creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

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

dCollection

[UCI]I804:24011-200000239160

2010年 2月

碩士學位 論文

H형강 補强기둥의 特性에 관한 硏究

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

文 錦 煥

H형강 補强기둥의 特性에 관한 硏究

A Study on the Characteristic of
H-shaped Steel Strengthened Column

2010 年 2月 25日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

文 錦 煥

H형강 補强기둥의 特性에 관한 硏究

指導敎授　金　政　燮

이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함.

2009年 10月

朝 鮮 大 學 校　大 學 院

建 築 工 學 科

文　　錦　　煥

文錦煥의 工學碩士學位論文을 認准 함.

委 員 長　　朝鮮大學校　　敎授　　金 義 植　印

委　　員　　朝鮮大學校　　敎授　　崔 宰 赫　印

委　　員　　朝鮮大學校　　敎授　　金 政 燮　印

2009年 11月

朝 鮮 大 學 校　大 學 院

목 차

기 호

Abstract

Ⅰ. 서 론 ····· 1

1.1 연구배경 및 목적 ····· 1

1.1.1 연구배경 ····· 1

1.1.2 연구목적 ····· 3

1.2 연구의 범위 및 방법 ····· 4

1.2.1 연구내용 ····· 4

1.2.2 연구방법 ····· 4

1.3 기존의 연구 ····· 7

Ⅱ. 이론적 연구 ····· 9

2.1 H형강 ····· 9

2.1.1 H형강 강종 표기 ····· 10

2.1.2 H형강의 분류 ····· 11

2.1.3 주성분에 의한 분류 및 특성 ····· 11

2.1.4 금속조직상의 분류 및 특성 ····· 14

2.1.5 H형강의 특징 ····· 16

2.1.6 H형강의 부식(腐蝕) ····· 18

2.2 H형강의 제조공정 ····· 23

2.3 압축재 ····· 25

2.3.1 압축재의 좌굴 ····· 25

2.3.2 강재단면의 분류 ····· 28

2.3.3 압축요소의 한계판폭두께비 ····· 29

2.3.4 유효좌굴길이와 세장비 제한 ····· 31

Ⅲ. 실험계획 ····· 34

3.1 재료실험 ····· 34

3.2 실험 개요 ····· 35

3.2.1 등가(等價)좌굴길이계수(K) ····· 39

3.3 실험 방법 ····· 42

3.3.1 개요 ····· 42

3.3.2 가력 및 측정방법 ····· 44

3.4 부재 실험 ····· 45

Ⅳ. 부재실험 결과 ····· 48

4.1 실험결과 ····· 48

4.2 보강 효과 ····· 63

4.3 소 결 ····· 66

Ⅵ. 결론 ····· 67

참고문헌 ····· 69

부록 ····· 73

표 목 차

<표 2.1> 강재단면의 분류 ····· 29
<표 2.2> 압축판요소의 판폭두께비(비구속판요소) ····· 30
<표 2.3> 유효좌굴길이계수(K) ····· 33

<표 3.1> 형강의 규격 ····· 35
<표 3.2> 기둥 실험체 계획 ····· 37

<표 4.1> 세장비 50 기둥 부재 실험 결과 ····· 48
<표 4.2> 세장비 60 기둥 부재 실험 결과 ····· 49
<표 4.3> 세장비 50 실험체 응력 ····· 63
<표 4.4> 세장비 60 실험체 응력 ····· 64

그 림 목 차

[그림 1.1] 연구 진행 흐름도 ····· 6

[그림 2.1] 압연공정 ····· 23

[그림 3.1] 기둥 보강실험체 접합 변수 개념도 ····· 38
[그림 3.2] 등가좌굴길이계수 ····· 39
[그림 3.3] 기둥실험체 개형 및 엔드플레이트와 브래킷 상세도 ····· 42
[그림 3.4] 기둥실험체와 나이프에지의 결합 ····· 43
[그림 3.5] 기둥 실험체 가력도 ····· 44

[그림 4.1] 세장비 50 실험체 하중-처짐 곡선 ····· 54
[그림 4.2] 세장비 60 실험체 하중-처짐 곡선 ····· 59
[그림 4.3] H형강 기둥 하중-처짐 곡선 비교 ····· 61
[그림 4.4] 세장비 Type별 하중-처짐 곡선 비교 ····· 62
[그림 4.5] 세장비 50 실험체 응력비 ····· 64
[그림 4.6] 세장비 60 실험체 응력비 ····· 65
[그림 4.7] 세장비별 최대 내력 ····· 65

사 진 목 차

[사진 3.1] 기준 실험체의 Setting 전경 ····· 45
[사진 3.2] 기준 실험체의 상단 지점부 전경 ····· 46
[사진 3.3] 기준 실험체의 하단 지점부 전경 ····· 46
[사진 3.4] 기준 실험체의 변위 측정 전경 ····· 47

기 호

A : 형강의 단면적(㎟)

σ_u : 실험체의 최대강도(N/㎟)

σ_{loc} : 국부좌굴내력(N/㎟)

δ_u : 최대하중시 부재의 변위(mm)

F_y : 항복강도(N/㎟)

F_u : 인장강도(N/㎟)

P_{cr} : 좌굴하중(N)

P_u : 최대하중(kN)

L_0 : 실험체 순길이(mm)

r : 단면2차반경(mm)

K : 유효좌굴길이계수

KL/r : 세장비

KL : 유효좌굴길이(mm)

λ : 판폭두께비

λ_p : 콤팩트단면의 한계판폭두께비

λ_r : 비콤팩트단면의 한계판폭두께비

Abstract

A Study on the Characteristic of H-shaped Steel Strengthened Column

By Moon, Kum-Hwan
Adviser : Prof. Kim, Jeong-Sup
Department of Architectural Engineering,
Graduate School of Chosun University

This study conducted centrally axis compression test of H-shaped section steel column with bonding methodology for unification of H-shaped section steel and reinforced section as a main variable when the flange section of H-shaped section steel column with poor member stress is reinforced with steel plate. It examined structural characteristics such as behavior, maximum stress, fracture and deformation of centrally axis compressed column depending on applicability and slenderness ratio of H-shaped section steel flange bonding methodology.

1) As a result of H-shaped column test, non-reinforced specimen showed brittle failure by buckling after having maximum load, but specimen of flange reinforced with steel plate showed increase of yield load, deformation in maximum load and failure by compression and buckling.

2) Maximum load of reinforced specimen showed increase 12.91~63.13% in 50 of slenderness ratio (KL/r) and 19.65~86.43% in 60 of slenderness ratio compared to standard specimen.

3) Section area stress of reinforced specimen showed reduction of 13.06~39.82% in 50 of slenderness ratio and of 0.65~36.21% in 60 of slenderness ratio compared to standard specimen.

4) Effects of reinforcement methods of H-shaped section steel showed the increase of stress in high tension bolt joining (C type), joining by welding at both extremes (A type), joining by welding at both extremes and center (B type), and combined joining of welding and high-power bolt at both extremes (D type) in order by the distance between reinforced joining and joined part.

5) Reinforced specimen showed increase of relative slope of initial stress and deformation due to that of section area and high resistance against deformation compared to standard specimen. Therefore, it was considered that specimen of flange reinforced with steel plate can expect the effects of deformation and buckling control.

6) To synthesize the results of centrally axis compressed column experiment, it was found that increase of tensile strength can be expected with reinforcement of H-shaped section steel with combined joining by welding and high-power bolt of flange section with steel plate. In addition, for its actual application to structure, experimental examination of compressive load to concentricity distance is required.

Ⅰ. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

1.1.1 연구배경

건축물은 사회적 요구수준의 변화와 내구성 확보, 사용공간의 변화에 따라 기존의 구조물을 용도변경 하거나 증축하게 된다. 증축이나 용도의 변경은 하중 증가에 따라 기존 건축물에서 구조 내력의 부족을 초래하여 구조적 보강이 불가피하다. 구조적 보강에서 기둥의 보강은 전체 건축물의 구조적 안전성 측면에서 매우 중요한 의미를 갖는다.

건축물의 설계 시 구조의 설계는 강한기둥, 약한 보 개념에 따라 압축부재인 기둥은 충분한 여유내력이 확보되도록 구조설계되어야 한다.

최근 건축물의 고층화, 대형화에 따라 건축물의 자중경감, 구조부재의 단면감소와 고강도화를 통한 공간 사용성의 증대와 같은 다양한 기능 등을 만족시키기 위해 구조적 제약 조건을 극복하고 장경간 및 공간의 효율적인 이용을 가능하게 하기 위해서는 구조형식이나 단면증가에 비해 내력상승이 뛰어나고 소성변형이 우수한 구조재를 필요로 하고 있다. 이에 고층 건축물의 안전성, 시공성 및 경제성을 고려한 구조방식 및 구조재의 개발 등 건축기술의 전반적인 발전이 요구되고 있다.

또한, 건축물이 고층화되면 바람이나 지진과 같은 수평하중의 영향이 수직하중의 영향보다 더 큰 구조적인 중요성을 지니게 되므로, 허용범위 내에서 부재강도와 변형을 유지하면서 사용자에게 불편을 주지 않도록 수직하중과 수평하중을 더욱 효율적으로 지지할 수 있어야 한다. 이러한 요구에 대해 건축구조분야에서는 새로운 구조시스템의 개발과 함께 기존의 재료를 적절히 조합하여 과거에는 얻을 수 없었던 구조성능을 부여하려는 노력이 활발하다.

그에 따라 강구조에 대한 많은 연구가 이루어 졌고, 실제 건축물에 적용하여 설계상의 여러 가지 문제점을 해결하고, 그 디테일이나 시공법에 대해서도 많은 연구

들이 진행되었다. 그리고 건축구조용 강재도 외력에 적절히 대응하도록 고강도화, 고성능화, 대형·극후화를 지향해 오고 있다.

그러나 강재의 특성상 강도가 높아지면 기존에 사용되던 강재에 비해 항복비가 상승하고, 연신율 및 인성이 저하함과 동시에 항복거동이 변화하여 명확한 항복점이 나타나지 않는 continuous yielding 현상이 일어나는 경향을 보인다.

H형강의 기계적 우수성으로 인해 건축구조용 강재로 사용이 일반화되었지만 공장제품으로 생산되어 시공된 기존 형강에 대한 단면 보강의 개념의 연구는 미진한 상태이며, 보강 후 구조 내력 및 거동에 대한 평가는 활발하게 이루어 지지 못하고 있다.

국내에서도 H형강의 보강에 대한 기초적인 연구가 수행중이나 아직까지는 초기 단계에 머물러 있으므로 많은 관심을 가지고 연구를 수행하여 기초적인 자료축적이 이루어져야 한다.

한편, 국내 강구조의 허용응력설계법이나 한계상태설계법에서는 기존 H형강의 단면보강에 대한 기준을 적용할 수 있는 직접적인 근거가 거의 없으므로 건축물의 구조부재로서 활발히 활용하기 위해서는 국내기준을 보완 제정할 필요가 있다. 따라서 H형강 보강에 대한 강도, 세장비(細長比), 폭(지름)-두께비, 단면형상에 따른 역학적 특성이 파악되어야 한다.

본 연구는 압연가공된 H형강의 접합방법과 세장비, 폭(지름)-두께비 등을 변수로 하여 재료실험과 부재실험을 실시하고, 이러한 실험 결과를 통해 기둥의 각 변수에 따른 내력 및 거동특성을 파악한다.

철골구조에서 압축재가 차지하는 중요성은 대단히 크므로 기둥의 내력과 변형능력을 여러 변수별로 조합하여 규명하는 것은 강구조물의 안전성 및 경제적인 면에서도 매우 중요하다.

1.1.2 연구목적

기존의 구조물에 증축 또는 용도변경에 따라 상부의 하중이 증가되어 기존에 시공된 H형강의 구조내력이 부족하여 구조적 보강이 필요할 경우 기존의 기둥에 구조적 보강이 불가피하게 필요하게 된다.

본 연구는 H형강 기둥의 각 변수에 따른 내력 및 변형 능력에 미치는 영향을 종합적으로 파악하기 위하여 부재력이 부족한 H형강 기둥에 대해 철판으로 플랜지의 단면을 보강할 경우, H형강과 보강 단면의 일체화를 위한 접합방법을 주요 변수로 H형강 보강 기둥에 대한 중심축 압축실험을 실시한다. 각 변수에 따른 내력 및 변형 능력에 미치는 영향을 파악함으로서 기둥부재로서 보강효과를 평가한다.

본 연구는 H형강 기둥의 단면을 철판으로 플랜지를 보강한 조건에 대한 실험적 연구로서 기존 H형강의 플랜지 접합 방법의 적용성 여부와 세장비에 따른 중심축 압축기둥의 거동, 최대응력 및 파괴양상, 변형 등의 구조적 특성을 파악한다. 또한, H형강 기둥부재에 플랜지 단면을 보강시 구조설계 및 시공상 적용을 위한 기초자료를 제공하는 것을 연구목적으로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

1.2.1 연구내용

1) H형강 기둥의 실험적 연구

H형강 기둥실험에서 사용된 H형강은 KS D 3503(일반구조용 압연강재, Steel for general Structure) SS400을 사용하며, KS 규격값 F_y는 235N/㎟로 규정되어 있다. 실험체의 공칭치수는 H-100×100×6×8이며 단위중량은 1.69×10^{-1}N/㎜이다.

본 연구는 H형강 기둥의 플랜지 단면을 철판으로 보강하여 세장비에 따른 중심축 압축기둥의 거동, 최대응력 및 파괴양상, 변형 등의 구조적 특성을 파악하고자 한다.

H형강 보강 기둥부재의 거동 파악에 대한 구체적인 연구내용은 다음과 같다.

① 플랜지의 접합 방법별 단면 보강에 따른 중심압축 기둥의 내력 파악

② 중심압축 하중을 받는 H형강 기둥의 거동 파악

③ 세장비 변화에 따른 중심압축력을 받는 기둥의 내력 및 변형능력 파악

2) 내력평가

① 중심압축 하중을 받는 기둥에 대한 실험데이터 분석

② 세장비에 따른 H형강 기준실험체와 접합 방법별 단면 보강 실험체의 비교

1.2.2 연구방법

1) 실험적 연구

(1) 기둥실험

H형강 보강 기둥의 내력에 미치는 영향 요인은 강재의 단면적, 접합방법, 세장비 등을 들 수 있다.

이에 본 연구는 H형강 기둥의 단면을 철판으로 보강하여 세장비에 따른 중심축 압축 하중을 받는 기둥 실험을 실시하며, 실험체의 변수는 다음과 같다.

① 중심압축 하중을 받는 기둥

- 재질 : H형강(SS 400)
- 단면형상 : H형강(H-100(120)×100×6×8(8))
- 세장비(KL/r) : 50, 60
- 폭(지름)-두께비 : 6.25, 3.12

② 플랜지 보강 접합 방법

이상과 같은 변수들을 대상으로 H형강 보강기둥 시험체를 제작하여 각 변수들로 내력 및 거동에 미치는 영향을 파악한다.

2) 내력평가

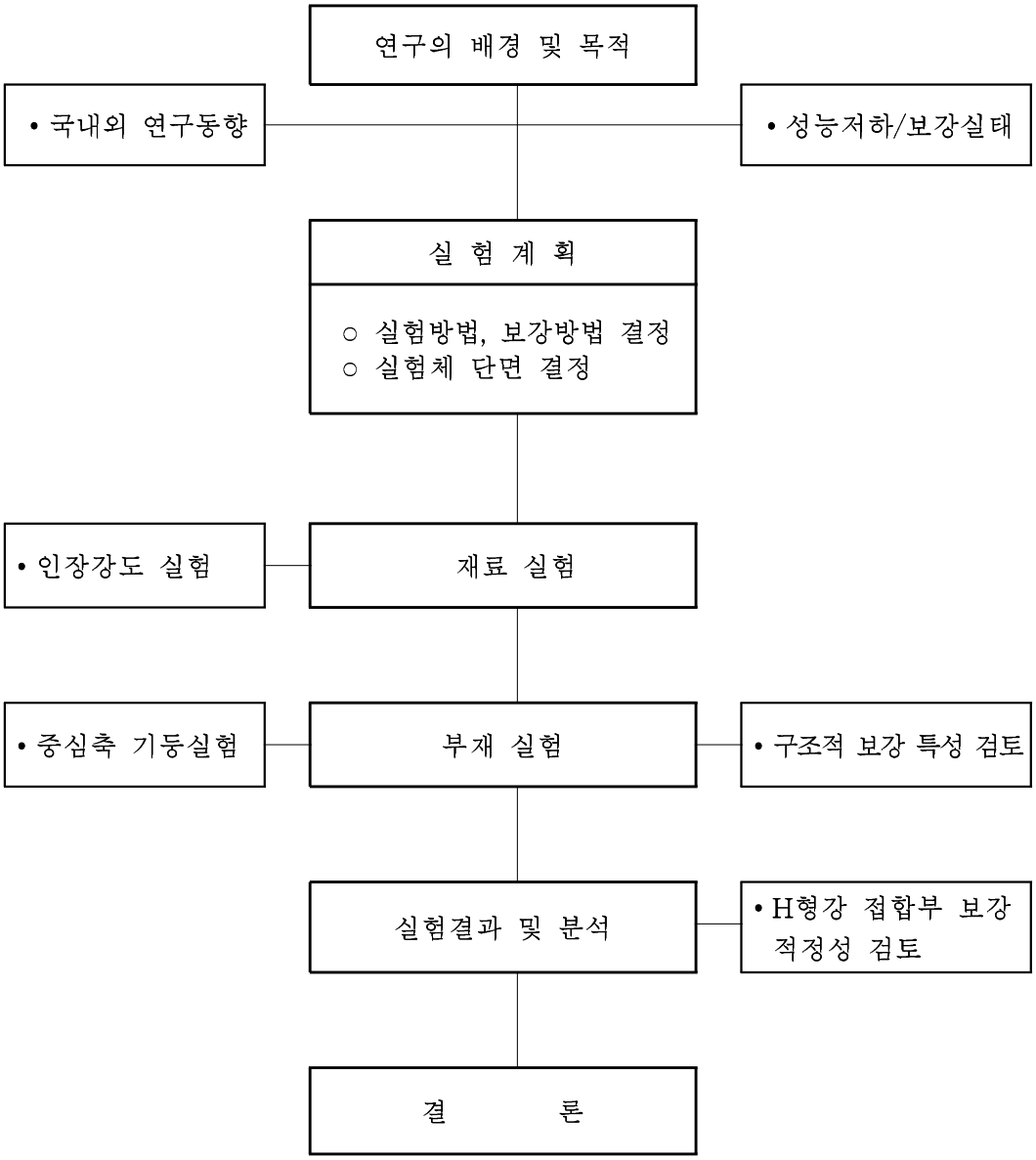
구조물이 파괴되는 몇 가지의 경우를 고려하면 불안정 문제, 피로 문제 또는 하중으로 인한 지나친 변형 문제를 들 수 있을 것이다. 만일 이런 문제들 중 어느 하나도 발생하지 않는다면, 구조물에 계속 하중을 가할 수 있을 것이다.

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 전소성이론에 의한 H형강 보강 기둥의 응력도와 변형도로부터 기둥의 좌굴내력을 파악하여 실험결과를 평가하고 설계 기초 자료를 제공하고자 한다.

본 연구를 수행하기 위하여 진행된 연구 흐름도는 다음과 같다.



[그림 1.1] 연구 진행 흐름도

1.3 기존의 연구

H형강은 구조용 강재 중에서 동일 압축력에 소요되는 재료의 효율성이 높은 편이며, 동시에 비틀림과 강축 방향에 대한 응력에 대해서도 높은 저항성능을 가지고 있다.

