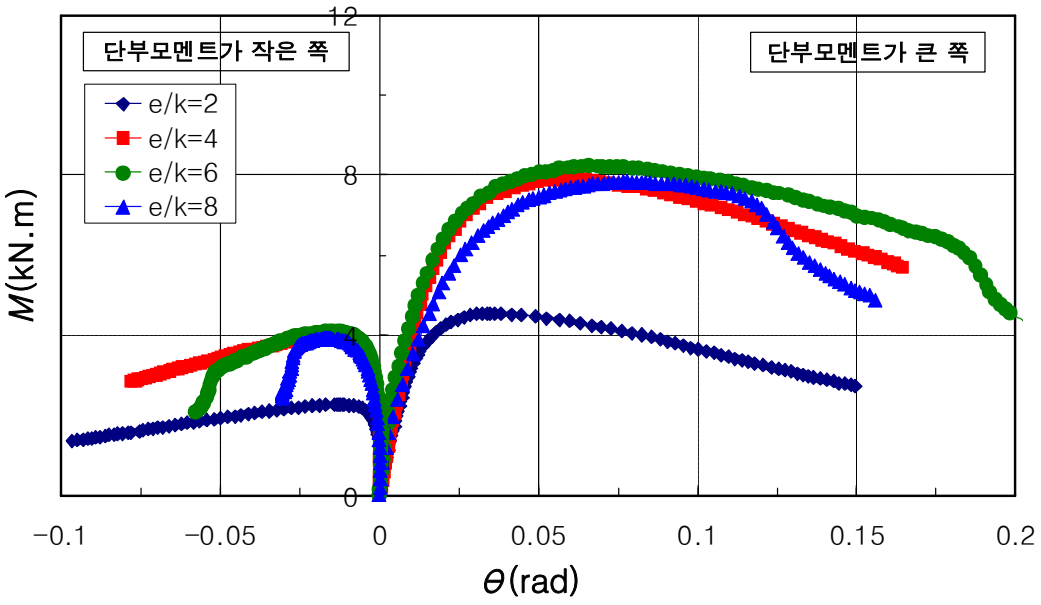
양단편심 비대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 모멘트-회전각 관계에서 세장비의 증가에 따른 세장효과에 의한 축력에 대한 영향보다는 편심비의 증가에 따른 단부모멘트 영향에 의한 회전각의 증대가 보-기둥의 좌굴에 큰 영향은 미치는 것으로

Collection @ chosun

판단된다.

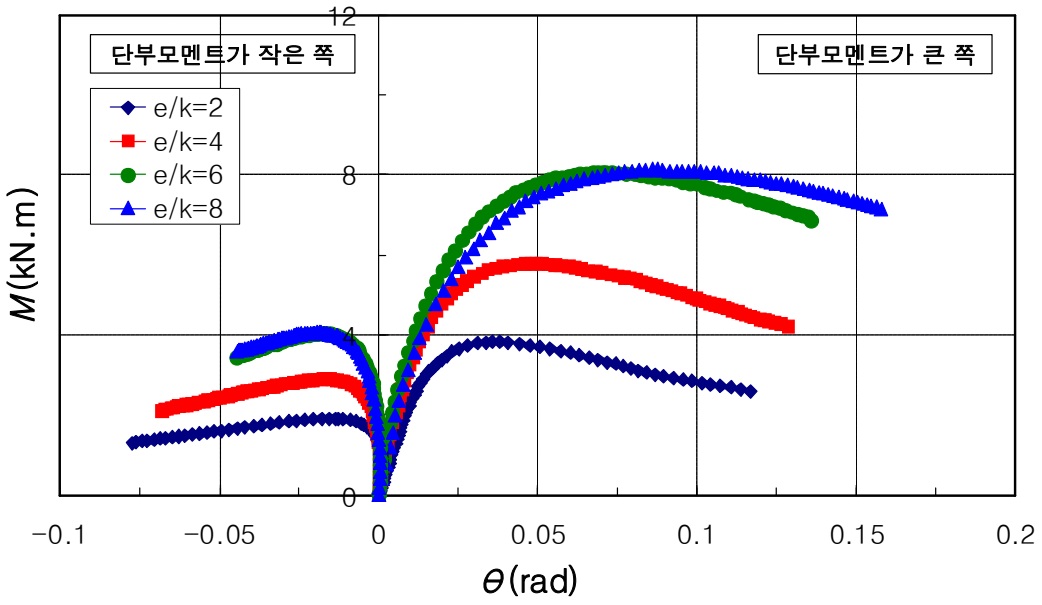


(a) 세장비 30 시험체



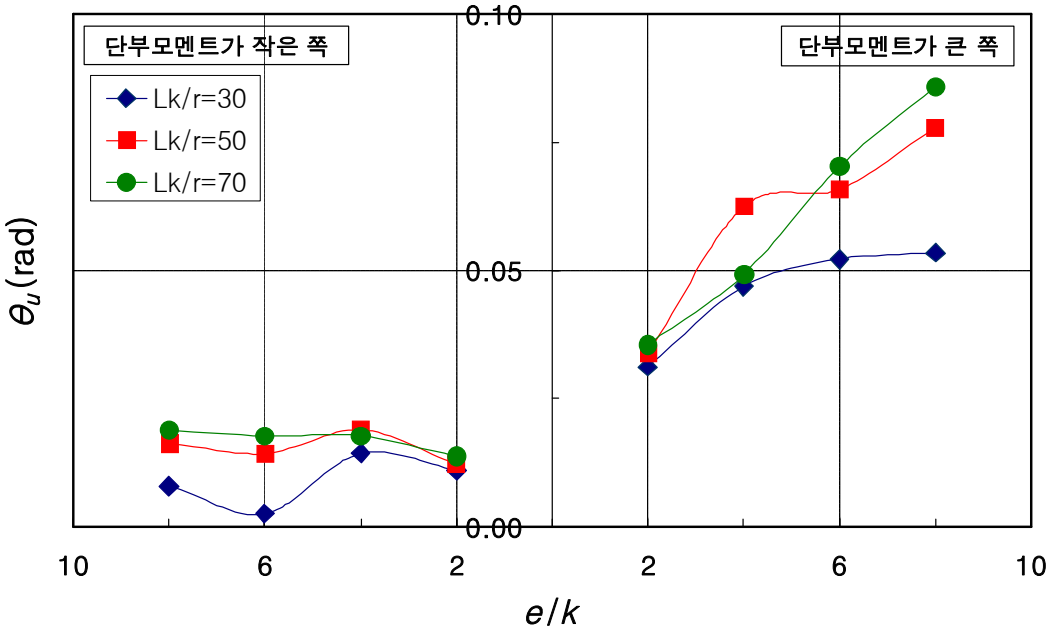
(b) 세장비 50 시험체

Collection @ chosun



(c) 세장비 70 시험체

[그림 3.50] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 모멘트-회전각 곡선



[그림 3.51] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥의 편심비에 따른 최대단부모멘트시 회전각

Collection @ chosun

3.2.3 순수 휨을 받는 보

순수 휨을 받는 보실험에서 얻어진 각 시험체의 최대내력과 최대내력시 변위 그리고 국부좌굴내력 등의 실험결과를 <표 3.5>에 나타냈다.

<표 3.5> 보 실험결과

구 분	P_u(kN)	σ_u(N/㎟)	M_u(kN·m)	δ_u(㎜)	θ_u(rad)	σ_{loc}(N/㎟)	M_u/M_p	σ_{loc}/σ_u
C-30	65.258	637	13.345	28.66	0.0882	631	1.549	0.990
C-50	31.272	566	11.844	62.96	0.0995	556	1.374	0.983
C-70	21.384	565	11.825	102.13	0.1198	-	1.372	-

주) P_u : 최대하중, σ_u : 최대휨내력, M_u : 최대휨모멘트, δ_u : 최대내력시 처짐, Θ_u: 최대내력시 단부회전각
σ_{loc} : 국부좌굴휨내력, M_p : 소성모멘트$\sigma_y \times Z_p$(σ_y : stub-column의 0.1% offset 내력, Z_p : 소성단면계수)
(-) : 부재좌굴에 의해 국부좌굴이 발생하지 않음

3.2.3.1 최대 휨내력

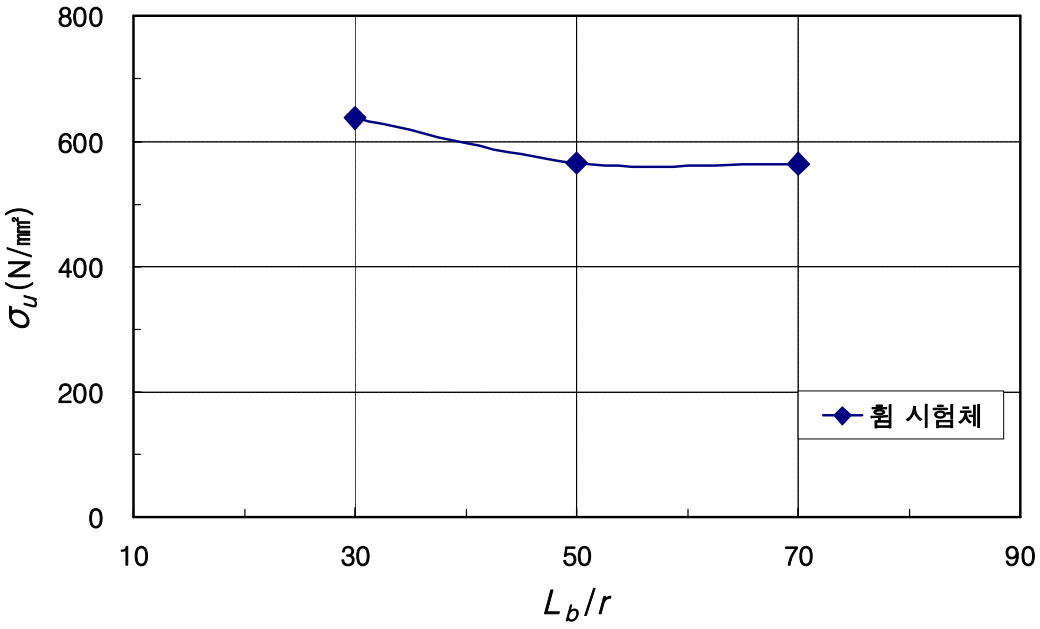
휨 부재의 실험결과 각 세장비별로 최대 휨내력 및 휨모멘트는 세장비의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 중앙부의 처짐 및 단부의 회전각은 증가하는 것으로 나타났다.

[그림 3.52]와 [그림 3.53]은 휨 부재의 세장비별로 최대 휨내력과 최대 휨모멘트를 나타낸 것으로 세장비50과 70은 거의 일정한 값으로 나타나나, 세장비30에 비해 세장비50은 88.75%, 세장비70은 88.61%의 값을 보였다.

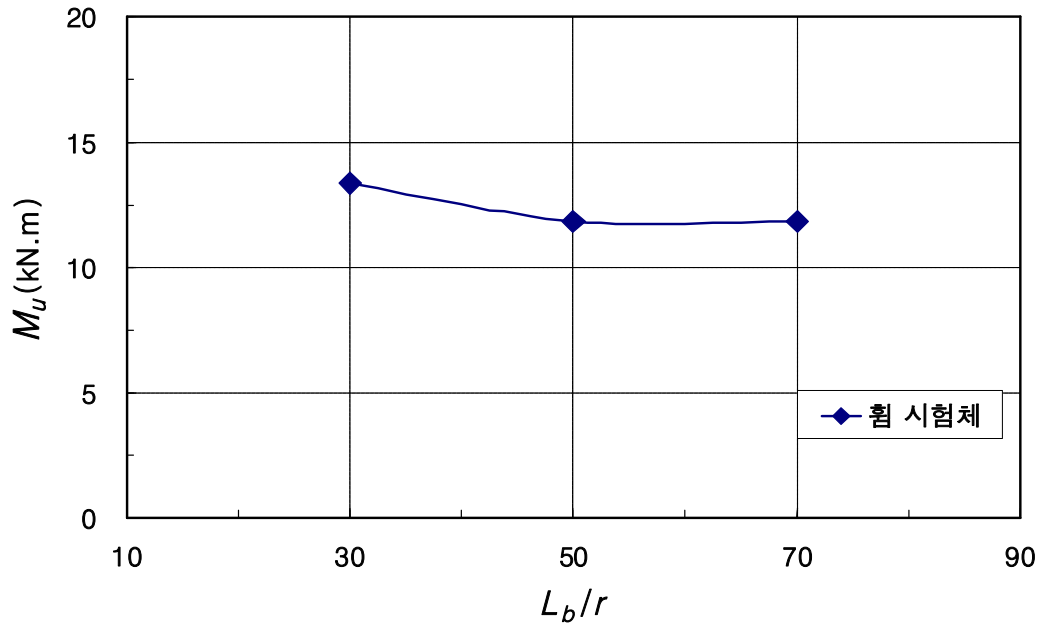
최대 휨모멘트를 소성모멘트로 나누어 비교한 결과, 각 세장비 모두 소성모멘트보다 큰 값으로 보였으며, 그 값은 1.549~1.372로 세장비의 증가에 따라 그 감소폭은 작게 나타나고 있다.

휨 부재의 국부좌굴은 세장비가 가장 작은 B-30과 B-50 시험체에서 발생하였으며, 최대 휨내력의 99%와 98.3%의 값을 보이고 있으며, C-70 시험체는 휨재의 부재좌굴로 처짐 측정장비의 측정한계치를 넘어서 국부좌굴점을 측정할 수 없었다.

Collection @ chosun



[그림 3.52] 휨 부재의 최대 휨내력



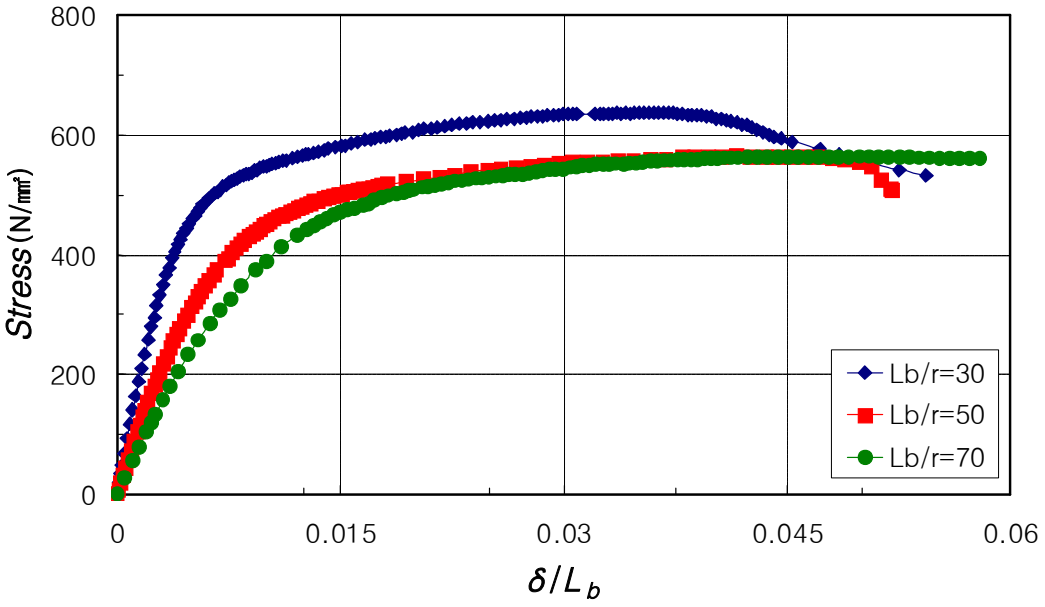
[그림 3.53] 휨 부재의 최대 휨모멘트

Collection @ chosun

3.2.3.2 휨내력-처짐 관계

휨 부재의 휨내력-처짐 관계는 초기탄성범위에서 세장비의 증가에 따라 휨내력의 감소를 보이고 있으나, 최대 휨내력에 이르러서 세장비50과 70의 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 그러나 세장비30에 비해서는 최대 휨내력이 감소하는 반면, 처짐은 증가하는 것으로 나타났다.

[그림 3.54]는 휨 부재의 각 세장비별로 휨내력과 휨 부재의 중앙부 처짐을 휨재의 비지지길이로 무차원하여 나타낸 곡선으로서 탄성범위의 휨내력은 세장비가 증가할수록 감소를 보이는 반면, 부재 중앙부의 처짐은 국부좌굴이 발생하기 전에는 크게 증가하는 것을 알 수 있다.



[그림 3.54] 휨 부재의 휨내력-처짐 관계

최대 휨내력시 처짐은 세장비30을 기준으로 세장비50은 1.19배, 세장비70은 1.42배 큰 값으로 나타났다.

이상에서 스테인리스 원형강관 휨 부재는 세장비의 증가에 따라 휨내력은 약간의 감소를 보이나 처짐은 크게 증가하는 연성적인 거동이 우수한 것으로 판단된다.

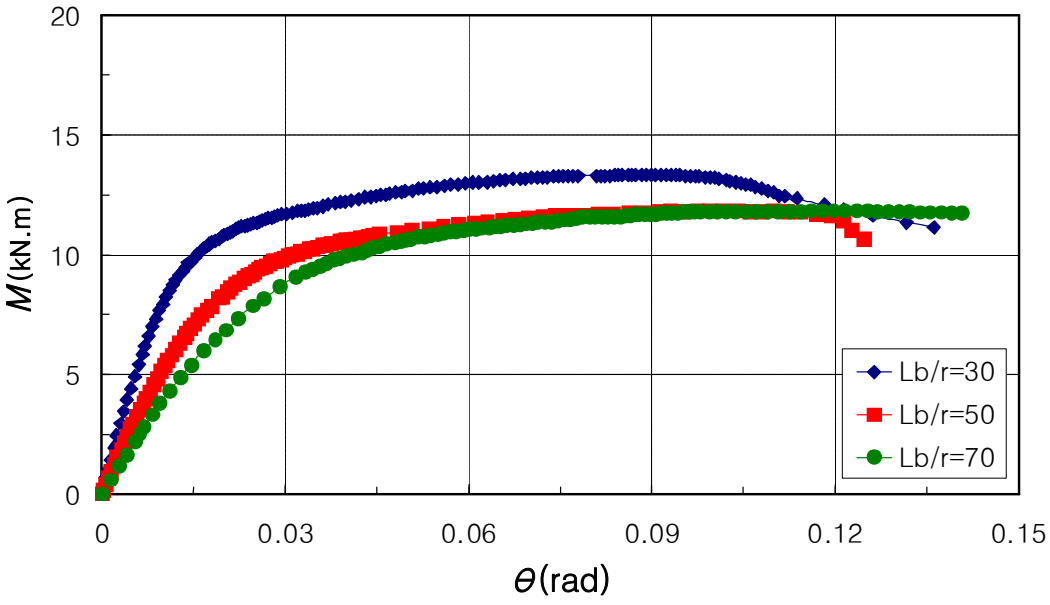
Collection @ chosun

3.2.3.3 모멘트(M)-회전각(θ) 관계

휨 부재의 모멘트-회전각 관계는 세장비가 증가할수록 휨모멘트는 감소하는 반면, 단부의 회전각은 크게 증가하는 것으로 나타났다.

[그림 3.55]는 휨 부재의 각 세장비별로 휨모멘트와 휨 부재의 단부의 회전각을 나타낸 곡선으로서 초기탄성범위에서 세장비의 증가에 따라 휨모멘트의 감소를 보이고 있으나, 최대 휨모멘트에 이르러서 세장비50과 70의 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 그러나 세장비30에 비해서는 최대 휨모멘트가 감소하는 반면, 회전각은 증가하는 것으로 나타났다. 최대 휨모멘트시 회전각은 세장비30을 기준으로 세장비50은 1.19배, 세장비70은 1.42배 큰 값으로 나타났다.

이상에서 스테인리스 원형강관 휨 부재는 세장비에 따라 휨모멘트는 약간의 차이를 보이나 세장비가 증가함에 따라 단부의 회전각은 크게 증가하는 연성적인 거동이 우수한 것으로 판단된다.



[그림 3.55] 휨 부재의 모멘트-회전각 관계

Collection @ chosun

3.3 소결

본 장에서는 스테인리스 원형강관의 기계적 성질과 재료적 특성을 파악하기 위한 재료실험과 중심압축 하중을 받는 기둥과 휨과 축력을 받는 보-기둥, 순수 휨을 받는 보 부재의 부재실험을 통하여 내력과 거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 재료실험

① 인장강도 실험결과 시험편에 항복참(yield plateau)이 나타나지 않았고, 항복이후에도 점차 내력이 증가하여 인장내력이 평균 850N/㎟로 매우 높은 값과 최대내력시 변형도는 0.5정도의 매우 우수한 변형능력을 보이고 있다.

② 항복내력으로 0.1% 옵셋 내력은 364N/㎟로 기준내력보다 각각 1.78배, 0.2% 옵셋 내력은 406N/㎟로 기준내력보다 2배 정도의 값으로 높게 나타났으며, 연신율 또한 52.63%로 매우 높은 연신능력을 보였다.

③ 탄성계수는 175.71GPa로 일반구조용 강재의 탄성계수보다 낮은 값을 보이고 있다. 이는 원형강관에서 절취한 인장시험편의 물림부가 정확히 평판을 이루지 못하여 실험 중 슬립(slip)현상에 의한 것으로 판단된다.

④ Stub-column 실험에 의한 평균최대내력은 450N/㎟이고, 0.1% 옵셋 평균항복내력은 314N/㎟, 0.2% 옵셋 항복내력은 356N/㎟으로 나타났다. 이는 스테인리스 강재를 건축구조용으로 사용시 별도의 항복강도 규정이 필요할 것으로 사료된다.

⑤ 재료실험결과, 스테인리스 원형강관은 항복내력, 항복비, 연신능력 등 구조용 강재로서 갖춰야할 충분한 기계적 성질과 최대내력, 소성변형능력에서 구조용 강관으로서 충분한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

(2) 부재실험

1) 중심압축 하중을 받는 기둥

① 스테인리스 원형강관 기둥의 최대내력은 모두 부재좌굴에 의해 결정되었고, 세장비 30 시험체는 344N/㎟이며, stub-column의 최대내력의 76.5% 정도의 저하된 값을 보이고 있으며, 세장비 50 시험체는 세장비 30의 66.1%, 세장비 70 시험체는 49.5%의 값을 나타냈다. 이는 세장비가 증가할수록 내력저하가 더 크게 나타내는 것이며, 기둥의 세장효과에 의한 것으로 판단된다.

② 내력-변위 관계는 세장비의 증가에 따라 내력과 축변위는 감소하고, 횡변위는 증가하는 것으로 나타났으며, 세장비의 증가에 따라 최대내력이후 소성변형능력은 더욱 증가하는 현상을 보이고 있다.

③ 스테인리스 원형강관은 기둥부재로서 활용 가능한 충분한 구조적 성능과 우수한 소성변형능력을 가지고 있는 것으로 판단된다.

2) 휨과 축력을 받는 보-기둥

① 스테인리스 원형강관 보-기둥의 최대내력은 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하현상이 뚜렷하게 나타났으며, 최대모멘트는 편심비가 증가할수록 증가하고, 세장비가 커질수록 감소함을 보였다. 이는 세장비 증가에 따른 세장효과와 편심비의 증가에 따른 보-기둥의 좌굴이 압축력보다는 휨의 영향이 상대적으로 커지기 때문으로 판단된다.

② 내력과 변위를 비교한 결과, 세장비가 증가할수록 부재좌굴로 인한 내력의 감소하며, 횡변위는 증가하나, 축변위는 편심에 의한 단부모멘트의 영향에 의해 불특정한 증감을 보이며, 내력과 변위에 가장 큰 영향을 주는 요인은 단부모멘트에 의한 부재의 곡률형상에 의한 것으로 판단된다.

③ 모멘트-회전각 관계에서 세장비의 증가에 따른 세장효과에 의한 휨의 영향보다는

Collection @ chosun

편심비의 증가에 따른 단부모멘트 영향에 의한 회전각의 증대가 보-기둥의 좌굴에 큰 영향은 미치는 것으로 판단된다.

④ 스테인리스 원형강관은 보-기둥부재로서 활용 가능한 충분한 구조적 성능과 우수한 소성변형능력을 가지고 있는 것으로 판단된다.

3) 순수 휨을 받는 보

① 스테인리스 원형강관 휨 부재의 실험결과 각 세장비 별로 최대 휨내력 및 휨모멘트는 세장비30이 세장비50과 70은 거의 동일한 값이며, 세장비30에 비해 작은 값을 보이나, 세장비의 증가에 따라 중앙부의 처짐 및 단부의 회전각은 증가하는 것으로 나타났다.

② 휨내력-처짐 관계와 휨모멘트-회전각 관계는 세장비50과 70은 세장비30에 비해 휨내력과 휨모멘트는 다소 감소하지만 거의 비슷한 결과를 보인 반면, 처짐과 단부의 회전각은 세장비의 증가에 따라 크게 증가하는 것으로 나타났다.

③ 스테인리스 원형강관의 휨에 대한 성능은 부재의 길이에 대해 내력의 큰 증감 없이 연성적인 거동이 우수한 것으로 사료되며, 구조용 강재로서 활용가능하다고 판단된다.

dCollection @ chosun

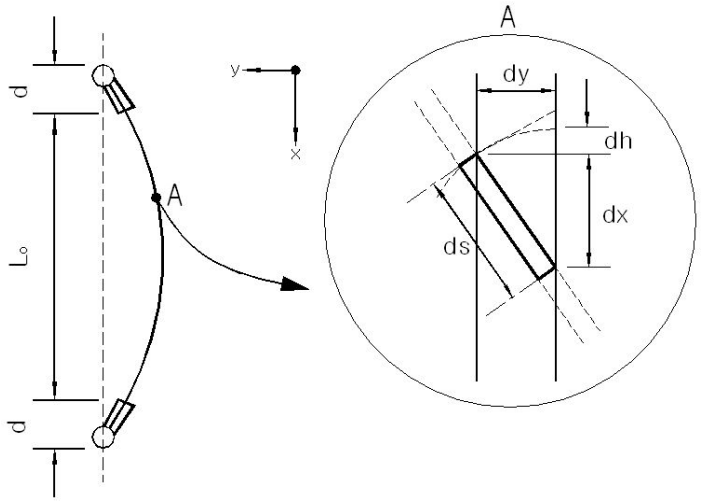
4. 보-기둥의 내력평가

4.1 전소성(全塑性) 이론해석에 의한 평가

4.1.1 등가(等價)좌굴길이계수(K)

본 연구에서는 유효좌굴길이(L_k)가 1이 되도록 시험체의 양단부를 단순지지조건으로 계획하기 위하여, 실질적인 완전한 힌지는 불가능하나 이상적인 조건에 가깝도록 나이프에지를 사용하여 편심가력 및 단부회전에 대한 구속을 최소화하였다.

