[UCI]I804:24011-200000263594

2013年 2月

碩 士 學 位 論 文

극한해석법을 이용한 구조물의 하중지지능력 향상에 관한 연구

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

金 廷 桓

극한해석법을 이용한 구조물의 하중지지능력 향상에 관한 연구

A Study on Improvement of Load Carrying Capacity in Structure using Limit Analysis

2013年 2月 25日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科

金 廷 桓

극한해석법을 이용한 구조물의 하중지지능력 향상에 관한 연구

指導敎授　崔　宰　赫

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2012年　10月

朝 鮮 大 學 校　大 學 院

建 築 工 學 科

金　廷　桓

金廷桓의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 敎授 김 의 식 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 조 창 근 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 최 재 혁 印

2012年 11月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

차 례

ABSTRACT

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적 ····· 1
1.2 비정상 하중 ····· 3

제2장 극한해석과 강소성 거동

2.1 극한해석의 정의 ····· 5
2.2 강소성 거동 ····· 5
2.2.1 축력에 대한 거동 ····· 5
2.2.2 휨모멘트에 대한 거동 ····· 6
2.3 평형방정식과 제약조건 ····· 7
2.3.1 부재의 모델화 ····· 7
2.3.2 부재의 평형방정식과 직접제약조건 ····· 8
2.3.3 부재의 중간하중점에서의 평형방정식과 간접제약조건 ····· 11
2.4 간략화법(Compact procedure)에 의한 해법 ····· 13
2.4.1 부재감도지수(Sensitivity Index) ····· 16
2.4.2 하중잔존율(Load Residual Rate) ····· 17

제3장 트러스 구조물의 하중지지능력 평가

3.1 개요 ····· 18
3.2 평면트러스 해석모델 및 부재의 특성 ····· 19
3.2.1 8스팬 평면 트러스의 해석 ····· 19
3.2.2 10스팬 평면 트러스의 해석 ····· 25
3.2.3 14스팬 평면 트러스의 해석 ····· 29
3.3 평면 트러스 보강방법 및 보강 후 하중지지능력 ····· 35

3.3.1 8스팬 평면 트러스의 보강 후 하중지지능력 ····· 35
가. 양단 고정 지점일 경우 하중지지능력 ····· 35
나. 한단 핀 한단 롤러 지점일 경우 하중지지능력 ····· 39
3.3.2 10스팬 평면 트러스의 보강 후 하중지지능력 ····· 43
가. 양단 고정 지점일 경우 하중지지능력 ····· 43
나. 한단 핀 한단 롤러 지점일 경우 하중지지능력 ····· 47
3.3.3 14스팬 평면 트러스의 보강 후 하중지지능력 ····· 51
가. 양단 고정 지점일 경우 하중지지능력 ····· 51
나. 한단 핀 한단 롤러 지점일 경우 하중지지능력 ····· 55
3.4 평면 트러스의 하중지지능력 평가 ····· 59
3.5 소결 ····· 62

제4장 벨트트러스가 설치된 구조물의 하중지지능력 평가

4.1 개요 ····· 64
4.2 해석모델 및 적용하중 ····· 64
4.2.1 해석 구조물의 형태 및 부재의 특성 ····· 64
4.2.2 부재 손실 유・무에 따른 적용하중 ····· 66
가. GSA(General Service Administration) 2003 가이드라인 ····· 66
나. DoD(Department of Defence) 2005 가이드라인 ····· 67
4.3 해석결과 ····· 69
4.3.1 GSA 2003에서 제시한 하중조합 적용 ····· 69
가. 하중계수(λ)에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 69
나. 소성힌지 발생 지점 ····· 72
4.3.2 DoD 2005에서 제시한 하중조합 적용 ····· 76
가. 하중계수(λ)에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 76
나. 소성힌지 발생 지점 ····· 79
4.4 소결 ····· 84

제5장 오클라호마 시(市) 연방청사의 하중지지능력 평가

5.1 개요 ····· 85
5.2 해석모델 및 적용하중 ····· 86
5.2.1 해석 구조물의 형태 및 부재의 특성 ····· 86
5.2.2 부재 손실 유・무에 따른 적용하중 ····· 87

5.3 해석결과 ····· 88
5.3.1 보강 전 하중계수(λ)에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 88
5.3.2 실제 사례의 붕괴기구 검토 및 트랜스퍼 층 보강 위치 ····· 91
5.3.3 트랜스퍼 층 보강 후 하중계수(λ)에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 92
5.3.4 트랜스퍼 층 보강 후 붕괴기구 검토 ····· 95
5.4 소결 ····· 96

제6장 철골 주차장에서의 화재 시 안전성 평가
6.1 개요 ····· 97
6.2 화재시뮬레이션 CFAST ····· 97
6.2.1 화재 발생지점 및 대상공간 설정 ····· 98
6.2.2 각 부재별 온도분포 ····· 99
6.2.3 온도에 따른 강재의 항복강도 ····· 102
6.3 간략화법에 의한 해석 ····· 103
6.3.1 해석모델 및 부재의 특성 ····· 103
6.3.2 구조물의 하중지지능력 평가 ····· 105
6.4 소결 ····· 108

제7장 결론 ····· 109

참고문헌 ····· 111

표 차 례

표 1.1 비정상하중의 종류 및 피해양상 ····· 4

표 3.1 사용된 부재의 특성 ····· 19
표 3.2 8스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수(양단고정) ····· 21
표 3.3 8스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 23
표 3.4 10스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수(양단고정) ····· 26
표 3.5 10스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 28
표 3.6 14스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수(양단고정) ····· 31
표 3.7 14스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 33
표 3.8 부재감도지수에 따른 8스팬 평면트러스의 보강순서(양단고정일 경우) ····· 36
표 3.9 부재감도지수에 따른 8스팬 평면트러스의 보강순서(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 40
표 3.10 부재감도지수에 따른 10스팬 평면트러스의 보강순서(양단고정일 경우) ····· 44
표 3.11 부재감도지수에 따른 10스팬 평면트러스의 보강순서(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 48
표 3.12 부재감도지수에 따른 14스팬 평면트러스의 보강순서(양단고정일 경우) ····· 52
표 3.13 부재감도지수에 따른 14스팬 평면트러스의 보강순서(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 56

표 4.1 사용된 부재의 특성 ····· 66
표 4.2 설계 풍하중 산정을 위한 조건 ····· 69
표 4.3 CASE Ⅰ의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 70
표 4.4 CASE Ⅱ의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 71
표 4.5 CASE Ⅲ의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 71
표 4.6 CASE Ⅰ의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 78
표 4.7 CASE Ⅱ의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 78
표 4.8 CASE Ⅲ의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 78

표 5.1 사용된 부재의 특성 ····· 87
표 5.2 G28, G8 기둥열의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 89
표 5.3 G24, G12 기둥열의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 90
표 5.4 G20, G16 기둥열의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 91
표 5.5 G28, G8 기둥열의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 93

표 5.6 G24, G12 기둥열의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 94
표 5.7 G20, G16 기둥열의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 94
표 5.8 1층 기둥에 대한 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.) ····· 95

표 6.1 대상 공간의 제원 ····· 98
표 6.2 대상공간의 설정값 ····· 99
표 6.3 해석모델의 각 부재 특성 ····· 104

그 림 차 례

그림 1.1 우발적 하중에 의한 피해사례 ····· 3

그림 2.1 축력에 대한 부재의 강소성 거동 ····· 6
그림 2.2 휨모멘트에 대한 강소성 거동 ····· 7
그림 2.3 부재단면의 제약조건 ····· 8
그림 2.4 직접제약조건에 따른 부재의 평형방정식 유도 ····· 10
그림 2.5 간접제약조건에 따른 부재의 중간하중점에서의 평형방정식 유도 ····· 12

그림 3.1 8스팬 평면 트러스 ····· 20
그림 3.2 10스팬 평면 트러스 ····· 25
그림 3.3 14스팬 평면 트러스 ····· 30
그림 3.4 원형강관의 보강방법 ····· 35
그림 3.5 보강순서에 따른 8스팬 Pratt Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우) ····· 37
그림 3.6 보강순서에 따른 8스팬 Howe Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우) ····· 38
그림 3.7 보강순서에 따른 8스팬 Warren Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우) ····· 39
그림 3.8 보강순서에 따른 8스팬 Pratt Truss의 하중지지능력(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 41
그림 3.9 보강순서에 따른 8스팬 Howe Truss의 하중지지능력(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 42
그림 3.10 보강순서에 따른 8스팬 Warren Truss의 하중지지능력(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 43
그림 3.11 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우) ····· 45
그림 3.12 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우) ····· 46
그림 3.13 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우) ····· 47
그림 3.14 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 49
그림 3.15 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 50
그림 3.16 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 51
그림 3.17 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우) ····· 53
그림 3.18 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우) ····· 54
그림 3.19 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우) ····· 55

그림 3.20 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 57
그림 3.21 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ····· 58
그림 3.22 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우) ··· 59
그림 3.23 8스팬 평면트러스의 부재감도지수와 하중지지능력 ····· 60
그림 3.24 10스팬 평면트러스의 부재감도지수와 하중지지능력 ····· 61
그림 3.25 14스팬 평면트러스의 부재감도지수와 하중지지능력 ····· 61

그림 4.1 기본모델(CASE Ⅰ) ····· 65
그림 4.2 비교모델(CASE Ⅱ, CASE Ⅲ) ····· 65
그림 4.3 정상상태에서의 적용하중(GSA 2003) ····· 67
그림 4.4 부재손실 발생시 적용하중(GSA 2003) ····· 67
그림 4.5 정상상태에서의 적용하중(DoD 2005) ····· 68
그림 4.6 부재손실 발생시 적용하중(DoD 2005) ····· 68
그림 4.7 CASE별 하중계수 비교(GSA 2003) ····· 72
그림 4.8 정상상태에서의 소성힌지 발생지점(GSA 2003) ····· 72
그림 4.9 1층 외부기둥(1번 부재) 손실시 소성힌지 발생지점(GSA 2003) ····· 73
그림 4.10 9층 외부기둥(9번 부재) 손실시 소성힌지 발생지점(GSA 2003) ····· 74
그림 4.11 1층 내부기둥(11번 부재) 손실시 소성힌지 발생지점(GSA 2003) ····· 75
그림 4.12 9층 내부기둥(19번 부재) 손실시 소성힌지 발생지점(GSA 2003) ····· 76
그림 4.13 CASE별 하중계수 비교(DoD 2005) ····· 79
그림 4.14 정상상태에서의 소성힌지 발생지점(DoD 2005) ····· 80
그림 4.15 1층 외부기둥(1번 부재) 손실시 소성힌지 발생지점(DoD 2005) ····· 81
그림 4.16 9층 외부기둥(9번 부재) 손실시 소성힌지 발생지점(DoD 2005) ····· 82
그림 4.17 1층 내부기둥(11번 부재) 손실시 소성힌지 발생지점(DoD 2005) ····· 83
그림 4.18 9층 내부기둥(19번 부재) 손실시 소성힌지 발생지점(DoD 2005) ····· 84