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

일반구조용 강재의 압축부재에 관한 최초의 좌굴(挫屈)이론은 스위스의 수학자 Euler[25]가 1744년에 발표하였다. 그 후 1770년에 Euler와 Lagrange는 탄성거동의 좌굴 후 변형에 대한 비탄성 처짐 이론을 발표하였으며, 1889년 Considére[40]와 Engesser[41]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 탄성계수 E와 접선계수E_t 사이에 존재하는 계수$\overline{E}$를 제안한 Condidére의 견해를 인정하여 감소계수이론(Reduced Modulus Theory, 이중계수이론, Double Modulus Theory)을 발표하였다.[31]

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

그 후 감소계수이론이 비탄성좌굴이론으로 받아들여졌으나, 1947년 Shanley[42]는 실제 좌굴하중이 Engesser의 접선계수 이론값과 감소계수 이론값 사이에 있으나 일반적으로 전자에 더 가깝다는 사실을 알고, 이 문제에 대한 결론을 맺었다.

Bleich[21]는 비탄성역에서는 접선계수하중을 적용하는 것이 원칙이나, 실험적으로 접선계수E_t를 구하는데 어려움이 있으므로 기하학적인 2차 곡선을 이용하여 Johnson의 포물선식을 발전시켰다.

1950년대에 Lehigh 대학의 Huber, Beedle[37] 등의 광범위한 연구결과, 잔류응력(殘留應力, residual stress)이 접선계수이론과 실험결과와의 차이를 유발하는 주 요인으로 밝혀지자, 미국의 CRC(Column Research Council, 현재는 SSRE)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[19]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, 미국구조안정 연구위원회)로 바뀌면서 Bjorhovde[43]의 논문을 기초로 확률론적 방법에 의한 복수강도곡선이 제안되었으며, 그 후 Rondal[44]은 Perry타입 공식의 상수를 바꾸어 복수강도곡선을 단일공식(單一公式)으로 나타내려는 연구를 행하였다.

Ⅱ. 이론적 연구

2.1 H형강

H형강은 철(Fe)에 보통 10% 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.

H형강은 성분에 따라 크롬계와 크롬-니켈계로 구분되며 최초로 실용화된 것은 12~13Cr강(1912년 칼날용)이고, 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.

H형강은 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 H형강은 몇 가지 계통으로 분류된다. 같은 계통에 속하는 H형강들은 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(angstrom=$10^{-6}\mu$) 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[1]경화계(析出硬化) 3종, 이상[2]계(二相, duplex) 2

1) 석출(析出) : 용액에서 고체를 분리해 내거나 화합물을 분석해서 그것을 구성하고

종 등 총 63종이 생산되고 있는데, 일본의 경우 약 2천여 종이 등록되어 있다.

2.1.1 H형강 강종 표기

강종 기호는 H형강 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 타입 3자리 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.

있는 물질을 분리해 냄

2) 이상(二相) : 서로 다른 2상 조직을 이루어져 단상강의 결점을 보완한 강

2.1.2 H형강의 분류

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

2.1.3 주성분에 의한 분류 및 특성

1) 크롬(Cr)H형강

크롬H형강은 18Cr과 13Cr 등이 있으며, 결정구조가 18Cr H형강은 체심입방격자[3](體心立方格子, Body Centered Cubic lattice)로 페라이트 조직을 갖고 있으며 13Cr H형강은 체심입방격자이나 마르텐사이트 조직을 갖고 있다. 두 가지 모두 자성을 갖고 있으며 특히 마르텐사이트가 자성이 강하다.

크롬H형강은 온도범위와 시간에 따라 재질의 연성이 떨어져 부스러지듯이 파단되는 여러 취성현상이 일어난다. 따라서 크롬H형강의 사용은 상온에서 350˚C까지가 적당하다.

(1) O.K 취성(脆性)

크롬함량이 15% 이상인 크롬 H형강은 400~500˚C에서 장시간 가열하면 취성이 나타나는데, 특히 475˚C에서 유지시킨 경우 이러한 취성현상이 가장 심하게 나타나며, 강도 및 경도는 증가하고, 연신율과 충격치가 감소하게 되고, 내식성이 저하된다.

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

---

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

(2) 시그마(sigma)상 취성(σ phase 취성)

시그마상은 Fe-Cr의 화합물로써 크롬 H형강을 600˚C 전후에서 장시간 가열하면 이 화합물이 금속조직의 입계에 나타나게 되며 상온에서 쉽게 부스러지게 된다.

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

(3) 고온취성(高溫脆性)

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

이 취성의 가장 문제가 되는 것은 H형강 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.

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

2) 크롬-니켈(Cr-Ni) H형강

Cr-Ni H형강은 18-8H형강이 대표적이며, 오스테나이트 조직으로 결정격자(結晶格子)가 면심입방격자[4](面心立方格子, face centered cubic lattice)이고 자성이 없다. 18-8 H형강은 오스테나이트강이라고도 부른다.

---

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

Cr-Ni H형강은 기계적 성질과 내식성 저하를 방지하기 위해 950~1,100˚C까지 가열한 후 급랭시키는 고용화열처리[5](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

18-8H형강은 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˚C 이상의 온도에서 페라이트조직이 나타나며, 페라이트조직이 발생되면 열간 및 냉간 가공시 균열이 발생되기 쉽다.

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

(2) σ상 생성

18-8H형강은 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˚C이며 페라이트가 많으면 석출되기 쉽고, 강도가 증가하고, 인성(靭性)이 감소하며, 내식성에 악영향을 준다.

(3) 크롬-카바이드 석출(析出)

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

---

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

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.

(4) 냉간가공경화성

18-8H형강은 18Cr H형강에 비해 상온에서 가공할 경우 가공경화도가 높아 쉽게 경화된다.

가공 경화도를 낮추기 위해서는 탄소의 함량을 적게 하고, 오스테나이트조직을 안정화시키기 위해 니켈이나 합금성분을 첨가시키며, 냉간가공경화를 받은 H형강은 내부응력을 제거하고 부분적으로 발생한 마르텐사이트 조직을 오스테나이트조직으로 변태[6](變態)시키기 위해 950~1,100°C에서 가열시켜 급랭(急冷)하는 것이 바람직하다.

2.1.4 금속조직상의 분류 및 특성

1) 오스테나이트(austenite)계 H형강

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.

그러나 STS304강종은 용강으로부터 고상(固相)으로 응고할 때 δ-페라이트[7]가 우선 석출되며, 온도에 따라 오스테나이트상이 안정한 상으로 되기 때문에 상온에서 완전한 오스테나이트조직이 존재해야 하나, 화학성분에 따라 주편(周偏) 내에 δ-페라이트가 5~12%정도 잔류하게 되어 열간가공성을 해칠 수 있으며 가공 후 약

---

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

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

간의 자성을 가질 수 있다.

오스테나이트상을 안전하게 유지하기 위해서는 17% 크롬의 경우 7%의 니켈이 필요하고, 26% 크롬의 경우 20%의 니켈이 필요하다. 침입형 오스테나이트 안정화 원소인 탄소함량을 낮춘 강종을 L등급 오스테나이트 H형강이라고 한다.

2) 페라이트(ferrite)계 H형강

체심입방구조로 오스테나이트계 H형강보다 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 건축 테두리에 사용되며, 후물(厚物)형태로는 liner(선재), deck plate(데크판), 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 용접 형태로는 거의 제조되지 않는다.

3) 마르텐사이트(martensite)계 H형강

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 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(捧材)나 판재(板材)로도 사용이 가능하다.

4) 이상(二相, duplex)계 H형강

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 H형강

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.

2.1.5 H형강의 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 H형강의 인장강도는 550~650N/㎟로 일반강의 350~450N/㎟, 황동의 280~350N/㎟, 알루미늄합금의 150~250N/㎟ 등 보다 크다.

3) 연성이 크다.

H형강은 보통강에 비하여 항복내력 이후의 내력상승(耐力上昇)이나 신장(伸長)성능이 극히 우수하다. 예로 탄소강 STK 400의 경우 연산율이 28% 정도인데 반해, 18-8계 H형강의 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(耐磨耗性)이 뛰어나다.

H형강은 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

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

(2) 내산화성(耐酸化性)

H형강은 800~850°C까지는 거의 산화되지 않기 때문에 화재가 발생하거나 오염물질이 묻은 경우에도 재연마하는 정도로 본연의 광택을 찾을 수 있다.

(3) 고온강도

고온에서도 강도가 높아 일반강과는 달리 500°C를 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.

H형강은 내식성(耐蝕性)과 광택 있는 미관을 유지함으로 도장이 필요 없다. 또한

내식성이 우수하므로 다른 금속에 비해 수명이 길다. 따라서 H형강은 설치할 당시는 비용이 비싸지만, 장기적으로는 보수비용이 거의 발생하지 않기 때문에 오히려 경제적이다.

9) 유지비가 적다.

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

이와 같이 H형강은 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.

2.1.6 H형강의 부식(腐蝕)

1) H형강의 부식형태

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

(1) 전면부식(全面腐蝕, General corrosion)

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

H형강은 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 H형강의 보호성 산화피막이 국부적으로 손상을 받은 후 부식성 원소들과 재료가 직접 반응함으로서 극히 작은 면접의 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 현상은 주로 중력방향으로 성장하는 모습으로 나타난다.

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

(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 부식 환경과의 반응성이 크게 됨으로서 나타난다.

입계부식의 기본적인 원인은 결정입계의 성분변화(한 성분의 과다존재 혹은 결

펍)에 의해 발생되는 것으로 300계 H형강에서의 Cr 함량 결핍에 의한 입계부식이 대표적으로 알려져 있다.

특히 450~850°C 구간에서 열적인 영향을 많이 받을 때, 300계 H형강의 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 국부적인 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 H형강을 사용하여 재료를 보강시키는 방법이 고려될 수 있다.

2) 부식에 영향을 미치는 인자(因子)

H형강의 부식에 영향을 미치는 주요 인자는 다음과 같다.

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

3) 부식유발 환경요인

다음과 같은 환경조건들과 접촉하는 경우 H형강의 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 항상 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 H형강의 내식성을 저하시키는 요인으로 작용한다.

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

따라서 H형강의 충분한 내식성 확보를 위해서는 이들 물질이 철저히 제거되어야 한다. 이들을 제거하는 방법으로 솔질, 연마(硏磨), shot blasting과 같은 물리적 힘을 사용하여 제거하거나, 산세(酸洗) 용액으로 물질을 녹여 제거하는 방법이 있다.

그러나 이때 주의할 점은 제거과정 중에 발생될 수 있는 철분성의 미세한 입자들이 H형강 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 부식환경이 내부로 침투하는 것을 방지하는 개념이다.

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

(4) 예민화 현상방지

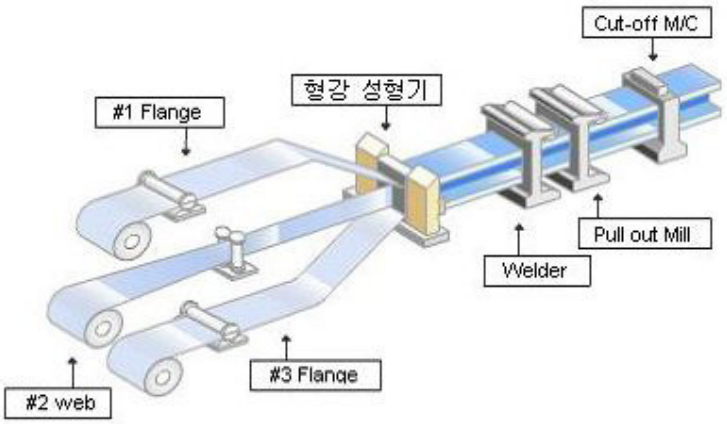
용접후 용접부에서 일정한 거리를 두고 열영향부가 발생함으로서 H형강의 내식성이 저하되는 현상이 나타난다. 특히 300계 H형강에서는 이 현상이 현저하기 때문에 용접 후 후처리가 중요하게 취급되고 있다.

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.

2.2 H형강의 제조공정

H형강 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[8](酸洗工程), 센지미어밀[9](Z-Mill)로 압연하여 생산한다.



[그림 2.1] 압연공정

1) 제강공정

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

2) 열간압연공정

---

8) 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.

9) 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.

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.

3) 냉간압연공정

크러스트(crust) 압연기와 광휘소둔[10](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 블랙코일 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.

---

10) 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.

2.3 압축재

압축력을 받는 구조부재를 압축재라 하고 압축력만이 작용하는 기둥이 이에 속한다. 압축재에 사용하는 강재의 단면형상으로는 H형강, ㄱ형강 등과 같은 개단면과 각형강관, 원형강관의 폐단면이 있으며, 이와 같은 단일압축재 외에 단일압축재를 조합시킨 조립압축재가 있다.

강재의 단면은 구성되는 판요소의 판폭두께비에 따라 콤팩트단면, 비콤팩트단면, 세장판요소단면으로 구분하고 있다. 강재의 판폭두께비가 비콤팩트단면의 한계판폭두께비를 초과하지 않는다면 국부좌굴 방지를 위한 내력의 감소는 필요하지 않지만, 압축재가 길어지게 되면 압축재 전체가 불안정 현상을 나타내는 부재좌굴이 발생하여 구조재의 안전에 문제를 일으킨다. 그리고 이러한 부재좌굴은 압축재의 길이가 동일하여도 양단의 지지조건에 따라서 압축재의 저항능력이 달라지게 되므로 설계식에 이러한 사항을 고려할 필요가 있다.

2.3.1 압축재의 좌굴

1) 중심압축력을 받는 기둥

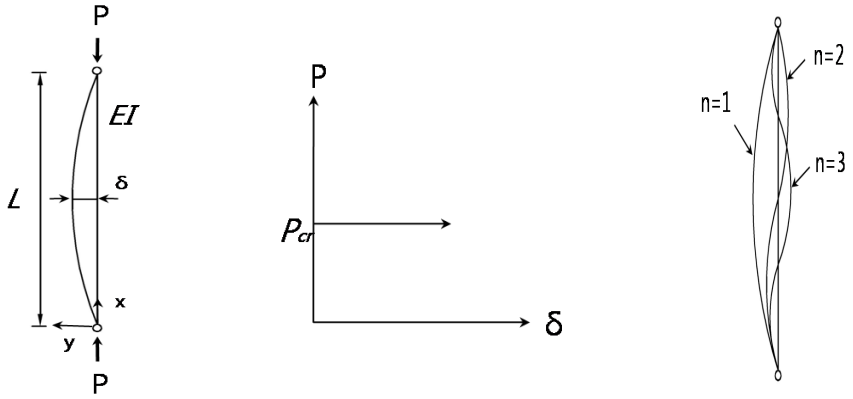
[그림 2.2](a)와 같이 양단 핀지지상태인 세장한 부재가 중심압축력 P를 받을때, P가 작은 경우에는 부재의 횡변위가 생기지 않고 길이 방향으로 그대로 줄어들 뿐이지만 한계 하중에 도달하면 기둥은 갑자기 횡방향으로 큰 변형을 일으키면서 불안정한 상태가 된다. 이 때 하중 P와 부재의 횡방향 처짐 δ와의 관계는 [그림 2.2](b)와 같이 된다. 이와 같은 현상을 좌굴(buckling)이라하고, 이 한계상태의 하중 P_{cr}을 좌굴하중이라고 한다.

부재가 세장한 경우 저항할 수 있는 하중은 적고, 따라서 부재에 생기는 압축응력도가 탄성범위 내에서 좌굴이 발생한다. 이와 같은 좌굴을 탄성좌굴(elastic buckling)이라고 하고, 이 때 저항하는 하중을 탄성좌굴하중이라고 한다.

탄성좌굴하중은 오일러(Euler)가 1757년에 다음과 같은 중심압축력을 받는 부재

(중심압축재)의 좌굴미분방정식으로부터 구하였다. [그림 2.2](a)와 같이 중심압축재의 좌굴이 발생한 상태에서 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\frac{d^2y}{dx^2}+\frac{P_{cr}y}{EI}=0 \qquad (2.3.1)$$



(a) 탄성좌굴 (b) 하중-횡변위 관계 (c) 좌굴모드

[그림 2.2] 중심압축력을 받는 부재의 탄성좌굴

$k^2=\frac{P_{cr}}{EI}$로 두변 식(2.3.1)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{d^2y}{dx^2}+k^2y=0 \qquad (2.3.2)$$

식 (2.3.2)의 미분방정식의 일반해는 식(2.3.3)과 같이 된다.

$$y=Asinkx+Bcoskx \qquad (2.3.3)$$

단, A, B는 적분상수이다. 재단조건으로부터,

x = 0일 때 y = 0로부터 B = 0

x = L일 때 y = 0로부터 sinkL = 0

sinkL = 0이므로 kL = nπ (n은 정수) (2.3.4)

따라서

$$P_{cr} = n^2 \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{2.3.5}$$

또 한 좌굴변형 상태는 $y = A sin \frac{n\pi x}{L}$ 가 된다. (2.3.6)

이 때 n은 정수로서 [그림 2.2](c)와 같이 좌굴의 변형상태 즉 좌굴모드에 관계한다. 그러나 실제로 중심압축재가 저항할 수 있는 최대내력은 n=1인 경우이며 이 때 좌굴하중은 다음과 같다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{2.3.7}$$

식(2.3.7)의 P_{cr}은 부재의 유효좌굴길이가 KL인 경우의 탄성좌굴하중(그림 2.2(a))으로서 오일러 좌굴하중(Euler's buckling load)이라고도 한다. 이 값을 응력으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$f_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \tag{2.3.8}$$

여기서, KL/r : 세장비

KL : 압축재의 유효좌굴길이(mm)

K : 유효좌굴길이계수(그림 2.2인 경우 : K=1)

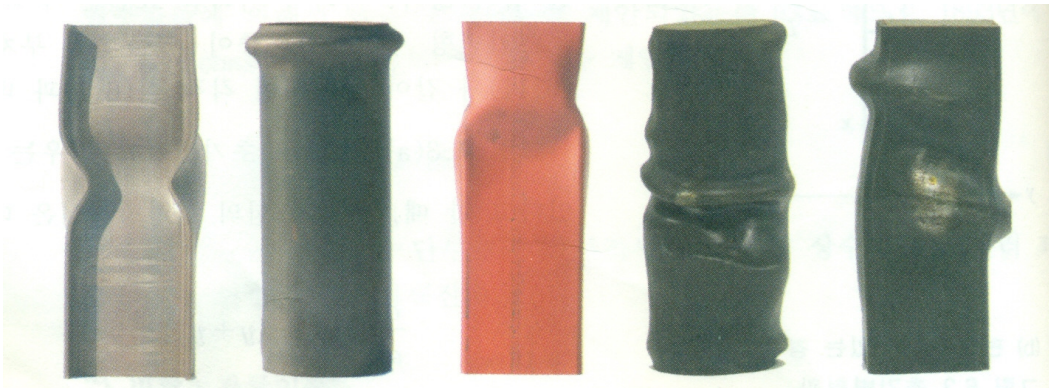
L : 부재길이(mm)

r : 압축재의 단면2차반경(mm)

A : 단면적(mm^2)

2.3.2 강재단면의 분류

압축재는 구성하는 판이 너무 얇아지면 부재좌굴 이외에 [그림 2.3]과 같은 국부좌굴이 발생하여 부재의 압축내력을 급격히 저하시킨다. [그림 2.3]과 같이 H형강과 같은 개단면 뿐만 아니라 원형 및 각형강관과 같은 폐단면에서 판이 얇아지면 국부좌굴이 발생한다. 또한 CFT(concrete filled tube)의 경우는 내부에 채워진 콘크리트의 구속으로 국부좌굴이 발생하기 어렵지만 항복강도 이상의 과도한 가력으로 국부좌굴을 발생시키면 [그림 2.3](d), (e)와 같이 된다. 이러한 이유로 압축재의 판폭두께비에 따라 단면을 <표 2.1>과 같이 콤팩트단면, 비콤팩트단면, 세장판 요소단면으로 분류한다. 이 구분에서 설명된 바와 같이 콤팩트단면과 비콤팩트단면은 한계판폭두께비 λ_p의 값으로 구별된다.