이에 따른 나이프에지의 영향으로 시험체 양단부는 강역부가 되어 좌굴길이의 변화를 초래하며, 이를 수정하기 위해 등가좌굴길이계수를 산정한다. 양단에 강역이 있는 경우, 먼저 보-기둥의 좌굴을 energy법을 이용하여 등가좌굴길이계수(K)를 구한다.



[그림 4.1] 등가좌굴길이계수

[그림 4.1]의 등가좌굴길이계수 개념도를 참조하여 임의의 좌표 x에 있는 A점의 연직방향의 변위를 구하면,

$$dh = ds - dx$$

$$= \sqrt{dx^2 + dy^2} - dx$$

$$= \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \cdot dx - dx$$

dCollection @ chosun

$$= \sqrt{1+(y')^2}\cdot\ dx - dx$$

$$= [1 + 1/2\cdot\ (y')^2 - 1]\cdot\ dx$$

$$= 1/2\cdot\ (y')^2\cdot\ dx$$

$a = \sqrt{dy^2 + dh^2}$에 대한 L_o구간의 개형을 $y = a \cdot \sin(\pi x/L_o)$로 가정하면, $y' = (a\pi/L_o) \cdot \cos(\pi x/L_o)$, 따라서 L_o구간의 압축량을 δ_1로 하면,

$$\delta_1 = \int_o^{L_o} 1/2\cdot(y')^2\cdot dx$$

$$= 1/2\cdot a^2\cdot\frac{\pi}{L_o}\cdot\int_o^{L_o}\cos^2\cdot\frac{\pi}{L_o}\cdot dx$$

$$= 1/4\cdot a^2\cdot\frac{\pi}{L_o}\cdot L_o$$

또한, 양단의 강역(剛域)부분의 압축량을 δ_2로 하면

$$\delta_2 = 2\times 1/2\cdot\{a\cdot(\pi/L_o)\}^2\cdot d$$

$$= a^2\cdot(\pi/L_o)^2\cdot d$$

전체 압축량은 $\delta = \delta_1 + \delta_2$이므로

$$\delta = (L_o/4 + d)(\pi a/L_o)^2$$

임의의 하중(P)에 의해 한 일은

$$P\cdot\delta = P\cdot(L_o/4 + d)(\pi a/L_o)^2 \qquad (4.1)$$

이며, 휨에 의해 기둥에 축적된 변형에너지(U)는

$$dU = 1/2\cdot\ EI\cdot\ (y'')^2\cdot\ dx$$

$$y'' = -a(\pi/L_o)^2\cdot\ \sin(\pi x/L_o)$$

위 식으로부터

$$U = 1/2\cdot\ EI\cdot\ (\pi/L_o)^4\cdot\ 4\int_0^{L_o}\sin^2(\pi x/L_o)\cdot\ dx$$

Collection @ chosun

$$= 1/4 \cdot EI a^2 \cdot (\pi/L_o)^4 \cdot L_o \quad (4.2)$$

(단, 강역에는 축적 안됨)

$P \cdot \delta = U$이므로, 식 (4.1)과 (4.2)로부터

$$P = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_o(L_o + 4d)} \quad (4.3)$$

이 되고, 부재의 길이가 $L_o + 2d$인 양단 단순지지의 좌굴하중은 등가좌굴길이계수(K)를 고려하면

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{\{K(L_o + 2d)\}^2} \quad (4.4)$$

이므로, 식 (4.3)과 (4.4)로부터 $P = P_{cr}$이 되기 위한 K값은

$$K = \frac{\sqrt{L_o(L_o + 4d)}}{(L_o + 2d)} \quad (4.5)$$

이 된다.

4.1.2 전소성내력(全塑性耐力)

원형강관 보-기둥에 일정한 축력과 모멘트가 작용되면 모멘트와 하중의 증가에 따라 강관은 전소성응력상태가 된다.

[그림 4.2]는 축력과 휨모멘트 작용시 원형강관 단면요소의 전소성 응력블럭(stress block)을 나타낸 것으로서, 소성중립축(PNA, Plastic Neutral Axis)의 위치에 따라 힘의 평형조건으로부터 축력(P)과 모멘트(M)의 상관관계(P-M interaction)를 유도하여 세장비의 변화에 따른 P-δ 영향과 모멘트 확대계수(A_F)을 고려하여 구한다.

해석을 위한 가정은 다음과 같다.

① 단면형태는 중공단면(中空斷面, hollow section)으로 한다.

② 강관의 변형도는 소성중립축으로부터 거리(X_n)에 비례한다.

③ 보-기둥의 단면은 변형 이후에도 평면을 유지한다.

④ 전소성응력상태시 단면내의 인장응력과 압축응력은 모두 직사각형 분포를 한다.

dCollection @ chosun

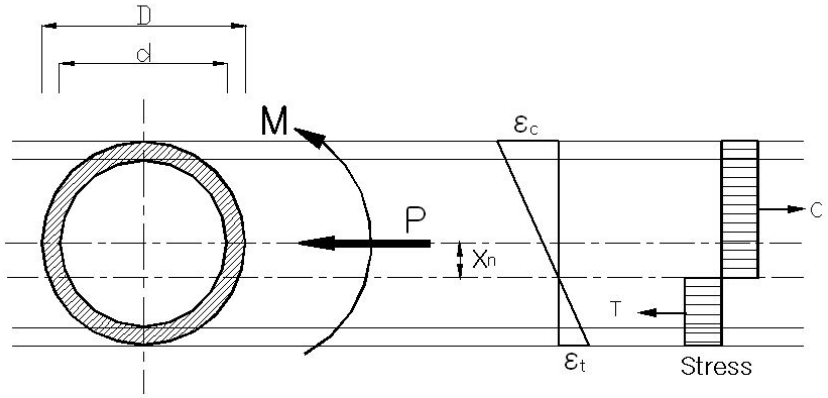
⑤ 부재의 원처짐 및 편심하중에 의한 영향으로 모멘트 확대계수에 강도저감계수(ϕ) 0.85(AISC-LRFD)를 적용한다.

축력(P)과 편심으로 인해 편심모멘트(M)가 작용해서 원형강관 기둥의 단면이 전소성상태가 될 때 내력의 계산은 소성중립축(PNA)의 위치에 따라 세가지 영역으로 나누어진다.

a) $-\frac{D}{2} \leq X_n < -\frac{d}{2}$

b) $-\frac{d}{2} \leqq X_n \leqq \frac{d}{2}$

c) $\frac{d}{2} < X_n \leq \frac{D}{2}$



[그림 4.117] 원형강관 기둥의 전소성응력상태

[그림 4.2]에서와 같이 소성중립축이 $-\frac{d}{2} \leqq X_n \leq \frac{d}{2}$에 있다고 가정하고, 전소성상태시 단면내의 압축력(C)과 인장력(T)은 다음과 같다.

$$T = 2\left[\int_{X_n}^{\frac{d}{2}} \{A(y) - B(y)\}dy + \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} A(y)dy\right]\sigma_y$$

여기서, $A(y) = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - y^2}$, $B(y) = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - y^2}$

$$C = 2\left[\int_{-\frac{D}{2}}^{-\frac{d}{2}} A(y)dy + \int_{-\frac{d}{2}}^{X_n} \{A(y) - B(y)\}dy\right]\sigma_y$$

Collection @ chosun

소성중립축을 중심으로 단면내에 분포하고 있는 각 응력에 의한 모멘트는 다음식과 같다.

$$M_T = 2\left[\int_{X_n}^{\frac{d}{2}} \{A(y) - B(y)\}(y - X_n)dy + \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} A(y)(y - X_n)dy\right]\sigma_y$$

$$M_C = 2\left[\int_{-\frac{D}{2}}^{-\frac{d}{2}} A(y)(X_n - y)dy + \int_{-\frac{d}{2}}^{X_n} \{A(y) - B(y)\}(X_n - y)dy\right]\sigma_y$$

전소성응력상태시 단면에 작용하는 축력(P)과 모멘트(M)는 단면내의 축방향력(C, T)과 모멘트(M_C, M_T)와의 평형조건으로부터 다음과 같이 구한다.

$$P = C - T$$

$$M = M_C + M_T - P \times X_n$$

세장비 변화에 따른 세장효과를 고려하기 위해 모멘트 확대계수를 고려하여 구하면 다음과 같다.

$$P_{PC} = P \times \alpha$$

$$M_{PC} = M \times \frac{1}{A_F} = M \times \left(1 - \frac{P}{\phi \times P_e}\right)$$

여기서, α: 세장효과를 고려한 좌굴계수($0.658^{\lambda_c^2}$)

ϕ : 강도저감계수(strength reduction factor, 0.85)

λ_c : 무차원세장비 $\left(\frac{KL}{r\pi} \times \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}\right)$

P_e : Euler 좌굴하중 $\left(\frac{\pi^2 EI}{L_k^2}\right)$

4.1.3 실험결과와 이론해석결과 비교

구조물에 있어서 거의 모든 부재는 휨과 축하중을 동시에 받게 된다. 이때 축력이나 모멘트가 상대적으로 작을 경우에는 각각의 영향은 무시되며, 부재는 축력이나 모멘트만을 받는 부재로 설계된다. 그러나 많은 경우에 있어서 조합력의 영향은 무시될 수 없고, 조합하중하에서 거동이 설계시 고려되어야 한다.

dCollection @ chosun

휨과 축력을 받는 경우의 상관식은 다음을 고려한다.

① 최대하중 P_u는 보-기둥 시험체에 작용하는 압축력이다.

② 최대휨모멘트 M_{u1}는 편심에 의한 재단모멘트로 실험값이다.

③ 해석 압축하중 P_{PC}는 보-기둥의 세장비에 따라 계산된다.

④ 소성모멘트 M_p는 소성단면계수와 stub-column의 0.1% 옵셋 항복강도의 곱이다.

P-M 상관식에 대한 전소성 이론해석결과와 실험결과, 서로 비교한 결과를 <표 4.1>에 나타냈으며, 실험결과를 P-M 상관곡선에 각 세장비에 따라 [그림 4.3]에 나타냈다.

대부분의 시험체의 실험결과는 이론해석결과에 비해 축력은 2.1%~89.43%, 휨모멘트는 2.2%~89.4% 높은 값으로 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 실험결과 가장 높은 값을 보이고 있다. 그러나 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비70 시험체는 해석결과의 축력은 90.5%~95.7%, 모멘트는 90.9%~95.5% 정도의 값으로 낮게 나타났다. 또한 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비30의 CCD25-30시험체외 세장비50과 70의 편심비2~6까지의 시험체의 실험결과는 이론해석결과의 축력은 86.6%~97.8%, 모멘트는 86.8%~98.6% 값을 보이고 있다. 또한 세장비가 증가할수록 해석값에 거의 근접하는 값을 보이고 있고, 양단편심 비대칭과 대칭 단일곡률 보-기둥은 해석값보다 낮은 시험체 실험결과가 나타나고 있다.

[그림 4.3]은 stub-column의 0.1% 옵셋 내력을 이용하여 세장효과를 고려한 보-기둥의 축력과 모멘트의 상관관계와 각 시험체의 실험결과를 나타낸 곡선으로서 stub-column의 항복내력과 시험체의 전소성모멘트로 무차원화한 것이다.

[그림 4.3]의 세장비70 중심기둥과 양단편심 대칭과 비대칭 단일곡률 보-기둥의 대부분의 시험체 실험결과가 해석결과보다 낮은 값을 보이고 있다. 이는 해석에 적용된 좌굴강도계수가 일반구조용 강재의 계수값을 적용한 결과로 스테인리스 원형강관 보-기둥은 세장효과에 의한 좌굴강도계수가 별도로 적용될 것으로 판단된다.

dCollection @ chosun

<표 4.1> 보-기둥 실험결과와 해석결과의 비교

시험체명	실험결과				해석결과				P_u/P_{PC}	M_{u1}/M_{PC}	R
	P_u	M_{u1}	P_u/P_y	M_{u1}/M_p	P_{PC}	M_{PC}	P_u/P_y	M_{PC}/M_p			
C-30	299.95	0	1.10	0	259.57	0	0.95	0	1.16	0	1.16
C-50	259.18	0	0.95	0	233.28	0	0.85	0	1.11	0	1.11
C-70	195.49	0	0.71	0	198.79	0	0.73	0	0.98	0	0.98
BCA25-30	192.54	4.81	0.70	0.56	166.29	4.16	0.61	0.48	1.16	1.16	1.16
BCA50-30	137.00	6.85	0.50	0.80	119.81	6.00	0.44	0.70	1.14	1.14	1.14
BCA75-30	105.27	7.90	0.38	0.92	92.01	6.92	0.34	0.80	1.14	1.14	1.14
BCA100-30	84.32	8.43	0.31	0.98	74.43	7.42	0.27	0.86	1.13	1.14	1.13
BCA25-50	150.14	3.75	0.55	0.44	142.81	3.58	0.52	0.42	1.05	1.05	1.05
BCA50-50	110.52	5.53	0.40	0.64	104.69	5.24	0.38	0.61	1.06	1.06	1.06
BCA75-50	87.92	6.59	0.32	0.77	82.27	6.17	0.30	0.72	1.07	1.07	1.07
BCA100-50	71.28	7.13	0.26	0.83	67.56	6.73	0.25	0.78	1.06	106	1.06
BCA25-70	105.61	2.64	0.39	0.31	110.38	2.76	0.40	0.32	0.96	0.96	0.96
BCA50-70	76.13	3.81	0.28	0.44	84.08	4.19	0.31	0.49	0.91	0.91	0.91
BCA75-70	62.64	4.70	0.23	0.55	68.06	5.11	0.25	0.59	0.92	0.92	0.92
BCA100-70	52.41	5.24	0.19	0.61	57.57	5.71	0.21	0.66	0.91	0.92	0.91
BCB25-30	284.20	7.11	1.04	0.82	172.00	4.30	0.63	0.50	1.65	1.65	1.65
BCB50-30	214.62	10.73	0.78	1.25	124.34	6.23	0.45	0.72	1.73	1.72	1.73
BCB75-30	180.92	13.57	0.66	1.58	95.58	7.16	0.35	0.83	1.89	1.89	1.89
BCB100-30	143.76	14.38	0.53	1.69	76.48	7.67	0.28	0.89	1.88	1.88	1.88
BCB25-50	221.97	5.55	0.81	0.64	158.90	3.98	0.58	0.46	1.40	1.39	1.40
BCB50-50	178.56	8.93	0.65	1.04	117.63	5.88	0.43	0.68	1.52	1.52	1.52
BCB75-50	148.18	11.11	0.54	1.29	91.73	6.87	0.34	0.80	1.62	1.62	1.62
BCB100-50	119.56	11.96	0.44	1.39	73.99	7.44	0.27	0.86	1.62	1.61	1.62
BCB25-70	172.09	4.30	0.63	0.50	140.67	3.52	0.51	0.41	1.22	1.22	1.22
BCB50-70	141.6	7.08	0.52	0.82	107.18	5.36	0.39	0.62	1.32	1.32	1.32
BCB75-70	115.59	8.67	0.42	1.01	85.39	6.41	0.31	0.74	1.35	1.35	1.35
BCB100-70	92.30	9.23	0.34	1.07	70.16	7.04	0.26	0.82	1.32	1.31	1.32

주) $R = \sqrt{P_u^2 + M_{u1}^2} / \sqrt{P_{PC}^2 + M_{PC}^2}$

Collection @ chosun

<표 4.1> 계속

시험체명	실험결과				해석결과				P_u/P_{PC}	M_{u1}/M_{PC}	R
	P_u	M_{u1}	P_u/P_y	M_{u1}/M_p	P_{PC}	M_{PC}	P_u/P_y	M_{PC}/M_p			
BCC25-30	229.55	5.74	0.84	0.67	169.38	4.23	0.62	0.49	1.36	1.36	1.36
BCC50-30	178.36	8.92	0.65	1.04	122.29	6.11	0.45	0.71	1.46	1.46	1.46
BCC75-30	142.44	10.68	0.52	1.24	93.99	7.03	0.34	0.82	1.52	1.52	1.52
BCC100-30	113.79	11.38	0.42	1.32	75.36	7.54	0.28	0.88	1.51	1.51	1.51
BCC25-50	179.77	4.49	0.66	0.52	151.36	3.78	0.55	0.44	1.19	1.19	1.19
BCC50-50	141.79	7.09	0.52	0.82	111.13	5.55	0.41	0.64	1.28	1.28	1.28
BCC75-50	115.91	8.69	0.42	1.01	86.84	6.51	0.32	0.76	1.34	1.34	1.34
BCC100-50	95.21	9.52	0.35	1.11	70.59	7.07	0.26	0.82	1.35	1.35	1.35
BCC25-70	129.02	3.23	0.47	0.37	126.42	3.16	0.46	0.37	1.02	1.02	1.02
BCC50-70	101.34	5.07	0.37	0.59	95.22	4.76	0.35	0.55	1.06	1.07	1.06
BCC75-70	84.64	6.35	0.31	0.74	76.29	5.71	0.28	0.66	1.11	1.11	1.11
BCC100-70	73.02	7.30	0.27	0.85	63.19	6.34	0.23	0.74	1.16	1.15	1.16
BCD25-30	165.23	4.13	0.60	0.48	169.51	4.22	0.62	0.49	0.98	0.97	0.98
BCD50-30	151.61	7.58	0.55	0.88	122.29	6.11	0.45	0.71	1.24	1.24	1.24
BCD75-30	112.21	8.42	0.41	0.98	93.99	7.03	0.34	0.82	1.19	1.20	1.19
BCD100-30	89.60	8.96	0.33	1.04	75.36	7.54	0.28	0.88	1.19	1.19	1.19
BCD25-50	131.52	3.29	0.48	0.38	151.48	3.77	0.55	0.44	0.87	0.87	0.87
BCD50-50	96.33	4.82	0.35	0.56	111.29	5.55	0.41	0.64	0.87	0.87	0.87
BCD75-50	85.55	6.42	0.31	0.75	86.91	6.51	0.32	0.76	0.98	0.99	0.98
BCD100-50	74.97	7.50	0.27	0.87	70.86	7.07	0.26	0.82	1.06	1.06	1.06
BCD25-70	116.62	2.92	0.43	0.34	126.56	3.15	0.46	0.37	0.92	0.93	0.92
BCD50-70	90.65	4.53	0.33	0.53	95.29	4.75	0.35	0.55	0.95	0.95	0.95
BCD75-70	74.59	5.59	0.27	0.65	76.29	5.71	0.28	0.66	0.98	0.98	0.98
BCD100-70	65.86	6.59	0.24	0.77	63.34	6.33	0.23	0.74	1.04	1.04	1.04

주) $R = \sqrt{P_u^2 + M_{u1}^2} / \sqrt{P_{PC}^2 + M_{PC}^2}$

Collection @ chosun

<표 4.1> 계속

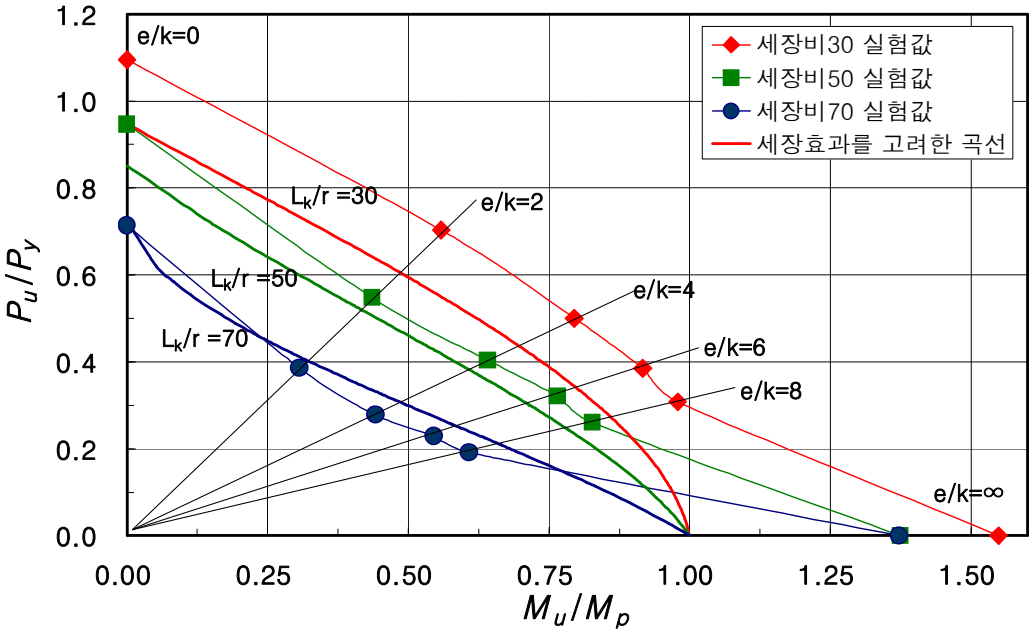
시험체명	실험결과				해석결과				P_u/P_{PC}	M_{u1}/M_{PC}	R
	P_u	M_{u1}	P_u/P_y	M_{u1}/M_p	P_{PC}	M_{PC}	P_u/P_y	M_{PC}/M_p			
BCE25-30	233.04	5.83	0.85	0.68	171.01	4.26	0.63	0.50	1.36	1.37	1.36
BCE50-30	174.15	8.71	0.64	1.01	123.42	6.18	0.45	0.72	1.41	1.41	1.41
BCE75-30	144.65	10.85	0.53	1.26	94.79	7.11	0.35	0.83	1.53	1.53	1.53
BCE100-30	109.66	10.97	0.40	1.27	76.29	7.60	0.28	0.88	1.44	1.44	1.44
BCE25-50	181.20	4.53	0.66	0.53	155.78	3.89	0.57	0.45	1.16	1.17	1.16
BCE50-50	157.93	7.90	0.58	0.92	114.66	5.74	0.42	0.67	1.38	1.38	1.38
BCE75-50	109.78	8.23	0.40	0.96	89.53	6.71	0.33	0.78	1.23	1.23	1.23
BCE100-50	78.45	7.85	0.29	0.91	72.97	7.26	0.27	0.84	1.08	1.08	1.08
BCE25-70	153.08	3.83	0.56	0.44	134.84	3.36	0.49	0.39	1.14	1.14	1.14
BCE50-70	115.74	5.79	0.42	0.67	101.88	5.09	0.37	0.59	1.14	1.14	1.14
BCE75-70	107.60	8.07	0.39	0.94	81.27	6.09	0.30	0.71	1.32	1.33	1.32
BCE100-70	81.34	8.13	0.30	0.94	67.32	6.70	0.25	0.78	1.21	1.21	1.21
B-30	0	13.35	0	1.55	0	8.62	0	1.00	0	1.55	1.55
B-50	0	11.84	0	1.37	0	8.62	0	1.00	0	1.38	1.38
B-70	0	11.83	0	1.37	0	8.62	0	1.00	0	1.37	1.37

주) $R = \sqrt{P_u^2 + M_{u1}^2} / \sqrt{P_{PC}^2 + M_{PC}^2}$

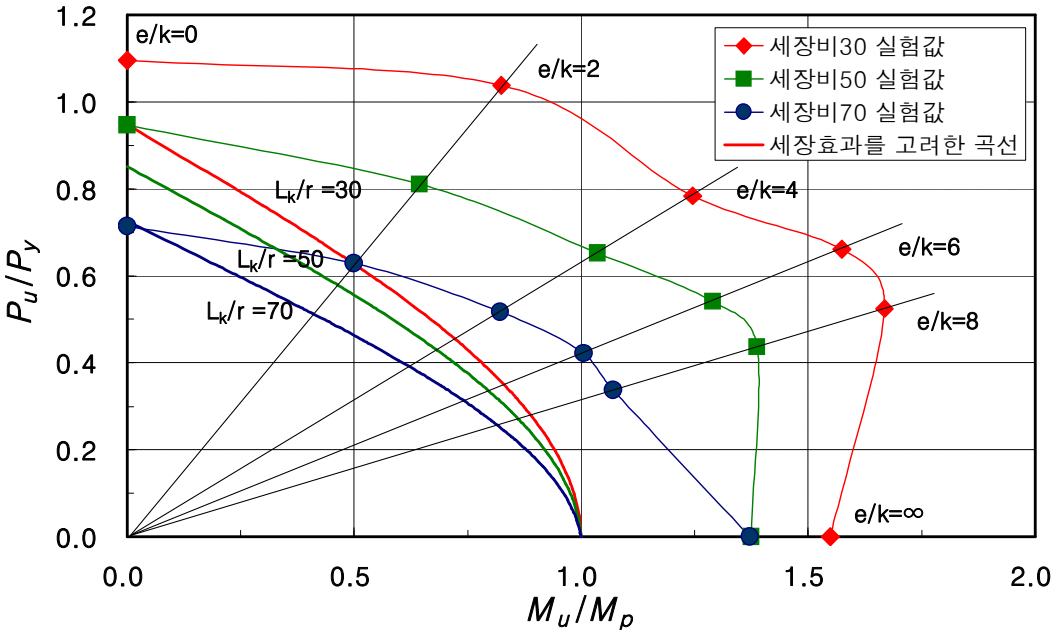
[그림 4.4]는 보-기둥의 실험값을 해석값으로 축력와 휨모멘트를 정량화한 값인 R로 비교한 곡선으로서, 일부 시험체가 해석결과보다 낮게 나타나고 있음을 나타내고 있다.