그림 5.1 Alfred P. Murrah Federal Building 붕괴사고 ····· 85
그림 5.2 해석모델 ····· 86
그림 5.3 정상상태에서의 적용하중(GSA 2003) ····· 87
그림 5.4 부재손실 발생 시 적용하중(GSA 2003) ····· 88

그림 5.5 실제 사례의 붕괴기구 ····· 91
그림 5.6 트랜스퍼 층 보강 위치 ····· 92
그림 5.7 트랜스퍼 층 보강 후 붕괴기구 ····· 96

그림 6.1 화재 발생지점 및 대상공간 ····· 98
그림 6.2 Column의 위치별 시간-온도 관계 ····· 100
그림 6.3 Beam의 위치별 시간-온도 관계 ····· 101
그림 6.4 각 부재의 평균 온도 분포 ····· 102
그림 6.5 일반 구조용 강재 및 내화 강재의 항복강도 ····· 103
그림 6.6 해석모델 ····· 104
그림 6.7 일반구조용 강재(SM490)로 설계된 구조물의 하중계수 ····· 105
그림 6.8 내화 강재(FR490)로 설계된 구조물의 하중계수 ····· 106
그림 6.9 Beam(내화 강재)+Column(일반구조용 강재)의 하중지지능력 비교 ····· 107
그림 6.10 일반구조용 강재와 내화 강재의 하중지지능력 비교 ····· 107

기 호 설 명

t : 축력

e : 축변형

m : 휨모멘트

θ : 회전각

λ : 붕괴하중계수

$\{P_0\}$: 절점하중벡터의 기저치

$[Con.]$: 접속메트릭스

$\{M\}$: 부재력(내력) 벡터

M_{pj} : 부재내력

λ_0 : 정상상태에서의 붕괴하중계수

λ_{damage} : 부재손실 시 붕괴하중계수

S.I. : 부재감도지수(Sensitivity Index)

R.R. : 하중잔존율(Load Residual Rate)

P_0 : 단위하중

Z_p : 소성단면계수(mm^3)

M_p : 전소성모멘트(kN·cm)

Dead Load : 고정하중(kN/m^2)

Live Load : 활하중(kN/m^2)

Wind Load : 풍하중(kN/m^2)

σ_y : 강재의 항복강도(Mpa)

T : 강재의 표면온도(℃)

min : 시간(분)

Abstract

A Study on Improvement of Load Carrying Capacity in Structure using Limit Analysis

Kim, Jung Hwan
Advisor : Prof. Choi, Jae hyouk,
Department of Architectural Engineering,
Graduate School of Chosun University

Progressive collapse of building structure has recently become an important issues because its causes is vital. Progressive collapse which bring about local loss of human life from unexpected accidental load to surrounding destruction, will be improved by increasing the safety on the structures through introducing reinforcements.

But, unfortunately, researches for improving structural safety by introducing effective reinforcement is under process or not yet completed.

In this thesis, it has been presented about evaluation on load carrying capacity in structure under accidental load, based on low-bound theorem of limit analysis and also the influence of vulnerable members were examined to increase the capability on

structures safety through distinction and reinforcing the most critical members.

In addition, research work compares with the existing various methods that had been done to enhance structural safety.

제1장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

예상 이외의 비정상하중에 의한 구조 부재의 국부적인 손실이 주변 부재의 파괴로 이어지는 연쇄붕괴에 관한 피해가 보고됨에 따라 최근 연쇄붕괴 방지를 위한 연구가 국내·외적으로 활발한 연구가 진행되고 있으며, 그와 더불어 보강을 통해 구조물의 안전성을 향상시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

이철호(2007) 등은 기둥이 손실된 철골모멘트골조의 보 휨모멘트-축인장력 상호작용을 반영할 수 있는 근사적 해석모형을 제시하고 이의 응용으로서 상용프로그램에 활용할 수 있는 새로운 비선형 동적 연쇄붕괴 해석법을 소개하였고, 김한수(2009) 등은 아웃리거와 벨트트러스 시스템이 고층 건물의 연쇄붕괴 저항성능을 효과적으로 증진시킬 수 있음을 확인하였다. 김진구(2007~2009) 등은 비선형동적해석 방법을 사용해 철골모멘트저항골조의 연쇄붕괴 가능성을 조사하였고, 철골조의 보 항복강도의 변동에 따른 연쇄붕괴 거동을 평가하였으며, 철골조의 기둥제거 시 발생하는 수직변위에 영향을 미치는 민감도를 분석하였다. 또한, 강선과 회전마찰감쇠기를 이용하여 기존 구조물의 내진보강 및 연쇄붕괴 저항성능을 향상시키는 방안에 대해 연구하였다.

또한, 박성수(2010) 등은 벨트트러스를 가지는 초고층 모델을 대상으로 강성 차이가 반영된 근사해석 방법을 통하여 동적 연쇄붕괴 해석을 실시하여 강한 축강성 기둥으로 묶여져 있는 보 및 트러스의 수직 방향에 대한 거동특성을 파악하였다. 그리고 Choi(2009) 등은 CPM을 이용하여 1981년 대설에 의한 일본 TSURUGA 지역에 위치한 차량기지의 지붕붕괴 사고 사례를 통해 실제 붕괴하중의 크기와 CPM을 이용하여 붕괴하중 해석결과를 비교함으로써 CPM의 정합성을 검토하였고, 하중계수와 부재감도에 관한 연구를 수행하였다.

이러한 연쇄붕괴에 대한 관심은 1968년 런던에서 Ronan Point apartment 의 붕괴 이후에 시작되었다. 그리고 1995년 차량 폭발 테러에 의해 Alfred P. Murrah Building가 붕괴되고 난 후 구조물의 연쇄붕괴에 대한 연구가 점진적으로 진행 되었고,(Longinow,

1996) 2001년 비행기 테러에 의해 World Trade Center 가 붕괴되고 난 후 연쇄붕괴에 대한 활발한 연구가 진행 되었다. 이를 반영하여 미국에서는 FEMA-356 (2000)을 통해 연쇄붕괴 해석을 위한 대체경로법을 수행하는 방법으로 선형정적해석, 선형동적해석, 비선형정적해석, 비선형동적해석의 네 가지 방법을 제시하였고, General Service Administration (GSA, 2003)와 Department of Defence (DoD, 2005)를 각각 발간하여 행정부 및 군사 시설물의 연쇄붕괴 해석을 위한 가이드라인과 연쇄붕괴를 방지하기 위한 설계 방법을 구체적으로 제시하였다. 또한, National Institute of Standard and Technology (NIST, 2006) 에서는 실무적인 차원에서의 구조 설계 및 보강에 대한 지침을 발표하였다.

연쇄적인 붕괴를 일으키는 하중은 일반적인 구조설계 과정에서 고려하는 하중이 아닌 비정상하중에 의한 우발적 하중으로 인하여 주로 발생한다. 구조물이 입은 발생 초기의 피해규모 보다는 손상위치에 따른 붕괴의 진전 양상에 따라 그 피해의 정도가 결정되기도 한다.

또한, 비정상하중에 의한 구조물의 안전성을 평가하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 김화중(1998) 등은 철골조주차장에서의 화재 시 FR강이 600℃이하의 범위에서 무피복 상태로서의 화재안정성을 보장할 수 있는지의 여부를 살펴보았으며. 곽윤근(2010) 등은 국내에서 내화피복재료의 기둥성능평가에 사용되고 있는 강재를 사용하여 화재 시 시간에 따른 온도분포 변화를 알아보고, 축하중거동에 온도의 상승이 미치는 영향을 알아보기 위해 구조해석을 수행하여 건축물의 내화성능 확보를 위한 기초적인 자료를 제공하였다.

이렇듯 연쇄붕괴를 방지하고자 하는 연구와 구조물의 안전성을 향상시키기 위한 연구는 다양하게 진행되고 있으나, 효율적인 보강을 통해 구조물의 안전성을 향상시키고자 하는 연구는 아직 미비한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 극한 해석의 하계 정리를 기본으로 한 Compact Procedure Method를 이용하여 비정상하중에 의한 우발적 하중이 발생하였을 경우 대상 구조물의 하중지지능력을 평가하였고, 비정상하중에 가장 취약한 부재를 판별하여 보강함으로써 구조물의 하중지지능력 향상에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다. 또한, 다양한 구조물의 하중지지능력 향상에 대한 방법들을 통해 효과적으로 구조물의 안전성을 향상

시키는 방안에 대해 연구하였다.

(a) Ronan Point (b) Alfred P. Murrah Building (c) World Trade Center

그림 1.1 우발적 하중에 의한 피해사례

1.2 비정상하중

자연적 혹은 인위적으로 환경이 바뀌면서 비정상하중과 같은 순간적인 하중에 의하여 구조물은 영향을 받는다.

비정상하중은 크게 충격 및 충돌에 의한 경우와 설계 및 시공의 오류, 폭발 및 화재에 의한 경우 그리고 지진이나 폭설 등에 의한 자연재해의 경우로 나눌 수 있다. 충격 및 충돌에서는 자동차, 비행기 등의 충돌이나 중량물의 낙하 등에 의한 경우를 들 수 있으며 연쇄붕괴의 대부분이 이에 해당된다. 그리고 설계 및 시공의 오류에서는 시공 오류, 구조 설계 과정에서의 오류, 리모델링 중에 구조 검토 과정에서의 오류 등이 이에 포함되며, 폭발 및 화재에서는 가스·폭탄 등에 의한 공기압력의 급격한 변화에 의한 피해 그리고 화재에 의한 피해를 들 수 있다. 그리고 자연재해에는 지진, 폭설, 태풍 등에 의한 구조물의 피해가 있다. 이러한 비정상하중에 의한 피해 양상과 그에 따른 실제 피해사례를 표 1에 나타내었다.