(a)H형강 (b)원형강관 (c)각형강관 (d)원형CFT (e)각형CFT

[그림 2.3] 국부좌굴

일반적으로 콤팩트단면에 좌굴이 생기기 전에 전체 소성응력분포를 받을 수 있고 국부좌굴 발생 전 약 3정도의 연성비를 갖는다. 비콤팩트단면은 국부좌굴이 발

생하기 전에 압축 부재에서 항복응력이 발생할 수 있으나, 완전소성응력 분포를 위해 요구되는 변형값에서, 소성국부좌굴을 저항하지 못한다. 또한, 압축세장판부재는 부재가 항복응력에 도달하기 전에 탄성적으로 좌굴한다.

지진이 강한지역의 구조물에서는 <표 2.2>에서 주어진 한계값 λ_p의 값보다 더 큰 소성연성비가 요구될 수도 있다. 구조부재에서 3에서 5까지의 연성을 갖기위해, 요소들의 연성계수는 5에서 15사이에 있을 수 있다. 그래서 이러한 경우에는 탄성회전의 7~9배의 소성연성비에 대비하는 것이 타당하다. 또한, 세장판 요소단면인 경우에는 판폭두께비가 지나치게 크면 국부좌굴 발생 전에 비틀림에 의해 부재가 파괴되므로 <표 2.2>와 같은 판폭두께비의 제한이 필요하다.

<표 2.1> 강재단면의 분류

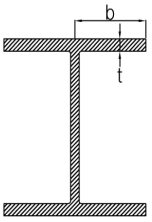
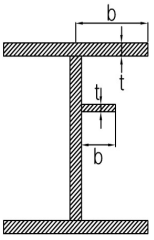
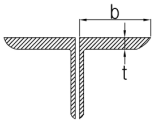
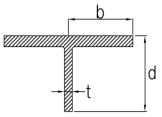
콤팩트 단면	단면의 플랜지들은 웨브에 연속적으로 연결되고, 그 단면의 모든 압축요소의 판폭두께비 λ가 λ_p를 초과하지 않는 단면($\lambda \leq \lambda_r$)
비콤팩트 단면	한 개나 그 이상의 요소들의 판폭두께비 λ가 λ_p를 초과하고 λ_r을 초과하지 않는 단면($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$)
세장판요소 단면	판폭두께비 λ가 λ_r를 초과하는 단면($\lambda > \lambda_r$)

주) λ_p : 콤팩트단면의 한계판폭두께비, λ_r : 비콤팩트단면의 한계판폭두께비

2.3.3 압축요소의 한계판폭두께비

단면 형상별 한계판폭두께비 λ_p, λ_r은 <표 2.2>와 같다. 판폭두께비 산정을 위한 b, t, d 는 다음과 같이 규정하고 있다.

<표 2.2> 압축판요소의 판폭두께비(비구속판요소)

	구분	판요소에 대한 설명	판폭 두께비	판폭두께비 제한값		예
				λ_p (콤팩트)	λ_r (비콤팩트)	
비구속판요소	1	균일압축을 받는 -압연H형강의 플랜지 -압연H형강으로부터 돌출된 플레이트 -서로 접한 쌍ㄱ형강의 돌출된 다리 -ㄷ형강의 플랜지	b/t	-	$0.56\sqrt{E/F_y}$	
	2	균일압축을 받는 -용접H형강의 플랜지 -용접H형강으로부터 돌출된 플레이트와 ㄱ형강 다리	b/t	-	$0.64\sqrt{k_cE/F_y}$ 11)	
	3	-균일압축을 받는 -ㄱ형강의 다리 -낄판을 낀 쌍ㄱ형강의 다리 -그 외 모든 한쪽만 지지된 판요소	b/t	-	$0.45\sqrt{E/F_y}$	
	4	균일압축을 받는 T형강의 스템	d/t	-	$0.75\sqrt{E/F_y}$	

11) $k_c = \dfrac{4}{\sqrt{h/t_w}}$, $0.35 \le k_c \le 0.76$

1) 비구속요소의 폭

압축력 방향과 평행한 면 중에서 한쪽 면에만 지지되어 있는 비구속요소의 폭은 다음 값으로 한다.

가) I, H 형강과 T형강의 플랜지의 폭 b는 전체 공칭 폭의 1/2로 한다.

나) ㄱ형강, ㄷ형강 및 Z형강의 다리의 폭 b는 전체 공칭사이즈로 한다.

다) 플레이트의 폭 b는 자유단으로부터 파스너의 첫 번째 줄 또는 용접선까지의 거리이다.

라) T형강의 스템 d는 전체 공칭 춤으로 한다.

2.3.4 유효좌굴길이와 세장비 제한

1) 지지상태에 의한 유효좌굴길이

오일러 좌굴하중이라고 불리어지는 식(2.3.9)는 부재의 지지조건상태가 양단핀지지일 때 성립되는 것이다. 그런데 지지조건은 항상 양단 핀지지상태만이 있는 것이 아니고 1단 핀 타단 고정, 1단 자유 타단 고정, 그리고 양단 고정의 경우도 있다. 이러한 경우도 양단 핀지지상태와 같은 방법으로 이론적인 탄성좌굴하중을 표현할 수 있다. 지지상태에 따른 좌굴하중은 다음 식과 같다.

1단 핀, 타단 고정일 때

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2} \tag{2.3.9}$$

1단 자유, 타단 고정일 때

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(2.0L)^2} \tag{2.3.10}$$

양단 고정일 때

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(0.5L)^2} \tag{2.3.11}$$

이 식들을 일반화 하여 나타내면 다음 식과 같다.

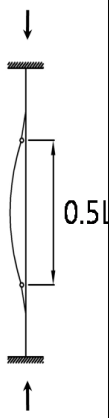
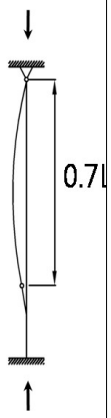
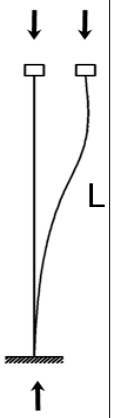
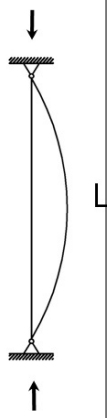
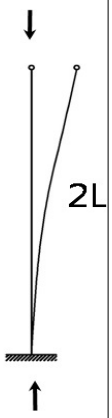
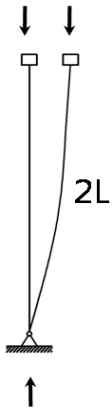
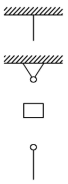
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{2.3.12}$$

식(2.3.7)은 $K = 1.0$인 경우이며 지지상태가 다른 경우에는 K값이 1.0이 아닌 다른 값을 가지게 된다. 이 때 KL이 그 부재의 유효좌굴길이이고, K를 유효좌굴길이계수라고 한다. 다음의 <표 2.3>에는 지지상태에 따른 K값을 나타내고 있다.

건축물의 골조에서 기둥에 연결되어있는 근접부재에서, 기둥밑에 기초와 지반과 구조물에서 모멘트구속의 정도를 평가하는 것은 매우 어렵다. 끝단의 구속정도의 정확한 확인여부에 관계없이, 가새골조(braced frame)와 비가새골조(unbraced frame)의 개념을 이해하여야 한다.

가새골조는 대각선 가새, 전단벽 또는 그와 비슷한 방법에 의해 측면의 안정성이 확보되는 것이다. 각 절점들은 측면방향으로 움직이지 않는다고 가정되고 각 기둥은 유효좌굴길이계수 K가 구해지면, 분리된 것처럼 설계될 수 잇다. 유효좌굴길이계수는 항상 1보다 작다.

<표 2.3> 유효좌굴길이계수(K)

재단조건 (점선은 좌굴모드)						
K의 이론값	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
K의 설계값	0.65	0.8	1.2	1.0	2.1	2.0
기호설명		회전구속, 이동구속 회전자유, 이동구속 회전구속, 이동자유 회전자유, 이동자유				

Ⅲ. 실험계획

3.1 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), 물리적(物理的) 및 화학적(化學的) 성질 등을 파악하기 위한 것이다.

실험은 일반구조용 압연강재 H형강을 비교하기 위해 KS D 3503(일반구조용 H형강) SS400 (F_y=235N/㎟)사용한다.

실험은 조선대학교 건설계열 공용실험실 소재 유압식 만능재료 실험기(Universal Testing Machine, 이하 U.T.M)로 실시하며, 실험기기 및 실험용품은 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-2000k, 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, WFLA-3-11-1L, Tokyo Sokki; Japan)

· Strain Gauge Terminal : TP4(Tokyo Sokki; Japan)

3.2 실험 개요

중심압축 하중을 받는 H형강 보강 기둥의 역학적 특성을 파악하기 위해, 세장비, 플랜지 보강 접합 방법을 주요 변수로 좌굴내력 및 거동 특성을 평가한다.

실험에 사용되는 형강은 KS D 3503(일반구조용 압연강재, Steel for general Structure) SS400을 사용한다.

<표 3.1> 형강의 규격

강 종	크 기(mm)	판폭두께비
H형강(SS400)	H - 100 × 100 × 6 × 8	6.25, 3.12

기둥 실험체는 H형강 H-100×100×6×8으로 세장비(KL/r) 50, 60에 대하여 기준실험체와 플랜지 단면을 철판으로 보강한 실험체를 제작한다. 실험체는 <표 3.2>와 같이 계획하여 실험한다.

H A- 0 - 50

· 기둥실험체 세장비(50, 60)

· 편심거리(e=0)

· 실험체 타입(N, A, B, C, D)

· HS : H형강 기준 실험체

HR : H형강 보강 실험체

실험체 제작과정은 순서에 의해 사진을 찍어 보관한다. 실험 계획에 따라 제작된 실험체는 실험전 단면적, 폭, 두께, 길이 등을 실측한다.

가력시 기둥의 양 단부는 단순지지 조건을 유지하기 위해 knife edge를 사용하며 볼트를 이용하여 실험체 양 단부의 end plate와 체결한다. 또한 하중재하는 양단 단순지지 조건으로 한다.

End plate는 PL-300mm×300mm×12mm를 사용하며, H형강과 end plate는 모살용접한다.

각 시험체의 유효좌굴길이(KL)는 시험체 단부에 부착된 아답터(adapter)를 강역(剛域)으로 에너지법에 의해 등가좌굴길이계수(K)를 산출하여 기둥시험체의 좌굴길이에 곱하여 구하고, 세장비는 유효좌굴길이를 좌굴측에 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 단부 조건으로 좌굴측을 미리 결정하여, 단부구속을 최소화할 수 있는 나이프 에지를 사용한다. 또한 나이프에지와 시험체를 정확히 부착시키기 위해 시험체의 단부에 두께 12mm(300mm×300mm)인 엔드플레이트(end plate)를 용접 부착하고, 엔드플레이트와 나이프 에지를 볼트(M16)로 체결한다.

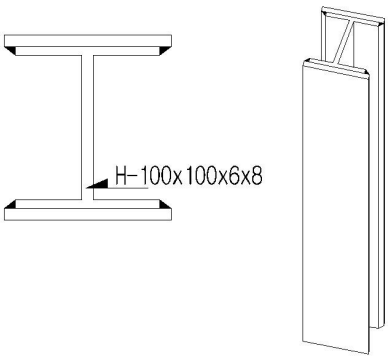
가력장치는 시험체 길이 및 내력을 예상하여 U.T.M을 사용하며, 하중 측정은 시험체 하부에 설치한 1000kN 용량의 Load Cell을 이용하여 측정하고, U.T.M 하중을 참고로 한다.

변위와 단부회전각을 측정하기 위해 D.T를 [그림 3.4]와 같이 설치한다. 또한 시험체 중앙부의 변형도 분포를 측정하기 위해 W.S.G를 시험체의 중앙부 플랜지에 부착한다.

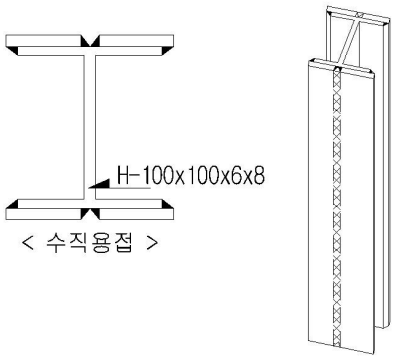
<표 3.2> 기둥 실험체 계획

실험체명	규 격	A (㎟)	b/t	KL/r	L_o (㎜)	L (㎜)	K	KL (㎜)
HSN-0-50	H-100x100x6x8	2,190	6.25	50	1,444	1,682	0.992	1,668
HRA-0-50	H-100x100x6x8	4,110	3.12	50	1,444	1,682	0.992	1,668
HRB-0-50	H-100x100x6x8	4,110	3.12	50	1,444	1,682	0.992	1,668
HRC-0-50	H-100x100x6x8	4,110	3.12	50	1,444	1,682	0.992	1,668
HRD-0-50	H-100x100x6x8	4,110	3.12	50	1,444	1,682	0.992	1,668
HSN-0-60	H-100x100x6x8	2,190	6.25	60	2,272	2,510	0.996	2,501
HRA-0-60	H-100x100x6x8	4,110	3.12	60	2,272	2,510	0.996	2,501
HRB-0-60	H-100x100x6x8	4,110	3.12	60	2,272	2,510	0.996	2,501
HRC-0-60	H-100x100x6x8	4,110	3.12	60	2,272	2,510	0.996	2,501
HRD-0-60	H-100x100x6x8	4,110	3.12	60	2,272	2,510	0.996	2,501

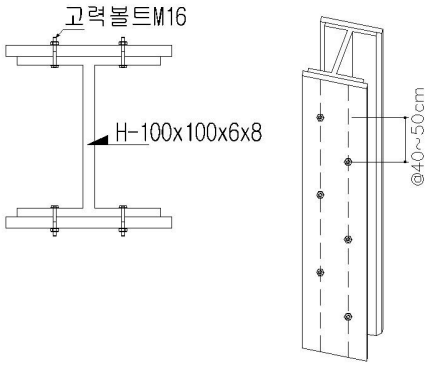
주) A : 단면적, b/t : 폭-두께, K : 유효좌굴길이계수, KL/r : 세장비, Lo : 실험체 순길이, KL : 유효좌굴길이



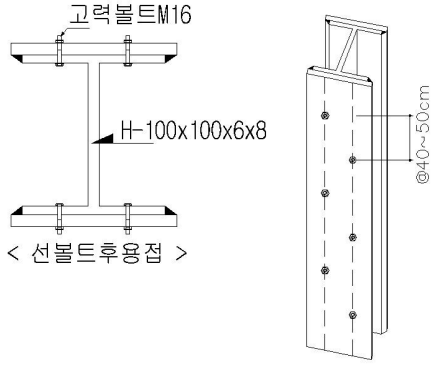
(a) HRA 실험체



(b) HRB 실험체



(c) HRC 실험체



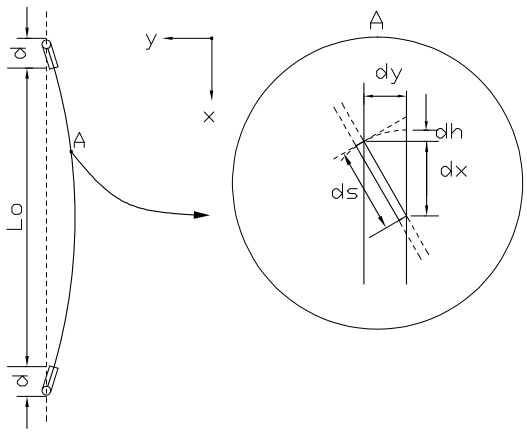
(d) HRD 실험체

[그림 3.1] 기둥 보강실험체 접합 변수 개념도

3.2.1 등가(等價)좌굴길이계수(K)

본 실험에서는 유효좌굴길이(KL)가 1이 되도록 시험체의 양단부를 단순지지조건으로 계획하기 위하여, 실질적으로 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 기둥의 좌굴을 energy법을 이용하여 등가좌굴길이계수(K)를 구한다.



[그림 3.2] 등가좌굴길이계수

[그림 3.2]의 등가좌굴길이계수 개념도를 참조하여 임의의 좌표 x에 있는 A점의 연직방향의 변위를 구하면,

$$
\begin{aligned}
dh &= ds - dx \\
&= \sqrt{dx^2 + dy^2} - dx \\
&= \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \cdot dx - dx \\
&= \sqrt{1 + (y')^2} \cdot dx - dx \\
&= [1 + 1/2 \cdot (y')^2 - 1] \cdot dx \\
&= 1/2 \cdot (y')^2 \cdot dx
\end{aligned}
$$

$a = \sqrt{dy^2 + dh^2}$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,

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \int_0^{L_o} 1/2 \cdot (y')^2 \cdot dx \\ &= 1/2 \cdot a^2 \cdot \frac{\pi}{L_o} \cdot \int_0^{L_o} \cos^2 \cdot \frac{\pi}{L_o} \cdot dx \\ &= 1/4 \cdot a^2 \cdot \frac{\pi}{L_o} \cdot L_o\end{aligned}$$

또한, 양단의 강역(剛域)부분의 압축량을 δ_2로 하면

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

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

$$P \cdot \delta = P \cdot (L_o/4 + d)(\pi a / L_o)^2 \qquad (3.1)$$

이며, 휨에 의해 기둥에 축적된 변형에너지(U)는

$$\begin{aligned}dU &= 1/2 \cdot EI \cdot (y'')^2 \cdot dx \\ y'' &= -a(\pi / L_o)^2 \cdot \sin(\pi x / L_o)\end{aligned}$$

위 식으로부터

$$U = 1/2 \cdot EI \cdot (\pi/L_o)^4 \cdot 4\int_0^{L_o} \sin^2(\pi x/L_o) \cdot dx \qquad (3.2)$$
$$= 1/4 \cdot EI \cdot a^2 \cdot (\pi/L_o)^4 \cdot L_o$$

(단, 강역에서는 축적 안됨)

$P \cdot \delta = U$이므로, 식 (3.1)과 (3.2)로부터

$$P = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_o(L_o + 4d)} \qquad (3.3)$$

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

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{K(L_o + 2d)^2} \qquad (3.4)$$

이므로 , 식 (3.3)과 (3.4)로부터 $P = P_{cr}$이 되기 위한 K값은

$$K = \frac{\sqrt{L_o(L_o + 4d)}}{(L_o + 2d)} \qquad (3.5)$$

이 된다.