특히 대칭과 비대칭 단일곡률의 보-기둥의 실험값이 해석값을 낮게 나타나고 있는데, 이는 스테인리스 강관의 이론해석에 적용한 세장비를 고려한 좌굴계수를 일반구조용강에 적용한 좌굴계수를 적용한 결과로 스테인리스 원형강관에 대해서는 별도의 좌굴계수가 적용되어야 될 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

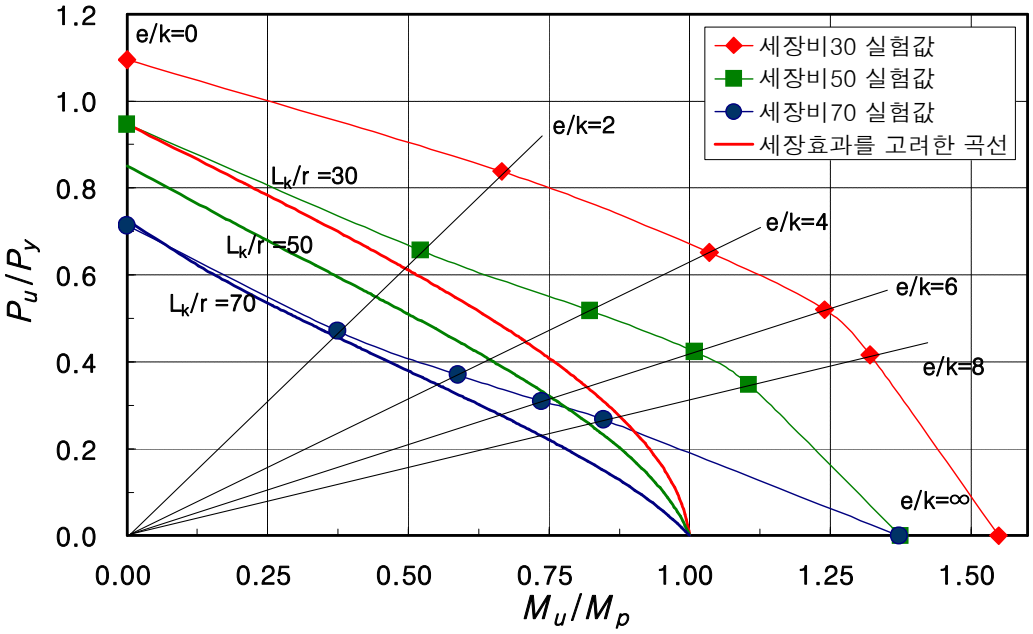


(a) 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥

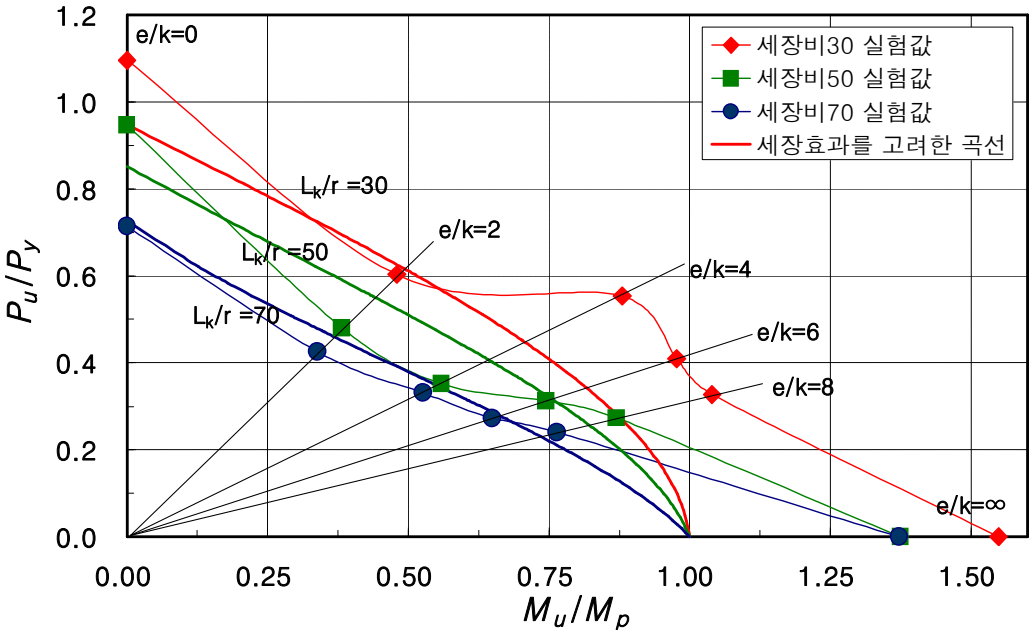


(b) 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥

Collection @ chosun

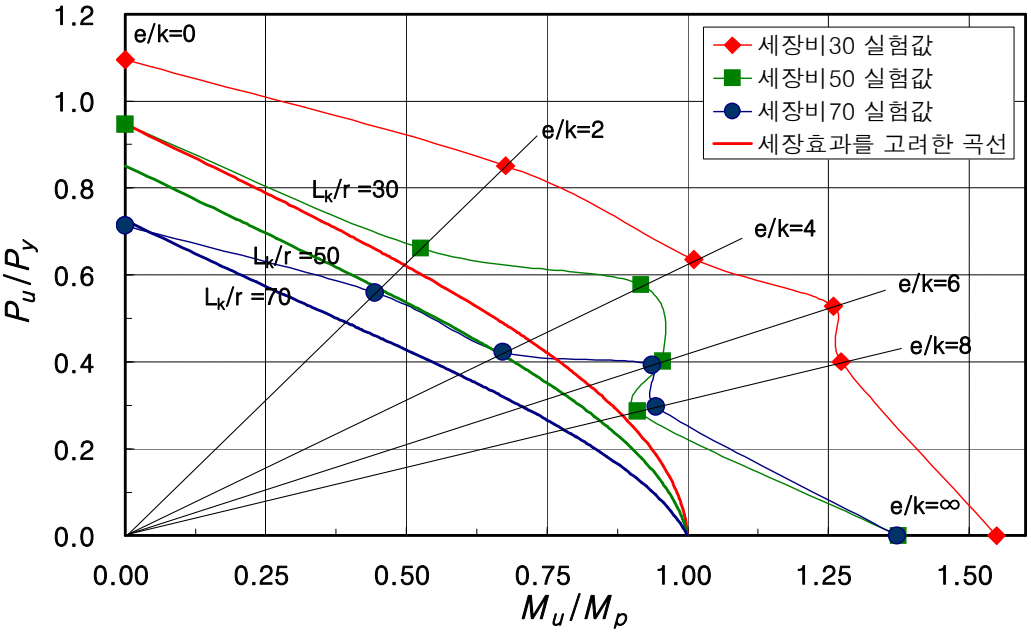


(c) 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥



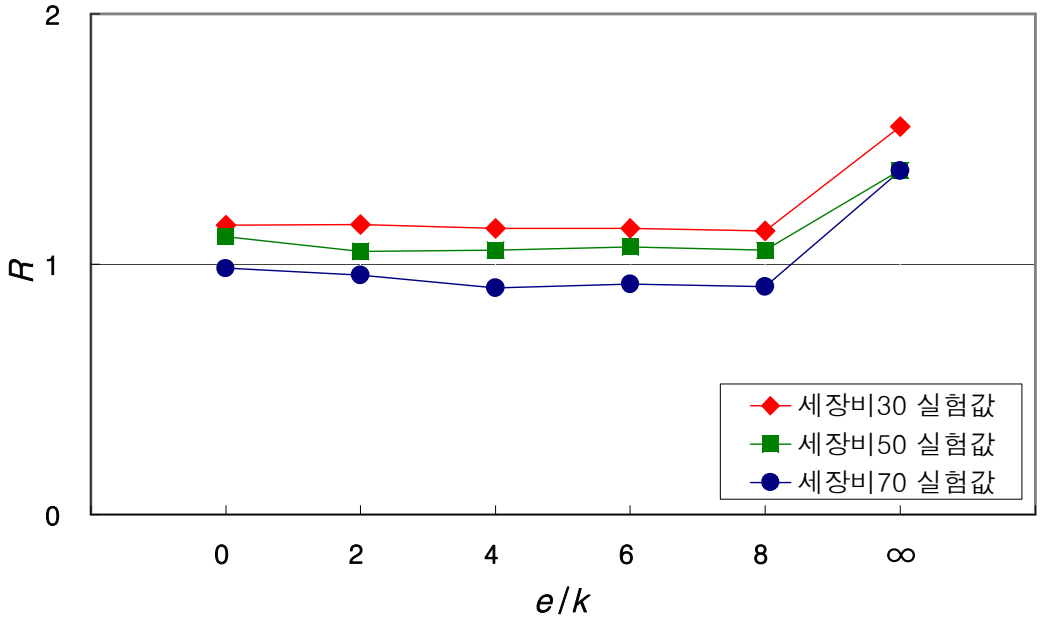
(d) 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥

Collection @ chosun



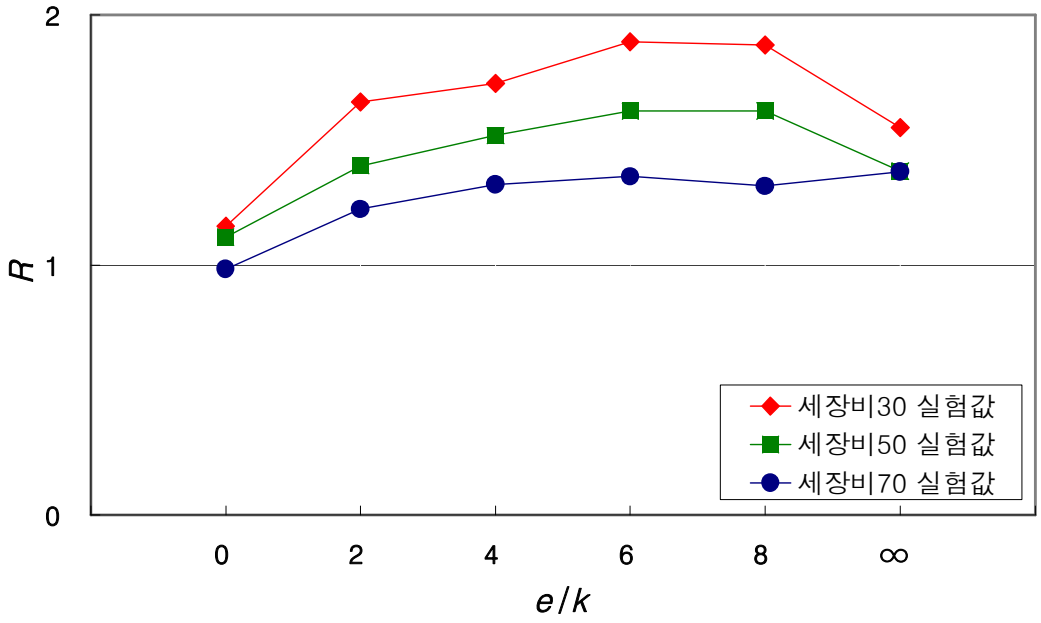
(e) 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥

[그림 4.3] 보-기둥의 실험값과 P-M 상관곡선 비교

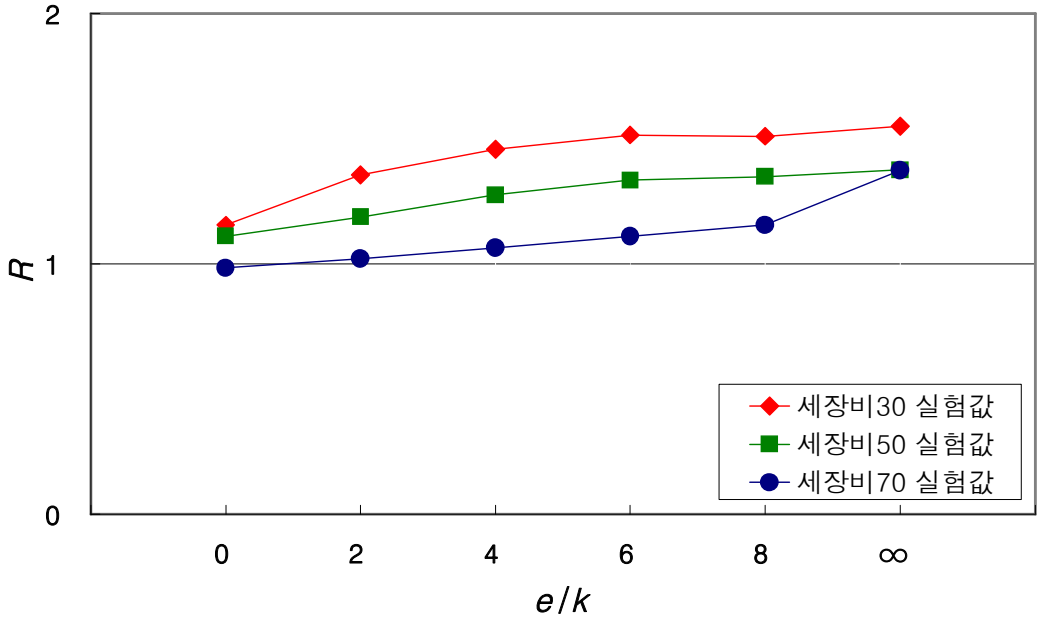


(a) 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥

Collection @ chosun

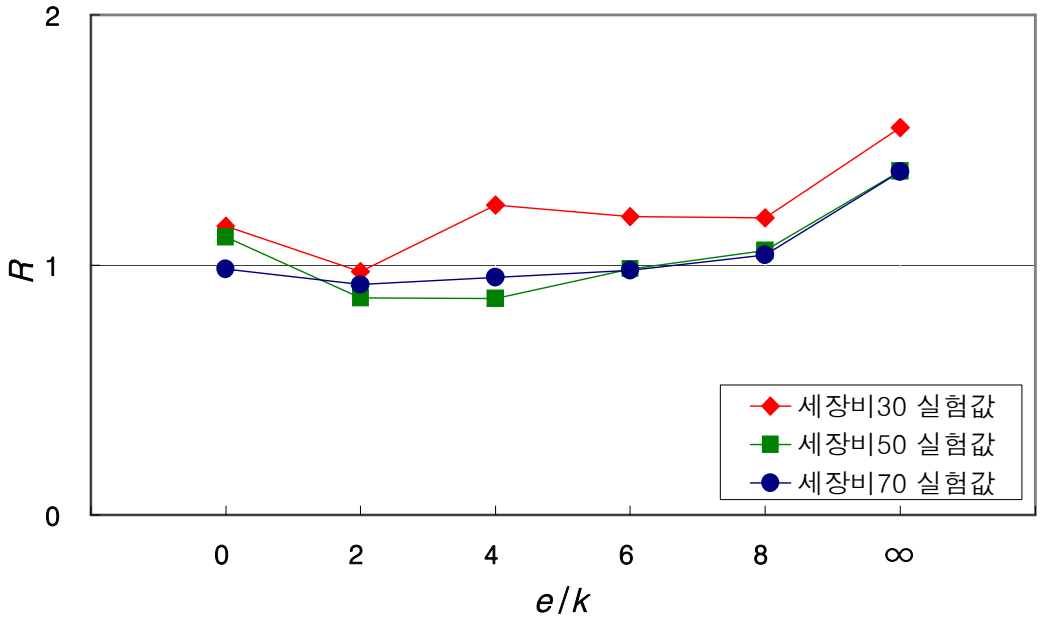


(b) 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥

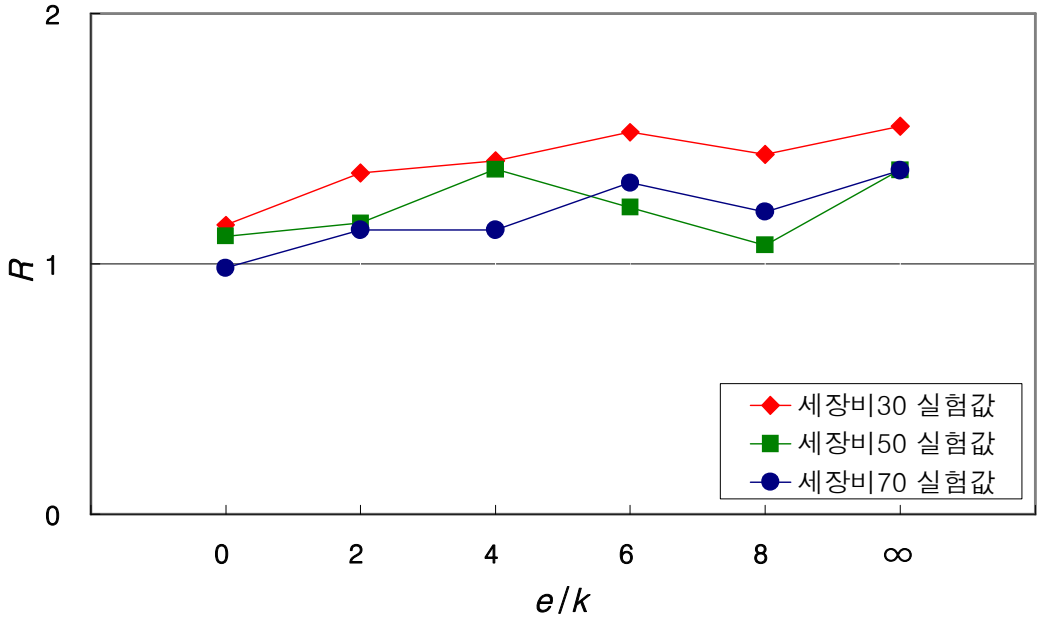


(c) 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥

Collection @ chosun



(d) 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥



(e) 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥

[그림 4.4] 보-기둥 편심비에 따른 R값의 비교

Collection @ chosun

4.2 각국 기준식에 의한 평가

4.2.1 각국 기준식

현재 국내에서는 스테인리스 강관에 대해서 강관 구조 설계기준에서 별도로 제시하고 있지 않으므로 휨과 축력을 받는 보-기둥의 실험결과와 각국 기준식에 대해 비교하고자 AIK-LSD, AISC-LRFD, AIJ-LSD, SIJ-ASD에 대해 알아본다.

(1) AIK-LSD

축력과 휨 모멘트를 받는 보-기둥 부재의 설계식은 다음과 같다.

① $\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2$ 일 때

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9}\left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right] \leq 1.0$$

② $\frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2$ 일 때

$$\frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0$$

여기서, P_u : 설계압축력(kN)

P_n : 기둥의 임계좌굴내력(kN)

M : 부재내의 모멘트(골조의 횡이동이 방지됨, kN·m)

M_{ux} : x축에 대한 설계모멘트(kN·m)

M_{uy} : y축에 대한 설계모멘트(kN·m)

M_u : 소요휨강도($M \times A_F$, kN·m)

A_F : 모멘트 확대계수($P-\delta = C_m / \left(1 - \frac{P_u}{P_e}\right) \geq 1.0$)

C_m : 등가모멘트계수, $0.6 - 0.4\frac{M_1}{M_2}$($C_m = 1.0$: 단곡률 일때 $M_1 = M_2$)

Collection @ chosun

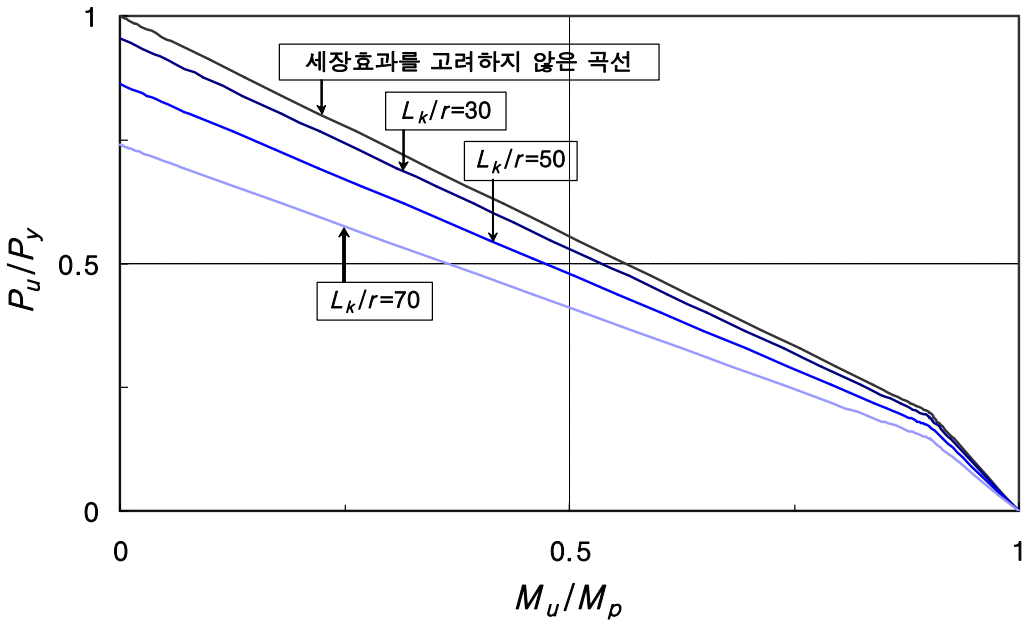
P_e : Euler 좌굴하중($A_g F_y / \lambda_c^2$)

M_{nx} : x축에 대한 부재의 최대모멘트저항능력 (kN·m)

M_{ny} : y축에 대한 부재의 최대모멘트저항능력 (kN·m)

ϕ_c : 0.85 (보-기둥의 강도저감계수)

ϕ_b : 0.90 (보의 강도저감계수)



[그림 4.5] AIK-LSD 보-기둥곡선

(2) AISC-LRFD

축력과 휨 모멘트를 받는 보-기둥 부재의 설계식은 다음과 같다.

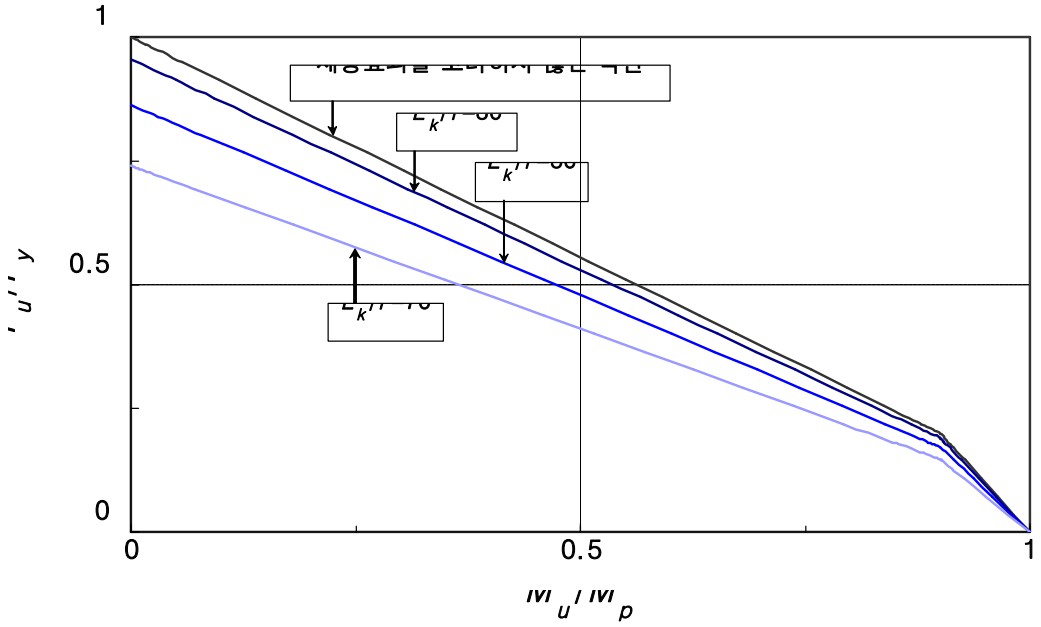
① $\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2$ 일 때

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9}\left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}}\right] \leq 1.0$$

Collection @ chosun

② $\frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2$ 일 때

$$\frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0$$



[그림 4.6] AISC-LRFD 보-기둥곡선

여기서, P_u : 설계압축력(kN)

P_n : 기둥의 임계좌굴내력(kN)

M : 부재내의 모멘트(골조의 횡이동이 구속됨, kN·m)

M_{ux} : x축에 대한 설계모멘트(kN·m)

M_{uy} : y축에 대한 설계모멘트(kN·m)

M_u : 소요휨강도($M \times A_F$, kN·m)

A_F : 모멘트 확대계수($P-\delta = C_m / \left(1 - \frac{P_u}{P_e}\right) \geq 1.0$)

C_m : 등가모멘트계수, $0.6 - 0.4\frac{M_1}{M_2}$($C_m = 1.0$: 단곡률 일때 $M_1 = M_2$)

Collection @ chosun

P_e : Euler 좌굴하중($A_g F_y / \lambda_c^2$)

M_{nx} : x축에 대한 부재의 최대모멘트저항능력 (kN·m)

M_{ny} : y축에 대한 부재의 최대모멘트저항능력 (kN·m)

ϕ_c : 0.85 (기둥의 강도저감계수)

ϕ_b : 0.90 (보의 강도저감계수)

(3) AIJ-LSD

축력과 모멘트를 받는 보-기둥의 설계식은 다음과 같다.