표 1.1 비정상하중의 종류 및 피해양상

비정상하중	피해양상	피해사례
충격 및 충돌	- 연쇄붕괴의 대부분의 경우 - 자동차, 비행기 등의 충돌 - 중량물의 낙하 등에 의한 경우	- World Trade Center 붕괴사고(2001) (미국, 뉴욕) : 비행기 충돌 등
설계 및 시공의 오류	- 시공 오류 - 구조설계 오류 - 리모델링 중 구조 검토 오류	- 삼풍백화점 붕괴사고(1995) (한국, 서울) : 시공 오류 - Skyline Plaza Building 붕괴사고(1973) (미국, 버지니아주) : 시공 오류 - Toki messe 붕괴사고(2003) (일본) : 접합부 시공 오류 - Cocoa Beach Building 붕괴사고(1981) (미국, 플로리다주) : 설계・시공 오류 - 종암동 고대빌딩 붕괴사고(2002) (한국, 서울) : 설계 오류 등
폭발 및 화재	- 가스・폭탄 등에 의한 공기 압력의 급격한 변화 - 화재에 의한 경우	- Ronan Point apartment 붕괴사고(1968) (영국, 런던) : 가스폭발 - Alfred P. Murrah Building 붕괴사고(1995) (미국, 오클라호마주) : 폭탄에 의한 폭발 - Madrid Windor Building 붕괴사고(2005) (스페인, 마드리드) : 화재 등
자연재해 (폭설/태풍/지진 등)	- 지진 등 자연재해에 의한 경우	- 고베지진(1995), 아이티지진(2010), 동일본 지진(2011) 등에 의한 구조물의 붕괴 - 체육관의 돔형 지붕 붕괴사고(2004) (한국, 문경) : 폭설에 의한 피해 - 태양광 집열판 지지대 기초부위 파손(2007) (한국, 제주도) : 태풍에 의한 피해 등

제2장 극한해석과 강소성 거동

2.1 극한해석의 정의

극한해석이란 구조부재에 소성변형이 생겨서 종국에는 불안정한 기구로 될 때 하중의 크기를 구하고자 하는 해석이다. 해석수행을 위해 구조물을 구성하는 부재는 모두 평면구조내의 직선부재로 하고, 축력과 휨모멘트에 관한 탄성변형이 소성변형에 비해 작아서 무시할 수 있는 강소성 거동으로 가정한다. 그리고 다루는 하중은 몇 개의 집중하중이 일정비율을 지키면서 증대해 가는 비례하중으로 한다. 극한해석에서는 구조실험을 할 때와 같이, 하중을 점차 증대시켜 가면서 소성힌지가 순서대로 발생하는 상태를 추적하는 방법이 아닌 중간 과정은 생략하고 바로 결과를 구하려고 하는 것이다. 극한해석법 중에서 하중을 점차 증가시켜 가는 부분이 있지만, 그것은 해석 편의상의 절차에 지나지 않는다.

2.2 강소성 거동

강소성 거동에는 크게 축력에 대한 거동과 휨모멘트에 대한 거동에 따르며, 이러한 두 거동의 제약조건은 붕괴가 축력에 의한 소성항복에 의해서 생기는 경우인 트러스해석과 붕괴가 휨모멘트에 의해서 생기는 골조해석에 적용된다. 실제로 축력과 휨모멘트에는 상관관계가 존재하나, 본 논문의 해석에서는 이러한 관계를 무시하고, $-t^{L}$, t^{U}, $-m_p^{L}$, m_p^{U}를 부재의 치수와 항복응력에만 의존하는 일정치로 가정한다.

2.2.1 축력에 대한 거동

그림 2.1은 강소성 거동을 하는 부재가 인장 또는 압축의 축력을 받을 때, 축력-변형의 관계를 나타낸 것이다. 축력 t가 $-t^{L} < t < t^{U}$의 범위에서 탄성거동을 하고, $t = t^{U}$ 또는 $t = -t^{L}$로 되면 소성거동을 한다. $-t^{L} < t < t^{U}$의 탄성영역에서는 축변형 e는 0 이라고 가정한다.

$t = t^{U}$ 로 되면 축인장변형 e의 값은 정(+)이고 부정(不定)으로 되고, $t = -t^{L}$로 되면 축압축변형 e의 값은 부(-)이고 부정으로 된다.

실제로 압축내력 $-t^L$은 부재의 좌굴을 고려하여 결정되어야 하지만 이것은 구조물의 해석순서에는 영향을 주지 않고, 부재의 축력 분포는 전체 길이에 걸쳐서 일정하다고 가정한다.

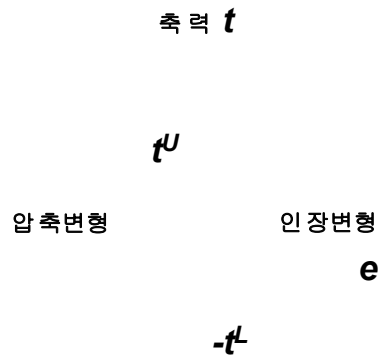


그림 2.1 축력에 대한 부재의 강소성 거동

2.2.2 휨모멘트에 대한 거동

그림 2.2는 강소성 거동을 하는 부재의 휨모멘트 m과 회전각 θ의 관계를 나타낸 것이다. 부재단면의 휨모멘트 m이 $-m_p^L < m < m_p^U$의 범위에서 회전각 θ는 0이 되고, $m = -m_p^L$ 또는 $m = m_p^U$에 도달하면 회전각 θ는 부정으로 된다. 이 회전각이 부정이 될 때의 모멘트를 전소성모멘트(full plastic moment)라 하고, 그와 같은 단면을 소성힌지(plastic hinge)라고 한다. 소성힌지는 보통의 힌지와 달리, 그 힌지의 양측 부분이 전소성모멘트에 도달했을 때 서로 상대적으로 회전할 수 있다.또한, 부재 중간에 하중이 작용하지 않는 경우에 부재내의 휨모멘트는 항상 어느 한 쪽의 부재단에서 최대가 되며 이때 부재단에 소성힌지가 발생하게 된다. 그러나 중간에 하중이 작용하는 경우, 중간하중이 작용하는 점에서 소성힌지가 발생할 가능성이 있다.

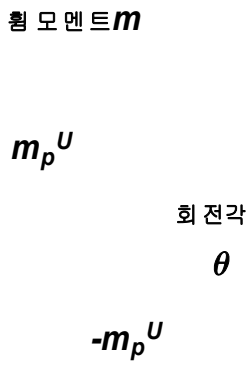


그림 2.2 휨모멘트에 대한 강소성 거동

2.3 평형방정식과 제약조건

2.3.1 부재의 모델화

부재 중간에 여러 개의 집중하중이 작용하고, 부재단면의 휨내력이 작용점의 위치에 따라 다른 경우, 중간하중이 작용하는 점에 휨모멘트가 최대로 되는 경우도 발생할 수 있지만, 부재길이를 따라서 단면의 내력이 달라지는 경우도 있어서 반드시 휨모멘트가 최대인 점에서 소성힌지가 발생한다고 할 수 없다. 따라서, 하중이 작용하지 않아도 단면의 내력이 낮은 경우에는 중간하중점을 설정할 필요가 있다.

부재단의 소성힌지는 접합부가 어떤 크기를 가지고 있어서 절점으로부터 임의의 크기만큼 떨어진 내측의 점에서 발생하게 된다.

부재단면의 제약조건을 고려하는 경우 그림 2.3에 나타낸 바와 같이 부재단벡터의 p_1, p_2와 축방향력 t, 부재단부로부터 $\varepsilon_1 L$, $\varepsilon_2 L$ 만큼 떨어진 위치에서의 모멘트 $\widetilde{m}_1$, $\widetilde{m}_2$ 및 중간하중점에서의 모멘트 m_i 와의 관계가 필요하다.

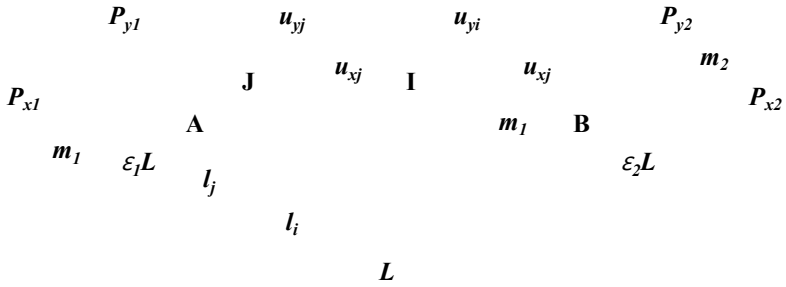


그림 2.3 부재단면의 제약조건

2.3.2 부재의 평형방정식과 직접제약조건

부재단하중 p_1, p_2와 부재력벡터 r 은 다음과 같이 정의하며, 휨모멘트는 그림 2.3과 같이 단면의 상단이 인장으로 되는 경우에는 그 부호를 정(+)으로 한다.

$$p_1 = \begin{bmatrix} p_{x1} \\ p_{y1} \\ m_1 \end{bmatrix}, \quad p_2 = \begin{bmatrix} p_{x2} \\ p_{y2} \\ m_2 \end{bmatrix}, \quad r = \begin{bmatrix} \underset{\sim}{t} \\ \underset{\sim}{m_1} \\ \underset{\sim}{m_2} \end{bmatrix}$$

부재력벡터 r 을 이용해서, 부재에서의 평형방정식은 힘의 평형조건으로부터 다음 식과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} p_1 &= H_1 r - (p_{equlv})_1 \\ p_2 &= H_2 r - (p_{equlv})_2 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $H_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & a & -a \\ 0 & 1+b_1 & -b_1 \end{bmatrix}$, $H_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -a & a \\ 0 & b_2 & -(1+b_2) \end{bmatrix}$

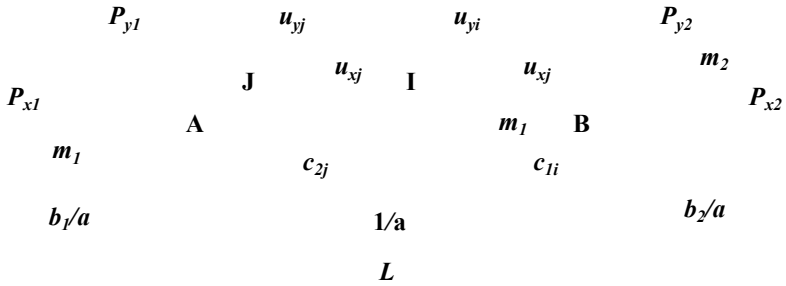
$$a = \frac{1}{(1-\varepsilon_1-\varepsilon_2)L}, \quad b_1 = \frac{\varepsilon_1}{1-\varepsilon_1-\varepsilon_2}, \quad b_2 = \frac{\varepsilon_2}{1-\varepsilon_1-\varepsilon_2}$$

$$(p_{\text{equiv}})_1 = \begin{bmatrix} \sum (c_{1i} + b_2/a) w_\xi / L \\ a \sum c_{1i} w_{yi} \\ b_1 \sum c_{1i} w_{yi} \end{bmatrix} , \qquad (p_{\text{equiv}})_2 = \begin{bmatrix} \sum (c_{2i} + b_1/a) w_\xi / L \\ a \sum c_{2i} w_{yi} \\ -b_2 \sum c_{2i} w_{yi} \end{bmatrix}$$

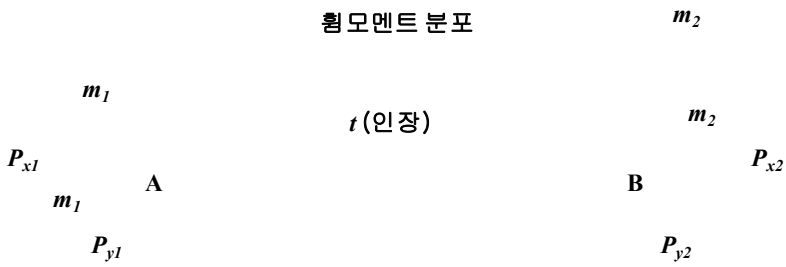
$$c_{1i} = (1 - \varepsilon_2) L - l_i \quad , \quad c_{2i} = l_i - \varepsilon_1 L$$

구체적인 식의 유도는 그림 2.4에 나타낸 바와 같이 중간하중이 작용하고, 평형상태에 있는 그림 2.4(a)를 부재단하중 벡터 p와 부재력 벡터 r 의 관계도인 그림 2.4(b)와 부재단하중 벡터 p 와 중간하중의 관계도인 그림 2.4(c)로 나누어 구할 수 있다.