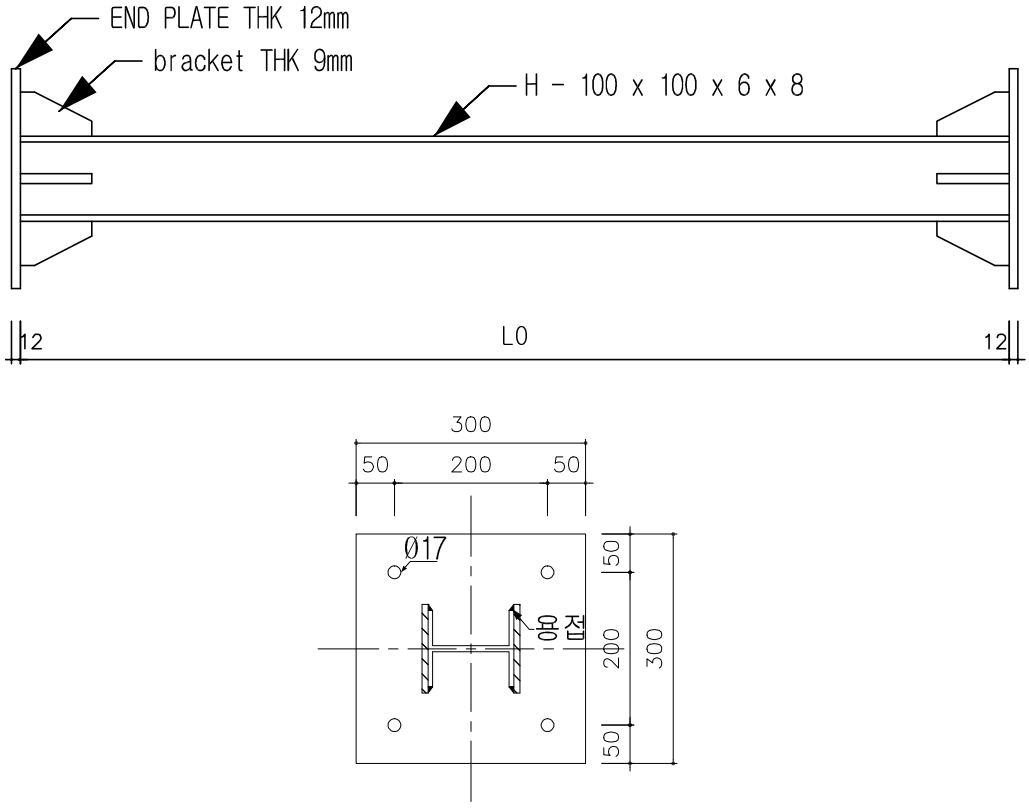
3.3 실험 방법

3.3.1 개요

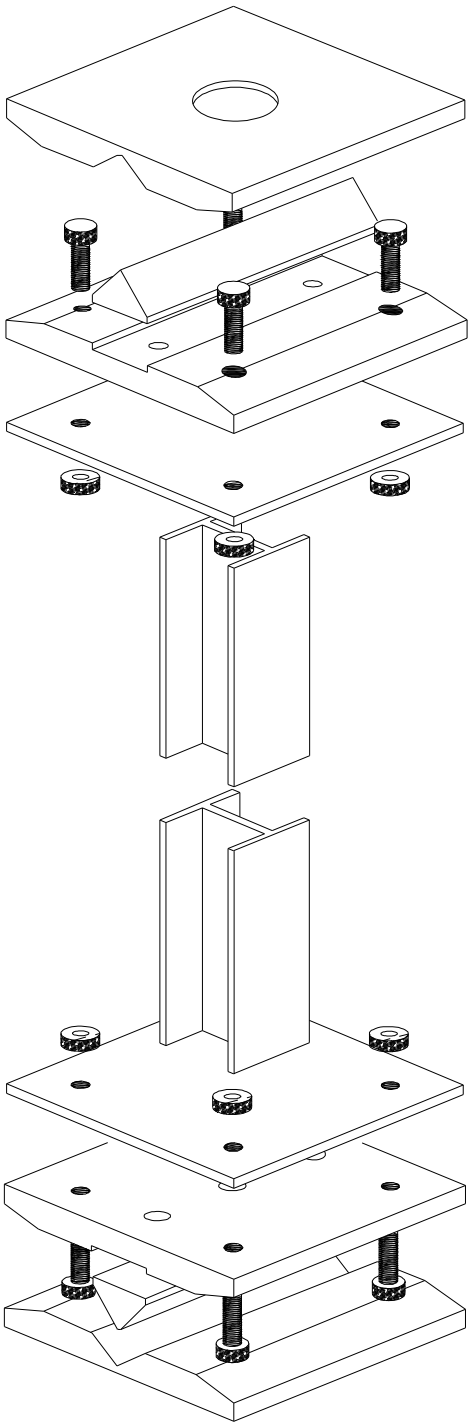
본 실험에 사용할 실험기기는 만능구조실험기를 이용하여 H형강 보강 기둥 부재 실험을 실시한다.

실험체의 개형은 [그림 3.3]에 나타내었고 기둥실험체의 계획을 <표 3.2>에 나타낸다. <표 3.2> 중 KL은 유효좌굴길이로서, 강역부(剛域部)가 되는 knife edge의 영향으로 좌굴길이가 변화하게 되는데, 이를 수정하기 위해 별도로 등가좌굴길이계수(K)를 산정하여 등가좌굴길이를 구해야 된다.

실험체 제작 시 H형강 재단치수 표기와 절단은 최대한 신중을 기하고 강재절단 후 수평이 맞지 않으면 hand grinder로 수평을 잡도록 한다.



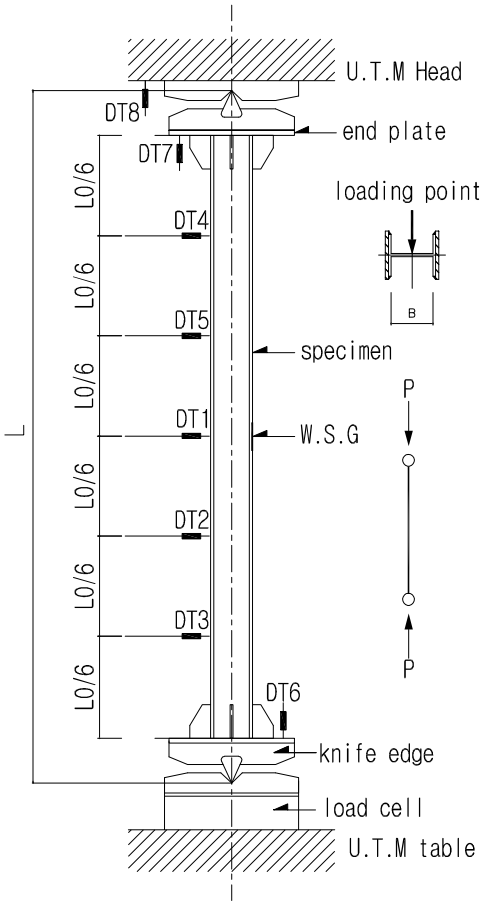
[그림 3.3] 기둥실험체 개형 및 엔드플레이트와 브래킷 상세도



[그림 3.4] 기둥실험체와 나이프에지의 결합

3.3.2 가력 및 측정방법

가력방법은 UTM(최대하중 1000kN, 유효높이 3000mm)에 자동분석기(Dataletty)와 load cell에 연결된 Datalogger 계측기의 하중 및 변위속도계를 기준으로 탄성역에서 하중속도는 3~25N/㎟·sec의 응력증가율로 하고, 항복 이후는 5mm/min의 실험체 변위의 증가율을 기준으로 재하속도를 조절한다.

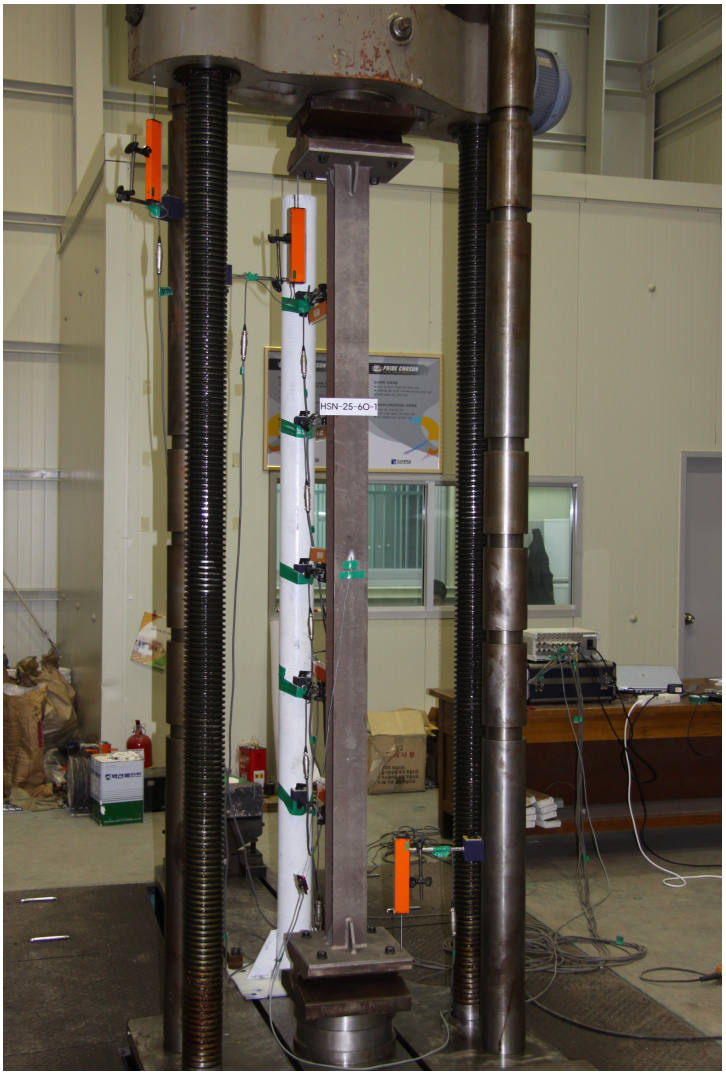


[그림 3.5] 기둥 실험체 가력도

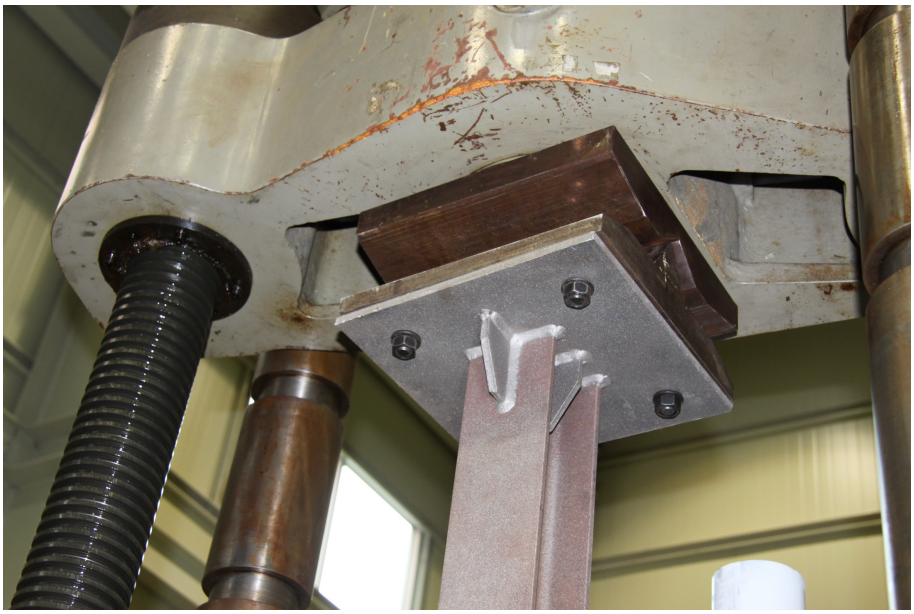
측정은 1000kN급 Load cell을 이용하여 하중을 측정하고, [그림 3.5]과 같이 D.T(변위계)를 설치하여 축변위 및 중앙, 양 L0/6지점의 횡변위와 단부회전각을 측정하며, 기둥 중심부에 W.S.G를 설치하여 변형을 측정한다.

3.4 부재 실험

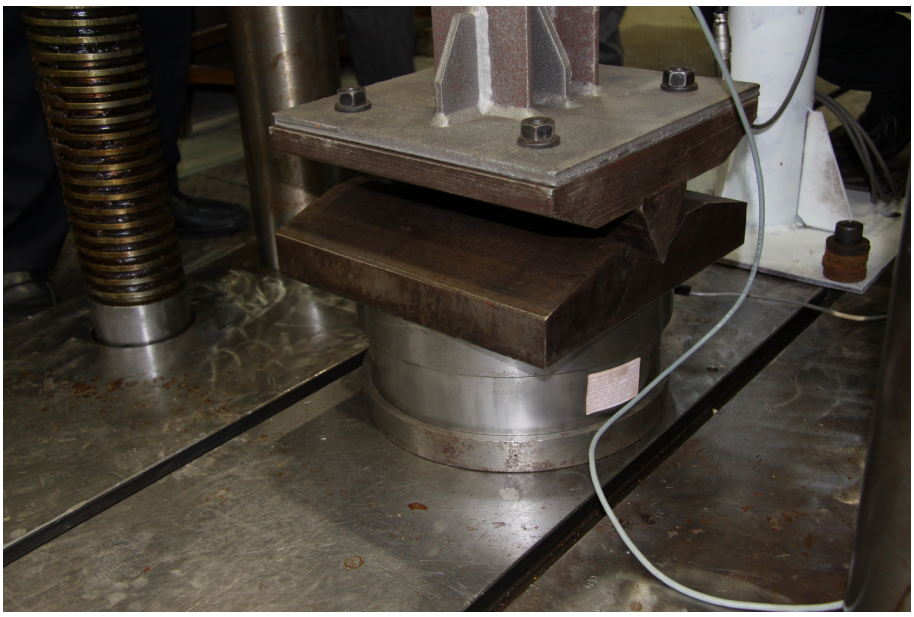
부재실험은 [그림 3.5]와 같이 만능구조실험기에서 실험체를 설치하고 축하중을 작용하여 실험체가 파괴 될 때까지 가력 후 최대내력을 결정한다. 또한, 하단 지점에 load cell을 올린 후 가압한다.



[사진 3.1] 기준 실험체의 Setting 전경



[사진 3.2] 기준 실험체의 상단 지점부 전경



[사진 3.3] 기준 실험체의 하단 지점부 전경

[사진 3.4] 기준 실험체의 변위 측정 전경

가력은 초당 0.1mm 변위가 발생되도록 가력하는 변위제어방식으로 재하하고 데이터(data)는 초당 6회 수집하여 저장한다. 부재실험체에 재하되는 하중을 정확히 측정하기 위하여 가력판 상부에 load cell을 설치하여 가력단계에 따른 하중을 정밀하게 측정한다.

변위측정은 상단 지점부 및 하단 지점부에 각 1개소에 LVDT(Linear Vertical Displacement Transducer, 변형게이지. 이하 DT)를 설치하고 실험체 플랜지 단면 각 Lo/6 지점에 DT를 5개소 설치하여 가력단계에 따른 실험체의 변위를 측정한다.

모든 측정기기의 측정데이터는 data logger에 연결하여 수집하며, 개인용 컴퓨터를 이용하여 변환 처리하여 하중 및 응력과 변형관계를 분석한다.

Ⅳ. 부재실험 결과

4.1 실험결과

H형강 기둥 부재의 실험 결과, H형강의 플랜지 단면 보강 접합은 고력볼트 접합, 양단 용접 접합, 양단과 중앙부 용접 접합, 양단 용접과 고력볼트 병용 접합의 순으로 내력이 증대되는 것으로 나타났다. 기준실험체의 최대하중은 HSN-0-50 실험체에서 689kN, HSN-0-60 실험체에서 575kN 이고, 양단 용접에 의해 플랜지 보강된 HRA-0-50 실험체에서 1,094kN, HRA-0-60 실험체에서 1,005kN, 양단과 중앙부에서 용접 접합된 HRB-0-50 실험체에서 1,100kN, HRB-0-60 실험체에서 1,014kN, HRC-0-50 실험체에서 778kN, HRC-0-60 실험체에서 688kN, 고력볼트와 양단 용접을 병용하여 접합된 HRD-0-50 실험체에서 1,124kN, HRD-0-60 실험체에서 1,072kN 으로 나타났다.

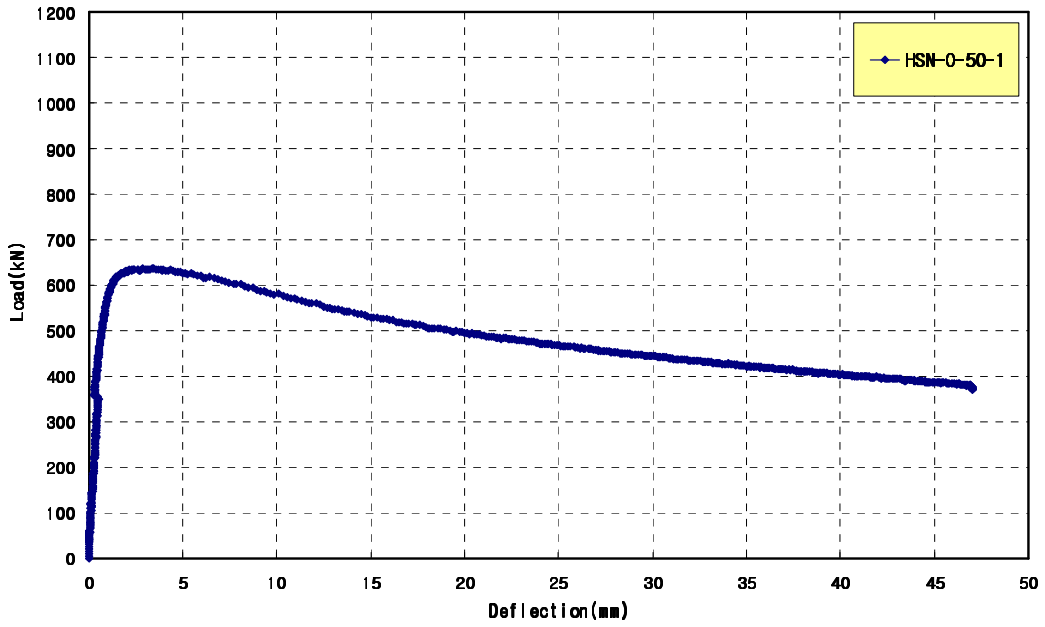
부재 실험체의 실험결과는 <표 4.1>~<표 4.2> 및 [그림 4.1]~[그림 4.4]와 같다.