① $\frac{N}{\phi N_{cr}} \leq 0.15$ 일 때

$$\frac{M C_m}{\phi M_u (1 - \frac{N}{N_e})} \leq 1.0$$

② $\frac{N}{\phi N_{cr}} > 0.15$ 일 때

$$\frac{N}{\phi N_{cr}} + 0.85 \left[\frac{M C_m}{\phi M_u \left(1 - \frac{N}{N_e}\right)} \right] \leq 1.0$$

여기서, N : 기둥의 설계압축력(tf)

N_{cr} : 극한좌굴내력, $\{1 - 0.545(\overline{\lambda} - 0.3)\} Ny$(tf)

M : 설계모멘트(tf·cm)

M_u : 보의 전소성모멘트(tf·cm)

N_e : Euler좌굴하중(tf)

ϕ : 강도저감계수(0.90)

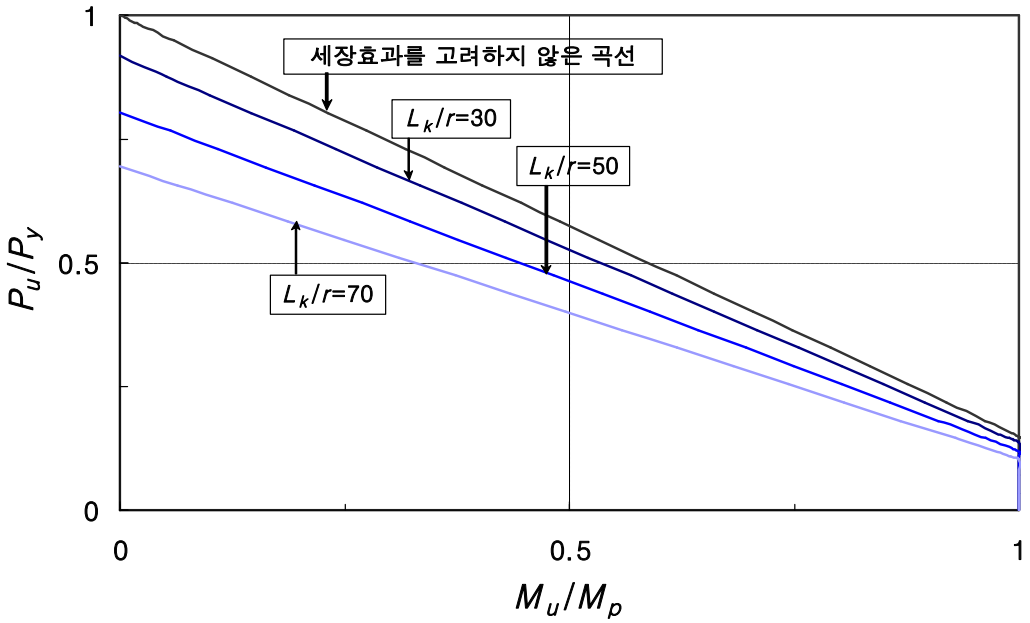
$C_m = 0.6 - 0.4 \frac{M_1}{M_2}$

(이 식에서 M_1, M_2는 단부모멘트로 $|M_2| > |M_1|$이며, M_1/M_2는 부재의 단곡률이 생기

Collection @ chosun

게 모멘트가 작용할 때는 (-), 2중곡률이 생기게 모멘트가 작용할 때는 (+)의 값을 가지게 된다.)

$\overline{\lambda}$: 무차원세장비$\left(\frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s}}\right)$($\sigma_y$: 강재의 항복강도, E_s : 탄성계수)



[그림 4.7] AIJ-LSD 보-기둥곡선

(4) SIJ-ASD

SIJ-ASD의 휨과 축력이 작용하는 스테인리스 강관기둥의 허용응력설계식으로서 다음과 같다.

① $\lambda_c \leq 0.2$ 일 때

$$N_c = \frac{N_y}{1.5}$$

② $0.2 < \lambda_c \leq 1.8$ 일 때

$$N_c = \frac{(1.086 - 0.43\lambda_c)N_y}{\nu}$$

dCollection @ chosun

③ $\lambda_c > 1.8$ 일 때

$$N_c = \left(\frac{1}{2.14\ \lambda_c^2}\right) N_y$$

$$\frac{N}{N_c} + \frac{M_1}{M_a} \leqq 1$$

여기서, N_c : 압축재의 허용압축하중=$A_c F_y$(tf)

N_y : 항복하중=$F_y A$(tf)

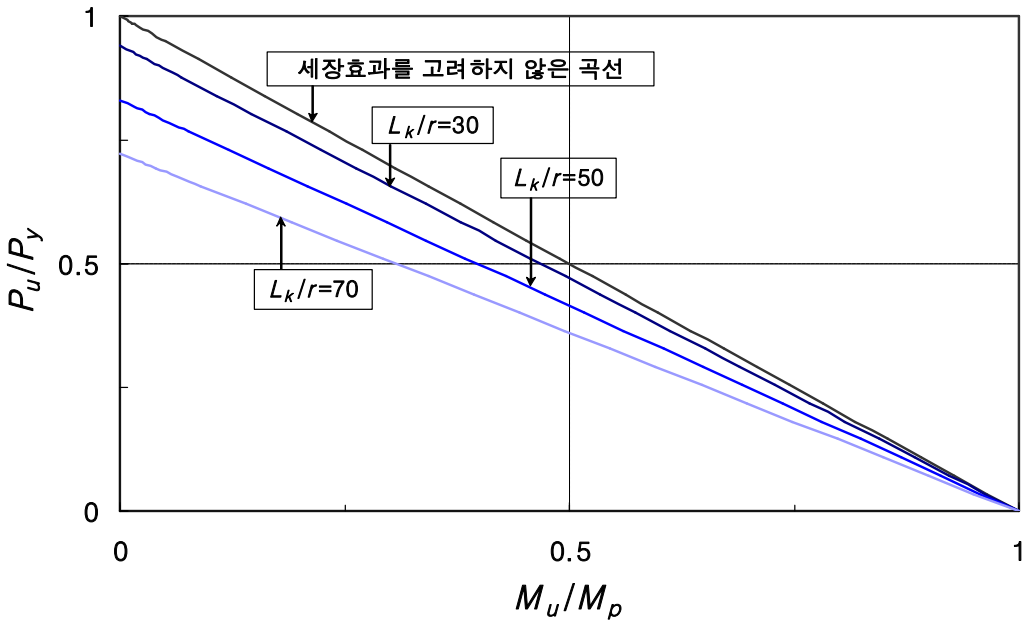
ν : 안전율1.42＋0.4 λ_c

λ_c : 무차원세장비

M_1 : 축방향에 작용하는 모멘트(tf・㎝)

M_a : 허용휨강도 $S \cdot F_y/1.5$ (tf・㎝)

S : 탄성단면계수(㎤)



[그림 4.8] SIJ-ASD 보-기둥곡선

Collection @ chosun

4.2.2 실험결과와 각국 기준식 비교

스테인리스 원형강관 보-기둥에 대해 AIK-LSD, AISC-LRFD, AIJ-LSD, SIJ-ASD에서 제안하고 있는 기준식과 실험값을 비교한다.

본 연구에서 기준식에 적용되는 항복강도는 stub-column압축강도실험에서 구한 항복내력(F_y=314N/㎟)을 적용하여 비교하였으며, 강도저감계수(ϕ)를 제외하여 적용하였다. 또한 보-기둥의 단부의 조건과 곡률의 형상에 대한 모멘트확대계수(A_F)를 적용하지 않았고, 실험에 의한 모멘트도 단부의 재단모멘트로 기준식에 실험결과를 단순 비교하였다.

각국 기준식에 대한 기준값과 실험값을 서로 비교한 결과를 <표 4.2>에 나타냈으며, 실험결과를 기준곡선에 각 세장비에 따라 [그림 4.9]에 나타냈다.

각국의 기준식에 실험값을 비교한 결과, 대부분의 보-기둥 시험체의 실험결과는 기준값을 만족하고 있으나, 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비70 시험체와 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비50 시험체 일부가 기준값보다 낮은 결과를 보이고 있다.

[그림 4.9]는 각국의 기준곡선에 실험값을 세장비별로 비교한 곡선으로서 세장비30의 보-기둥 실험값은 기준곡선을 상회하고 있으나, 세장비50과 70시험체의 일부 실험값이 기준곡선에 만족하지 못한 결과를 보이고 있다.

이는 단부의 재단모멘트가 스테인리스 원형강관 단일곡률 보-기둥의 내력의 저하에 큰 영향을 주는 것으로 보여 지며, 또한 연성이 큰 스테인리스 강재의 특성상 세장비가 클수록 보-기둥의 좌굴에 의한 횡변위의 증가가 $P-\delta$효과에 의한 2차 휨모멘트를 증가시킴으로 축력의 저하에 의한 것으로 판단되어지며, 이를 고려한 좌굴강도를 결정하여야 할 것으로 사료된다.

dCollection @ chosun

<표 4.2> 보-기둥 실험값과 기준값의 비교

시험체명	P_u (kN)	M_{u1} (kN·m)	P_{AIK} P_{AISC} (kN)	M_{AIK} M_{AISC} (kN·m)	P_{AIJ} (kN)	M_{AIJ} (kN·m)	P_{SIJ} (kN)	M_{SIJ} (kN·m)	R / R_{AIK} R_{AISC}	R / R_{AIJ}	R / R_{SIJ}
C-30	299.95	0	261.62	0	251.16	0	257.54	0	1.15	1.19	1.16
C-50	259.18	0	236.22	0	220.42	0	227.38	0	1.10	1.18	1.14
C-70	195.49	0	202.70	0	190.24	0	197.76	0	0.96	1.03	0.99
BCA25-30	192.54	4.81	156.50	3.90	155.30	3.87	130.50	3.26	1.23	1.24	1.48
BCA50-30	137.00	6.85	111.70	5.56	112.70	5.59	87.60	4.37	1.23	1.22	1.56
BCA75-30	105.27	7.90	86.40	6.49	87.90	6.59	65.70	4.93	1.22	1.20	1.60
BCA100-30	84.32	8.43	70.80	7.07	72.50	7.21	52.90	5.26	1.19	1.16	1.59
BCA25-50	150.14	3.75	146.80	3.67	142.80	3.57	122.50	3.05	1.02	1.05	1.23
BCA50-50	110.51	5.53	106.60	5.32	105.90	5.27	83.70	4.18	1.04	1.04	1.32
BCA75-50	87.92	6.59	83.50	6.27	83.80	6.28	63.80	4.76	1.05	1.05	1.38
BCA100-50	71.28	7.13	68.80	6.87	69.60	6.94	51.30	5.12	1.04	1.02	1.39
BCA25-70	105.60	2.64	133.10	3.33	129.80	3.22	112.90	2.84	0.79	0.81	0.94
BCA50-70	76.13	3.81	99.40	4.94	98.50	4.89	79.50	3.96	0.77	0.77	0.96
BCA75-70	62.64	4.70	79.00	5.92	79.20	5.92	60.90	4.58	0.79	0.79	1.03
BCA100-70	52.41	5.24	65.70	6.55	66.20	6.61	49.70	4.95	0.80	0.79	1.05
BCB25-30	284.20	7.11	156.50	3.90	155.30	3.87	130.50	3.26	1.82	1.83	2.18
BCB50-30	214.62	10.73	111.70	5.56	112.70	5.59	87.60	4.37	1.92	1.90	2.45
BCB75-30	180.92	13.57	86.40	6.49	87.90	6.59	65.70	4.93	2.09	2.06	2.75
BCB100-30	143.76	14.38	70.80	7.07	72.50	7.21	52.90	5.26	2.03	1.98	1.72
BCB25-50	221.97	5.55	146.80	3.67	142.80	3.57	122.50	3.05	1.51	1.55	1.81
BCB50-50	178.58	8.93	106.60	5.32	105.90	5.27	83.70	4.18	1.68	1.69	2.13
BCB75-50	148.18	11.11	83.50	6.27	83.80	6.28	63.80	4.76	1.77	1.77	2.32
BCB100-50	119.56	11.96	68.80	6.87	69.60	6.94	51.30	5.12	1.74	1.72	2.33
BCB25-70	172.09	4.30	133.10	3.33	129.80	3.22	112.90	2.84	1.29	1.33	1.52
BCB50-70	141.62	7.08	99.40	4.94	98.50	4.89	79.50	3.96	1.42	1.44	1.78
BCB75-70	115.59	8.67	79.00	5.92	79.20	5.92	60.90	4.58	1.46	1.46	1.90
BCB100-70	92.30	9.23	65.70	6.55	66.20	6.61	49.70	4.95	1.40	1.39	1.86

주) P_u : 실험최대하중, M_{u1} : 실험단부모멘트, P_{AIK} : AIK-LSD 축력, M_{AIK} : AIK-LSD 휨강도, P_{AISC} : AISC-LRFD 축력, M_{AISC} : AISC-LRFD 휨강도, P_{AIJ} : AIJ-LSD 축력, M_{AIJ} : AIJ-LSD 휨강도, P_{SIJ} : SIJ-ASD 축력, M_{SIJ} : SIJ-ASD 휨강도, $R = \sqrt{P^2+M^2}$

Collection @ chosun

<표 4.2> 계속

시험체명	P_u (kN)	M_{u1} (kN·m)	P_{AIK} P_{AISC} (kN)	M_{AIK} M_{AISC} (kN·m)	P_{AIJ} (kN)	M_{AIJ} (kN·m)	P_{SIJ} (kN)	M_{SIJ} (kN·m)	R / R_{AIK} R_{AISC}	R / R_{AIJ}	R / R_{SIJ}
BCC25-30	229.55	5.74	156.50	3.90	155.30	3.87	130.50	3.26	1.47	1.48	1.76
BCC50-30	178.36	8.92	111.70	5.56	112.70	5.59	87.60	4.37	1.60	1.58	2.04
BCC75-30	142.44	10.68	86.40	6.49	87.90	6.59	65.70	4.93	1.65	1.62	2.17
BCC100-30	113.79	11.38	70.80	7.07	72.50	7.21	52.90	5.26	1.61	1.57	2.15
BCC25-50	179.77	4.49	146.80	3.67	142.80	3.57	122.50	3.05	1.22	1.26	1.47
BCC50-50	141.79	7.09	106.60	5.32	105.90	5.27	83.70	4.18	1.33	1.34	1.69
BCC75-50	115.91	8.69	83.50	6.27	83.80	6.28	63.80	4.76	1.39	1.38	1.82
BCC100-50	95.21	9.52	68.80	6.87	69.60	6.94	51.30	5.12	1.38	1.37	1.86
BCC25-70	129.02	3.23	133.10	3.33	129.80	3.22	112.90	2.84	0.97	0.99	1.14
BCC50-70	101.34	5.07	99.40	4.94	98.50	4.89	79.50	3.96	1.02	1.03	1.27
BCC75-70	84.64	6.35	79.00	5.92	79.20	5.92	60.90	4.58	1.07	1.07	1.39
BCC100-70	73.02	7.30	65.70	6.55	66.20	6.61	49.70	4.95	1.11	1.10	1.47
BCD25-30	165.23	4.13	156.50	3.90	155.30	3.87	130.50	3.26	1.06	1.06	1.27
BCD50-30	151.61	7.58	111.70	5.56	112.70	5.59	87.60	4.37	1.36	1.35	1.73
BCD75-30	112.21	8.42	86.40	6.49	87.90	6.59	65.70	4.93	1.30	1.28	1.71
BCD100-30	89.60	8.96	70.80	7.07	72.50	7.21	52.90	5.26	1.27	1.24	1.69
BCD25-50	131.52	3.29	146.80	3.67	142.80	3.57	122.50	3.05	0.90	0.92	1.07
BCD50-50	96.33	4.82	106.60	5.32	105.90	5.27	83.70	4.18	0.90	0.91	1.15
BCD75-50	85.55	6.42	83.50	6.27	83.80	6.28	63.80	4.76	1.02	1.02	1.34
BCD100-50	74.97	7.50	68.80	6.87	69.60	6.94	51.30	5.12	1.09	1.08	1.46
BCD25-70	116.62	2.92	133.10	3.33	129.80	3.22	112.90	2.84	0.88	0.90	1.03
BCD50-70	90.65	4.53	99.40	4.94	98.50	4.89	79.50	3.96	0.91	0.92	1.14
BCD75-70	74.59	5.59	79.00	5.92	79.20	5.92	60.90	4.58	0.94	0.94	1.22
BCD100-70	65.86	6.59	65.70	6.55	66.20	6.61	49.70	4.95	1.00	0.99	1.33

주) P_u : 실험최대하중, M_{u1} : 실험최대단부모멘트, P_{AIK} : AIK-LSD 축력, M_{AIK} : AIK-LSD 휨강도, P_{AISC} : AISC-LRFD 축력, M_{AISC} : AISC-LRFD 휨강도, P_{AIJ} : AIJ-LSD 축력, M_{AIJ} : AIJ-LSD 휨강도, P_{SIJ} : SIJ-ASD 축력, M_{SIJ} : SIJ-ASD 휨강도, $R = \sqrt{P^2+M^2}$

dCollection @ chosun

<표 4.2> 계속

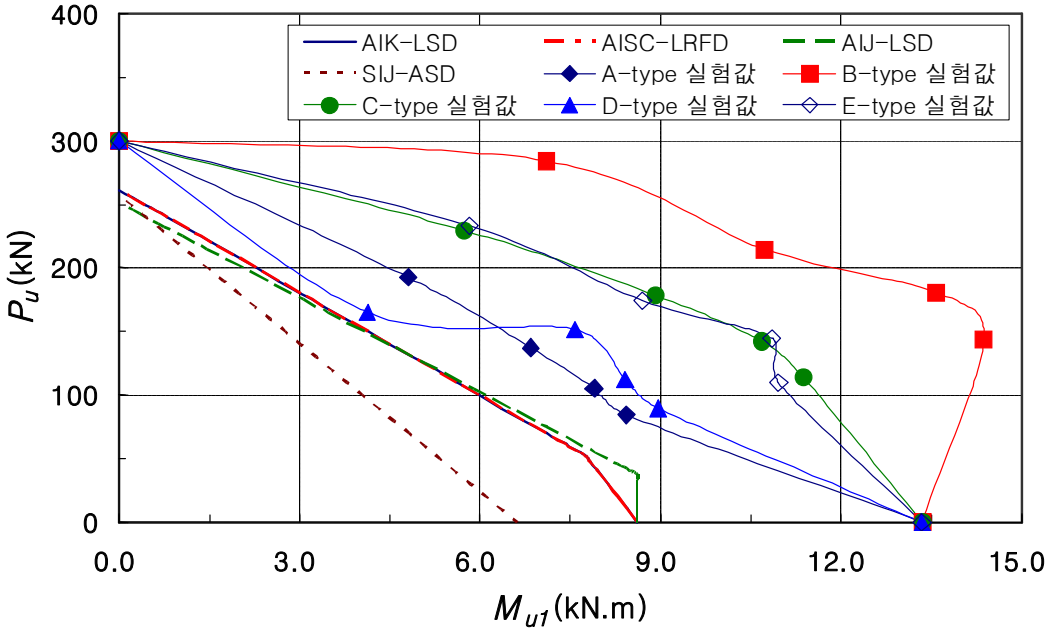
시험체명	P_u (kN)	M_{u1} (kN·m)	P_{AIK} P_{AISC} (kN)	M_{AIK} M_{AISC} (kN·m)	P_{AIJ} (kN)	M_{AIJ} (kN·m)	P_{SIJ} (kN)	M_{SIJ} (kN·m)	R / R_{AIK} R_{AISC}	R / R_{AIJ}	R / R_{SIJ}
BCE25-30	233.04	5.83	156.50	3.90	155.30	3.87	130.50	3.26	1.49	1.50	1.79
BCE50-30	174.15	8.71	111.70	5.56	112.70	5.59	87.60	4.37	1.56	1.55	1.99
BCE75-30	144.65	10.85	86.40	6.49	87.90	6.59	65.70	4.93	1.67	1.65	2.20
BCE100-30	109.66	10.97	70.80	7.07	72.50	7.21	52.90	5.26	1.55	1.51	2.07
BCE25-50	181.20	4.53	146.80	3.67	142.80	3.57	122.50	3.05	1.23	1.27	1.48
BCE50-50	157.98	7.90	106.60	5.32	105.90	5.27	83.70	4.18	1.48	1.49	1.89
BCE75-50	109.78	8.23	83.50	6.27	83.80	6.28	63.80	4.76	1.31	1.31	1.72
BCE100-50	78.45	7.84	68.80	6.87	69.60	6.94	51.30	5.12	1.14	1.13	1.53
BCE25-70	153.08	3.83	133.10	3.33	129.80	3.22	112.90	2.84	1.15	1.18	1.36
BCE50-70	115.74	5.79	99.40	4.94	98.50	4.89	79.50	3.96	1.16	1.18	1.46
BCE75-70	107.60	8.07	79.00	5.92	79.20	5.92	60.90	4.58	1.36	1.36	1.77
BCE100-70	81.34	8.13	65.70	6.55	66.20	6.61	49.70	4.95	1.24	1.23	1.64
B-30	0	13.35	0	8.62	0	8.62	0	6.62	1.55	1.55	2.02
B-50	0	11.84	0	8.62	0	8.62	0	6.62	1.37	1.37	1.79
B-70	0	11.83	0	8.62	0	8.62	0	6.62	1.37	1.37	1.79

주) P_u : 실험최대하중, M_{u1} : 실험최대단부모멘트, P_{AIK} : AIK-LSD 축력, M_{AIK} : AIK-LSD 휨강도, P_{AISC} : AISC-LRFD 축력, M_{AISC} : AISC-LRFD 휨강도, P_{AIJ} : AIJ-LSD 축력, M_{AIJ} : AIJ-LSD 휨강도, P_{SIJ} : SIJ-ASD 축력, M_{SIJ} : SIJ-ASD 휨강도, $R=\sqrt{P^2+M^2}$

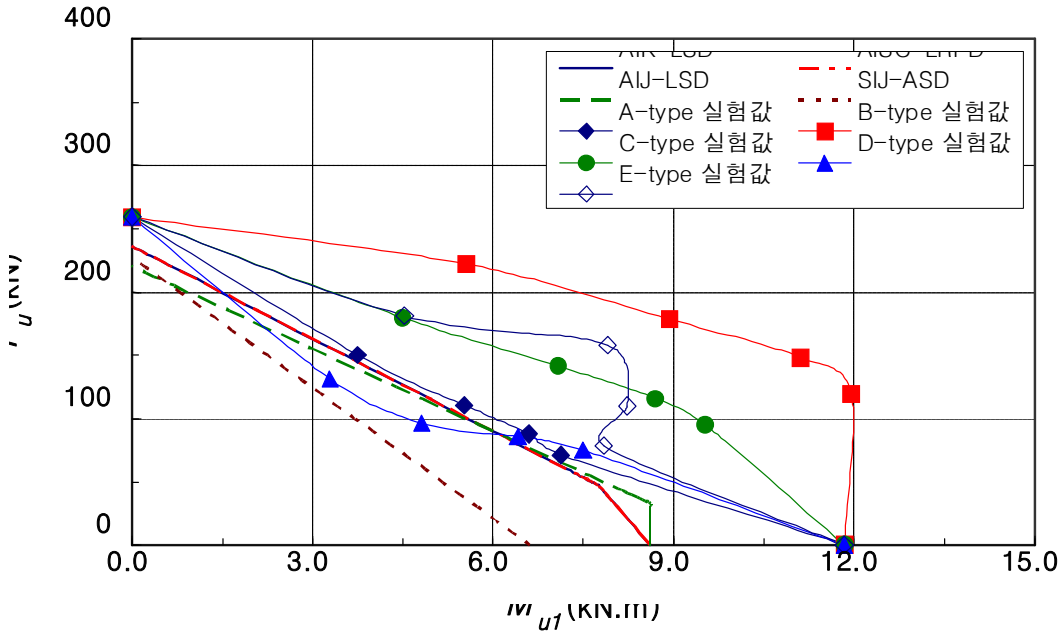
[그림 4.10]~[그림 4.12]는 축력과 모멘트를 정량화한 값 R의 비교값으로 기준값에 대한 실험값의 비를 세장비에 따라 비교한 곡선으로 AIK-LSD와 AISC-LRFD의 기준식이 같은 값으로 이를 함께 표현하였으며, AIJ-LSD와 SIJ-ASD에 대한 비교값이다.

[그림 4.10]의 세장비30 보-기둥 실험값은 AIK-LSD와 AISC-LRFD 기준값보다 1.06~2.09배, AIJ-LSD 기준값보다 1.06~2.06배, SIJ-ASD 기준값보다 1.27~2.75배 높은 값을 보이고 있다.