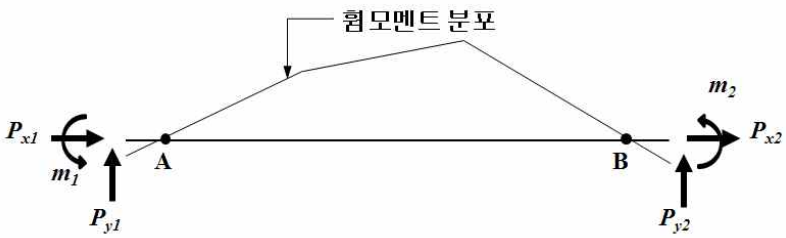
축력과 휨모멘트에 대한 거동으로서, 간단한 강소성 거동으로 가정하고 있으며, 축력과 휨모멘트의 값에는 상한치와 하한치가 있다. 따라서, 부재력 벡터 r 의 성분, t, $\widetilde{m}_1$, $\widetilde{m}_2$ 에는 한계치가 있고, 이것을 $-r^{\perp} < t < r^{\sqcup}$ 로 표현하고 직접제약조건이라고 한다.



(a) 부재의 평형상태



(b) 부재단하중 벡터 p와 부재력 벡터 r의 관계



$$P_{x1} = -\sum (c_{1i} + b_2 / a) w_{xi} / L \qquad P_{x2} = -\sum (c_{2i} + b_1 / a) w_{xi} / L$$

$$P_{y1} = -\sum a c_{1i} w_{yi} \qquad P_{y2} = -\sum a c_{2i} w_{yi}$$

$$m_1 = (b_1 / a) p_{y1} \qquad m_2 = (b_2 / a) p_{y2}$$

(c) 부재단하중 벡터 p와 중간하중의 관계

그림 2.4 직접제약조건에 따른 부재의 평형방정식 유도

2.3.3 부재의 중간하중점에서의 평형방정식과 간접제약조건

그림 2.5에 보이는 바와 같이, 부재의 중간하중점 I에서의 휨모멘트 m_i 에는 강소성거동으로 가정하고 있으며, 휨모멘트 값에는 상한치와 하한치가 존재한다.

휨모멘트 m_i 는 r과 중간하중에 관하여 선형의 관계에 있으며, 힘의 평형을 고려하여, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

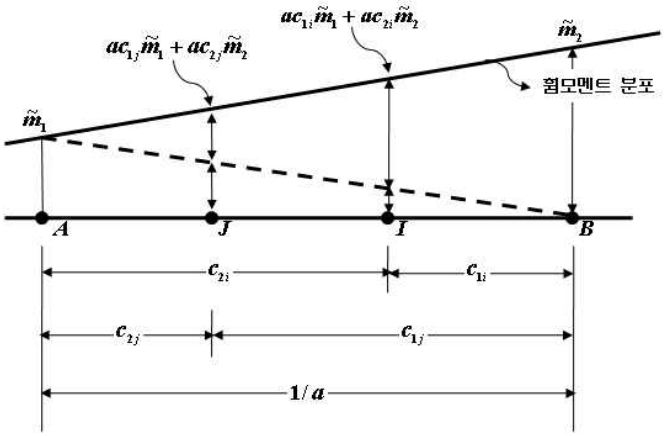
$$m_i = m_i^{(0)} - b_i{}^t r \tag{2}$$

여기서, $m_i^{(0)} = ac_{2i}\sum_j c_{1j} w_{yj} - \sum_{i>j}(l_i - l_j) w_{yj}$

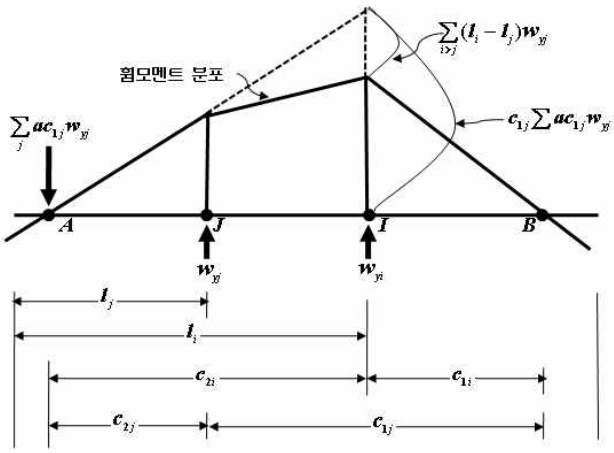
$b_i{}^t = \left[0 - ac_{1i} - ac_{2i}\right]$

여기서, $m_i^{(0)}$의 항은 A점과 B점에서 단순지지 되어 있는 보의 I점에서의 모멘트이고, $\sum_j$는 부재에 작용하고 있는 전체하중에 관련된 것의 합이다. 또한, $\sum_{i>j}$는 $l_i > l_j$의 부분에 작용하고 있는 하중에 관련된 것의 합을 나타낸 것이다. 구체적인 식의 유도는 그림 2.5에 나타낸 바와 같이 휨모멘트와 부재력 벡터의 관계와 중간하중과의 관계를 고려하여 유도할 수 있다.

휨모멘트 m_i는 I점에서의 전소성모멘트의 값에 의해서 $-m_i{}^L \le m_i \le m_i{}^U$의 범위에서 제약을 받는다. 이것을 r 의 직접제약조건에 대한 간접제약조건이라고 한다.



(a) 휨모멘트 m_i와 부재력 벡터 r의 관계



(b) 휨모멘트 m_i와 중간하중의 관계

그림 2.5 간접제약조건에 따른 부재의 중간하중점에서의 평형방정식 유도

2.4 간략화법(Compact procedure)에 의한 해법

Livesley에 의해서 제안된 Compact Procedure Method(이하 CP법)은 극한해석의 하계정리(Low-bound theorm)를 기보으로 선형계획법을 이용한 해석법이다.

여기서, 하계정리란, 주어진 골조에 있어서 부재력과 휨모멘트가 주어진 하중조건에서 평형상태에 있고, 제약조건이 지켜지면, 그 구조물에 주어진 하중은 진의 붕괴하중의 하계를 준다. 즉, 만일 제약조건 $-r^{\perp} \le r \le r^{\cup}$와 평형방정식 $\lambda p = Hr$을 만족하는 부재력 벡터 r를 찾을 수 있으면, $\lambda \le \lambda_c$로 된다. 따라서, 제약조건을 만족하고, 평형방정식의 해가 존재하는 λ의 값 중, 최대의 것이 진의 붕괴하중계수가 된다.

문제는 「p, H, $r^{\perp}$, $r^{\cup}$이 주어지고, $\lambda p = Hr$과 $-r^{\perp} \le r \le r^{\cup}$의 제약조건하에서의 최대치를 구한다.」로 정의될 수 있으며 이러한 문제를 경계치 문제라고 한다. 또한, p의 성분은 M개, H의 성분은 N개(M < N)로 되어있다.

평형식 $\lambda p = Hr$에 Gauss-Jordan의 소거법을 적용하면,

$$\lambda \begin{bmatrix} p_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ p_M \end{bmatrix} = \underset{\mathrm{M} > \mathrm{N}}{\begin{bmatrix} h_{11} & \cdot & h_{1i} & \cdot & \cdot & \cdot & h_{1N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ h_{M1} & \cdot & h_{Mi} & \cdot & \cdot & \cdot & h_{MN} \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} r_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_N \end{bmatrix}$$

식 (3) H 의 제 1행의 요소 중에서 절대치가 최대인 요소 $h_{1\ell}$을 피봇(pivot)요소로 선택, 제 1행의 식을 $h_{1\ell}$로 나누고, 제 2행 이후 k=2,…, M(k≠1)의 각 행에 대해서, 제 1행의 수정한 식을 $h_{k\ell}$배해서, 식 k에서 뺀다.

$$\lambda \begin{bmatrix} p_1' \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ p_M' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}' & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & h_{1N}' \\ \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ h_{M1}' & \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & h_{MN}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_N \end{bmatrix} \leftarrow \text{1행목}$$

(2) 순서대로 H의 각 행 I=2,3, … , M의 절대치가 최대인 요소 h_{ij}를 피봇요소로 선택하고 앞에서와 같은 다음의 2가지 조작을 한다.

① 식i를 h_{ij}로 나눈다.(i행의 최대요소인 h_{ij}(피봇요소)를 1로 한다.)

② k=1, 2, … , n(k=i)에 대해서, 수정한 식 I를 h_{ij}배해서, 식 k에서 뺀다.

이 조작을 하여, H 매트릭스의 j열은 I행이 1로 되는 것 이외는 모두 0으로 되며, 이러한 순서를 반복한 결과, 다음 식 (3)과 같이 된다.

$$\lambda p^* = H^* r \tag{3}$$

즉,

$$\lambda \begin{bmatrix} p_1{}^* \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ p_M{}^* \end{bmatrix} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} \star & & \star & & \star & & \star \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & h_{12}{}^* & 1 & \cdot & 0 & h_{1(N-1)}{}^* & 0 \\ 1 & \cdot & 0 & \cdot & 0 & \cdot & 0 \\ 1 & \cdot & 0 & \cdot & 0 & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & 0 & \cdot & 1 & \cdot & 0 \\ 0 & h_{M2}{}^* & 1 & \cdot & 0 & h_{M(N-1)}{}^* & 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{bmatrix} r_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_N \end{bmatrix}$$

(☆의 열은 1을 1개 가진 기저변수에 관련된 열(M 개)

매트릭스[H]의 차원을 m행 n열로 하면, 통상은 부정정구조물이기 때문에 m < n 이다. 최초로, Gauss-Jordan의 쓸어 내 법에 따라 n열 중 m열을, 단지 1개의 1과 나머지는 0뿐인 열로 변환한다. 이것을, H*매트릭스로 한다. 다음에, [r]의 성분을 2개의 타입, 즉, 기저 변수와 비기저 변수로 나눈다. 그 나누는 방법은, 기저 변수를 변환한 H*매트릭스의 1을 1개 포함한 열에 관계하는 것과 비기저 변수를 배열이 되지 않은 H*매트릭스의 열에 관계하는 것으로 한다.

이상과 같은 준비 계산 하에서, 붕괴 하중 계수 λ의 계산 과정은, 초기값으로서 λ = 0, r_j의 모두에 대해서, r_j = 0으로 일어나 이하의 2개의 스텝을 반복한다. 여기서, j는 전비기저 변수를 나타내는 첨자 기호이다.

스텝 1 : λ의 증분

기저변수의 값만 변화시켜, 그 중의 하나가 경계치에 도달할 때까지 λ를 증가시킴

스텝 2 : 기저변수와 비기저변수의 재작성

λ를 더욱 증가시키기 위해서 기저변수와 비기저변수를 교환한다.