<표 4.1> 세장비 50 기둥 부재 실험 결과

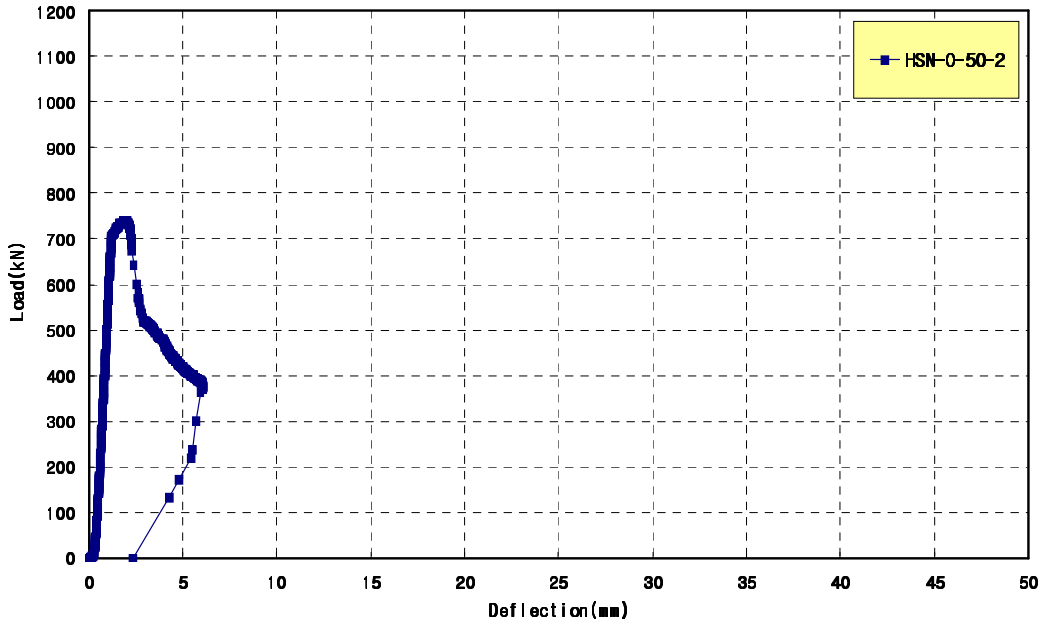
구 분	Pu(kN)		σu(N/㎟)	최대하중비
HSN-0-50-1	637	689	291.1	1.00
HSN-0-50-2	741		338.1	
HRA-0-50-1	1,119	1,094	272.3	1.59
HRA-0-50-2	1,069		260.1	
HRB-0-50-1	1,130	1,100	274.8	1.60
HRB-0-50-2	1,069		260.2	
HRC-0-50-1	733	778	178.3	1.13
HRC-0-50-2	824		200.4	
HRD-0-50-1	1,138	1,124	277.0	1.63
HRD-0-50-2	1,110		270.1	

<표 4.2> 세장비 60 기둥 부재 실험 결과

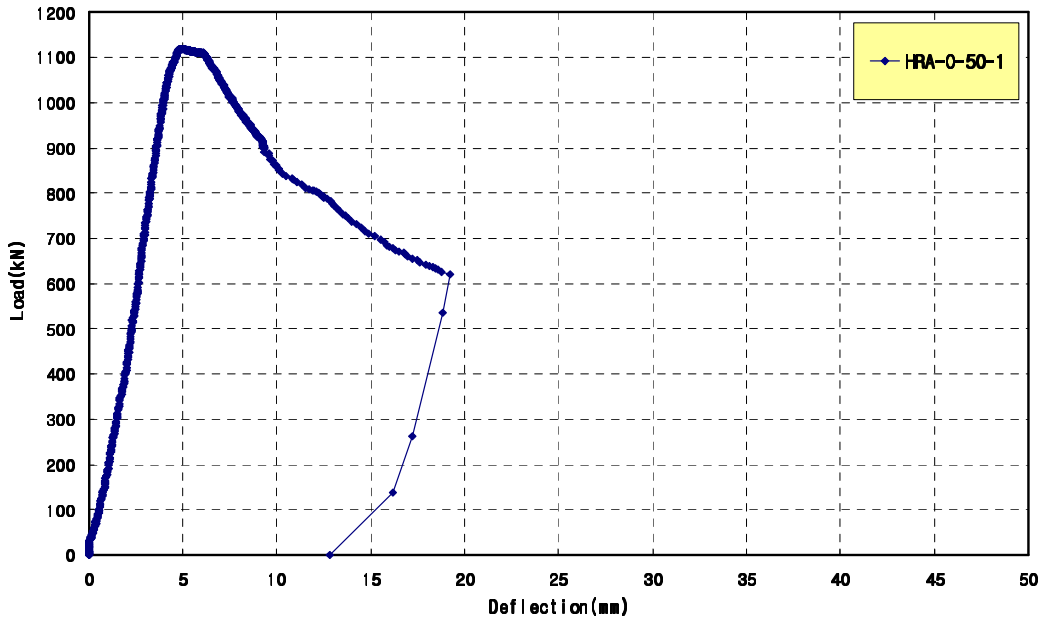
구 분	Pu(kN)		σu(N/㎟)	최대하중비
HSN-0-60-1	537.1	575	245.3	1.00
HSN-0-60-2	612.3		279.6	
HRA-0-60-1	1022.6	1,005	248.8	1.75
HRA-0-60-2	987.9		240.4	
HRB-0-60-1	928.9	1,014	226.0	1.76
HRB-0-60-2	1099.5		267.5	
HRC-0-60-1	728.6	688	177.3	1.20
HRC-0-60-2	647.3		157.5	
HRD-0-60-1	1107.6	1,072	269.5	1.86
HRD-0-60-2	1035.5		251.9	