Collection @ chosun

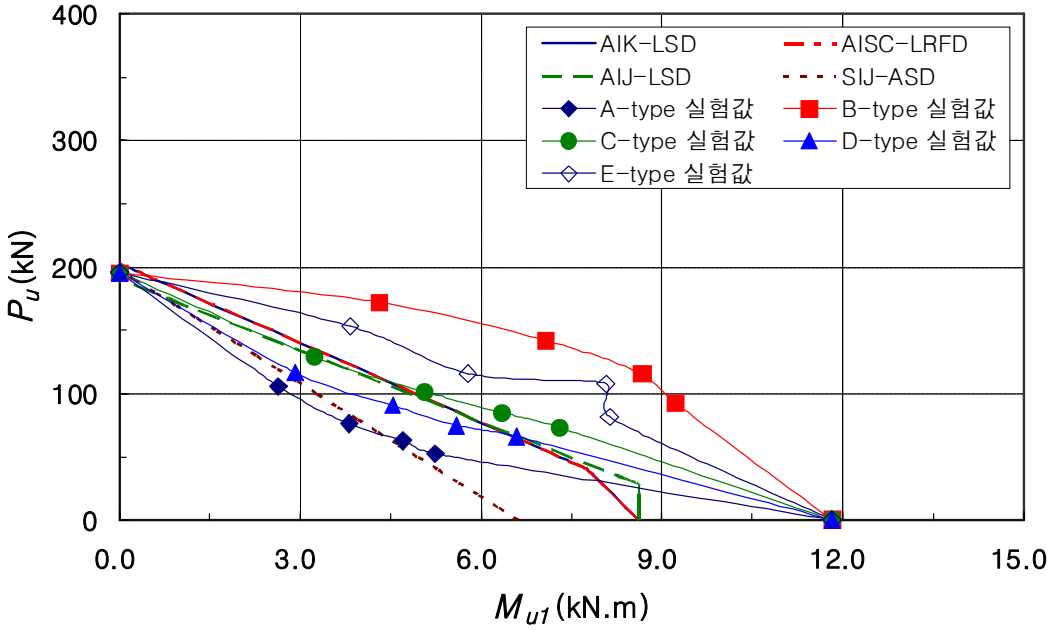


(a) $L_K/r = 30$



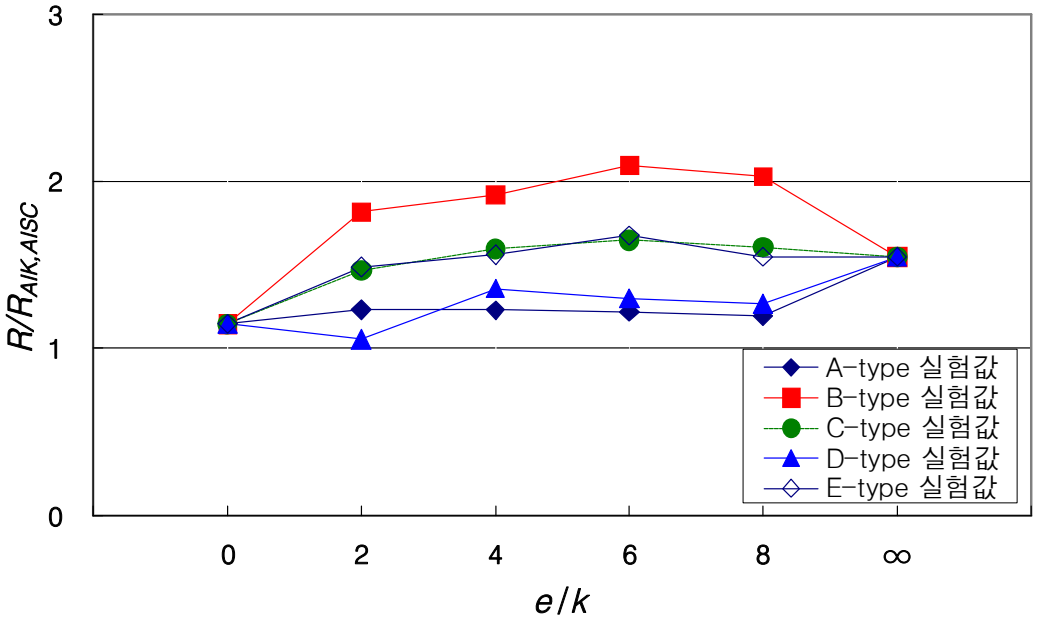
(b) $L_K/r = 50$

Collection @ chosun



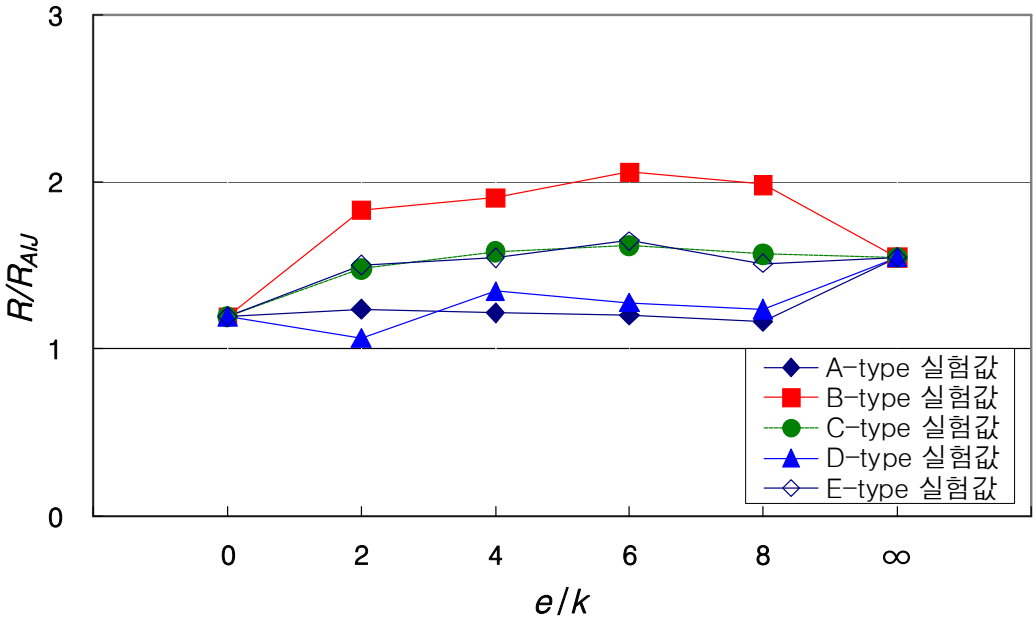
(c) $L_K/r = 70$

[그림 4.9] 보-기둥의 실험값과 기준곡선 비교

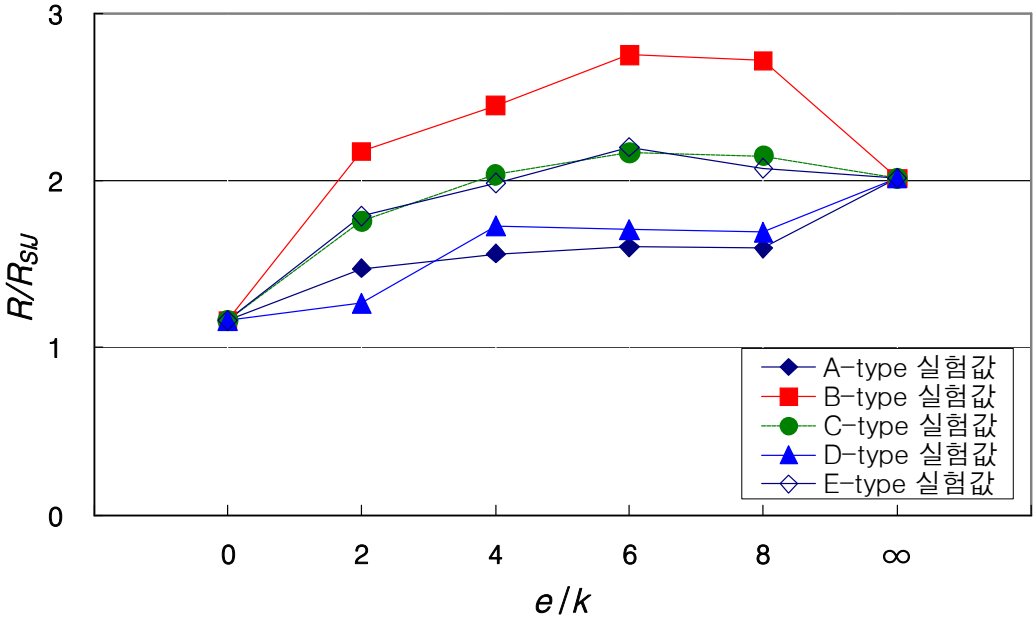


(a) AIK-LSD, AISC-LRFD

Collection @ chosun



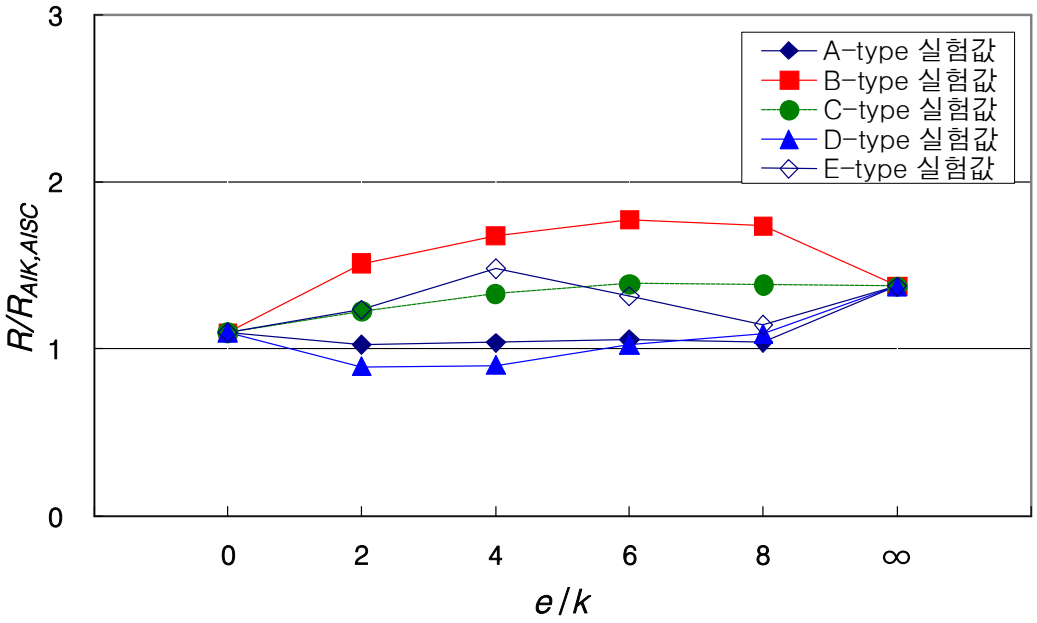
(b) AIJ-LSD



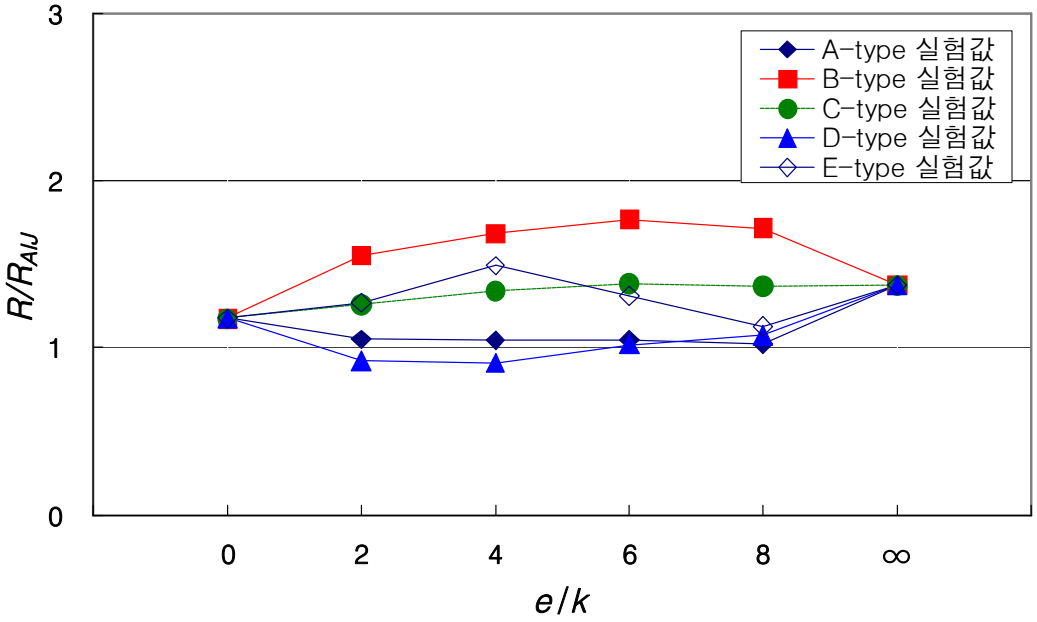
(c) SIJ-ASD

[그림 4.10] $L_K/r = 30$ 보-기둥 실험값과 기준값 비교

Collection @ chosun

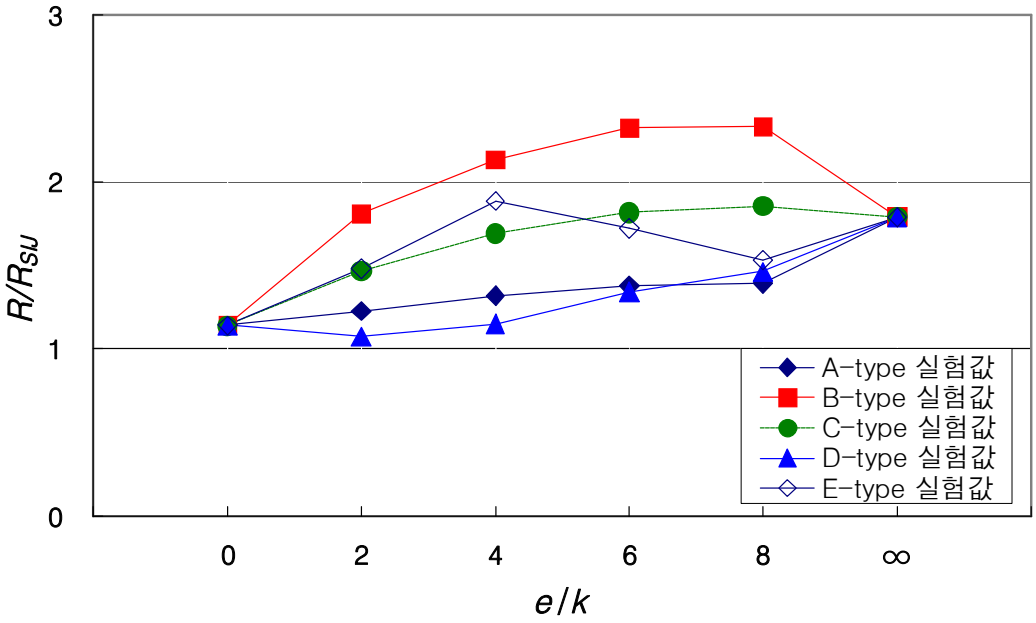


(a) AIK-LSD, AISC-LRFD



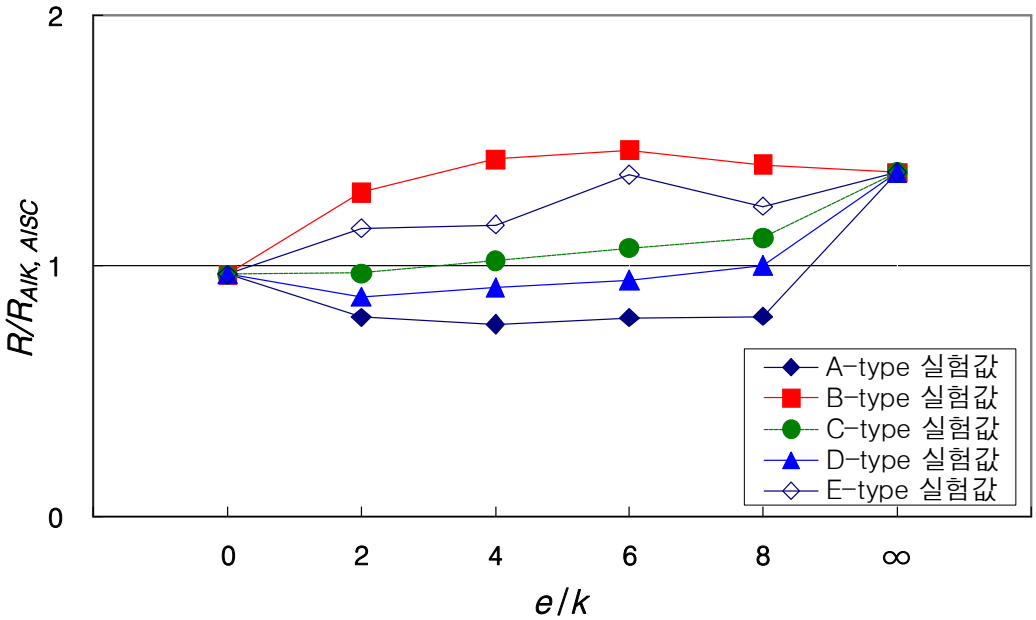
(b) AIJ-LSD

Collection @ chosun



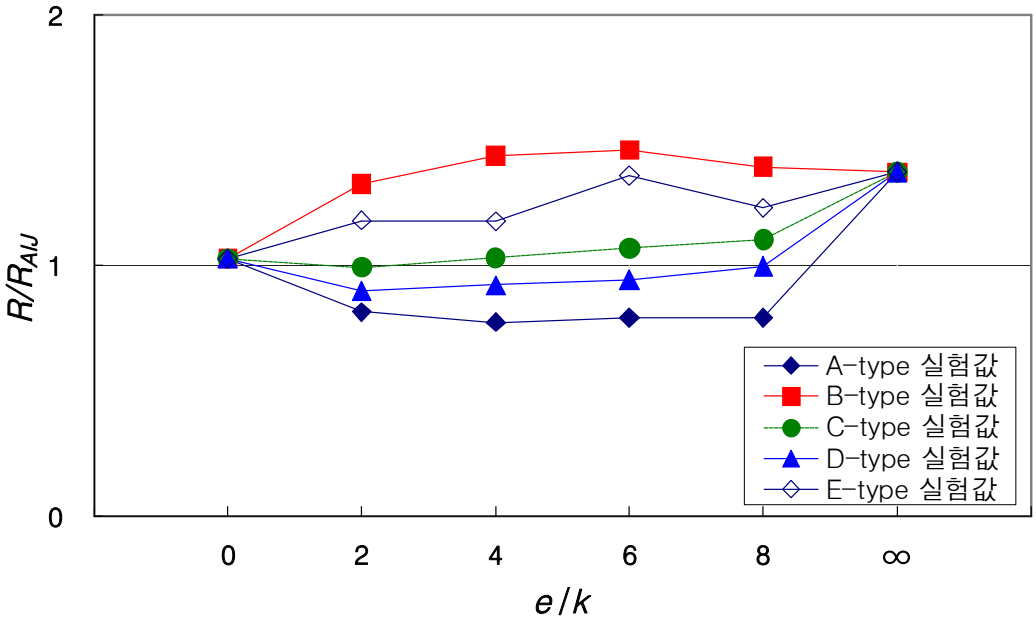
(c) SIJ-ASD

[그림 4.11] $L_K/r = 50$ 보-기둥 실험값과 기준값 비교

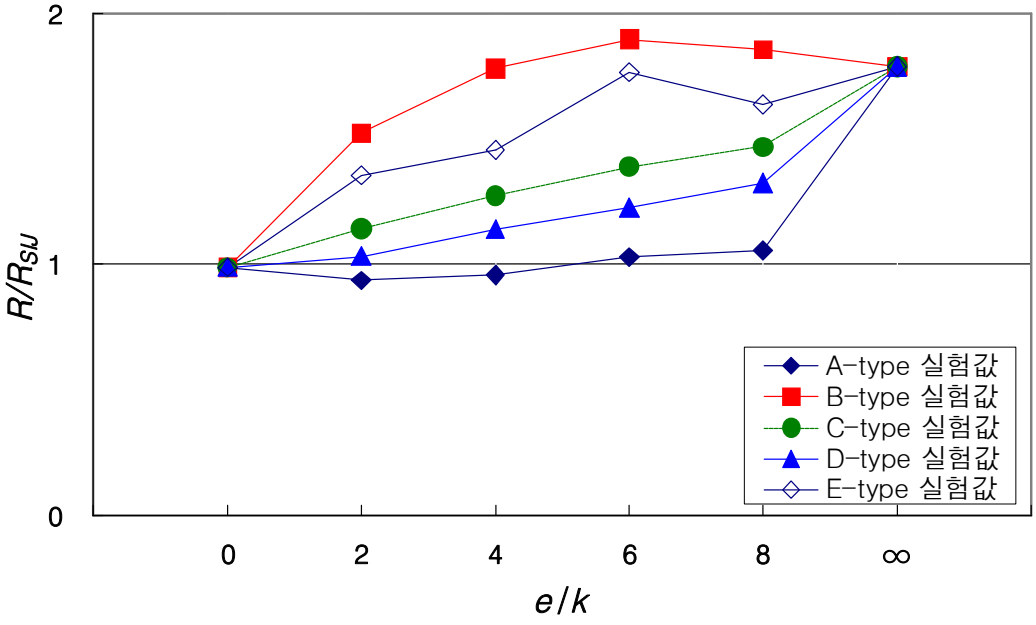


(a) AIK-LSD, AISC-LRFD

Collection @ chosun



(b) AIJ-LSD



(c) SIJ-ASD

[그림 4.12] $L_K/r = 70$ 보-기둥 실험값과 기준값 비교

Collection @ chosun

[그림 4.11]의 세장비50 보-기둥 실험값은 양단편심 비대칭 단일곡률 시험체 BCD25-50과 BCD50-50은 AIK-LSD와 AISC-LRFD 기준값보다 0.90배로 낮은 값을 보인반면, 그 외 시험체는 1.02~1.77배로 높은 값을 보였고, 또한 AIJ-LSD 기준값보다 BCD25-50과 BCD50-50은 0.92배와 0.91배로 낮게 나타났고, 그 외 보-기둥은 1.02~1.77배로 높게 나타났다. 그러나 SIJ-ASD 기준값보다는 모든 보-기둥의 실험값이 1.23~2.33배 높은 값을 보였다.

[그림 4.12]의 세장비70 보-기둥 실험값은 양단편심 대칭 단일곡률의 모든 시험체와 일단중심 타단편심 단일곡률의 BCC25-70 시험체, 그리고 BCD70-100을 제외한 양단편심 비대칭 단일곡률의 모든 시험체는 AIK-LSD와 AISC-LRFD 기준값보다 0.77~0.97배 낮은 값을 보인반면, 그 외 시험체는 1.00~1.46배로 높은 값을 보였다.

AIJ-LSD기준 또한 양단편심 대칭과 비대칭 단일곡률의 모든 시험체와 일단중심 타단편심 단일곡률의 BCC25-70 시험체는 기준값보다 0.77~0.99배 낮은 값을 보인반면, 그 외 시험체는 1.03~1.46배로 높게 나타났다.

SIJ-ASD 기준값보다는 양단편심 대칭 단일곡률의 BCA25-70과 BCA50-70 시험체만 0.94와 0.96배 낮게 나타났고, 그 외 모든 보-기둥의 실험값이 1.03~1.90배 높은 값을 보였다.

스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험결과를 기준에 비교한 결과 세장비50과 세장비70의 일부 시험체 실험값이 기준값을 만족하지 못하는 것으로 나타났는데, 이는 세장비를 고려한 좌굴계수의 산정에 있어 별도의 좌굴계수를 적용하여야 할 것으로 판단된다.

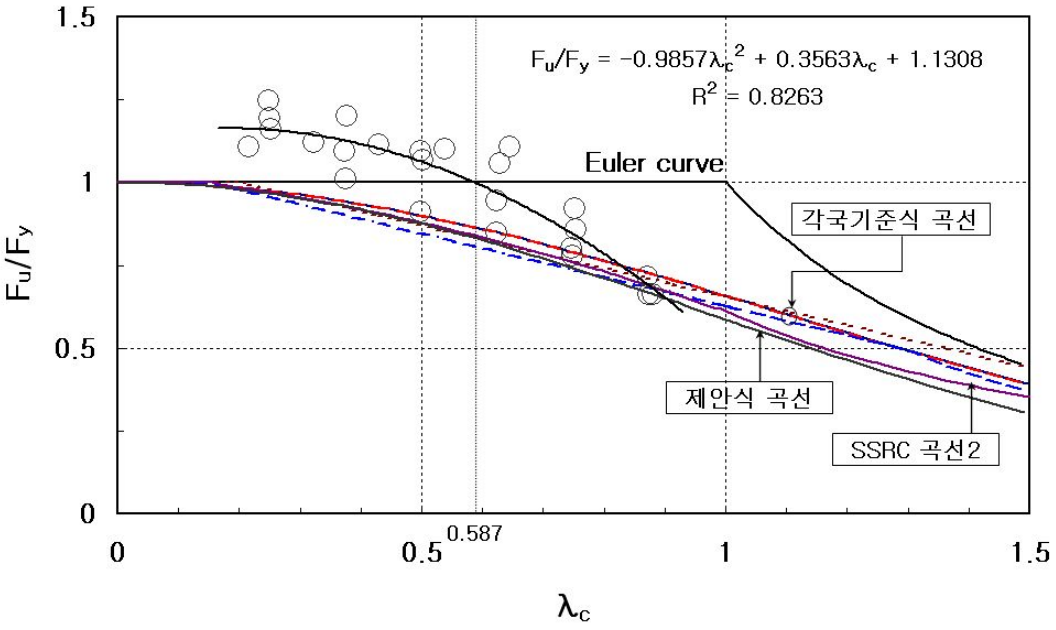
Collection @ chosun

4.3 보-기둥의 적용식

4.3.1 좌굴강도계수

전소성이론과 각국기준식에 실험값을 비교한 결과, 스테인리스 원형강관 보-기둥이 세장비가 증가함에 따라 급격한 좌굴내력의 저하를 보이고 있어, 일반구조용 강관의 설계식(AIK-LSD)에서 적용한 좌굴계수 0.658의 설계식은 실험값을 만족할 만한 결과를 도출하지 못해 별도의 좌굴계수가 필요하였다.

이에 본 연구에서는 2005년 “스테인리스 강관 기둥의 내력에 관한 연구[45]”에서 제안한 좌굴강도계수를 적용하여 그에 따른 스테인리스 원형강관 보-기둥에 적정성을 평가하고자 한다.



[그림 4.13] 스테인리스 강관 기둥의 무차원 좌굴계수 제안곡선

[그림 4.13]과 식(4.7)은 스테인리스 강관 기둥의 좌굴계수 제안곡선과 제안식으로 스테인리스 강관 중심압축 기둥 시험체의 실험결과를 이용하여 stub-column의 0.1% 옵셋내력으로 무차원화한 좌굴내력(σ_u/σ_y)과 무차원세장비(λ_c)의 관계를 SSRC 복수강도곡선 2와 같이 $0.15<\lambda_c\leq 1.0$범위에서 이차식으로 회귀하여 제안한 식이다.

Collection @ chosun

회귀식은 다음과 같다.

$0.215 \leq \lambda_c \leq 0.880$에서

$$\frac{F_u}{F_y} = 1.1308 + 0.3563\lambda_c - 0.9857\ \lambda_c^2 (\ R^2 = 0.8263) \qquad (4.6)$$

좌굴계수는 [그림 4.13]과 같이 기둥의 실험값을 회귀시킨 식(4.6)과 Euler 좌굴곡선이 만나는 점을 도출하여 스테인리스 강관 기둥의 좌굴강도 제안식은 다음식과 같다.