스텝 2를 실행할 수 없게 되었을 경우, 다시말해 λ을 증가시키는 비기저 변수가 존재하지 않는 경우, 붕괴시에 상당하는 λ의 최대치에 도달해, 해를 얻을 수 있게 된다. 이 시점에서 비기저 변수가 되어 있는 것의 집에서, $r_j = r_U$ 또는 $r_j = -r_L$인 것이 소성힌지이며, 이것이 붕괴 기구를 나타낸다. 모든 비기저 변수가 소성힌지이면, 충분히 붕괴되며, 얻을 수 있던 r는 붕괴시의 응력을 나타낸다. 비기저 변수가운데 소성힌지가 아닌 것($r_j = 0$)이 남아 있으면 부분 붕괴이며, 소성힌지 이외의 점의 응력은 붕괴시의 외력과 어울리는 가능한 응력 분포의 하나를 나타내는 것에 지나지 않는다. 일반의 다층 다스팬의 프레임에서는 대부분이 부분 붕괴가 된다.

다음에, 붕괴 하중의 계산 과정에 포함되는 역학적 의미에 대해 설명한다.

스텝 1의 하중의 증분에 대해서 기저 변수만을 변화시키는 것은, 비기저 변수에 대응하는 부재 단면에 「절단」힌지를 넣어서 할 수 있는 「정정구조물」을 풀고, 부재력과 하중의 증분을 요구하는 것이다. 비기저 변수인 부재력의 위치가 정정기본형을 구성하기 위해서 「절단」을 넣는 위치이며, 비기저 변수의 값이 거기에 작용하는 「부정정력」이다.

이상, 붕괴 하중의 계산은, 최초 부정정구조물로부터 정정기본형을 작성하고 부정정력을 일정값에 유지해 하중 증분을 계산하여 다음에 정정기본형을 변경하고 한층 더 하중을 증대시킬 수 있을지를 검토한다.

덧붙여 이 닫는「절단」부분은, 닫았을 때에 하중에 의해서 발생하는 부재력의 증감 방향을 알 수 있으므로, 하중 계수를 증대할 수 있는 「닫는」부분을 선택할 수 있다. 이것을 선택할 수 없을 때가, 하계 정리보다 하중 계수가 최대값에 이르렀을 때로 붕괴 하중이 된다.

여기서, 비례재하를 받는 구조물이, 붕괴시에 단위 비례 하중의 몇 배(λ_c)의 하중을 받을 수 있는지는 하계 정리에 근거하여 선형 계획법을 이용하고, 다음과 같이 정식화된다.

$$\text{Maximize } \lambda \tag{4}$$

$$\text{Subject to } \lambda\{P_0\} = [Con.] \cdot \{M\} \tag{5}$$

$$\text{소성조건 } |M_j| \le M_{pj} \tag{6}$$

여기서, λ : 붕괴하중계수,

$\{P_0\}$: 절점하중벡터의 기저치,

$[Con.]$: 접속메트릭스,

$\{M\}$: 부재력(내력) 벡터,

M_{pj} : 부재내력.

2.4.1 부재감도지수(Sensitivity Index ; S.I.)

Ohi(2003)는 극한해석법을 이용하여 식(8)과 같이 구조물의 하중지지능력 λ_0 에 대해서, 특정 부재의 손실발생시의 하중지지능력 λ_{damage} 평가하여, 그 저하율을 부재감도지수 (Sensitivity Index : S.I.)로 정의하였다. 또한, 특정 부재가 손실될 경우, 부재력이 손실되면 부재력 벡터 또한 사라지게 되는데 이를 도식화 하면 식(7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{damage}\left\{P_0\right\} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{i1} & \cdots & c_{n1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c_{1m} & \cdots & c_{im} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_i \\ \vdots \\ M_n \end{pmatrix} \tag{7}$$

Removed

Removed

$$\text{S.I.(Sensitivity Index)} = \frac{\lambda_0 - \lambda_{damage}}{\lambda_0} \tag{8}$$

여기서, λ_0 : 정상상태에서의 붕괴하중계수,

λ_{damage} : 부재손실 시 붕괴하중계수,

$\{P_0\}$: 절점하중벡터의 기저치,

$[Con.]$: 접속메트릭스,

$\{M\}$: 부재력(내력) 벡터.

구조물의 어느 특정부재가 손실되어도 하중지지능력이 거의 변화하지 않는 경우, 부재감도가 매우 작아져 골조의 하중지지능력에 대한 지배도가 작은 부재임을 나타낸다. 반대로, 하중계수가 대폭 감소한 경우 그 부재의 부재감도는 크게 나타남으로서 구조물의 하중지지능력에 대한 지배도가 큰 부재가 된다. 이와 같이 부재감도가 큰 부재를 중요부재(Key element)로 정의하였다.

2.4.2 하중잔존율(Load Residual Rate)

부재손실이 발생하기 전 구조물의 하중지지능력을 기준으로 하여 부재 손실이 발생한 후 구조물에 잔존하는 하중지지능력을 잔존율(Residual Rate : R.R.)로 정의하였다.

$$\text{하중잔존율(R.R.)} = \frac{\lambda_{damage}}{\lambda_0} \times 100(\%) \tag{9}$$

여기서, λ_0 : 정상상태에서의 붕괴하중계수,

λ_{damage} : 부재손실 시 붕괴하중계수.

제3장 평면 트러스 구조물의 하중지지능력 평가

3.1 개요

트러스 구조물은 교량, 체육관 지붕 등 대공간 구조물에 적용되는 구조 형식으로 직선부재로 된 강재를 사용하여 삼각형을 기본으로 하중을 지탱하는 구조로써, 일반적인 보와 같은 휨 부재와는 달리 단면의 효율성을 극대화시켰으며 무게 또한 가벼워 시공성이 우수한 장점을 가지고 있다.

그러나, 콘크리트 구조물보다 환경의 변화에 영향을 많이 받는 강재로 이루어져 있어서 그 손상이 크므로 지속적인 보수・보강이 필요한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 극한 해석의 하계정리를 기본으로 한 Compact Procedure Method를 이용하여 구조물의 각 부재들에 대한 부재감도지수를 산정하였다. 그리고 부재감도지수를 통해 부재의 중요도를 도출하고 중요도가 높은 가장 중요한 부재(Key-Element)부터 순차적으로 보강하여 구조물의 하중지지능력에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 또한, 트러스 구조물의 안전성 향상에 효과적인 방법에 대해서도 연구하였다.

3.2 평면 트러스 해석모델 및 부재의 특성

표 3.1은 본 장에서 수행하는 해석모델에 사용된 부재의 특성을 나타낸 것이다. 부재는 각각 상현재, 하현재, 수직재, 경사재로 구성되어 있으며, 모든 부재를 SS400 강재로 된 원형강관을 사용하였다. 여기서, 상현재, 하현재는 ϕ- 101.6 x 4.0로 설계하였으며, 수직재, 경사재는 ϕ- 89.1 x 2.8로 각각 설계하였다. 그리고 각 부재의 크기에 따른 소성단면계수(Z_p)와 전소성모멘트(M_p)를 나타내었다.

표 3.1 사용된 부재의 특성

부 재	강 재	부재 크기	소성단면계수 Z_p [mm^3]	전소성모멘트 M_p [kN・cm]
하현재	SS400	ϕ- 101.6 x 4.0	5.98 x 10^4	1.4 x 10^3
상현재				
수직재		ϕ- 89.1 x 2.8	3.71 x 10^4	8.7 x 10^2
경사재				

3.2.1 8스팬 평면 트러스의 해석

그림 3.1은 8스팬 평면 트러스 해석을 위한 해석모델이다. 구조물의 각 지점을 1.양단고정, 2.힌지와 롤러 지점으로 설계하였으며, 평면 트러스(Pratt Truss, Howe Truss, Warren Truss)의 종류에 따른 비교를 위하여 동일한 크기와 동일한 하중을 사용하여 해석을 수행하였다.

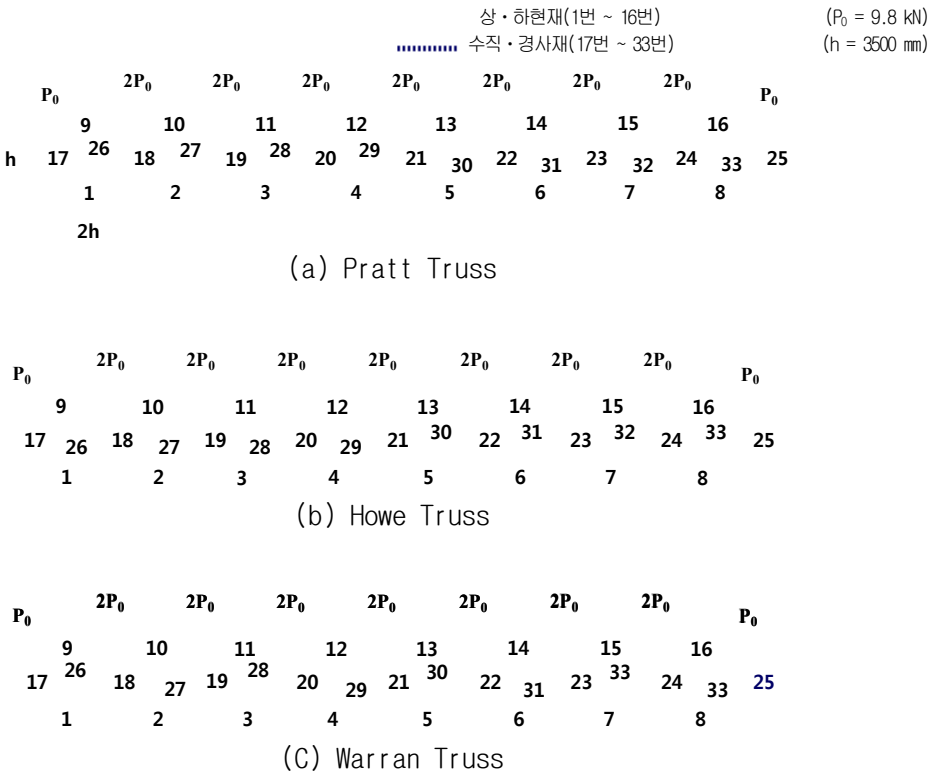


그림 3.1 8스팬 평면 트러스

트러스 한 경간의 너비 7m 에 총 8경간으로 구성되어있으며, 높이는 3.5m로 설계하였다. 또한, 그림 3.1(a)에서 보이는 바와 같이 트러스 상부의 각 절점에만 하중을 부여하였으며. (b), (c)에도 동일한 하중을 가하였다. 여기서, P_0(1t = 9.8kN)는 단위하중이다.