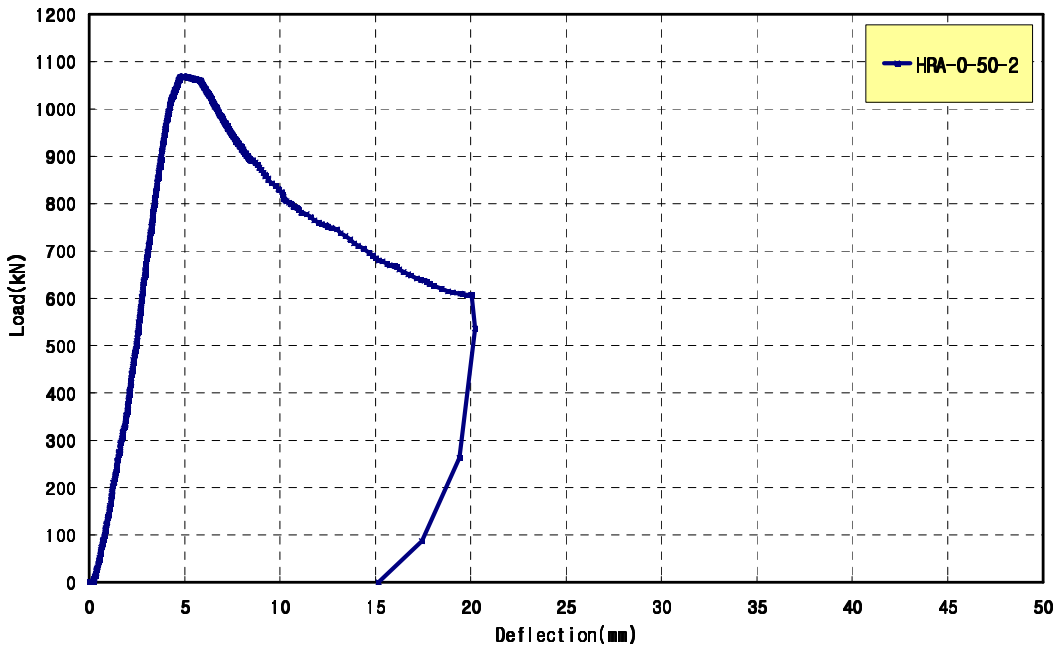
(a) HSN-0-50-1 실험체



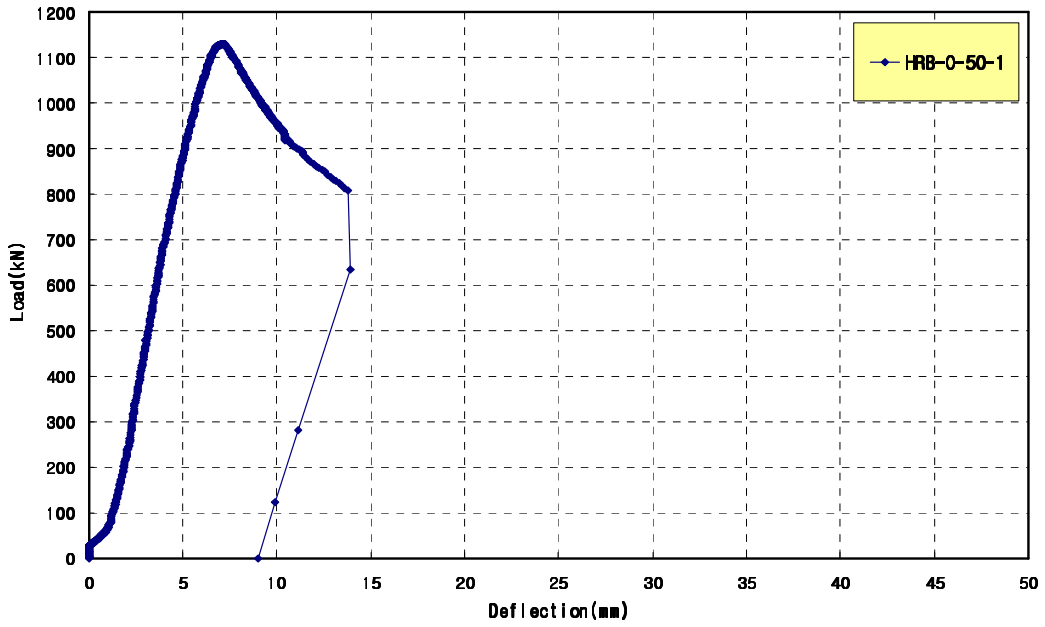
(b) HSN-0-50-2 실험체



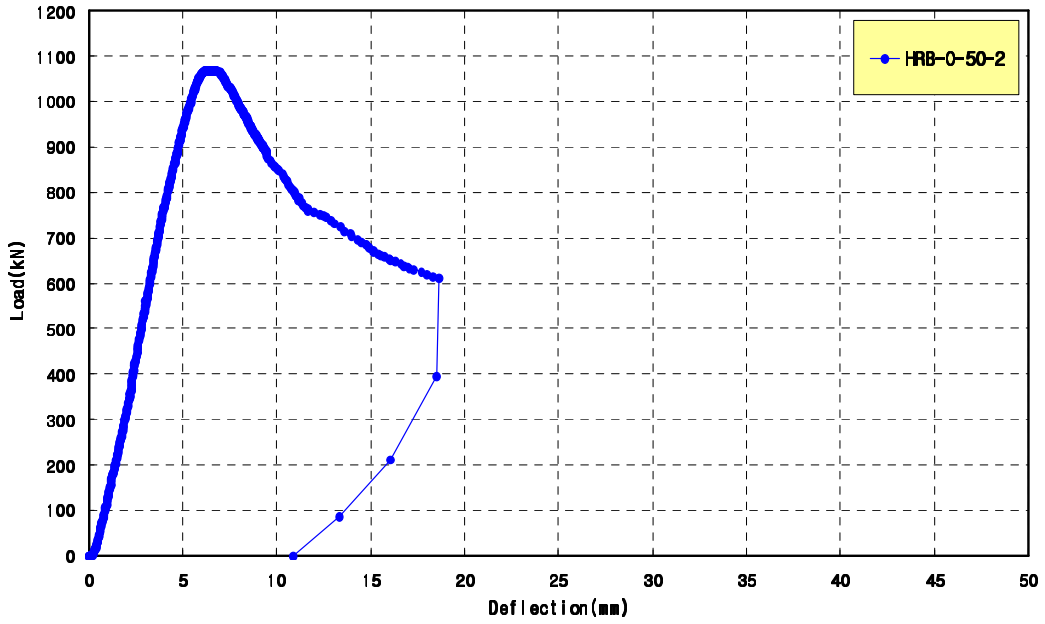
(c) HRA-0-50-1 실험체



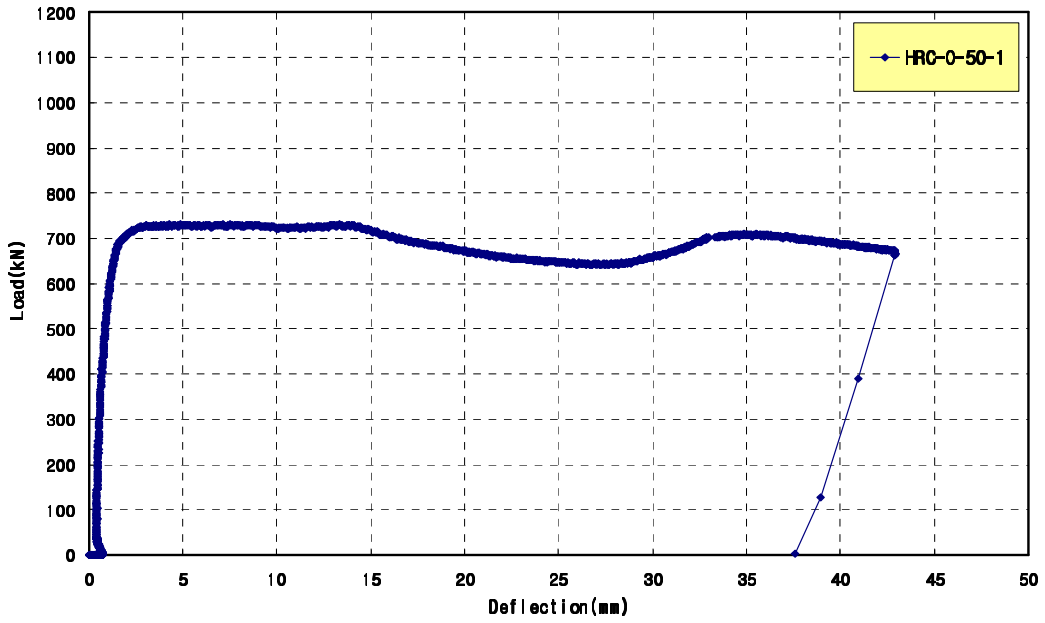
(d) HRA-0-50-2 실험체



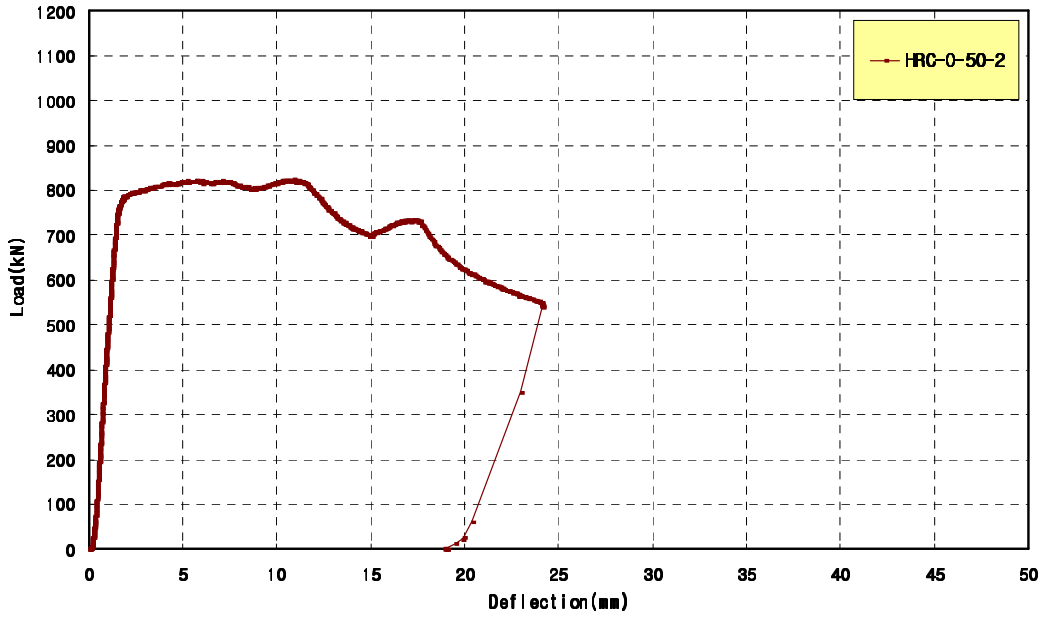
(e) HRB-0-50-1 실험체



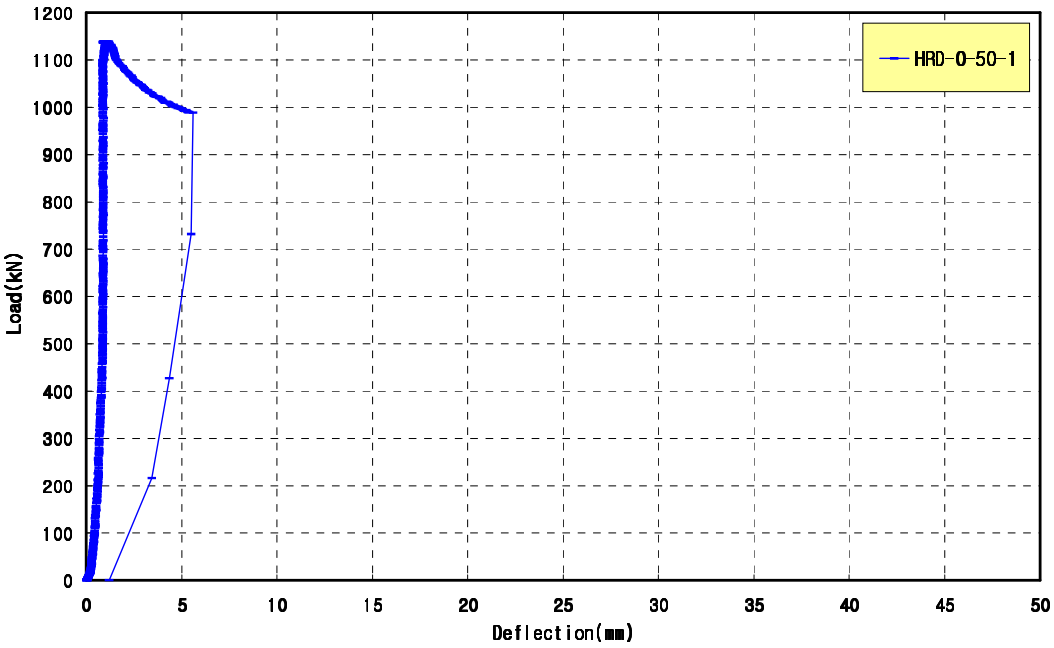
(f) HRB-0-50-2 실험체



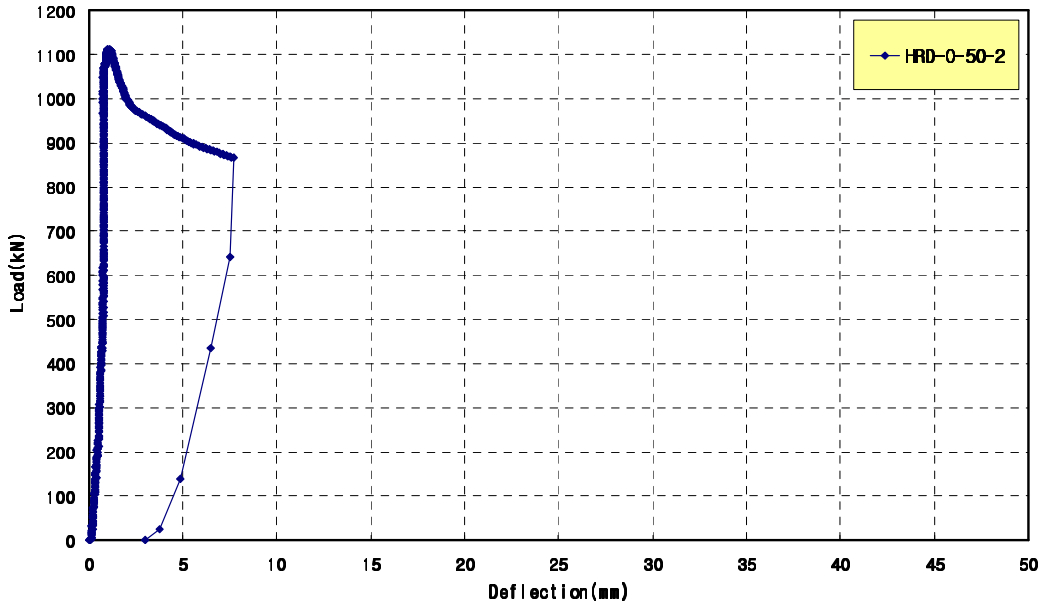
(g) HRC-0-50-1 실험체



(h) HRC-0-50-2 실험체

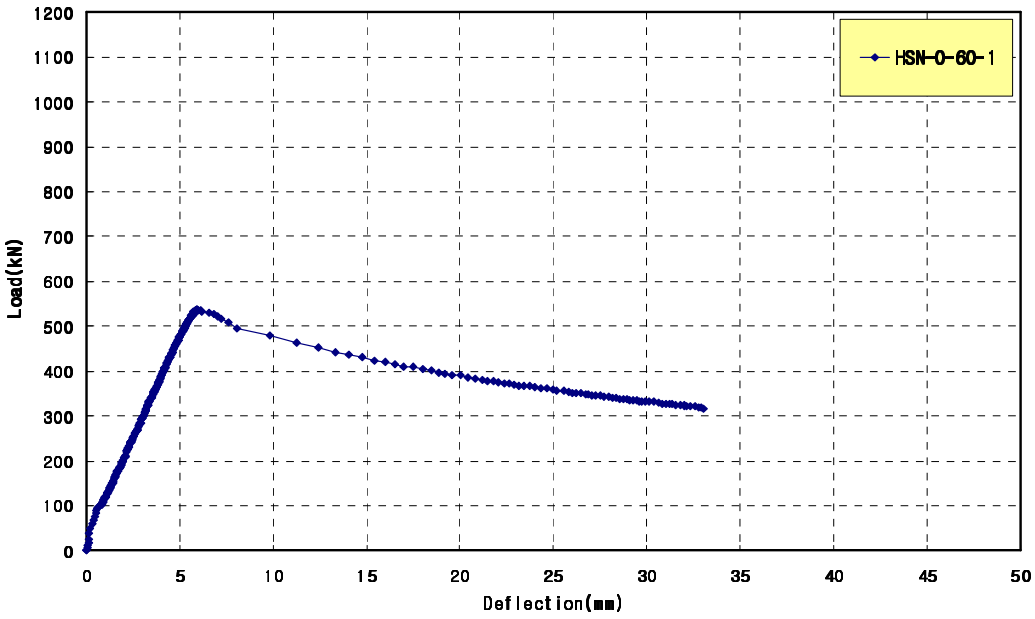


(i) HRD-0-50-1 실험체

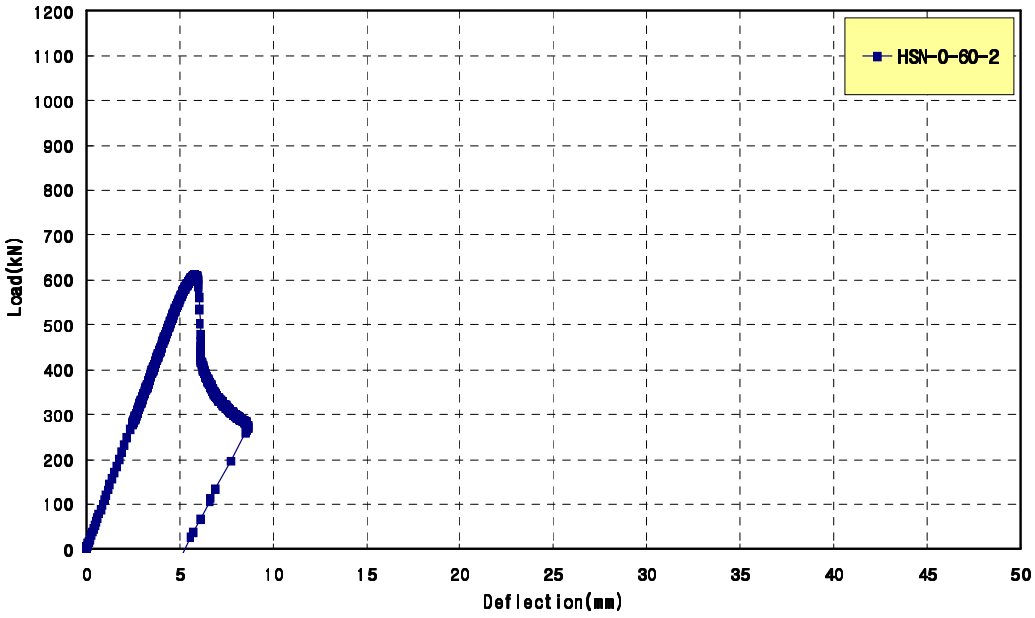


(j) HRD-0-50-2 실험체

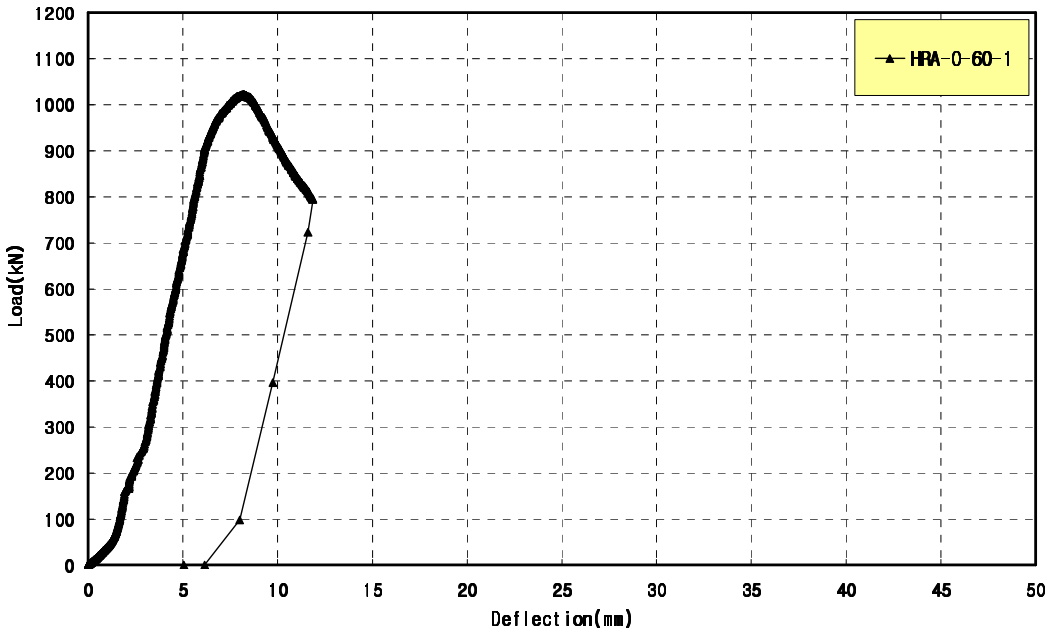
[그림 4.1] 세장비 50 실험체 하중-처짐 곡선



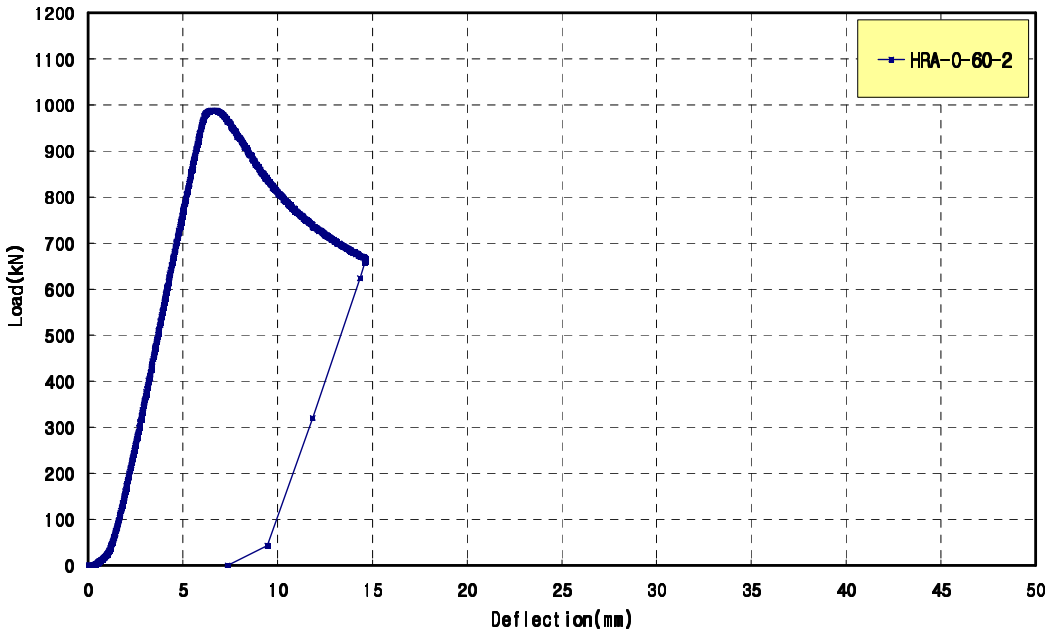
(a) HSN-0-60-1 실험체



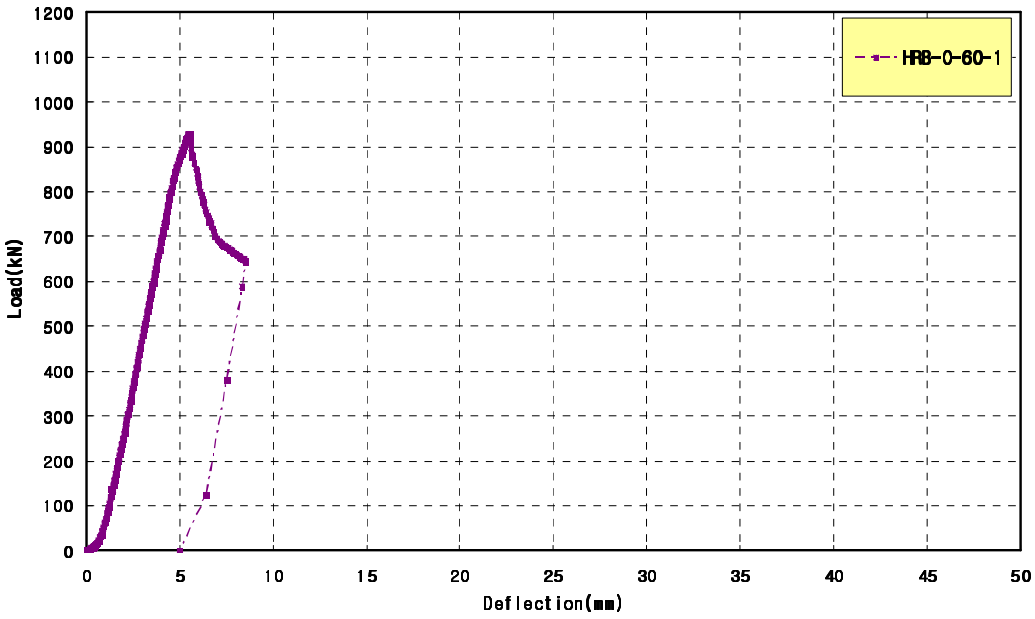
(b) HSN-0-60-2 실험체



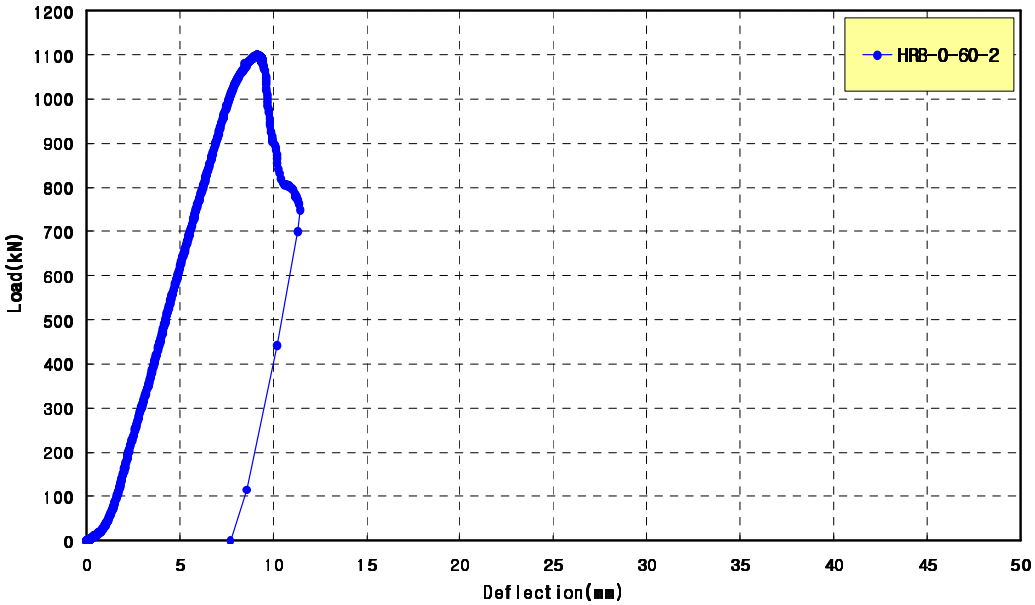
(c) HRA-0-60-1 실험체



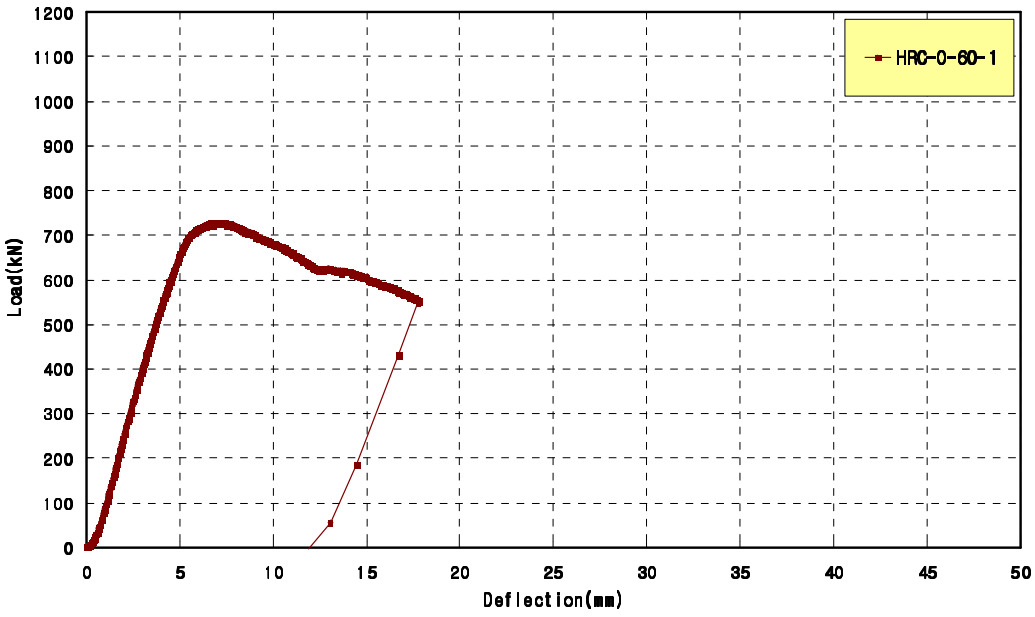
(d) HRA-0-60-2 실험체



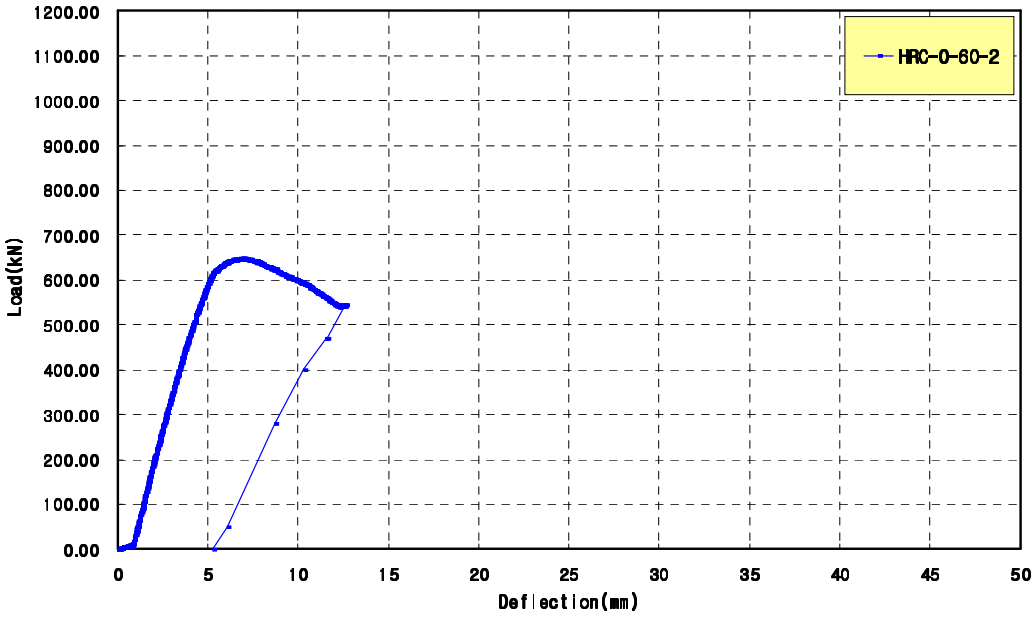
(e) HRB-0-60-1 실험체



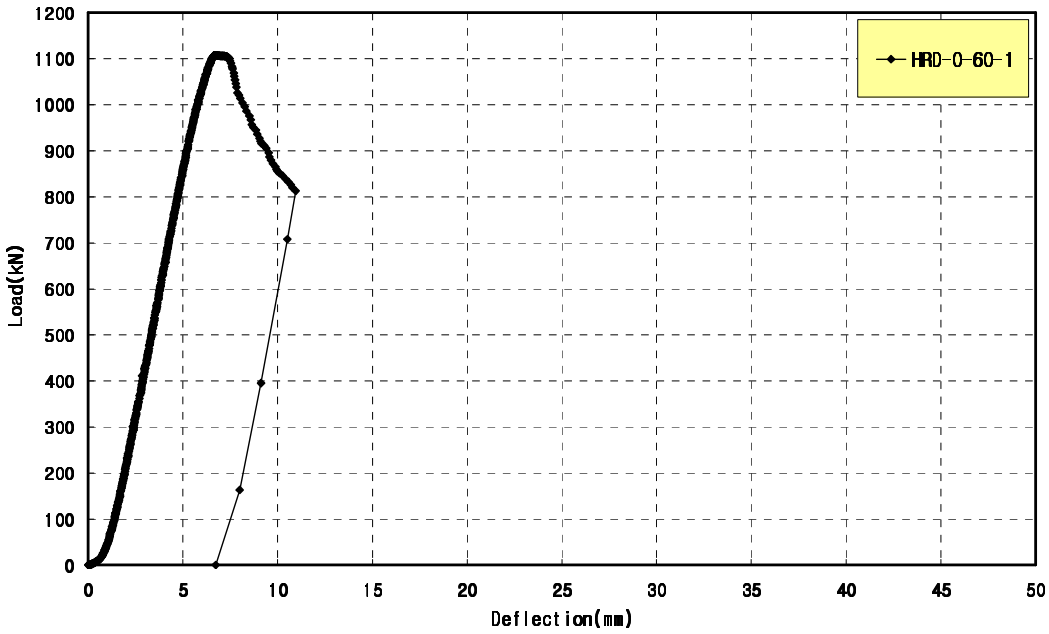