$0.215 \leq \lambda_c \leq 0.880$ 일 때

$$F_{cr} = (0.587^{\lambda_c^2}) \cdot F_y \qquad (4.7)$$

4.3.2 모멘트확대계수 A_F

휨과 축력에 대한 상관관계식을 유도하기 위해서 축력의 무차원량 P_u/P_n와 모멘트의 무차원량 M_u/M_n를 도입하여 P_u/P_n와 M_u/M_n를 양축으로 하고 그 교점을 잇는 직선식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{P_u}{P_n} + \frac{M_u}{M_n} \leq 1.0 \qquad (4.8)$$

여기서, P_u : 재하된 축압축 하중(kN)

M_u : 재하된 1차 휨모멘트(kN·m)

P_n : 축압축 부재에 대한 공칭압축하중(kN)

M_n : 축하중이 없는 부재의 공칭휨모멘트(kN·m)

그런데 이 관계식은 P_u/P_n와 M_u/M_n를 양축으로 하고 그 교점을 있는 직선식이므로 세장비가 커지거나 실험적 및 이론적으로 얻어지는 부분의 붕괴하중은 이 직선식 아래에 위치한다. 식(4.8)과 실제 붕괴하중의 차이는 식 중의 M_u는 부재에 작용하는 1차 모멘트로서 $P-\delta$ 효과에 의한 2차 휨효과를 고려하지 않았기 때문이다.

일반적으로 압축력이 있게 되면 1차 휨모멘트는 대체로 $1/(1-(P_u/P_e))$만큼 증가하게 된다. 이 계수를 모멘트 증폭계수(A_F)라고 하며, 이 증폭계수를 이용하여 식(4.8)을

Collection @ chosun

표현하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{P_u}{P_n}+\frac{M_{u1}}{M_n}\frac{1}{1-\frac{P_u}{P_e}}=1.0 \qquad (4.9)$$

여기서, M_{u1} : 재하된 1차 휨모멘트(kN·m)

$$P_e=\frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

그런데 식(4.9)를 모멘트 수정계수(C_m)을 이용하여 일반화하면 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_u}{P_n}+\frac{M_{u1}C_m}{M_n(1-P_u/P_e)}=1.0 \qquad (4.10)$$

식(4.10)에서 축압축력을 고려한 최대휨모멘트는 AIK-LSD에서 규정하고 있는 모멘트 증폭계수(A_F)를 이용하면, 다음 식(4.11)과 같이 표현할 수 있다.

$$M_u=M_{u1}A_F \qquad (4.11)$$

여기서, $A_F=\frac{C_m}{1-\frac{P_u}{P_e}}\geq 1.0$

$$C_m=0.6-0.4\left(\frac{M1}{M2}\right)$$

여기서, $M1/M2$은 휨면내에서 구속되지 않은 부재의 양단의 모멘트 중 큰 모멘트에 대한 작은 모멘트의 비율이다. $M1/M2$의 부호는 부재가 이중곡률인 경우에는 정(+)이고, 단일곡률인 경우는 부(-)이다.

Collection @ chosun

4.4 제안식 평가

4.4.1 실험결과와 제안식 비교

스테인리스 원형강관 보-기둥의 제안식은 강구조 한계상태 설계법(AIK-LSD)을 기반으로 제안된 스테인리스 강관 기둥의 좌굴강도와 모멘트확대계수A_F을 적용하였다.

실험결과는 각 보-기둥의 최대하중으로 하며, 최대모멘트는 편심에 의한 단부모멘트와 $P-\delta$ 효과에 의한 2차 모멘트를 합한 값으로 하여, 실험결과와 제안식결과를 비교한 값을 <표 4.3>~<표 4.7>에 나타냈다.

<표 4.3>은 양단편심 대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험결과를 제안식결과와 비교한 것으로서 실험결과에 의한 휨부재를 제외한 최대하중은 제안식결과에 비해 세장비30은 1.27~1.48배, 세장비50은 1.23~1.32배, 세장비70은 1.00~1.20배의 값을 보였으며, 최대모멘트는 세장비30은 1.26~1.48배, 세장비50은 1.22~1.33배, 세장비70은 1004~1.20배로 제안식을 만족하는 결과로 나타났다.

<표 4.4>는 양단편심 대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험결과를 제안식결과와 비교한 것으로서 실험결과에 의한 휨부재를 제외한 최대하중은 제안식결과에 비해 세장비30은 1.27~2.17배, 세장비50은 1.23~1.88배, 세장비70은 1.20~1.51배의 값을 보였으며, 최대모멘트는 세장비30은 1.26~2.11배, 세장비50은 1.22~1.87배, 세장비70은 1.20~1.50배로 제안식을 만족하는 결과로 나타났다.

<표 4.5>은 일단중심 타단편심 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험결과를 제안식결과와 비교한 것으로서 실험결과에 의한 휨부재를 제외한 최대하중은 제안식결과에 비해 세장비30은 1.27~1.82배, 세장비50은 1.23~1.62배, 세장비70은 1.18~1.30배의 값을 보였으며, 최대모멘트는 세장비30은 1.26~1.81배, 세장비50은 1.22~1.60배, 세장비70은 1.18~1.30배로 제안식을 만족하는 결과로 나타났다.

dCollection @ chosun

<표 4.3> 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교

시험체명	실험결과(A)				제안식결과(B)				A/B		
	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	R
C-30	299.55	1.04	1.10	0.12	236.70	0.83	0.86	0.10	1.27	1.26	1.27
BCA25-30	192.54	7.53	0.70	0.87	130.00	5.07	0.47	0.59	1.48	1.48	1.48
BCA50-30	137.00	8.95	0.50	1.04	96.50	6.32	0.35	0.73	1.42	1.42	1.42
BCA75-30	105.27	9.85	0.38	1.14	75.70	7.07	0.28	0.82	1.39	1.39	1.39
BCA100-30	84.32	9.94	0.31	1.15	63.80	7.50	0.23	0.87	1.32	1.33	1.32
B-30	0	15.22	0	1.77	0	8.62	0	1.00	0	1.77	1.77
C-50	259.18	1.07	0.95	0.12	210.40	0.88	0.77	0.10	1.23	1.22	1.23
BCA25-50	150.14	7.22	0.55	0.84	115.80	5.57	0.42	0.65	1.30	1.30	1.30
BCA50-50	110.51	9.14	0.40	1.06	83.70	6.86	0.31	0.80	1.32	1.33	1.32
BCA75-50	87.92	9.54	0.32	1.11	68.60	7.42	0.25	0.86	1.28	1.28	1.28
BCA100-50	71.28	10.01	0.26	1.16	56.10	7.87	0.20	0.91	1.27	1.27	1.27
B-50	0	13.81	0	1.60	0	8.62	0	1.00	0	1.60	1.60
C-70	195.49	2.52	0.71	0.29	162.40	2.11	0.59	0.24	1.20	1.20	1.20
BCA25-70	105.60	6.19	0.39	0.72	102.00	5.98	0.37	0.69	1.04	1.03	1.04
BCA50-70	76.13	7.22	0.28	0.84	75.70	7.18	0.28	0.83	1.01	1.01	1.01
BCA75-70	62.64	7.82	0.23	0.91	61.90	7.73	0.23	0.90	1.01	1.01	1.01
BCA100-70	52.41	8.06	0.19	0.94	52.30	8.08	0.19	0.94	1.00	1.00	1.00
B-70	0	14.18	0	1.65	0	8.62	0	1.00	0	1.65	1.65

주) $R = \sqrt{P_u^2 + M_u^2}$

dCollection @ chosun

<표 4.4> 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교

시험체명	실험결과(A)				제안식결과(B)				A/B		
	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	R
C-30	299.95	1.04	1.10	0.12	236.70	0.83	0.86	0.10	1.27	1.26	1.27
BCB25-30	284.20	8.80	1.04	1.02	145.30	4.49	0.53	0.52	1.96	1.96	1.96
BCB50-30	214.62	12.18	0.78	1.41	105.50	5.99	0.39	0.69	2.03	2.03	2.03
BCB75-30	180.92	14.71	0.66	1.71	83.40	6.80	0.30	0.79	2.17	2.16	2.17
BCB100-30	143.76	15.46	0.53	1.79	68.60	7.33	0.25	0.85	2.10	2.11	2.10
B-30	0	15.22	0	1.77	0	8.62	0	1.00	0	1.77	1.77
C-50	259.18	1.07	0.95	0.12	210.40	0.88	0.77	0.10	1.23	1.22	1.23
BCB25-50	221.97	7.65	0.81	0.89	136.00	4.69	0.50	0.54	1.63	1.63	1.63
BCB50-50	178.56	10.99	0.65	1.27	100.70	6.19	0.37	0.72	1.77	1.77	1.77
BCB75-50	148.18	13.16	0.54	1.53	78.90	7.04	0.29	0.82	1.88	1.87	1.88
BCB100-50	119.56	13.40	0.44	1.55	67.00	7.48	0.24	0.87	1.78	1.79	1.78
B-50	0	13.81	0	1.60	0	8.62	0	1.00	0	1.60	1.60
C-70	195.49	2.52	0.71	0.29	162.40	2.11	0.59	0.24	1.20	1.20	1.20
BCB25-70	172.09	5.87	0.63	0.68	130.20	4.41	0.48	0.51	1.32	1.33	1.32
BCB50-70	141.62	9.03	0.52	1.05	97.80	6.19	0.36	0.72	1.45	1.46	1.45
BCB75-70	115.59	10.73	0.42	1.25	76.70	7.14	0.28	0.73	1.51	1.50	1.51
BCB100-70	92.30	10.80	0.34	1.25	64.80	7.62	0.24	0.88	1.42	1.42	1.42
B-70	0	14.18	0	1.65	0	8.62	0	1.00	0	1.65	1.65

주) $R = \sqrt{P_u^2 + M_u^2}$

dCollection @ chosun

<표 4.5> 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교

시험체명	실험결과(A)				제안식결과(B)				A/B		
	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	R
C-30	299.95	1.04	1.10	0.12	236.70	0.83	0.86	0.10	1.27	1.26	1.27
BCC25-30	229.55	8.20	0.84	0.95	136.00	4.85	0.50	0.56	1.69	1.69	1.69
BCC50-30	178.36	11.25	0.65	1.31	98.80	6.24	0.36	0.72	1.81	1.81	1.81
BCC75-30	142.44	12.66	0.52	1.47	78.30	6.98	0.29	0.81	1.82	1.81	1.82
BCC100-30	113.79	12.86	0.42	1.49	66.10	7.42	0.24	0.86	1.72	1.73	1.72
B-30	0	15.22	0	1.77	0	8.62	0	1.00	0	1.77	1.77
C-50	259.18	1.07	0.95	0.12	210.40	0.88	0.77	0.10	1.23	1.22	1.23
BCC25-50	179.77	8.02	0.66	0.93	120.60	5.37	0.44	0.62	1.49	1.49	1.49
BCC50-50	141.79	10.27	0.52	1.19	90.80	6.58	0.33	0.76	1.56	1.56	1.56
BCC75-50	115.91	11.73	0.42	1.36	71.50	7.31	0.26	0.85	1.62	1.60	1.62
BCC100-50	95.21	12.36	0.35	1.43	60.00	7.73	0.22	0.90	1.59	1.60	1.59
B-50	0	13.81	0	1.60	0	8.62	0	1.00	0	1.60	1.60
C-70	195.49	2.52	0.71	0.29	150.00	1.94	0.55	0.23	1.30	1.30	1.30
BCC25-70	129.02	6.61	0.47	0.77	109.40	5.60	0.40	0.65	1.18	1.18	1.18
BCC50-70	101.35	8.30	0.37	0.96	83.70	6.84	0.31	0.79	1.21	1.21	1.21
BCC75-70	84.64	9.59	0.31	1.11	66.70	7.55	0.24	0.88	1.27	1.27	1.27
BCC100-70	73.02	10.23	0.27	1.19	56.80	7.92	0.21	0.92	1.29	1.29	1.29
B-70	0	14.18	0	1.65	0	8.62	0	1.00	0	1.65	1.65

주) $R = \sqrt{P_u^2 + M_u^2}$

dCollection @ chosun

<표 4.6> 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교

시험체명	실험결과(A)				제안식결과(B)				A/B		
	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	R
C-30	299.95	1.04	1.10	0.12	236.70	0.83	0.86	0.10	1.27	1.26	1.27
BCD25-30	165.23	5.87	0.60	0.68	136.30	4.84	0.50	0.56	1.21	1.21	1.21
BCD50-30	151.61	10.02	0.55	1.16	96.20	6.33	0.35	0.73	1.58	1.58	1.58
BCD75-30	112.21	10.19	0.41	1.18	77.60	7.00	0.28	0.81	1.45	1.46	1.45
BCD100-30	89.60	10.53	0.33	1.22	64.10	7.49	0.23	0.87	1.40	1.41	1.40
B-30	0	15.22	0	1.77	0	8.62	0	1.00	0	1.77	1.77
C-50	259.18	1.07	0.95	0.12	207.20	0.85	0.76	0.10	1.25	1.26	1.25
BCD25-50	131.52	5.80	0.48	0.67	121.20	5.34	0.44	0.62	1.09	1.09	1.09
BCD50-50	96.33	7.26	0..35	0.84	88.80	6.66	0.32	0.77	1.08	1.09	1.08
BCD75-50	85.55	8.80	0.31	1.02	71.20	7.33	0.26	0.85	1.20	1.20	1.20
BCD100-50	74.97	9.90	0.27	1.15	59.00	7.77	0.22	0.90	1.27	1.27	1.27
B-50	0	13.81	0	1.60	0	8.62	0	1.00	0	1.60	1.60
C-70	195.49	2.52	0.71	0.29	157.20	2.02	0.57	0.23	1.24	1.25	1.24
BCD25-70	116.62	6.24	0.43	0.72	94.60	5.07	0.35	0.59	1.23	1.23	1.23
BCD50-70	90.65	7.73	0.33	0.90	75.00	6.39	0.27	0.74	1.21	1.21	1.21
BCD75-70	74.59	8.59	0.27	1.00	65.70	7.58	0.24	0.88	1.14	1.13	1.14
BCD100-70	65.86	9.78	0.24	1.14	53.90	7.03	0.20	0.93	1.22	1.22	1.22
B-70	0	14.18	0	1.65	0	8.62	0	1.00	0	1.65	1.65

주) $R = \sqrt{P_u^2 + M_u^2}$

dCollection @ chosun

<표 4.7> 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥 실험결과와 제안식결과 비교

시험체명	실험결과(A)				제안식결과(B)				A/B		
	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	P_u/P_y	M_u/M_p	P_u	M_u	R
C-30	299.95	1.04	1.10	0.12	236.70	0.83	0.86	0.10	1.27	1.26	1.27
BCE25-30	233.04	7.74	0.85	0.90	140.80	4.67	0.51	0.54	1.66	1.66	1.66
BCE50-30	174.15	10.47	0.64	1.21	102.00	6.12	0.37	0.71	1.71	1.71	1.71
BCE75-30	144.65	12.30	0.53	1.43	80.50	6.90	0.29	0.80	1.80	1.78	1.80
BCE100-30	109.66	11.99	0.40	1.39	67.70	7.36	0.25	0.85	1.62	1.63	1.62
B-30	0	15.22	0	1.77	0	8.62	0	1.00	0	1.77	1.77
C-50	259.18	1.07	0.95	0.12	210.40	0.88	0.77	0.10	1.23	1.22	1.23
BCE25-50	181.20	6.75	0.66	0.78	131.50	4.89	0.48	0.57	1.38	1.38	1.38
BCE50-50	157.98	11.18	0.58	1.30	92.40	6.52	0.34	0.76	1.71	1.71	1.71
BCE75-50	109.78	10.25	0.40	1.19	76.30	7.14	0.28	0.83	1.44	1.44	1.44
BCE100-50	78.45	9.42	0.29	1.09	63.20	7.62	0.23	0.88	1.24	1.24	1.24
B-50	0	13.81	0	1.60	0	8.62	0	1.00	0	1.60	1.60
C-70	195.49	2.52	0.71	0.29	162.40	2.11	0.59	0.24	1.20	1.20	1.20
BCE25-70	153.08	6.42	0.56	0.75	120.00	5.02	0.44	0.58	1.28	1.28	1.28
BCE50-70	115.74	8.78	0.42	1.02	87.90	6.65	0.32	0.77	1.32	1.32	1.32
BCE75-70	107.60	11.39	0.39	1.32	70.20	7.41	0.26	0.86	1.53	1.54	1.53
BCE100-70	81.34	10.87	0.30	1.26	59.30	7.83	0.22	0.91	1.37	1.39	1.37
B-70	0	14.18	0	1.65	0	8.62	0	1.00	0	1.65	1.65

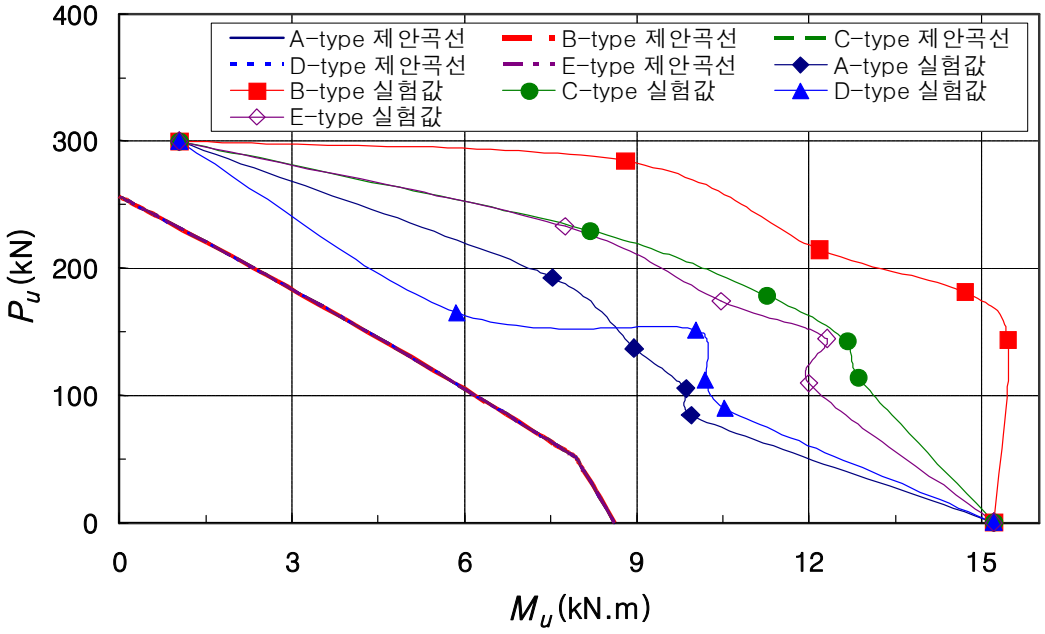
주) $R = \sqrt{P_u^2 + M_u^2}$

Collection @ chosun

<표 4.6>은 양단편심 비대칭 단일곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험결과를 제안식결과와 비교한 것으로서 실험결과에 의한 휨부재를 제외한 최대하중은 제안식결과에 비해 세장비30은 1.21~1.58배, 세장비50은 1.08~1.27배, 세장비70은 1.14~1.24배의 값을 보였으며, 최대모멘트는 세장비30은 1.21~1.58배, 세장비50은 1.09~1.27배, 세장비70은 1.13~1.25배로 제안식을 만족하는 결과로 나타났다.

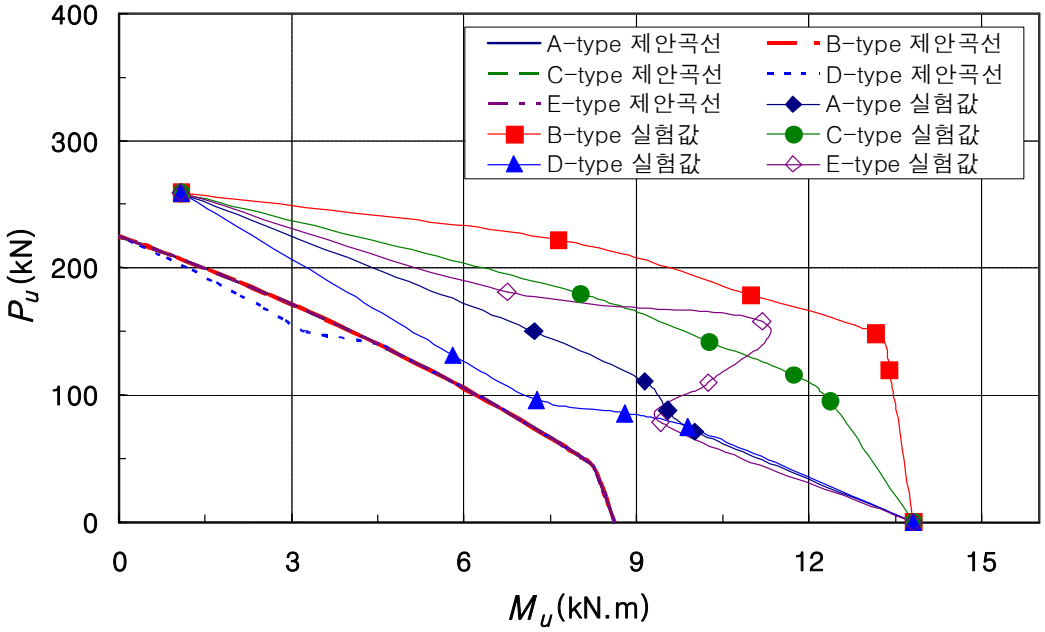
<표 4.7>는 양단편심 비대칭 이중곡률 스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험결과를 제안식결과와 비교한 것으로서 실험결과에 의한 휨부재를 제외한 최대하중은 제안식결과에 비해 세장비30은 1.27~1.80배, 세장비50은 1.23~1.71배, 세장비70은 1.20~1.53배의 값을 보였으며, 최대모멘트는 세장비30은 1.26~1.78배, 세장비50은 1.22~1.71배, 세장비70은 1.20~1.54배로 제안식을 만족하는 결과로 나타났다.

[그림 4.14]는 단부모멘트와 곡률형상별로 편심비에 따라서 스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험값을 제안식 곡선에 비교한 것으로 세장비가 증가함에 따라 제안식 곡선에 다소 근접하게 나타나고 있으나 실험값 모두 안전한 범위에 있는 것으로 판단된다.