표 3.2 8스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수(양단고정)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		Load F.	S.I.	Load F.	S.I.	Load F.	S.I.
Non		0.667	-	0.72	-	0.711	-
하현재	1 or 8	0.66	0.01	0.711	0.013	0.703	0.011
	2 or 7	0.667	0	0.72	0	0.711	0
	3 or 6	0.667	0	0.706	0.019	0.698	0.018
	4 or 5	0.654	0.019	0.706	0.019	0.654	0.08
상현재	9 or 16	0.095	0.858	0.714	0.008	0.095	0.866
	10 or 15	0.055	0.918	0.113	0.843	0.095	0.866
	11 or 14	0.044	0.934	0.066	0.908	0.044	0.938
	12 or 13	0.042	0.937	0.053	0.926	0.044	0.938
수직재	17 or 25	0.053	0.921	0.206	0.714	0.053	0.925
	18 or 24	0.129	0.807	0.177	0.754	0.411	0.422
	19 or 23	0.181	0.729	0.312	0.567	0.711	0
	20 or 22	0.301	0.549	0.693	0.038	0.41	0.423
	21	0.411	0.384	0.72	0	0.711	0
경사재	26 or 33	0.111	0.834	0.113	0.843	0.111	0.844
	27 or 32	0.181	0.729	0.187	0.74	0.181	0.745
	28 or 31	0.301	0.549	0.312	0.567	0.301	0.577
	29 or 30	0.659	0.012	0.667	0.074	0.659	0.073

평면 트러스 해석과정에서 각 지점조건을 양단 고정으로 설계하였을 때의 8스팬으로 설계된 Pratt Truss와 Howe Truss 그리고 Warren Truss의 해석수행 결과를 표 3.2에 나타내었다.

양단 고정의 경우, Pratt Truss의 하중계수(Load F.)는 0.667, Howe Truss의 경우에는 0.72 그리고 Warren Truss의 하중계수는 0.711로 Howe Truss가 다른 두 트러스보다 근소하게나마 하중계수가 높게 나타났다.

Pratt Truss의 경우, 하현부재의 손상하중계수는 0.654 ~ 0.667로 높게 나타났으며, 상현부재에서는 0.042 ~ 0.095로 가장 낮게 나타났다. 또한, 수직부재의 경우에는 0.053 ~ 0.411, 경사부재에서는 0.111 ~ 0.659로 위치에 따른 손상하중계수의 차이가 심함을 확인할 수 있었다. 특히, 수직부재와 경사부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수

록 손상하중계수가 점점 증가하고 있는 추세를 보였다. 또한, Pratt Truss의 부재감도지수를 살펴보면, 하현부재에서는 0 ~ 0.019로 낮게 나타났으며, 상현부재에서는 0.858 ~ 0.937로 가장 다른 부재에 비해 더 높게 나타났다. 그리고 수직부재 및 경사부재에서는 각각 0.384 ~ 0.921과 0.012 ~ 0.834로 나타났는데, 이를 통해 외부보다 중앙부의 중요도가 더 높음을 확인할 수 있었다.

Howe Truss의 경우에는 Pratt Truss와 마찬가지로 하현부재의 손상하중계수가 0.706 ~ 0.72로 가장 높게 나타났다. 또한, 상현부재에서는 0.053 ~ 0.714로 중앙부로 갈수록 그 차이가 심하게 나타났는데 이로 인해 중앙부재로 갈수록 더 취약해짐을 확인할 수 있었다. 그리고 수직부재와 경사부재에서는 각각 0.117 ~ 0.72와 0.113 ~ 0.667로 나타났으며 경사부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수록 하중계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 부재감도지수는 하현부재에서 0 ~ 0.019로 트러스에 별다른 영향을 미치지 않고 있다는 것을 확인할 수 있었으며, 상현부재에서는 0.008 ~ 0.926으로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 큰 차이로 증가하였다. 그리고 수직부재의 경우 0 ~ 0.754로 나타났고, 경사부재의 경우 0.074 ~ 0.843으로 상현부재와 같이 외부에서 중앙부로 갈수록 부재의 중요도가 감소하였으며, 외부부재에서 가장 큰 부재감도지수를 나타내었다.

Warren Truss의 경우, Pratt Truss와 유사한 값을 보였으며, 하현부재의 손상하중계수가 0.654 ~ 0.711로 높게 나타났다. 또한, 상현부재의 손상하중계수는 0.044 ~ 0.095로 나타났고, 수직부재는 0.053 ~ 0.711, 경사부재는 0.111 ~ 0.659로 나타났다. 경사부재에서는 Pratt Truss와 Howe Truss의 경우와 마찬가지로 중앙부로 갈수록 하중계수가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Warren Truss의 부재감도지수를 살펴보면, Pratt Truss와 Howe Truss와 마찬가지로 하현부재의 부재감도지수가 0 ~ 0.011로 가장 낮은 부재중요도를 보이고 있으며, 상현부재의 경우에는 0.886 ~ 0.938로 나타났다. 그리고 수직재의 경우, 0 ~ 0.925로 나타났으며, 특히 부재감도지수가 0인 부재가 두 부분으로 부재의 중요도가 낮게 나타났으며, 그 외의 다른 부재에서는 부재감도지수가 0.423 ~ 0.925로 위치에 따라 부재감도지수의 차이가 크게 나타났다. 경사부재의 경우에는 0.073 ~ 0.844로 다른 두 트러스와 마찬가지로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 낮아짐을 확인할 수 있었다.

표 3.3 8스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		Load F.	S.I.	Load F.	S.I.	Load F.	S.I.
Non		0.646	-	0.689	-	0.689	-
하현재	1 or 8	0.646	0	0.048	0.93	0.689	0
	2 or 7	0.048	0.926	0.028	0.959	0.028	0.959
	3 or 6	0.028	0.957	0.022	0.968	0.028	0.959
	4 or 5	0.022	0.966	0.021	0.97	0.021	0.97
상현재	9 or 16	0.048	0.926	0.689	0	0.048	0.93
	10 or 15	0.028	0.957	0.048	0.93	0.048	0.93
	11 or 14	0.022	0.966	0.028	0.959	0.022	0.968
	12 or 13	0.021	0.967	0.022	0.968	0.022	0.968
수직재	17 or 25	0.026	0.960	0.206	0.701	0.026	0.962
	18 or 24	0.117	0.819	0.164	0.762	0.411	0.403
	19 or 23	0.164	0.746	0.274	0.602	0.689	0
	20 or 22	0.274	0.576	0.664	0.036	0.41	0.405
	21	0.411	0.364	0.689	0	0.689	0
경사재	26 or 33	0.095	0.853	0.095	0.862	0.095	0.862
	27 or 32	0.164	0.746	0.164	0.762	0.164	0.762
	28 or 31	0.273	0.577	0.273	0.604	0.273	0.604
	29 or 30	0.638	0.012	0.638	0.074	0.638	0.074

평면 트러스 해석과정에서 각 지점조건을 한단 핀, 한단 롤러로 설계하였을 때의 8스팬으로 설계된 Pratt Truss와 Howe Truss 그리고 Warren Truss의 해석수행 결과를 표 3.3에 나타내었다.

핀과 롤러지점의 경우, Pratt Truss의 하중계수(Load F.)는 0.646, Howe Truss의 경우에는 0.689 그리고 Warren Truss의 하중계수는 0.689로 Pratt Truss가 다른 두 트러스보다 하중계수가 낮게 나타났다.

Pratt Truss의 경우, 하현부재의 손상하중계수는 0.022 ~ 0.646으로 나타났으며, 상현부재에서는 0.021 ~ 0.048로 나타났다. 또한, 수직부재의 경우에는 0.026 ~ 0.411, 경사부재에서는 0.095 ~ 0.638로 나타났으며, 수직부재와 경사부재에서는 외부에서 중

앙부로 갈수록 손상하중계수가 점점 증가하고 있는 추세를 보였다. 또한, Pratt Truss의 부재감도지수를 살펴보면, 하현부재에서는 0 ~ 0.966으로 나타났으며, 상현부재에서는 0.926 ~ 0.967로 다른 부재에 비해 높게 나타났다. 그리고 수직부재 및 경사부재에서는 각각 0.364 ~ 0.96과 0.012 ~ 0.853으로 나타났는데, 이를 통해 외부보다 중앙부의 중요도가 더 높음을 확인할 수 있었으며, 하현부재와 수직부재 그리고 경사부재에서 부재감도지수의 차이가 심하게 나타났다.

Howe Truss의 경우에는 Pratt Truss와 마찬가지로 하현부재의 손상하중계수가 0.021 ~ 0.048로 가장 낮게 나타났다. 또한, 상현부재에서는 0.022 ~ 0.689로 중앙부로 갈수록 손상하중계수가 급격히 낮아졌는데 이로 인해 중앙부재로 갈수록 더 취약해짐을 확인할 수 있었다. 그리고 수직부재와 경사부재에서는 각각 0.164 ~ 0.689와 0.095 ~ 0.638로 나타났으며 경사부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수록 하중계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 부재감도지수는 하현부재에서 0.93 ~ 0.97로 부재감도지수가 높게 나타났으며, 상현부재에서는 0 ~ 0.968로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 큰 차이로 감소하였다. 그리고 수직부재의 경우 0 ~ 0.762로 나타났고, 경사부재의 경우 0.074 ~ 0.862로 상현부재와 같이 외부에서 중앙부로 갈수록 부재의 중요도가 감소하였으며, 외부부재에서 가장 큰 부재감도지수를 나타내었다.

Warren Truss의 경우, Pratt Truss와 유사한 값을 보였으며, 하현부재의 손상하중계수가 0.021 ~ 0.689로 높게 나타났다. 또한, 상현부재의 손상하중계수는 0.022 ~ 0.048로 나타났고, 수직부재는 0.026 ~ 0.689, 경사부재는 0.095 ~ 0.638로 나타났다. 경사부재에서는 Pratt Truss와 Howe Truss의 경우와 마찬가지로 중앙부로 갈수록 하중계수가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Warren Truss의 부재감도지수를 살펴보면, Pratt Truss와 마찬가지로 하현부재의 부재감도지수가 0 ~ 0.959로 부재 위치에 따른 차이가 심하게 나타났으며, 상현부재의 경우에는 0.93 ~ 0.968로 나타났다. 그리고 수직재의 경우에는 0 ~ 0.962로 나타났으며, 특히 부재감도지수가 0인 부재가 두 부분으로 부재의 중요도가 낮게 나타났으며, 그 외의 다른 부재에서는 부재감도지수가 0.403 ~ 0.962로 위치에 따라 부재감도지수의 차이가 크게 나타났다. 경사부재의 경우에는 0.074 ~ 0.862로 다른 두 트러스와 마찬가지로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 낮아짐을 확인할 수 있었다.

3.2.2 10스팬 평면 트러스의 해석

그림 3.2는 10스팬 평면 트러스 해석을 위한 해석모델이다. 구조물의 각 지점을 1. 양단고정, 2.힌지와 롤러 지점으로 설계하였으며, 평면 트러스(Pratt Truss, Howe Truss, Warren Truss)의 종류에 따른 비교를 위하여 동일한 크기와 동일한 하중을 사용하여 해석을 수행하였다.