(f) HRB-0-60-2 실험체



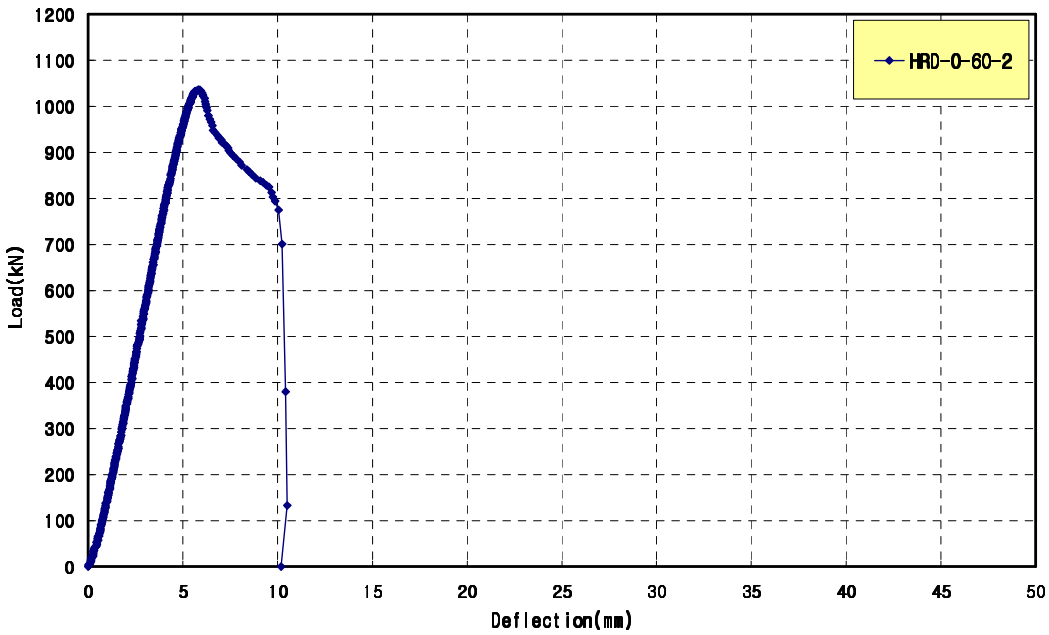
(g) HRC-0-60-1 실험체



(h) HRC-0-60-2 실험체

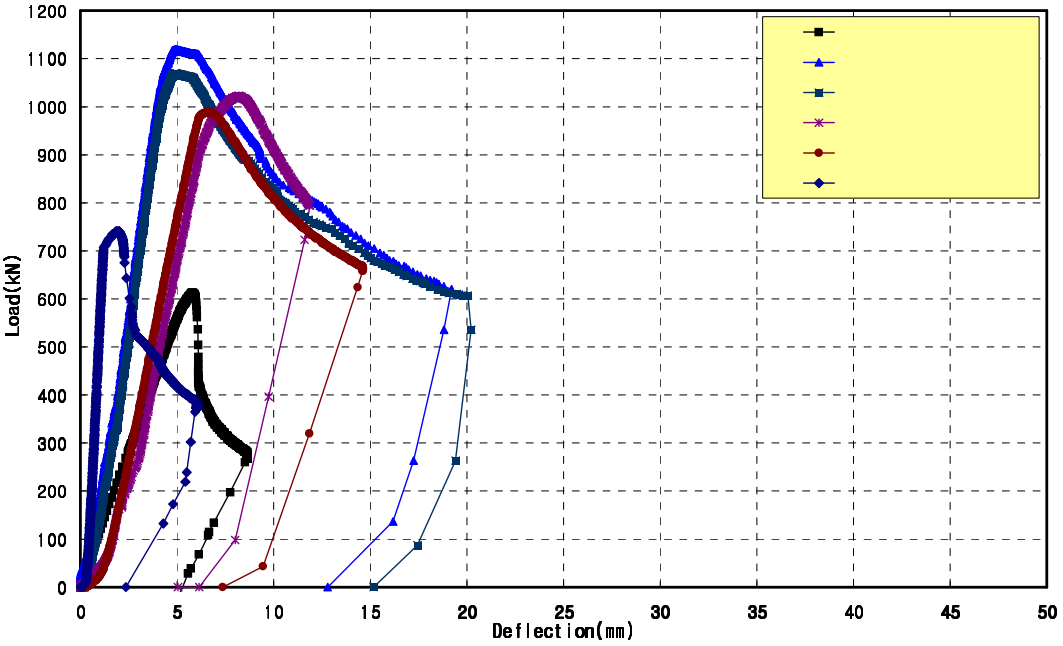


(i) HRD-0-60-1 실험체

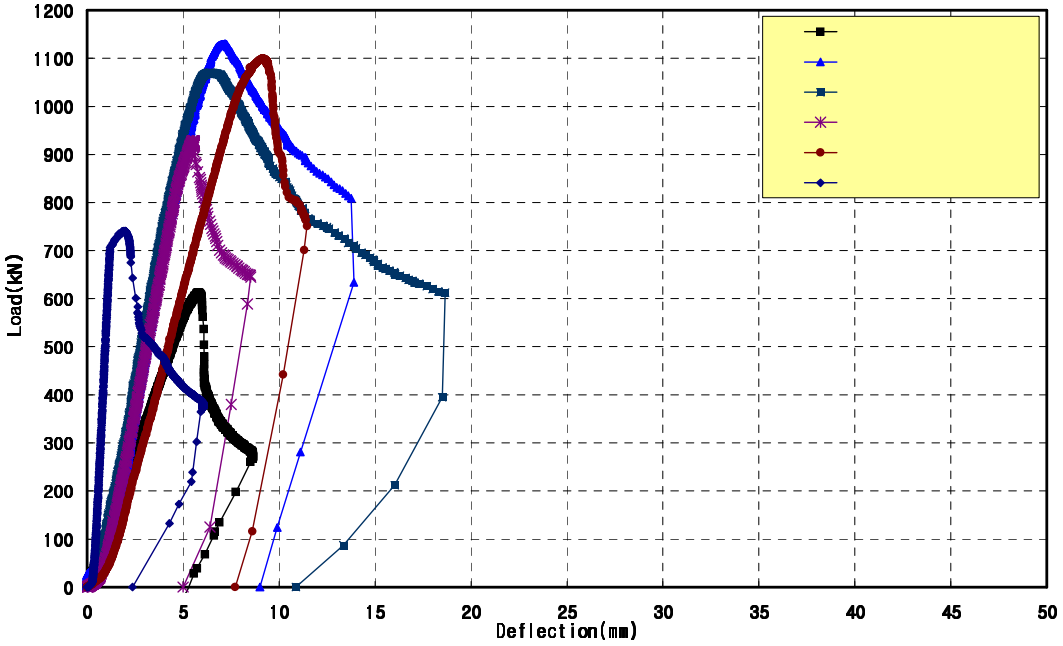


(y) HRD-0-60-2 실험체

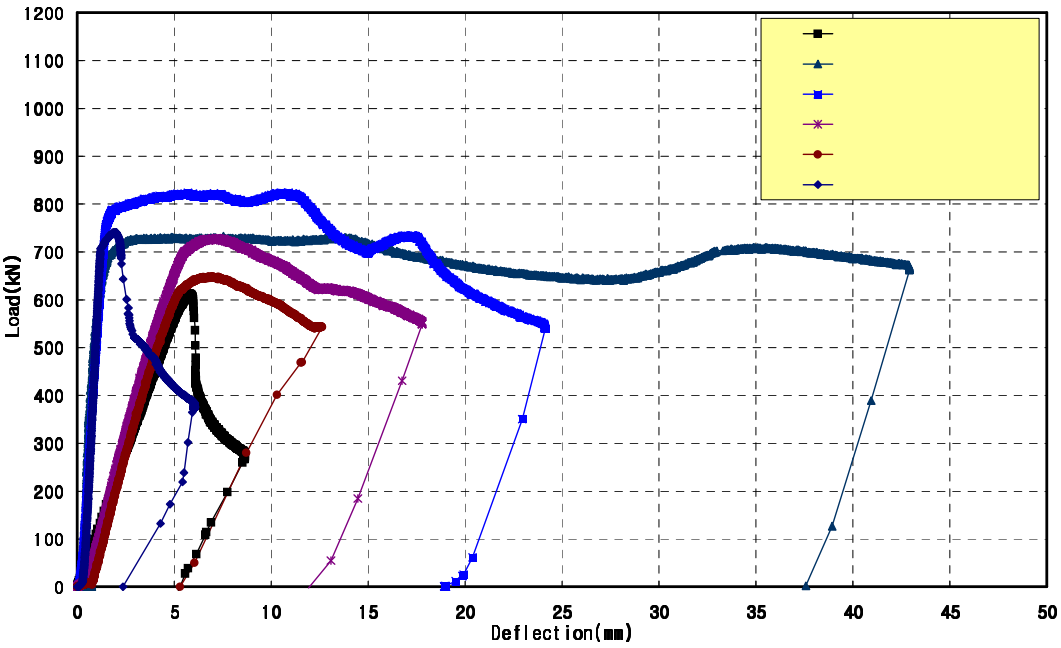
[그림 4.2] 세장비 60 실험체 하중-처짐 곡선



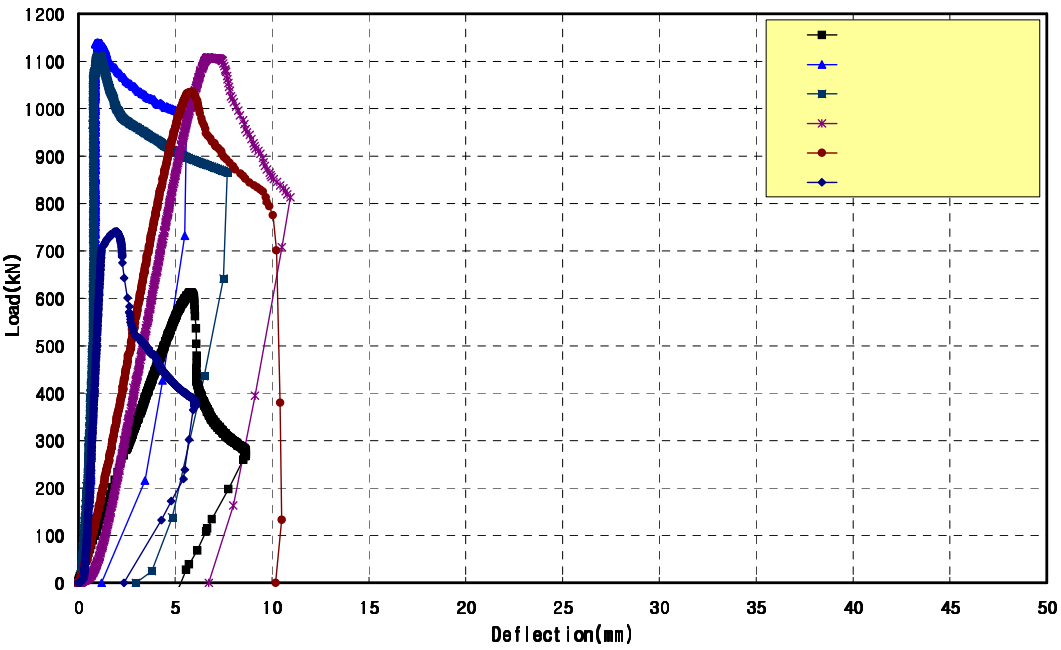
(a) A Type



(b) B Type

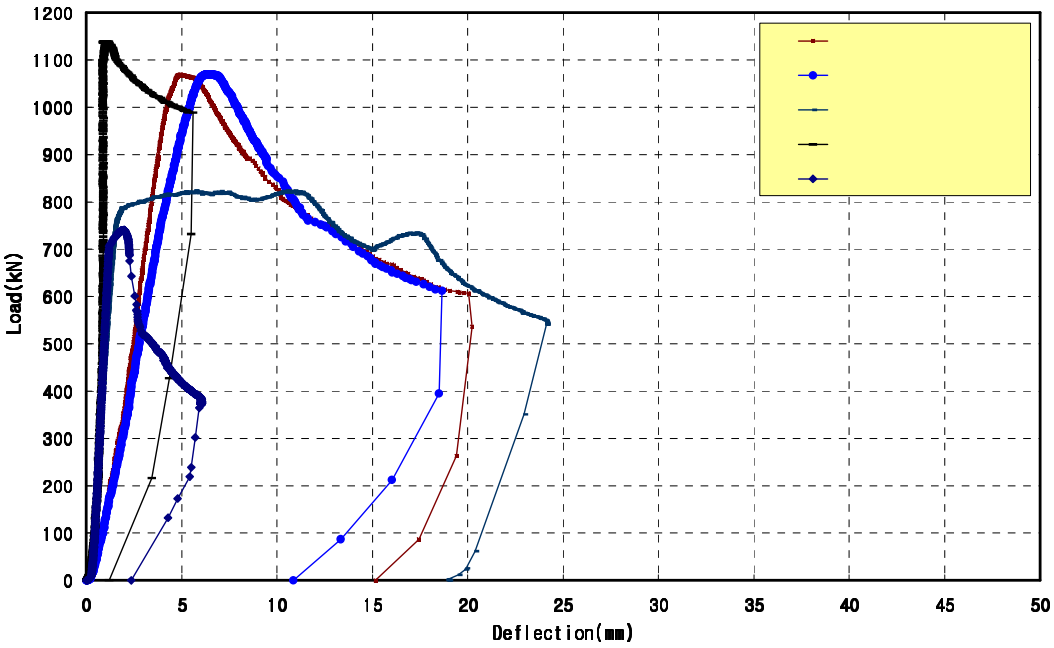


(c) C Type

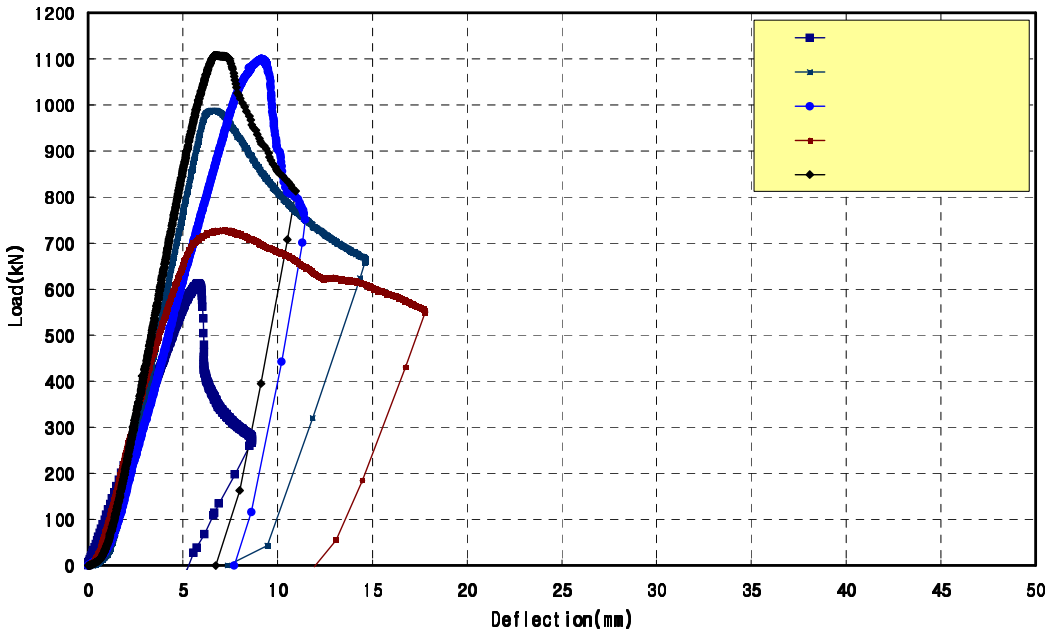


(d) D Type

[그림 4.3] H형강 기둥 하중-처짐 곡선 비교



(a) 세장비 50 Type



(b) 세장비 60 Type

[그림 4.4] 세장비 Type별 하중-처짐 곡선 비교

4.2 보강 효과

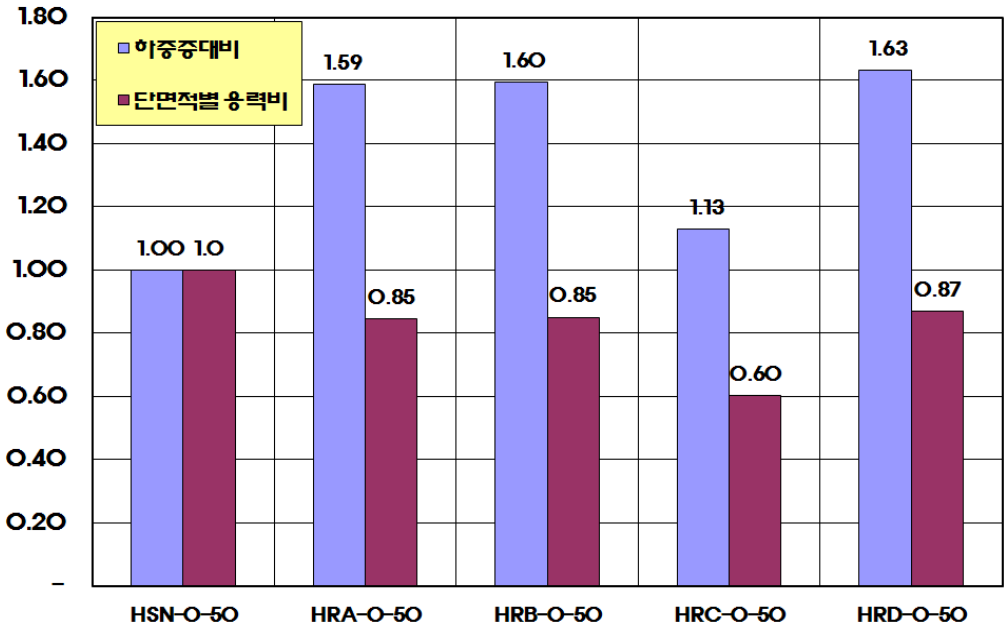
H형강 중심축 압축실험을 실시하여 최대내력과 변위를 조사하여 각 실험체별로 기둥의 단면적에 따른 최대하중비를 파악하여 단면적별 응력비를 검토하였다.

세장비 50의 최대응력은 기준실험체에서 314.6N/㎟, A Type 실험체에서 266.2N/㎟, B Type실험체에서는 267.5N/㎟, C Type실험체에서는 189.3N/㎟, D Type실험체에서는 273.5N/㎟로 나타났다.

또한, 세장비 60의 최대응력은 기준실험체에서 262.4N/㎟, A Type 실험체에서 244.6N/㎟, B Type실험체에서는 246.8N/㎟, C Type실험체에서는 167.4N/㎟, D Type실험체에서는 260.7N/㎟로 나타났다.