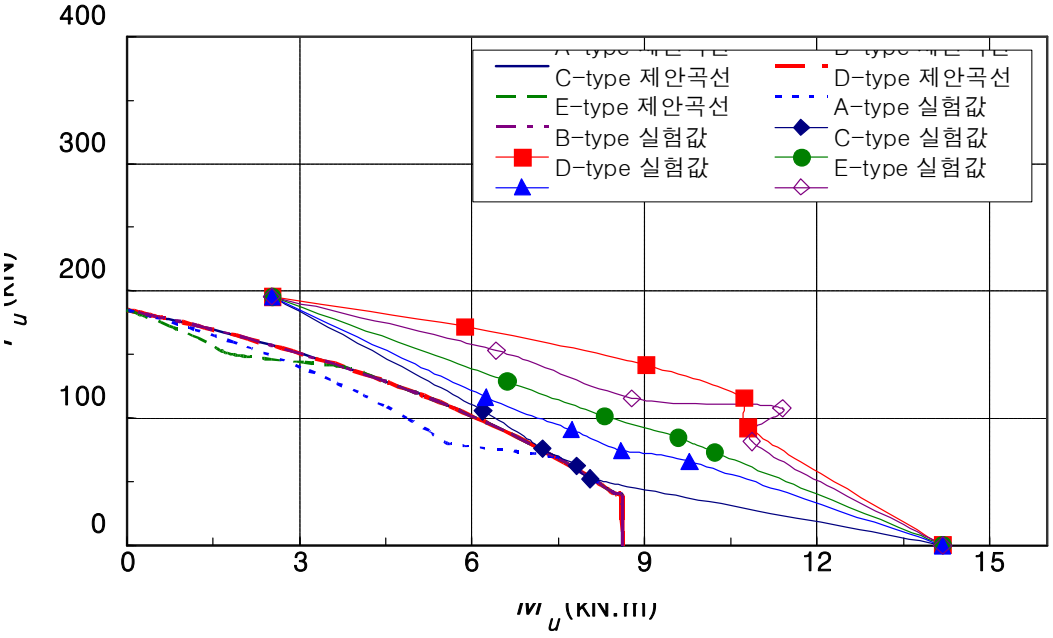


(a) $L_K/r = 30$

Collection @ chosun



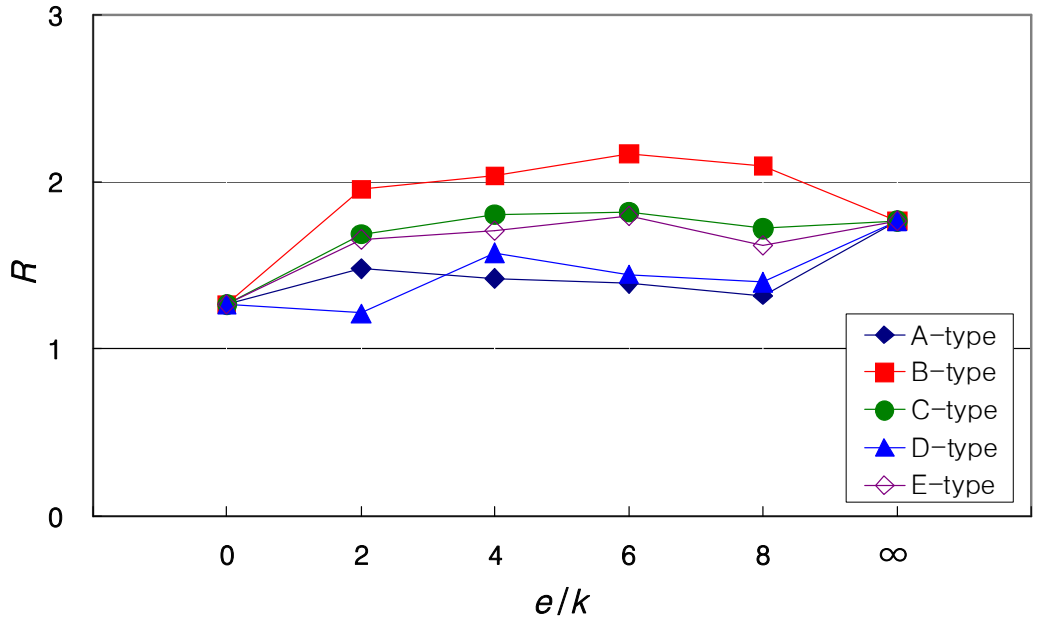
(b) $L_K/r = 50$



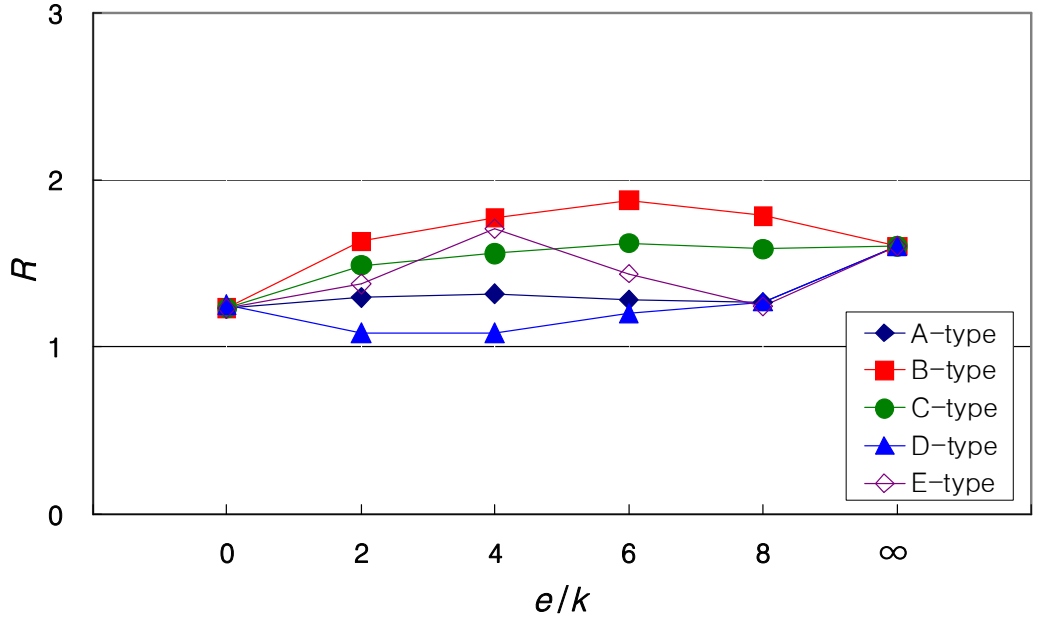
(c) $L_K/r = 70$

[그림 4.14] 단부모멘트와 곡률형상별 편심비에 따른 보-기둥 실험값과 제안곡선 비교

Collection @ chosun

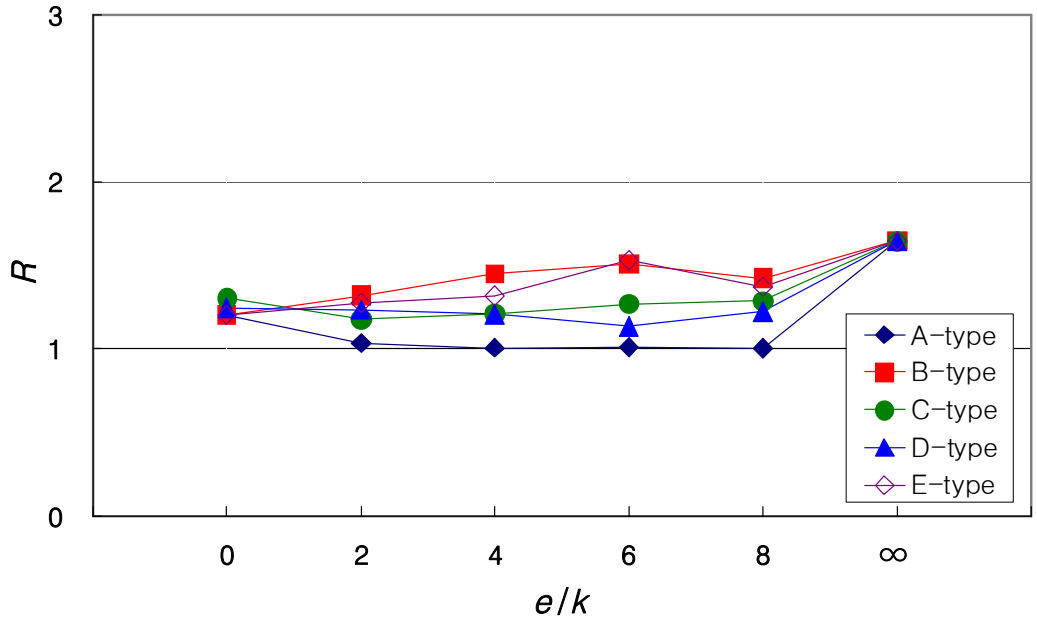


(a) $L_K/r = 30$



(b) $L_K/r = 50$

dCollection @ chosun



(c) $L_K/r = 70$

[그림 4.15] 단부모멘트와 곡률형상별 편심비에 따른 보-기둥의 R값 비교

[그림 4.15]는 단부모멘트와 곡률형상별로별로 편심비에 따라 최대하중과 모멘트의 정량화한 R값을 비교한 것으로서 세장비30과 세장비50은 다소 분산된 값을 보인반면, 세장비70은 일정한 값을 보이고 있다.

각 세장비별로 R값을 평균하였을 때, 세장비30은 1.62배, 세장비50은 1.28배, 세장비70은 1.31배 높은 값으로 나타났으며, 이는 실험에 의한 결과가 제안식에 의한 결과의 28%이상의 안전율을 가진다고 볼 수 있다.

이상에서 제안된 스테인리스 강관 기둥의 좌굴강도식을 스테인리스 원형강관 보-기둥 실험결과에 평가한 결과, 제안된 강도식은 충분히 실험결과를 만족하는 것으로 평가되나, 세장비의 증가에 따라 제안식에 근접하는 것으로 나타나 세장비70을 초과하는 보-기둥에 대한 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

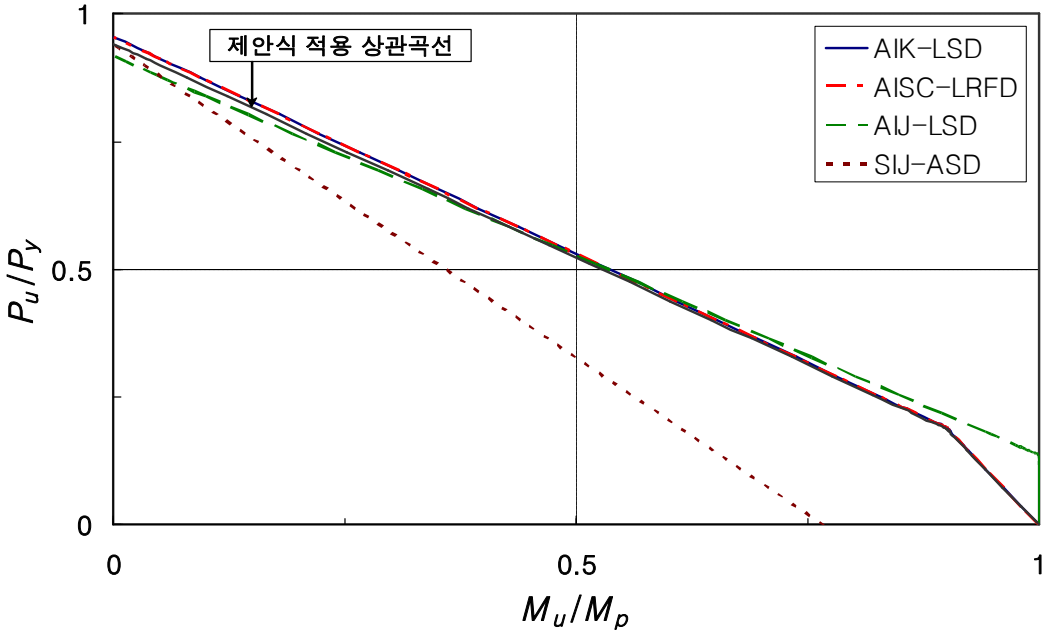
Collection @ chosun

4.4.2 제안식과 각국 기준식 비교

[그림 4.16]의 종축은 기둥의 세장효과에 따른 좌굴계수를 적용한 보-기둥의 최대내력에 항복강도로 무차원화 하였고, 횡축은 최대모멘트를 소성(탄성)모멘트로 무차원화 하였다.

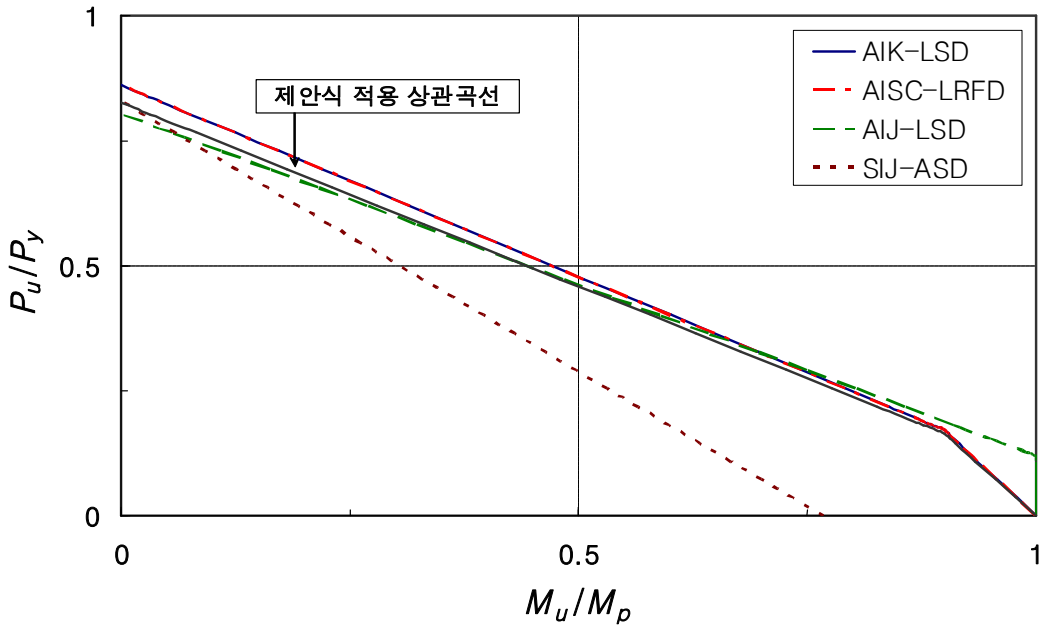
제안식 곡선은 세장비 30에서는 AIK-LSD, AISC-LRFD와 거의 비슷한 곡선을 보이나, 세장비 50은 무차원화한 모멘트가 0.5이하에서는 더 낮은 곡선을 보이다 모멘트가 증가하면서 거의 비슷한 곡선의 형태를 보였다.

세장비 70에서는 모멘트가 작은 경우 모든 기준곡선보다 낮게 나타나지만, 무차원 모멘트가 0.1범위 이상에서는 허용응력설계법은 SIJ-ASD보다 높은 곡선형태를 보이고 있다.

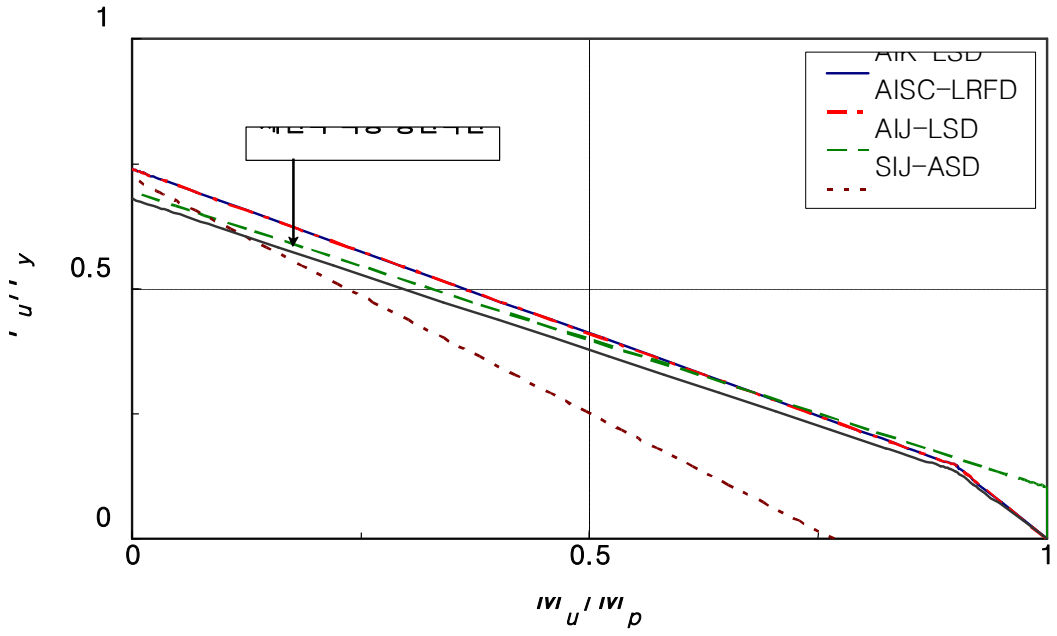


(a) $L_K/r = 30$

Collection @ chosun



(b) $L_K/r = 50$



(c) $L_K/r = 70$

[그림 4.16] 제안식을 적용한 보-기둥 상관곡선과 각국 기준곡선의 비교

Collection @ chosun

4.5 소결

본 장에서는 스테인리스 원형강관 보-기둥을 연구대상으로 하여, 이론해석과 각국 기준식에 실험결과를 비교함으로서 보-기둥의 최대내력과 모멘트에 대해 평가하고, 제안식의 비교를 통한 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이론해석에 의한 내력평가

1) 대부분의 보-기둥의 실험결과는 이론해석결과에 비해 축력은 2.1%~89.43%, 휨모멘트는 2.2%~89.4% 높은 값으로 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥의 실험결과 가장 높은 값을 보였으나, 세장비가 증가할수록 해석값에 거의 근접하는 값을 보였고, 양단편심 비대칭과 대칭 단일곡률 보-기둥은 해석값보다 낮은 시험체 실험결과가 나타나고 있다.

2) 이론해석결과보다 낮은 실험결과는 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비70 시험체는 축력은 90.5%~95.7%, 모멘트는 90.9%~95.5% 정도의 값이며, 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 CCD25-30시험체와 세장비50, 70의 편심비2~6까지의 시험체의 실험결과는 축력은 86.6%~97.8%, 모멘트는 86.8%~98.6% 값으로 해석결과보다 낮은 값으로 나타났다.

3) 일부 중심압축 하중을 받는 기둥과 단부모멘트가 대칭과 비대칭 단일곡률의 보-기둥의 실험값이 해석값을 낮게 나타나고 있는데, 이는 스테인리스 원형강관의 전소성 이론해석에 적용한 세장비를 고려한 좌굴계수는 일반구조용강에 대한 것으로 스테인리스 원형강관에 대해서는 별도의 좌굴계수가 적용되어야 될 것으로 판단된다.

(2) 각국기준식에 의한 내력평가

1) 각국의 기준식에 실험값을 비교한 결과, 대부분의 보-기둥 시험체의 실험결과는

Collection @ chosun

기준값을 만족하고 있으나, 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비70 시험체와 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥의 세장비50 시험체 일부가 기준값보다 낮은 결과를 보이고 있다.

2) 세장비30 보-기둥 실험값은 AIK-LSD와 AISC-LRFD 기준값보다 1.06~2.09배, AIJ-LSD 기준값보다 1.06~2.06배, SIJ-ASD 기준값보다 1.27~2.75배 높은 값을 보이고 있다.

3) 세장비50 보-기둥 실험값은 일부 보-기둥이 AIK-LSD와 AISC-LRFD, AIJ-LSD 기준값보다 낮은 값을 보였으나, 그 외 시험체는 1.02~1.77배로 높은 값을 보였고, SIJ-ASD 기준값보다는 모든 보-기둥의 실험값이 1.23~2.33배 높은 값을 보였다.

4) 세장비70 보-기둥 실험값은 일부 보-기둥이 AIK-LSD와 AISC-LRFD, AIJ-LSD, SIJ-ASD 기준값보다 0.77~0.999배 낮은 값을 보인반면, 그 외 시험체는 1.00~1.90배로 높은 값을 보였다.

5) 일부 기둥과 보-기둥 시험체의 실험값이 기준곡선에 만족하지 못한 결과로 나타났는데, 이는 단부의 재단모멘트가 스테인리스 원형강관 기둥과 보-기둥의 내력의 저하에 큰 영향을 주는 것으로 보여 지며, 또한 연성이 큰 스테인리스 강재의 특성상 세장비가 클수록 보-기둥의 좌굴에 의한 횡변위의 증가가 $P-\delta$효과에 의한 2차 휨모멘트를 증가시킴으로 축력의 저하에 의한 것으로 판단되어지며, 이를 고려한 좌굴강도를 결정하여야 할 것으로 판단된다.

(3) 제안식 평가

1) 장호주(2005년)가 제안한 스테인리스 강관 기둥의 좌굴강도는 무차원 세장비 $0.215 \leq \lambda_c \leq 0.880$의 범위에서 현행 AIK-LSD의 중심 축하중을 받는 기둥의 좌

Collection @ chosun

굴계수 0.658에 비해 10.8% 낮은 0.587로 제안하였으며, 제안식은 다음과 같다.

$0.215 \leq \lambda_c \leq 0.880$에서

스테인리스 강관 기둥의 좌굴강도 : $F_{cr} = (0.587^{\lambda_c^2}) \cdot F_y$

2) 스테인리스 원형강관 보-기둥의 실험값을 제안식 곡선에 비교결과, 세장비가 증가함에 따라 제안식 곡선에 다소 근접하게 나타나고 있으나 실험값 모두 안전한 범위에 있는 것으로 판단된다.

3) 각 세장비별로 하중과 모멘트의 정량화된 값을 평균하였을 때, 세장비30은 1.62배, 세장비50은 1.28배, 세장비70은 1.31배 높은 값으로 나타났으며, 이는 실험에 의한 결과가 제안식에 의한 결과의 28%이상의 안전율을 가진다고 볼 수 있다.

4) 제안된 스테인리스 강관 기둥의 좌굴강도식을 스테인리스 원형강관 보-기둥 실험결과에 평가한 결과, 제안된 강도식은 충분히 실험결과를 만족하는 것으로 평가되나, 세장비의 증가에 따라 제안식에 근접하는 것으로 나타나 세장비70을 초과하는 보-기둥에 대한 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5) 제안식 곡선은 각국 기준식 곡선과 비교한 결과, 세장비 30에서는 AIK-LSD, AISC-LRFD와 거의 비슷한 곡선을 보이나, 세장비 50은 무차원화한 모멘트가 0.5이하에서는 더 낮은 곡선을 보이다 모멘트가 증가하면서 거의 비슷한 곡선의 형태를 보였고, 세장비 70에서는 모멘트가 작은 경우 모든 기준곡선보다 낮게 나타나지만, 무차원 모멘트가 0.1범위 이상에서는 허용응력설계법은 SIJ-ASD보다 높은 곡선형태를 보이고 있다.

Collection @ chosun

5. 결론

본 연구는 스테인리스 원형강관 보-기둥의 각 변수에 따른 내력 및 변형 능력에 미치는 영향을 종합적으로 파악하기 위해, 건축 구조용 부재로서의 기초적인 역학적 거동을 파악하고, 보-기둥부재로 사용하기 위한 방법을 모색하였다.

또한 스테인리스 강관의 구조설계기준 제정을 위한 기초적인 연구의 일환으로, 재료실험을 통한 기계적 성질을 조사하고, 부재의 세장비, 편심비, 곡률형상 등을 주요 파라미터로 한 기둥과 휨과 축력을 받는 보-기둥, 순수 휨을 받는 보에 대한 실험을 통하여 부재의 내력 및 거동, 파괴성상 등의 구조적 특성을 파악하고, 실험결과를 전소성 이론해석과 국내 강구조 설계기준인 AIK-LSD와 AISC- LRFD, AIJ-LSD, SIJ-ASD의 각국 기준식과 비교하였다.

이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 재료실험결과, 스테인리스 원형강관은 내력, 항복비, 연신능력 등 구조용 강재로서 갖춰야할 충분한 기계적 성질과 소성변형능력에서 뛰어난 성능을 가지고 있는 것으로 판단된다.

(2) 부재실험결과, 스테인리스 원형강관 보-기둥의 내력은 세장비와 편심비가 증가할수록 내력저하현상이 뚜렷하게 나타났으며, 모멘트는 편심비가 증가할수록 증가하고, 세장비가 커질수록 감소함을 보여 세장비 증가에 따른 세장효과와 단부모멘트의 증가가 압축력보다는 휨의 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.

(3) 스테인리스 원형강관 부재는 최대내력이후 소성변형능력이 더욱 증가함으로 건축구조용 부재로서 활용 가능한 충분한 구조적 성능과 우수한 소성변형능력을 가지고 있는 것으로 판단된다.

(4) 전소성 이론해석에 의한 보-기둥의 내력평가 결과, 일부 중심압축 하중을 받는 기둥과 단부모멘트가 대칭과 비대칭 단일곡률의 보-기둥의 실험값이 해석값을 낮

Collection @ chosun

게 나타나고 있는데, 이는 스테인리스 원형강관의 전소성 이론해석에 적용한 세장비를 고려한 좌굴계수는 일반구조용강에 대한 것으로 스테인리스 원형강관에 대해서는 별도의 좌굴계수가 적용되어야 될 것으로 판단된다.

(5) 각국의 기준식에 실험값을 비교한 결과, 일부 기둥과 보-기둥 시험체의 실험값이 기준곡선에 만족하지 못한 결과로 나타났는데, 이는 단부의 재단모멘트가 스테인리스 원형강관 기둥과 보-기둥의 내력의 저하에 큰 영향을 주는 것으로 보여 지며, 또한 연성이 큰 스테인리스 강재의 특성상 세장비가 클수록 보-기둥의 좌굴에 의한 횡변위의 증가가 $P-\delta$효과에 의한 2차 휨모멘트를 증가시킴으로 축력의 저하에 의한 것으로 판단되어지며, 이를 고려한 좌굴강도를 결정하여야 할 것으로 판단된다.

(6) 제안된 스테인리스 강관 기둥의 좌굴강도 $F_{cr}=(0.587^{\lambda_c^2})\cdot F_y$는 스테인리스 원형강관 보-기둥 실험결과에 비교한 결과, 세장비가 증가함에 따라 제안식 곡선에 다소 근접하게 나타나고 있으나, 실험값 모두 안전한 범위에 있는 것으로 판단된다.

(7) 스테인리스 원형강관 보-기둥에 대한 모멘트수정계수C_m와 모멘트확대계수A_F는 현행 국내 강구조 설계기준을 적용하여도 보-기둥의 연성적인 거동으로 안전할 것으로 판단된다.

(8) 제안식 곡선은 각국 기준식 곡선과 비교한 결과, 세장비 30에서는 각국의 한계상태설계법과 거의 비슷한 곡선을 보이나, 세장비가 증가할수록 더 낮은 곡선을 보이고 있으나, 허용응력설계법인 SIJ-ASD보다 높은 곡선형태를 보이고 있다.

(9) 제안된 스테인리스 기둥의 좌굴강도식의 평가 결과, 충분히 실험결과를 만족하는 것으로 평가되나, 세장비의 증가에 따라 제안식에 근접하는 것으로 나타나 세장비70을 초과하는 보-기둥에 대한 별도의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

향후 연구과제

본 연구에서 문제시 되는 것은 스테인리스 강관 규격이 현재 생산되는 일부 제품에 국한된 것과 기둥의 세장비 다양성 결여에 있을 것이다.

몇 개의 시험체로 실제 강관의 보-기둥보다 훨씬 작은 단면에 의한 실험결과를 통해 얻어진 구조설계식을 실제 보-기둥에 적용시키기 위해서는 수많은 실험결과에 대한 확률론적 연구와 부재의 size effect에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

이상에서 “스테인리스 각형강관 보-기둥의 내력에 관한 연구”에 관한 향후 연구과제는 다음과 같이 제안할 수 있다.

1) 스테인리스 강관에 대한 폭넓은 변수의 폭(지름)-두께비에 관한 연구
2) 스테인리스 강관의 잔류응력이나 소성가공이 보-기둥의 좌굴내력에 미치는 영향에 관한 연구
3) 무차원세장비 0.9이상의 스테인리스 강관 보-기둥에 관한 연구
4) 스테인리스 강관의 연성적 특징에 따라 $P-\delta$ 효과에 의한 2차 휨모멘트의 영향의 기준설정에 관한 연구

Collection @ chosun

참고문헌

1. 大韓建築學會, 『鋼構造 限界狀態 設計基準 및 解說』, 2004.7.
2. 大韓建築學會, 『鋼管構造 設計基準 및 解說』, 기문당, 1998.10.
3. 大韓建築學會 鐵骨構造委員會, 『鋼構造設計 規準 및 解說-AISC 1986』, 기문당, 1992.4.
4. 大韓建築學會, 『冷間成形鋼 構造計算基準 및 解說』, 기문당, 1999.11.
5. 韓國鋼構造學會, 鋼構造便覽 第3卷, 『鋼構造建築物의 設計』, pp 402～412, 1995.
6. 윤종규・심재동, 『전문가를 위한 철강공학』, 대웅, 2004.9.