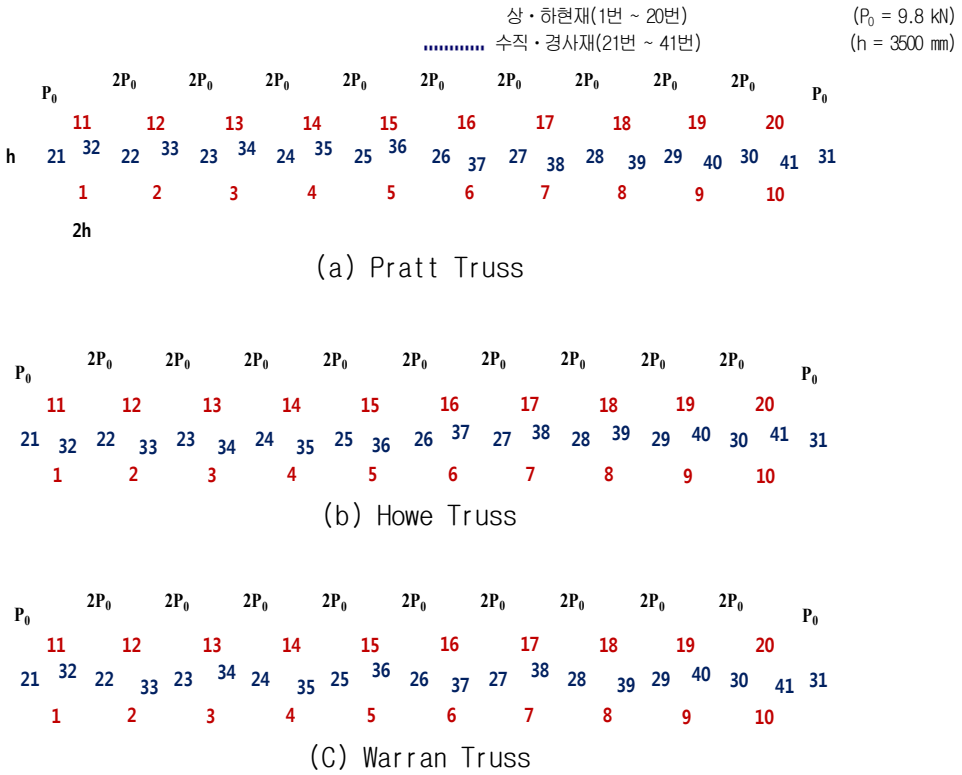


그림 3.2 10스팬 평면 트러스

트러스 한 경간의 너비 7m 에 총 10경간으로 구성되어있으며, 높이는 3.5m로 설계하였다. 또한, 그림 3.2(a)에서 보이는 바와 같이 트러스 상부의 각 절점에만 하중을 부여하였으며. (b), (c)에도 동일한 하중을 가하였다. 여기서, P_0(1t = 9.8kN)는 단위하중이다.

표 3.4 10스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수(양단고정)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		Load F.	S.I.	Load F.	S.I.	Load F.	S.I.
Non		0.427	-	0.45	-	0.427	-
하현재	1or10	0.423	0.009	0.445	0.011	0.423	0.009
	2or9	0.427	0	0.45	0	0.427	0
	3or8	0.427	0	0.45	0	0.427	0
	4or7	0.427	0	0.442	0.018	0.427	0
	5or6	0.419	0.019	0.442	0.018	0.419	0.019
상현재	11or20	0.074	0.827	0.447	0.007	0.074	0.827
	12or19	0.042	0.902	0.089	0.802	0.074	0.827
	13or18	0.032	0.925	0.05	0.889	0.032	0.925
	14or17	0.028	0.934	0.038	0.916	0.032	0.925
	15or16	0.027	0.937	0.033	0.927	0.027	0.937
수직재	21or31	0.043	0.899	0.207	0.54	0.043	0.899
	22or30	0.099	0.768	0.125	0.722	0.413	0.033
	23or29	0.128	0.7	0.184	0.591	0.427	0
	24or28	0.179	0.581	0.306	0.32	0.413	0.033
	25or27	0.298	0.302	0.434	0.036	0.427	0
	26	0.413	0.033	0.45	0	0.413	0.033
경사재	32or41	0.086	0.799	0.087	0.807	0.086	0.799
	33or40	0.127	0.703	0.131	0.709	0.127	0.703
	34or39	0.178	0.583	0.184	0.591	0.178	0.583
	35or38	0.297	0.304	0.306	0.32	0.297	0.304
	36or37	0.422	0.012	0.427	0.051	0.422	0.012

평면 트러스 해석과정에서 각 지점조건을 양단 고정으로 설계하였을 때의 10스팬으로 설계된 Pratt Truss와 Howe Truss 그리고 Warren Truss의 해석수행 결과를 표 3.4에 나타내었다.

양단 고정의 경우, Pratt Truss의 하중계수(Load F.)는 0.427, Howe Truss의 경우에는 0.45 그리고 Warren Truss의 하중계수는 0.427로 Howe Truss가 다른 두 트러스보다 근소하게나마 하중계수가 높게 나타났다.

Pratt Truss의 경우, 하현부재의 손상하중계수는 0.419 ~ 0.427로 높게 나타났으며,

상현부재에서는 0.027 ~ 0.074로 가장 낮게 나타났다. 또한, 수직부재의 경우에는 0.043 ~ 0.413, 경사부재에서는 0.089 ~ 0.422로 위치에 따른 손상하중계수의 차이가 심함을 확인할 수 있었다. 특히, 경사부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수록 손상하중계수가 점점 증가하고 있는 추세를 보였다. 또한, Pratt Truss의 부재감도지수를 살펴보면, 하현부재에서는 0 ~ 0.019로 낮게 나타났으며, 상현부재에서는 0.827 ~ 0.937로 가장 다른 부재에 비해 더 높게 나타났다. 그리고 수직부재 및 경사부재에서는 각각 0.033 ~ 0.899와 0.012 ~ 0.799로 나타났는데, 이를 통해 외부보다 중앙부의 중요도가 더 높음을 확인할 수 있었다.

Howe Truss의 경우에는 Pratt Truss와 마찬가지로 하현부재의 손상하중계수가 0.442 ~ 0.45로 가장 높게 나타났다. 또한, 상현부재에서는 0.033 ~ 0.447로 나타났다. 그리고 수직부재와 경사부재에서는 각각 0.125 ~ 0.45와 0.087 ~ 0.427로 나타났으며 경사부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수록 하중계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 부재감도지수는 하현부재에서 0 ~ 0.018로 나타났으며, 상현부재에서는 0.007 ~ 0.927로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 큰 차이로 증가하였다. 그리고 수직부재의 경우 0 ~ 0.722로 나타났고, 경사부재의 경우 0.051 ~ 0.807로 상현부재와 같이 외부에서 중앙부로 갈수록 부재의 중요도가 감소하였으며, 외부부재에서 가장 큰 부재감도지수를 나타내었다.

Warren Truss의 경우, Pratt Truss, Howe Truss와 유사한 값을 보였으며, 하현부재의 손상하중계수가 0.419 ~ 0.427로 높게 나타났다. 또한, 상현부재의 손상하중계수는 0.027 ~ 0.074로 나타났고, 수직부재는 0.043 ~ 0.427, 경사부재는 0.086 ~ 0.422로 나타났다. 경사부재에서는 Pratt Truss와 Howe Truss의 경우와 마찬가지로 중앙부로 갈수록 하중계수가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Warren Truss의 부재감도지수를 살펴보면, Pratt Truss와 Howe Truss와 마찬가지로 하현부재의 부재감도지수가 0 ~ 0.019로 가장 낮은 부재중요도를 보이고 있으며, 상현부재의 경우에는 0.827 ~ 0.925로 나타났다. 그리고 수직재의 경우, 0 ~ 0.899로 나타났다. 경사부재의 경우에는 0.012 ~ 0.799로 다른 두 트러스와 마찬가지로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 낮아짐을 확인할 수 있었다.

표 3.5 10스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		Load F.	S.I.	Load F.	S.I.	Load F.	S.I.
Non		0.414	-	0.431	-	0.414	-
하현재	1or10	0.414	0	0.037	0.914	0.414	0
	2or9	0.037	0.911	0.021	0.951	0.021	0.949
	3or8	0.021	0.949	0.016	0.963	0.021	0.949
	4or7	0.016	0.961	0.014	0.968	0.014	0.966
	5or6	0.014	0.966	0.013	0.97	0.014	0.966
상현재	11or20	0.037	0.911	0.431	0	0.037	0.911
	12or19	0.021	0.949	0.037	0.914	0.037	0.911
	13or18	0.016	0.961	0.021	0.951	0.016	0.961
	14or17	0.014	0.966	0.016	0.963	0.016	0.961
	15or16	0.013	0.969	0.014	0.968	0.013	0.969
수직재	21or31	0.021	0.949	0.207	0.52	0.021	0.949
	22or30	0.092	0.778	0.118	0.726	0.413	0.002
	23or29	0.118	0.715	0.165	0.617	0.414	0
	24or28	0.165	0.601	0.275	0.362	0.413	0.002
	25or27	0.275	0.336	0.425	0.014	0.414	0
	26	0.413	0.002	0.431	0.000	0.413	0.002
경사재	32or41	0.074	0.821	0.074	0.828	0.074	0.821
	33or40	0.118	0.715	0.118	0.726	0.118	0.715
	34or39	0.165	0.601	0.165	0.617	0.165	0.601
	35or38	0.275	0.336	0.275	0.362	0.275	0.336
	36or37	0.408	0.014	0.408	0.053	0.408	0.014

평면 트러스 해석과정에서 각 지점조건을 한단 핀, 한단 롤러로 설계하였을 때의 10스팬으로 설계된 Pratt Truss와 Howe Truss 그리고 Warren Truss의 해석수행 결과를 표 3.5에 나타내었다.

핀과 롤러지점의 경우, Pratt Truss의 하중계수(Load F.)는 0.414, Howe Truss의 경우에는 0.431 그리고 Warren Truss의 하중계수는 0.414로 나타났다.

Pratt Truss의 경우, 하현부재의 손상하중계수는 0.014 ~ 0.414로 나타났으며, 상현부재에서는 0.013 ~ 0.037로 나타났다. 또한, 수직부재의 경우에는 0.021 ~ 0.413, 경

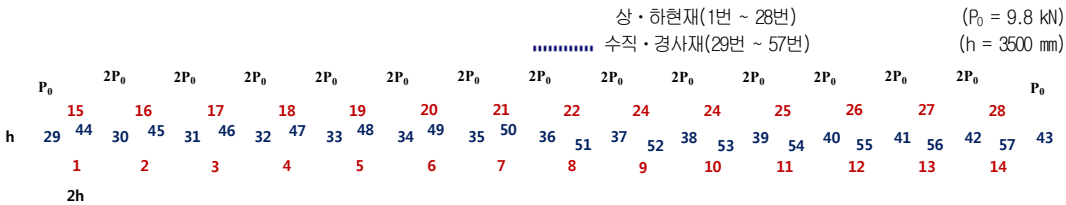
사부재에서는 0.074 ~ 0.408로 나타났으며, 수직부재와 경사부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수록 손상하중계수가 점점 증가하고 있는 추세를 보였다. 또한, Pratt Truss의 부재감도지수를 살펴보면, 하현부재에서는 0 ~ 0.966으로 나타났으며, 상현부재에서는 0.911 ~ 0.969로 나타났다. 그리고 수직부재 및 경사부재에서는 각각 0.021 ~ 0.413과 0.074 ~ 0.408로 나타났는데, 이를 통해 외부보다 중앙부의 중요도가 더 높음을 확인할 수 있었으며, 하현부재와 수직부재 그리고 경사부재에서 부재감도지수의 차이가 심하게 나타났다.