<표 4.3> 세장비 50 실험체 응력

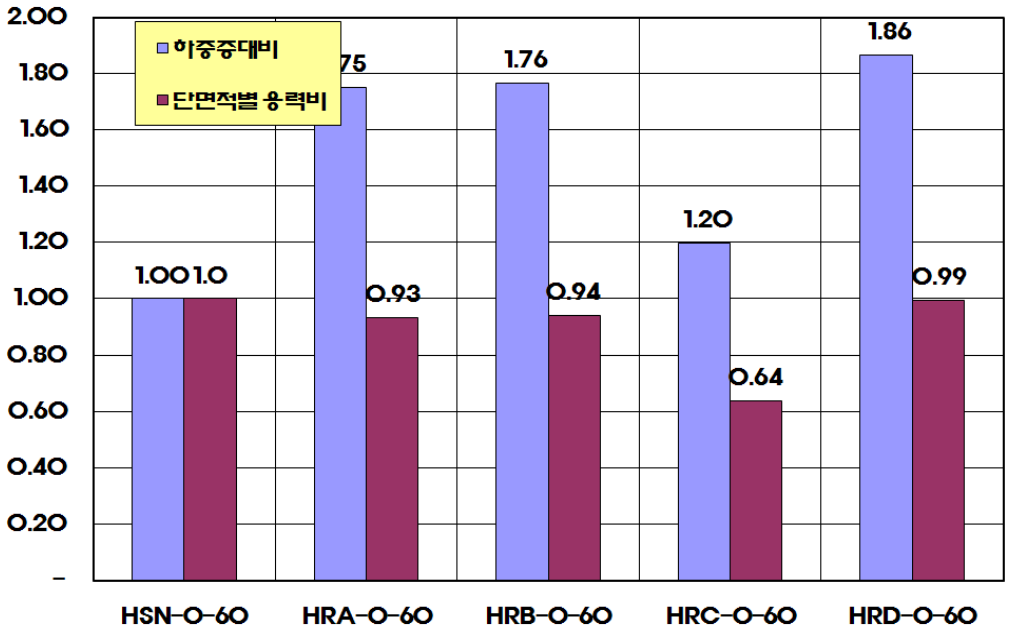
구 분	최대하중비	6u(N/㎟)	단면적 응력비
HSN-0-50	1.00	314.6	1.0
HRA-0-50	1.59	266.2	0.85
HRB-0-50	1.60	267.5	0.85
HRC-0-50	1.13	189.3	0.60
HRD-0-50	1.63	273.5	0.87



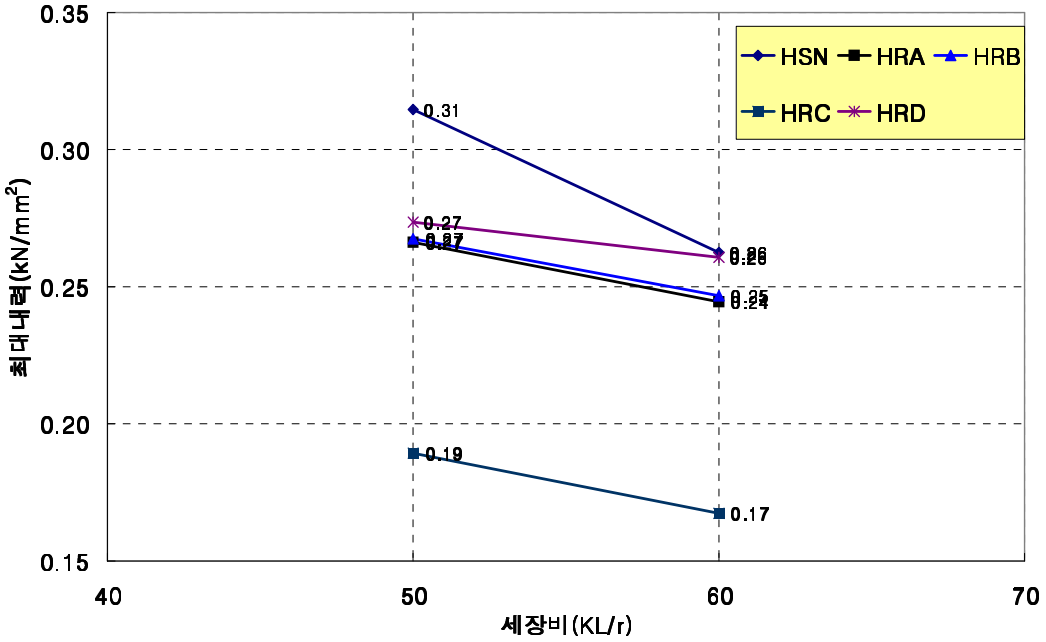
[그림 4.5] 세장비 50 실험체 응력비

<표 4.4> 세장비 60 실험체 응력

구 분	최대하중비	6u(N/㎟)	단면적 응력비
HSN-0-60	1.00	262.4	1.00
HRA-0-60	1.75	244.6	0.93
HRB-0-60	1.76	246.8	0.94
HRC-0-60	1.20	167.4	0.64
HRD-0-60	1.86	260.7	0.99



[그림 4.6] 세장비 60 실험체 응력비



[그림 4.7] 세장비별 최대 내력

4.3 소 결

H형강 기둥의 단면 부재력이 부족하여 철판으로 플랜지를 보강하는 경우, 접합부의 일체 거동과 세장비별 내력을 평가하기 위해 중심축 압축실험을 실시하여 다음과 같은 구조적 특성을 파악하였다.

1) 보강실험체는 기준실험체에 비해 세장비 50에서 최대하중은 12.91~63.13% 세장비 60에서 최대하중은 19.65~86.43% 증대하는 것으로 나타났다.

2) 보강실험체는 기준실험체에 비해 세장비 50에서 최대응력은 13.06~39.82%, 세장비 60에서 최대응력은 0.65~36.21% 정도 감소되는 것으로 나타났다.

3) 보강실험체의 보강 접합에 따른 보강 효과는 고력볼트(C Type), 양단 용접 (A Type), 양단+ 중앙 용접(B Type), 양단 용접 + 고력볼트(D Type) 순으로 내력이 높게 나타나 구조적 보강 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

4) 최대하중 이후 거동은 고력볼트 접합방법을 제외한 용접 및 병행 접합방법에서 접합점 간의 거리가 가까울수록 H형강 기둥과 유사하게 좌굴에 의해 파괴되었고, 볼트 접합보다는 용접 및 병행 접합방법을 사용하는것이 더 큰 효과를 기대할 수 있을 것으로 나타났다.

Ⅵ. 결론

본 연구는 부재력이 부족한 H형강 기둥에 대해 철판으로 플랜지의 단면을 보강하는 경우, H형강과 보강 단면의 일체화를 위한 접합방법을 주요 변수로 H형강 보강 기둥에 대한 중심축 압축실험을 실시하였다. H형강에 플랜지 접합 방법의 적용성 여부와 세장비에 따른 중심축 압축기둥의 거동, 최대응력 및 파괴양상, 변형 등의 구조적 특성을 파악하였다.

1) H형강 보강 기둥 실험 결과, 무보강의 기준실험체는 최대하중 이후 좌굴에 의해 취성파괴 되었으나, 플랜지를 철판으로 보강한 실험체는 항복하중이 증대하여 최대하중에 도달하여 변형이 발생하여 압축 및 좌굴에 의해 파괴되는 것으로 나타났다.

2) 기준실험체에 비해 보강실험체의 최대하중은 세장비 50에서 12.91~63.13%, 세장비 60에서 19.65~86.43% 정도 증대되는 것으로 나타났다.

3) 기준실험체에 비해 보강실험체의 단면적별 최대응력은 세장비 50에서 13.06~39.82%, 세장비 60에서 0.65~36.21% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

4) H형강의 보강방법별 보강효과는 보강의 접합과 접합부간의 거리 특성에 의해서 고력볼트 접합(C Type), 양단부 용접 접합(A Type), 양단부와 중앙부 용접 접합(B Type), 양단부 용접 접합과 고력볼트의 병용 접합(D Type)의 순으로 극한응력이 증대되는 것으로 나타났다.

5) 기준실험체에 비해 보강 실험체는 단면적의 증대로 인해 초기 응력과 변형

의 상관 기울기가 증대되어 변형 저항능력이 높은 것으로 나타났다. 그러므로 플랜지를 철판으로 보강한 실험체는 변형 및 좌굴제어의 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

6) 이상으로 중심축 압축기둥 실험 결과를 종합하면, H형강 기둥에 철판으로 플랜지 단면을 용접과 고력볼트의 병행 접합방법으로 보강하면 내력 증대효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 실제로 구조물에 적용하기 위해서는 향후 편심거리 압축하중에 대한 실험적 검토가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 『강구조 한계상태 설계기준 및 해설』, 2004.7
2. 대한건축학회, 『강관구조 설계기준 및 해설』, 기문당, 1998.10.
3. 대한건축학회 철골구조위원회, 『강구조설계 규준 및 해설-AISC 1986』, 기문당, 1992.4.
4. 대한건축학회, 『냉간성형강 구조계산기준 및 해설』, 기문당, 1999.11.
5. 한국강구조학회, 강구조편람 제3권, 『강구조건축물의 설계』, pp 402~412, 1995.
6. 윤종규・심재동, 『전문가를 위한 철강공학』, 대웅, 2004.9.
7. 김규석 외 3인, "축력과 휨모멘트를 받는 각형강관 부재의 구조특성에 관한 연구", 『대한건축학회논문집』*11*:111~123, 1995.6.
8. 김규석 외 3인, "축력과 휨모멘트를 받는 원형강관 기둥의 이력거동에 관한 연구", 『대한건축학회논문집』*12*:173~183, 1996.3.
9. 김규석 외 3인, "축압축력을 받는 강관 기둥부재의 거동특성에 관한 해석적 연구", 『대한건축학회논문집』*8*:169~179, 1996.3.
10. 김상섭 외 3인, "H형강 기둥의 약축에 대한 기둥-보 접합상세 개발 및 내력평가", 『한국강구조학회논문집』*16*:169~180, 2004.02.
11. 이명재 외 2인, "고강도 H형강 부재의 좌굴내력과 설계식에의 적용에 관한 연구", 『한국강구조학회논문집』*13*:123~131, 2001.04.
12. 장인화 외 1인, "스테인리스 304강재의 국부좌굴에 관한 연구", 『韓國鋼構造學會論文集』*15*:51~57, 2003.2.
13. 양영성 외 3인, "중심압축하중을 받는 스테인리스 원형강관기둥의 좌굴내력에 관한 실험적 연구", 『대한건축학회학술발표논문집』415~420, 2000.6.
14. 양영성 외 2인, "스테인리스강관과 일반구조용강관 단주내력 비교에 관한 연구", 『대한건축학회학술발표논문집』 *15*:561~570, 2003.10.
15. 양영성 외 1인, "스테인리스 강관 기둥의 내력에 관한 연구", 『대한건축학회

논문집』 *19*:93～102, 2003.6.

16. 양영성 외 2인, “스테인리스 각형강관과 일반구조용 각형강관 기둥의 내력비교에 관한 실험적 연구”, 『대한건축학회논문집』 *20*:35～42, 2004.6.
17. 양영성 외 2인, “스테인리스 원형강관과 일반구조용 원형강관 기둥의 내력비교에 관한 실험적 연구”, 『대한건축학회논문집』 *20*:51～58, 2004.6.
18. 양영성, “중심압축축하중을 받는 강주의 좌굴강도에 관한 연구”, 박사학위논문, 동국대학교, 1988.12.
19. Ayrton, W. E. and Perry, J., 『On Struts』, The Engineer, 1886.
20. Beedle, L. S., 『Stability of metal Structures』, 1991.
21. Bleich, F., 『Buckling Strength of Metal Structures』, McGraw-Hill, 1952.
22. Chen, W. F. and Atsuta, T., 『Theory of Beam-Columns, Volume 1, In-plane behavior and design』, McGraw-Hill, 1976.
23. Chen, W. F. and Atsuta, T., 『Theory of Beam-columns, Volume 2, Space behavior and design』
24. Chen, W. F. and Lui, E. M., 『Structural Stability, Theory and Implementation』, 1987.
25. Euler, L., 『De curvis elastice, Lausanne and Geneva』, 1744.
26. Galambos, T. V., 『Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures』, 5/e, 1987.
27. Geschwindner, L. F., Disque, R. O., Bjorhovde, R., 『Load Resistance Factor Design of steel structures』, 1994.
28. Narayanan, R., 『Beams and Beam-Columns, Stability and Strength』, 1983.
29. Salmon, C. G. & Johnson, J. E., “STEEL STRUCTURES, Design and Behavior”, Harper & Row, 1990.
30. Chen, W. F. and Atsuta, T., “Column Curvature Curve Method for Analysis of Beam-Columns”, 『JISE. London』, Vol.50, No6, 1972.

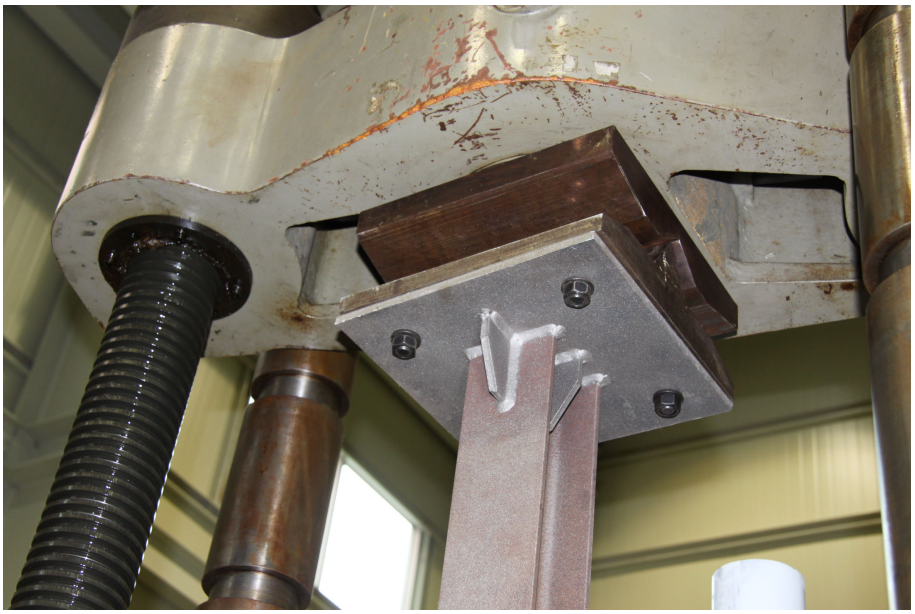
논문집』 *19*:93～102, 2003.6.

16. 양영성 외 2인, “스테인리스 각형강관과 일반구조용 각형강관 기둥의 내력비교에 관한 실험적 연구”, 『대한건축학회논문집』 *20*:35～42, 2004.6.
17. 양영성 외 2인, “스테인리스 원형강관과 일반구조용 원형강관 기둥의 내력비교에 관한 실험적 연구”, 『대한건축학회논문집』 *20*:51～58, 2004.6.
18. 양영성, “중심압축축하중을 받는 강주의 좌굴강도에 관한 연구”, 박사학위논문, 동국대학교, 1988.12.
19. Ayrton, W. E. and Perry, J., 『On Struts』, The Engineer, 1886.
20. Beedle, L. S., 『Stability of metal Structures』, 1991.
21. Bleich, F., 『Buckling Strength of Metal Structures』, McGraw-Hill, 1952.
22. Chen, W. F. and Atsuta, T., 『Theory of Beam-Columns, Volume 1, In-plane behavior and design』, McGraw-Hill, 1976.
23. Chen, W. F. and Atsuta, T., 『Theory of Beam-columns, Volume 2, Space behavior and design』
24. Chen, W. F. and Lui, E. M., 『Structural Stability, Theory and Implementation』, 1987.
25. Euler, L., 『De curvis elastice, Lausanne and Geneva』, 1744.
26. Galambos, T. V., 『Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures』, 5/e, 1987.
27. Geschwindner, L. F., Disque, R. O., Bjorhovde, R., 『Load Resistance Factor Design of steel structures』, 1994.
28. Narayanan, R., 『Beams and Beam-Columns, Stability and Strength』, 1983.
29. Salmon, C. G. & Johnson, J. E., “STEEL STRUCTURES, Design and Behavior”, Harper & Row, 1990.
30. Chen, W. F. and Atsuta, T., “Column Curvature Curve Method for Analysis of Beam-Columns”, 『JISE. London』, Vol.50, No6, 1972.

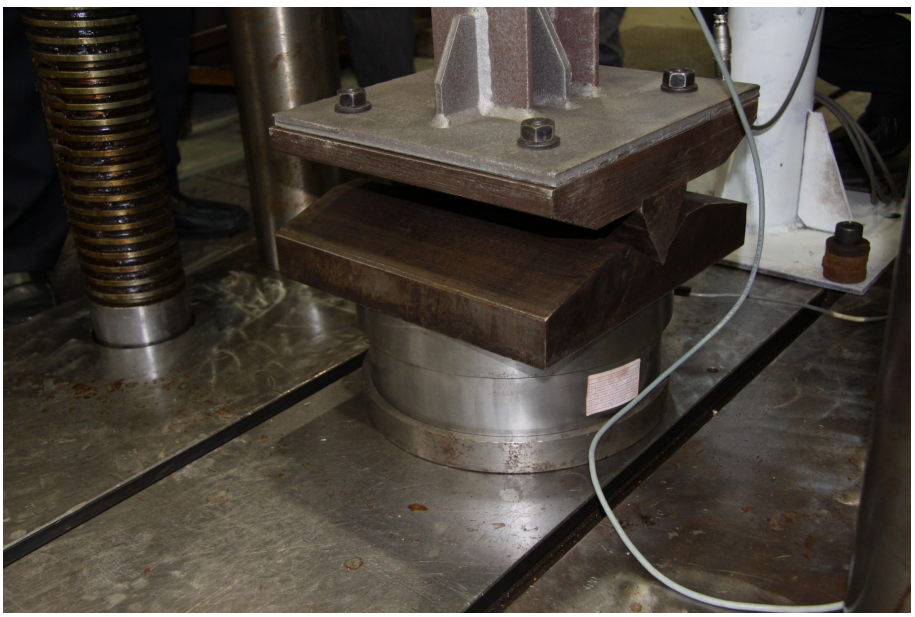
31. Engesser, F., “Knickfragen”, 『Schweiz. Bauzith.』, Vol.26, 1895
32. Errera, S. J. and Popowich, D. W., “Bolted and Welded Stainless Steel Connections”, 『Journal of the Structural Division, ASCE』, Vol.100, No.ST6, 1973.6.
33. Errera, S. J. and Popowich, D. W., “ASCE LRFD Method for Stainless Steel Structures”, 『Journal of Structural Engineering, ASCE』, Vol,118, No.4, 1992.4.
34. Galmbos, T. V. and Ketter, R. L., “Columns Under Combined Bending and Thrust”, 『Trans. ASCE』, Vol.126, 1961.
35. Hauck, G. F. and Lee, S. L., “Stability of Elasto-Plastic Wide-Flange Columns”, 『Trans. ASCE』, Vol.89, 1963.
36. Hill, H. N. and Clark, J. K., “Lateral Buckling of Eccenrtically Loaded I and H-section Columns”, 『Trans. ASCE』, 1951.
37. Huber, A. W. and Beedle, L. S., “Residual Stress and the Compressive Strength of Steel”, 『Weld. Jour. Res. Supp.』, Vol.33, Dec.1954.
38. Ketter, R. L., Kaminsky. E. L. and Beedle, L. S. “Plastic Deformation of Wide-Flange Beam-Columns” 『Trans. ASCE』, Vol.120, 1955.
39. 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.
40. Considére, A., "Resistance des Piéces Comprimées", 『Congrés International des Procédés de Construction』, 1889.
41. Enggesser, F., 『Zeischrift für Architectur und Ingenieurweses』, 1889.
42. Shanley, F. R., "Inelastic Column Theory", 『Jour. Aeronaut. SCI』, 1947.
43. Bjohovde, Reidar, "Deterministic and Probabilistic Approaches to the Strength of Steel Columns" Lehigh University Ph. D. Dissertation. Civil Engineering, 1972.

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

부록 1. 실험사진



[사진 1] 실험체의 상단 지점부 전경



[사진 2] 실험체의 하단 지점부 전경

[사진 3] 실험체의 변위 측정 전경

[사진 4] 실험체의 전체 전경

[사진 5] 세장비 50 실험체 실험 전 전경

[사진 6] 세장비 60 실험체 실험 전 전경

[사진 7] 세장비 60 실험체 실험 후 전경

[사진 8] 기존 기둥의 플랜지 보강 전경

[사진 9] 기존 기둥의 플랜지 및 리브보강과 마감용 라스 전경

저작물 이용 허락서

학 과	건축공학과	학 번	20087070	과 정	석사, 박사
성 명	한글: 문금환 한문 : 文錦煥 영문 : Moon, Kum-Hwan				
주 소	광주광역시 북구 망월동 258-5번지				
연락처	011-603-2690	E-MAIL	khmoon1@kumhoenc.com		
논문제목	한글 : H형강 보강 기둥의 특성에 관한 연구 영어 : A Study on the Characteristic of H-shaped Steel Strengthened Column				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함.

   다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대( )

2009년 11월 일

저작자: 문 금 환 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하