7. 金圭石 외 3인, “冷間成形圓形鋼管柱의 構造特性에 관한 實驗的 硏究(Ⅰ)”, 『大韓建築學會論文集』 *8*:139～149, 1992.3.
8. 김규석 외 3인, “축력과 휨모멘트를 받는 각형강관 부재의 구조특성에 관한 연구”, 『大韓建築學會論文集』 *11*:111～123, 1995.6.
9. 김규석 외 3인, “축력과 휨모멘트를 받는 원형강관 기둥의 이력거동에 관한 연구”, 『大韓建築學會論文集』 *12*:173～183, 1996.3.
10. 김규석 외 3인, “축압축력을 받는 강관 기둥부재의 거동특성에 관한 해석적 연구”, 『韓國鋼構造學會論文集』 *8*:169～179, 1996.3.
11. 김규석 외 2인, “냉간성형 원형강관기둥의 좌굴내력에 관한 연구”, 『大韓建築學會論文集』 *14*:35～42, 1998.10.
12. 김규석 외 2인, “냉간성형 립ㄷ형강의 잔류응력 분포 및 크기”, 『大韓建築學會論文集』 *16*:55～62, 2000.9.
13. 김규석 외 3인, “건축구조용 표면처리 경량형강의 잔류응력 분포 및 크기”, 『大韓建築學會學術發表論文集』 *20*:249～252, 2000.4.
14. 김화중 외 1인, “고축압을 받는 각형 및 원형 강관 기둥의 변형능력과 좌굴 강도에 관한 실험적 연구”, 『大韓建築學會論文集』 *10*:267～277, 1994.11.
15. 김화중 외 1인, “편심 하중을 받는 원형 강관 기둥의 좌굴내력 및 변형능력에 관한 실험적 연구”, 『大韓建築學會論文集』 *11*:191～199, 1995.5.
16. 文泰燮 외 3인, “偏心壓縮 角形鋼管柱의 挫屈耐力에 관한 實驗的 捐軀”, 『大韓建

Collection @ chosun

築學會論文集』 *8*:175～182, 1992.6.

17. 梁永晟 외 2인, “角形鋼管柱의 挫屈耐力에 관한 實驗的硏究(Ⅰ)”, 『大韓建築學會學術發表論文集』 *12*:353～356, 1992.4.
18. 梁永晟 외 3인, “冷間成形 圓形 및 角形鋼管部材의 靭性에 관한 實驗的 硏究”, 『大韓建築學會學術發表論文集』 *13*:505～510, 1993.10.
19. 양영성 외 2인, “실험데이타에 의한 냉간성형 강관 기둥의 내력에 관한 확률·통계론적 연구”, 『大韓建築學會秋季學術發表論文集』*19*:350～355, 1999.10.
20. 양영성 외 3인, “실험데이터에 의한 CFT 단주의 종국내력에 관한 확률·통계론적 연구”, 『韓國鋼構造學會學術發表論文集』453～460, 2000.6.
21. 양영성 외 3인, “중심압축하중을 받는 스테인리스 원형강관기둥의 좌굴내력에 관한 실험적 연구″, 『韓國鋼構造學會學術發表論文集』415～420, 2000.6.
22. 양영성 외 2인, “스테인리스강관과 일반구조용강관 단주내력 비교에 관한 연구″, 『韓國鋼構造學會論文集』*15*:561～570, 2003.10.
23. 양영성 외 1인, “스테인리스 강관 기둥의 내력에 관한 연구”, 『大韓建築學會論文集 構造系』 *19*:93～102, 2003.6.
24. 양영성 외 2인, “스테인리스 각형강관과 일반구조용 각형강관 기둥의 내력비교에 관한 실험적 연구”, 『大韓建築學會論文集 構造系』 *20*:35～42, 2004.6.
25. 양영성 외 2인, “스테인리스 원형강관과 일반구조용 원형강관 기둥의 내력비교에 관한 실험적 연구”, 『大韓建築學會論文集 構造系』 *20*:51～58, 2004.6.
26. 李明宰 외 1인, “角形 및 圓形鋼管柱의 最大耐力에 관한 硏究”, 『大韓建築學會論文集』 *28*:46～53 1989.12.
27. 李明宰, “Stainless Steel의 機械的 性質 및 挫屈耐力에 관한 연구”, 『大韓建築學會論文集』 *5*:319～326 1989.12.
28. 李明宰, “Stainless Steel H형단면보의 횡좌굴내력에 관한 연구”, 『大韓建築學會論文集』 *6*:271～277 1990.12.
29. 이명재 외1인, “스테인리스 각형강관 기둥의 최대내력”, 『韓國鋼構造學會論文集』 *17*:73～82, 2005.2.
30. 李暎直 외 2인, “中心軸荷重을 받는 鋼管柱의 壓縮耐力에 關한 實驗的 硏究”,

Collection @ chosun

『大韓建築學會學術發表論文集』 *13*:497~500, 1993.10.

31. 장인화 외 1인, “스테인리스 304강재의 국부좌굴에 관한 연구”, 『韓國鋼構造學會論文集』 *15*:51~57, 2003.2.
32. 장호주 외2인, “축력과 양단대칭모멘트를 받는 스테인리스 원형강관 기둥의 좌굴내력에 관한 실험적 연구”, 『大韓建築學會論文集』構造係 *21*:73~82, 2005.3.
33. 장호주 외2인, “편심압축력을 받는 스테인리스 원형강관 기둥의 곡률형상에 따른 좌굴내력에 관한 실험적 연구”, 『大韓建築學會論文集』構造係 *21*:69~76, 2005.3.

34. 金東圭, “鋼管柱의 彈塑性擧動에 關한 硏究”, 博士學位논문, 東國大學校, 1982.
35. 金周仁, “偏心 軸荷重을 받는 콘크리트 充塡 角形鋼管 기둥의 耐力 및 變形擧動에 관한 硏究”, 碩士學位論文, 朝鮮大學校, 1997.6.
36. 金鎭平, “冷間成形 角形鋼管 部材의 軸壓軸 擧動 特性에 관한 實驗的 硏究”, 碩士學位論文, 朝鮮大學校, 1996.6.
37. 金炫成, “偏心壓縮을 받는 角形鋼管 기둥의 挫屈耐力에 관한 硏究”, 碩士學位論文, 朝鮮大學校, 1996.12.
38. 朴柱浩, “冷間成形鋼管 短柱의 耐力에 관한 硏究”, 碩士學位論文, 朝鮮大學校, 2001.2.
39. 朴俊成, “중심압축하중을 받는 스테인리스 강관기둥의 좌굴내력에 관한 실험적 연구”, 碩士學位論文, 朝鮮大學校, 2001.2.
40. 徐貞煥, “合成鋼管 기둥의 耐力에 관한 硏究”, 博士學位論文, 朝鮮大學校, 2000.8.
41. 徐聖然, “冷間成形 角形鋼管 기둥 部材의 構造特性에 관한 硏究: 博士學位論文, 東國大學校, 1995.6.
42. 安亨濬, “冷間加工形鋼管 構造部材의 耐力에 關한 硏究”, 博士學位論文, 漢陽大學校, 1992.12.
43. 梁永晟, “中心壓縮荷重을 받는 鋼柱의 挫屈强度에 관한 硏究”, 博士學位論文, 東國大學校, 1988.12.
44. 兪在熙, “一般構造用鋼管과 스테인리스鋼管 短柱의 耐力에 관한 硏究”, 碩士學位

Collection @ chosun

論文, 朝鮮大學校, 2004.2.

45. 張浩朱, “스테인리스 鋼管 기둥의 挫屈耐力에 關한 硏究” 博士學位論文, 朝鮮大學校, 2005.2.
46. 鄭榮均, “角形 및 圓形鋼管主의 最大耐力에 關한 硏究”, 碩士學位論文, 漢陽大學校, 1994.6.
47. 趙永男, “콘크리트 充塡 圓形鋼管 部材의 耐力에 관한 實驗的 硏究”, 碩士學位論文, 朝鮮大學校, 2001.2.
48. 千守賢, “偏心壓縮力을 받는 高强度 콘크리트充塡 角形鋼管 기둥의 耐力에 관한 硏究”, 碩士學位論文, 朝鮮大學校, 2000.2.

49. 日本建築學會, 『鋼管構造設計施工指針同解說』, 1990.
50. 日本建築學會, 『鋼構造限界狀態設計指針・同解說』, 1998.
51. 日本建築學會, 『鋼構造座屈設計指針』, 1996.
52. 日本ステンレス構造建築協會, 『ステンレス建築構造 設計施工基準・同解說』, 1995.
53. 日本ステンレス協會 ステンレス建築協會,建設省建築硏究所, 『新ステンレス鋼利用技術指針』, 1993.10.

54. 五十嵐正義, “冷間成形角形鋼管斷面の彈性曲げ擧動に關する實驗的硏究”, 『日本建築學會學術講演梗槪集』, 1984.10
55. 松井 千秋, 津田 惠吾, “角形鋼管柱の塑性變形能力評價式”, 『日本建築學會學術講演梗槪集』, 1984.10
56. 成原 弘之, “冷間成形角形鋼管の短柱壓縮試驗”, 『日本建築學會學術講演梗槪集』, 1985.10
57. 宮尾 俊明, 松村 弘道, 岡本 晴仁, “製造種別に注目した箱形斷面部材の耐力と變形能力”, 『日本建築學會學術講演梗槪集』, 1991.3.
58. 北 芳男, “冷間成形角形鋼管柱の 彈塑性擧動”, 『日本建築學會學術講演梗槪集』, 1991.9
59. 上場 煇康, 金谷 弘, 淸水 孝憲, “高强度丹形鋼管の曲げ壓軸實驗”, 『日本建築學會

Collection @ chosun

學術講演梗槪集』, 1992.8.

60. 金谷 弘, “高强度圓形鋼管の曲げ壓縮實驗-その2 實驗結果”, 『日本建築學會學術講演梗槪集』, 1992.8

61. 邱 榮政, 榮村 仁, 山田 哲, 秋山 宏, “冷間成形角形鋼管の保有性能の硏究”, 『日本建築學會學術講演梗槪集』, 1992.8.

62. SSBA, “Design and Construction Standard of Stainless Steel Building”, Stainless Steel Building Association of Japan, Tokyo, Japan, 1995.

63. AISC, 『Manual of Steel Construction - Load and Resistance Factor Design』, Third Edition, 1994.

64. AISI, 『Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members』, Specification 1968a, 1968.

65. AISI, 『Specification for the Design of Light Gage Cold-formed Stainless Steel Members』, Specification 1968b, 1968.

66. AISI, 『Cold-formed Stainless Steel Design Manual』, 1974.

67. Ayrton, W. E. and Perry, J., 『On Struts』, The Engineer, 1886.

68. Beedle, L. S., 『Stability of Metal Structures』, 1991.

69. Bleich, F., 『Buckling Strength of Metal Structures』, McGraw-Hill, 1952.

70. Chen, W. F. and Atsuta, T., 『Theory of Beam-Columns, Volume 1, In-plane behavior and design』, McGraw-Hill, 1976.

71. Chen, W. F. and Atsuta, T., “Theory of Beam-columns, Volume 2, Space behavior and design』, McGraw-Hill, 1976.

72. Chen, W. F. and Lui, E. M., 『Structural Stability, Theory and Implementation』, 1987.

73. Enggesser, F., 『Zeischrift für Architectur und Ingenieurweses』, 1889.

74. Euler, L., 『De curvis elastics, Lausanne and Geneva』, 1744.

75. Euler, L., 『Sur la force de Colonnes, the Mémoires de l'Académie de Berlin』,

Collection @ chosun

1789.

76. Galambos, T. V., 『Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures』, 5/e, 1987.

77. Geschwindner, L. F., Disque, R. O., Bjorhovde, R., 『Load Resistance Factor Design of steel structures』, 1994.

78. LRFD, 『Cold-Formed Steel Design Manual』, AISI, 1991.

79. Narayanan, R., 『Beams and Beam-Columns, Stability and Strength』, 1983.

80. Salmon, C. G. & Johnson, J. E., "STEEL STRUCTURES, Design and Behavior", Harper & Row, 1990.

81. Wei-Wen Yu, 『Cold-Formed Steel Design』, 2/e, John Wiley & Sons. 1991.

82. Burr, W. H., "The Reinforced Concrete Work of the McGraw Building", 『Trans. ASCE』, Vol.*60*, No.1075, 1908.

83. Chen, W. F. and Atsuta, T., "Column Curvature Curve Method for Analysis of Beam-Columns", 『JISE. London』, Vol.*50*. No6, 1972.

84. Considére, A., "Resistance des Piéces Comprimées", 『Congrés International des Procédés de Construction』, 1889.

85. Engesser, F., "Knickfragen", 『Schweiz. Bauzitg.』, Vol.*26*, 1895

86. Errera, S. J. and Popowich, D. W., "Bolted and Welded Stainless Steel Connections", 『Journal of the Structural Division, ASCE』, Vol.*100*, No.ST6, 1973.6.

87. Errera, S. J. and Popowich, D. W., "ASCE LRFD Method for Stainless Steel Structures", 『Journal of Structural Engineering, ASCE』, Vol.*118*, No.4, 1992.4.

88. Furlong, R. W., "Strength of Steel-Encased Concrete Beam Columns", 『Journal of the Structural Division, ASCE』, Vol.*93*, No.ST5, 1967.

89. Galmbos, T. V. and Ketter, R. L., "Columns Under Combined Bending and

Collection @ chosun

Thrust", 『Trans. ASCE』. Vol.*126*, 1961.

90. Hauck, G. F. and Lee, S. L., "Stability of Elasto-Plastic Wide-Flange Columns", 『Trans. ASCE』, Vol.*89*, 1963.

91. Hill, H. N. and Clark, J. K., "Lateral Buckling of Eccenrtically Loaded I and H-section Columns", 『Trans. ASCE』, 1951.

92. Huber, A. W. and Beedle, L. S., "Residual Stress and the Compressive Strength of Steel", 『Weld. Jour. Res. Supp.』, Vol.*33*, Dec.1954.

93. Ketter, R. L., Kaminsky, E. L. and Beedle, L. S. "Plastic Deformation of Wide-Flange Beam-Columns", 『Trans. ASCE』. Vol.*120*, 1955.

94. Moson, R. E., Fisher, G. P. and Winter, G., "Test and Analysis of Eccentrically Loaded Columns", 『Journal of Structural Engineering, ASCE』, Vol.*84*, 1958.75. Niemi, E. and Makelainen, P., "Tubular Structures", 『The Third International Symposium』, 1990.

95. Rasmussen, K. J. R. and Hancock, G. J., "Stainless Steel Tubular Columns - Tests and Design", 『Proc. Tenth Int. Specialty Conf. on Cold-formed Stainless Steel Structures』, 1990.

96. Rasmussen, K. J. R. and Hancock, G. J., "Strength Tests on Stainless Steel Tubular Columns", 『Proc. Second Nat. Struct. Engrg. Conf., Institute of Engineers Australia』, 1990.

97. Rasmussen, K. J. R. and Hancock, G. J., "Design of Cold-Form Stainless Steel Tubular Members. Ⅰ:Columns", 『Journal of Structural Engineering, ASCE』, Vol.*119*, No.8, 1993.8.

98. Rasmussen, K. J. R. and Hancock, G. J., "Design of Cold-Form Stainless Steel Tubular Members. Ⅱ:Beams", 『Journal of Structural Engineering, ASCE』, Vol.*119*, No.8, 1993.8.

99. Roderick, J. W. and Rogers, D. F., "Load Carrying Capacity of Simple

Collection @ chosun

Composite Columns", 『Journal of the Structural Division, ASCE』, Vol.*95*, No.ST2, 1969.

100. Rondal, Jacques and Maquoi, R., "Single Equation for SSRC Column Strength Curves", 『Journal of the Structural Division, ASCE』, Vol.*105*, No.ST1, 1979.

101. Salvadori, M. C., "Lateral Buckling of Eccentrically Loaded I-Columns", 『Trans. ASCE』, Vol.*121*, 1956.

102. Shanley, F. R., "Inelastic Column Theory", 『Jour. Aeronaut. SCI』, 1947.

103. Weng, C. C. and Teoman Pekoz, "Residual Stresses in Cold-Formed Steel Members", 『Journal of Structural Engineering, ASCE』, Vol.*116*, No.6, 1990.6.

104. Bjohovde, Reidar, "Deterministic and Probabilistic Approaches to the Strength of Steel Columns" Lehigh University Ph. D. Dissertation. Civil Engineering, 1972.

105. Lin, S. H., Yu, W. W. and Galambos, T. V., "Design of Cold-formed Stainless Steel Structural Members - Proposed Allowable Stress Design Specification with Commentary", Third Progress Report, University of Missouri-Rolla. Rolla, Mo. 1988.

106. Lin, S. H., Yu, W. W. and Galambos, T. V., "Load and Resistance Factor Design of Cold-formed Stainless Steel - Statistical Analyses and Material Properties and Development of LRFD Provisions", Fourth Progress Report, University of Missouri-Rolla. Rolla, Mo. 1988.

Collection @ chosun

부록1. 기 호

A	단면적(㎟)
A_F	모멘트 확대계수
C	압축하중(kN)
C_m	모멘트수정계수
d	원형강관의 안지름(㎜)
D	원형강관의 바깥지름(㎜)
D/t	원형강관 지름-두께비
E_s	강재의 탄성계수(MPa)
e	편심거리(㎜)
e/k	편심비
f	형상계수
E_sI	휨강성(剛性)
F_{cr}	공칭한계강도(N/㎟)
F_u	계수강도(N/㎟)
F_y	항복강도(N/㎟)
I_s	강관의 단면2차모멘트(㎜⁴)
k	단면핵반경(㎜)
K	등가좌굴길이계수
L	시험체 길이(㎜)
L_k	유효좌굴길이(㎜)
L_k/r	세장비
L_o	순수시험체길이(㎜)
M	재단모멘트(kN・m)
M_C	압축측 모멘트(kN・m)
M_o	휨재의 휨모멘트(kN・m)
M_p	전소성모멘트(kN・m)

Collection @ chosun

M_{PC}	전소성 이론해석에 의한 최대모멘트(kN · m)
M_T	인장측 모멘트(kN · m)
M_u	최대모멘트(kN · m)
M_u1	편심거리와 최대하중에 의해 결정되는 작은 쪽 단부모멘트(kN · m)
M_u2	편심거리와 최대하중에 의해 결정되는 큰 쪽 단부모멘트(kN · m)
M_{u1}	재단모멘트(kN · m)
M_{u2}	$P-\delta$ 효과에 의한 2차모멘트(kN · m)
P	축하중(kN)
P_e	Euler 좌굴하중(kN)
P_n	공칭압축하중(kN)
P_{PC}	전소성 이론해석에 의한 최대하중(kN)
P_u	최대하중(kN)
P_y	항복하중(kN)
r	단면2차반경(㎜)
R	$\sqrt{P^2+M^2}$
t	강관의 두께(㎜)
T	인장하중(kN)
S	탄성단면계수(㎣)
X_n	소성중립축거리(㎜)
Z	소성단면계수(㎣)
α	세장효과를 고려한 좌굴계수
δ	횡변위(㎜)
δ_u	보-기둥의 최대내력시의 횡변위(㎜)
Δ	축변위(㎜)
Δ_u	보-기둥의 최대내력시의 축변위(㎜)
ϵ_u	최대내력시 변형도(strain)
ϵ_y	항복내력시 변형도(strain)
θ	회전각(rad)

dCollection @ chosun

θ_u	최대모멘트시 회전각(rad)
θ_u1	편심거리가 작은 단부의 최대모멘트시 회전각(rad)
θ_u2	편심거리가 큰 단부의 최대모멘트시 회전각(rad)
λ_c	무차원 세장비
λ_p	한계세장비
ν	안전율(SIJ-ASD)
σ_{loc}	국부좌굴내력(N/㎟)
σ_u	최대내력(N/㎟)
σ_y	항복내력(N/㎟)
σ_y/σ_u	항복비
${}_s\sigma_u$	Stub-column의 최대내력(N/㎟)
${}_t\sigma_y$	인장강도시험편의 항복내력(N/㎟)
$\overline{\sigma}$	표준편차
ϕ	강도저감계수(strength reduction factor, 0.85)

Collection @ chosun

부록2. 실험사진

[부사진 2.1] 인장강도실험 setting 전경

[부사진 2.2] 인장강도 시험편과 파단 후 시험편 전경

Collection @ chosun

[부사진 2.3] Stub-column 시험체 setting 전경

[부사진 2.4] stub-column 파단 전경

Collection @ chosun

[부사진 2.5] 기둥 시험체 setting 전경

[부사진 2.6] 기둥 시험체 파단 전경

Collection @ chosun

[부사진 2.7] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥 시험체 setting 전경

[부사진 2.8] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥 시험체 파단 전경

Collection @ chosun

[부사진 2.9] 양단편심 대칭 단일곡률 보-기둥 시험체와 파단 후 시험체 전경

[부사진 2.10] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥 시험체 setting 전경

dCollection @ chosun

[부사진 2.11] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥 시험체 파단 전경

[부사진 2.12] 양단편심 대칭 이중곡률 보-기둥 시험체와 파단 후 시험체 전경

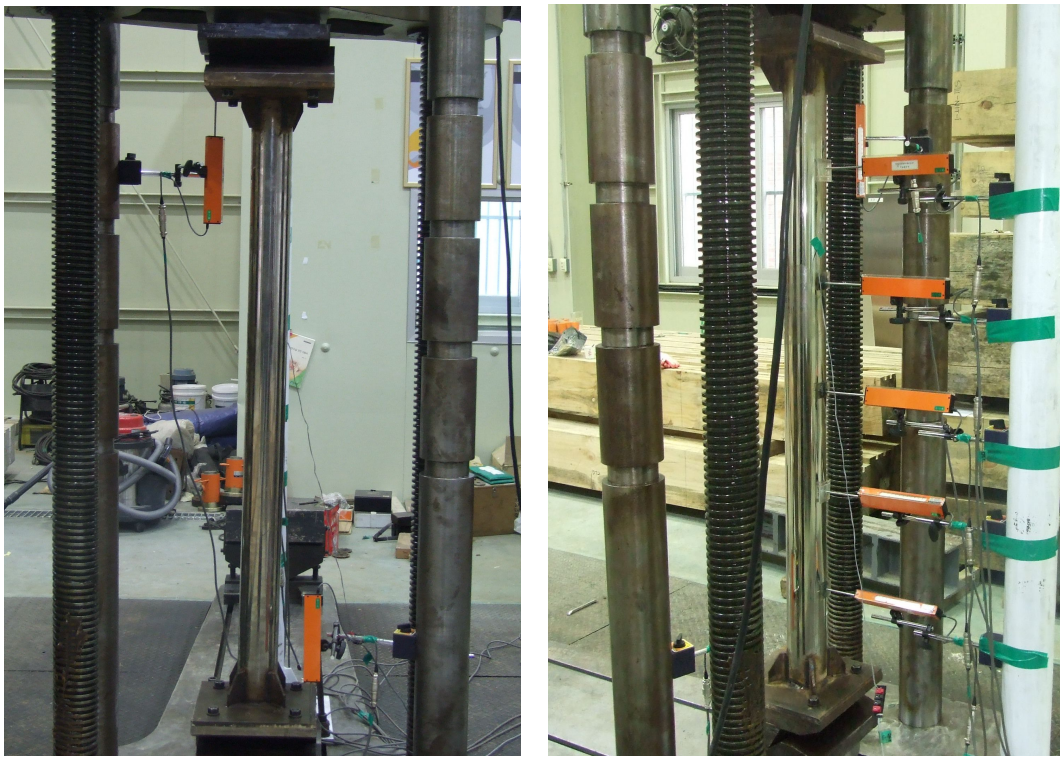
Collection @ chosun

[부사진 2.13] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥 시험체 setting 전경

[부사진 2.14] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥 시험체 파단 전경

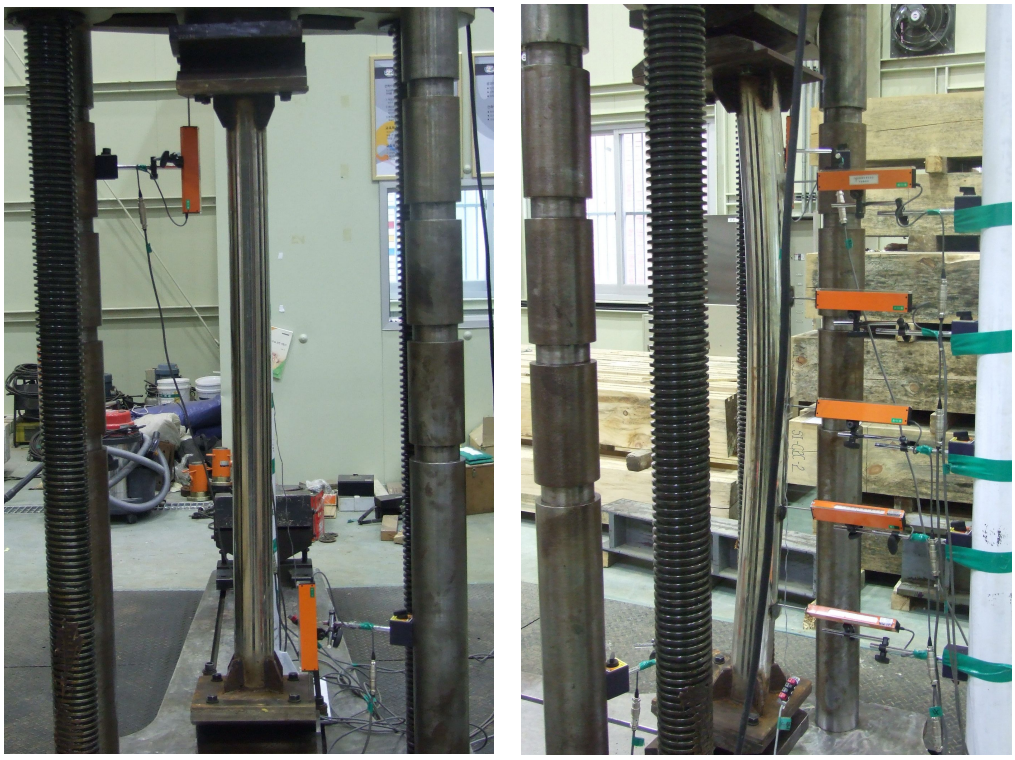
Collection @ chosun

[부사진 2.15] 일단중심 타단편심 단일곡률 보-기둥 시험체와 파단 후 시험체 전경



[부사진 2.16] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥 시험체 setting 전경

dCollection @ chosun



[부사진 2.17] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥 시험체 파단 전경

[부사진 2.18] 양단편심 비대칭 단일곡률 보-기둥 시험체와 파단 후 시험체 전경

Collection @ chosun

[부사진 2.19] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥 시험체 setting 전경

[부사진 2.20] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥 시험체 파단 전경

dCollection @ chosun

[부사진 2.21] 양단편심 비대칭 이중곡률 보-기둥 시험체와 파단 후 시험체 전경