Howe Truss의 경우에는 하현부재의 손상하중계수가 0.013 ~ 0.037로 낮게 나타났다. 또한, 상현부재에서는 0.014 ~ 0.431로 중앙부로 갈수록 손상하중계수가 급격히 낮아졌는데 이로 인해 중앙부재로 갈수록 더 취약해짐을 확인할 수 있었다. 그리고 수직부재와 경사부재에서는 각각 0.207 ~ 0.431과 0.074 ~ 0.408로 나타났으며 경사부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수록 하중계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 부재감도지수는 하현부재에서 0.914 ~ 0.97로 부재감도지수가 높게 나타났으며, 상현부재에서는 0 ~ 0.968로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 큰 차이로 감소하였다. 그리고 수직부재의 경우 0 ~ 0.726으로 나타났고, 경사부재의 경우 0.053 ~ 0.828로 하현부재와 같이 외부에서 중앙부로 갈수록 부재의 중요도가 감소하였으며, 외부부재에서 가장 큰 부재감도지수를 나타내었다.

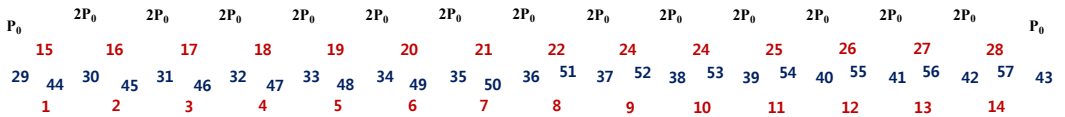
Warren Truss의 경우, 하현부재의 손상하중계수가 0.014 ~ 0.414로 높게 나타났다. 또한, 상현부재의 손상하중계수는 0.013 ~ 0.037로 나타났고, 수직부재는 0.021 ~ 0.414, 경사부재는 0.074 ~ 0.408로 나타났다. 경사부재에서는 Pratt Truss와 Howe Truss의 경우와 마찬가지로 중앙부로 갈수록 하중계수가 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.3 14스팬 평면 트러스의 해석

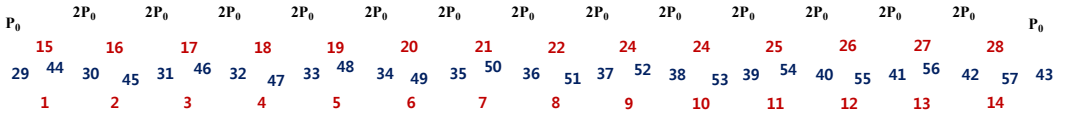
그림 3.3는 14스팬 평면 트러스 해석을 위한 해석모델이다. 구조물의 각 지점을 1. 양단고정, 2.힌지와 롤러 지점으로 설계하였으며, 평면 트러스(Pratt Truss, Howe Truss, Warren Truss)의 종류에 따른 비교를 위하여 동일한 크기와 동일한 하중을 사용하여 해석을 수행하였다.



(a) Pratt Truss



(b) Howe Truss



(C) Warran Truss

그림 3.3 14스팬 평면 트러스

트러스 한 경간의 너비 7m 에 총 14경간으로 구성되어있으며, 높이는 3.5m로 설계하였다. 또한, 그림 3.3(a)에서 보이는 바와 같이 트러스 상부의 각 절점에만 하중을 부여하였으며. (b), (c)에도 동일한 하중을 가하였다. 여기서, P_0(1t = 9.8kN)는 단위하중이다.

표 3.6 14스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수(양단고정)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		Load F.	S.I.	Load F.	S.I.	Load F.	S.I.
Non		0.218	-	0.225	-	0.218	-
하현재	1or14	0.216	0.009	0.223	0.009	0.216	0.009
	2or13	0.218	0	0.225	0	0.218	0
	3or12	0.218	0	0.225	0	0.218	0
	4or11	0.218	0	0.225	0	0.218	0
	5or10	0.218	0	0.225	0	0.218	0
	6or9	0.218	0	0.221	0.018	0.218	0
	7or8	0.214	0.018	0.221	0.018	0.214	0.018
상현재	15or28	0.051	0.766	0.224	0.004	0.051	0.766
	16or27	0.028	0.872	0.061	0.729	0.051	0.766
	17or26	0.02	0.908	0.033	0.853	0.02	0.908
	18or25	0.017	0.922	0.024	0.893	0.02	0.908
	19or24	0.015	0.931	0.02	0.911	0.015	0.931
	20or23	0.014	0.936	0.018	0.92	0.015	0.931
	21or22	0.014	0.936	0.017	0.924	0.014	0.936
수직재	29or43	0.03	0.862	0.207	0.08	0.03	0.862
	30or42	0.067	0.693	0.078	0.653	0.218	0
	31or41	0.079	0.638	0.099	0.56	0.218	0
	32or40	0.097	0.555	0.127	0.436	0.218	0
	33or39	0.125	0.427	0.178	0.209	0.218	0
	34or38	0.175	0.197	0.225	0	0.218	0
	35or37	0.215	0.014	0.222	0.013	0.218	0
	36	0.218	0	0.225	0	0.218	0
경사재	44or57	0.059	0.729	0.06	0.733	0.059	0.729
	45or56	0.079	0.638	0.081	0.64	0.079	0.638
	46or55	0.097	0.555	0.099	0.56	0.097	0.555
	47or54	0.125	0.427	0.127	0.436	0.125	0.427
	48or53	0.175	0.197	0.178	0.209	0.175	0.197
	49or52	0.218	0	0.222	0.013	0.218	0
	50or51	0.215	0.014	0.218	0.031	0.215	0.014

평면 트러스 해석과정에서 각 지점조건을 양단 고정으로 설계하였을 때의 14스팬으로 설계된 Pratt Truss와 Howe Truss 그리고 Warren Truss의 해석수행 결과를 표 3.6에 나타내었다.

양단 고정의 경우, Pratt Truss의 하중계수(Load F.)는 0.218, Howe Truss의 경우에는 0.225 그리고 Warren Truss의 하중계수는 0.218로 Howe Truss가 다른 두 트러스보다 근소하게나마 하중계수가 높게 나타났다.

Pratt Truss의 경우, 하현부재의 손상하중계수는 0.214 ~ 0.218로 높게 나타났으며, 상현부재에서는 0.014 ~ 0.051로 가장 낮게 나타났다. 또한, 수직부재의 경우에는 0.03 ~ 0.218, 경사부재에서는 0.059 ~ 0.218로 위치에 따른 손상하중계수의 차이가 심함을 확인할 수 있었으며, 수직부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수록 손상하중계수가 점점 상승하고 있는 추세를 보였다. 또한, Pratt Truss의 부재감도지수를 살펴보면, 하현부재에서는 0 ~ 0.018로 낮게 나타났으며, 상현부재에서는 0.766 ~ 0.936으로 다른 부분에 비해 더 높은 부재감도지수를 가지는 부재들이 많은 것으로 나타났다. 그리고 수직부재 및 경사부재에서는 각각 0 ~ 0.862와 0 ~ 0.729로 나타났으며, 외부보다 중앙부의 중요도가 더 높음을 확인할 수 있었다.

Howe Truss의 경우에는 Pratt Truss와 마찬가지로 하현부재의 손상하중계수가 0.221 ~ 0.225로 가장 높게 나타났다. 또한, 상현부재에서는 0.017 ~ 0.224로 나타났다. 그리고 수직부재와 경사부재에서는 각각 0.127 ~ 0.225와 0.06 ~ 0.218로 나타났으며 경사부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수록 하중계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 부재감도지수는 하현부재에서 0 ~ 0.018로 나타났으며, 상현부재에서는 0.004 ~ 0.924로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 증가하였다. 그리고 수직부재의 경우 0 ~ 0.653으로 나타났고, 경사부재의 경우 0.013 ~ 0.733으로 상현부재와 같이 외부에서 중앙부로 갈수록 부재의 중요도가 감소하였으며, 외부부재에서 가장 큰 부재감도지수를 나타내었다.

Warren Truss의 경우, 하현부재의 손상하중계수가 0.216 ~ 0.218로 높게 나타났다. 또한, 상현부재의 손상하중계수는 0.014 ~ 0.051로 나타났고, 수직부재는 0.03 ~ 0.218, 경사부재는 0.059 ~ 0.218로 나타났다. 또한, Warren Truss의 부재감도지수를 살펴보면, Pratt Truss와 Howe Truss와 마찬가지로 하현부재의 부재감도지수가 0 ~ 0.018로 가장 낮은 부재중요도를 보이고 있으며, 상현부재의 경우에는 0.766 ~ 0.936으로 나타났다. 그리고 수직재의 경우, 0 ~ 0.862로 나타났는데 외부부재의 경우를 제외한 나머지 부재들은 부재감도지수가 0으로 나타났다. 경사부재의 경우에는 0 ~ 0.729로 다른 두 트러스와 마찬가지로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 낮아짐

을 확인할 수 있었다.

표 3.7 14스팬 평면트러스의 하중계수 및 부재감도지수
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		Load F.	S.I.	Load F.	S.I.	Load F.	S.I.
Non		0.211	-	0.215	-	0.211	-
하현재	1or14	0.211	0	0.026	0.879	0.211	0
	2or13	0.026	0.877	0.014	0.935	0.014	0.934
	3or12	0.014	0.934	0.01	0.953	0.014	0.934
	4or11	0.01	0.953	0.008	0.963	0.008	0.962
	5or10	0.008	0.962	0.007	0.967	0.008	0.962
	6or9	0.007	0.967	0.007	0.967	0.007	0.967
	7or8	0.007	0.967	0.007	0.967	0.007	0.967
상현재	15or28	0.026	0.877	0.215	0	0.026	0.877
	16or27	0.014	0.934	0.026	0.879	0.026	0.877
	17or26	0.01	0.953	0.014	0.935	0.01	0.953
	18or25	0.008	0.962	0.01	0.953	0.01	0.953
	19or24	0.007	0.967	0.008	0.963	0.007	0.967
	20or23	0.007	0.967	0.007	0.967	0.007	0.967
	21or22	0.007	0.967	0.007	0.967	0.007	0.967
수직재	29or43	0.015	0.929	0.207	0.037	0.015	0.929
	30or42	0.064	0.697	0.075	0.651	0.211	0
	31or41	0.075	0.645	0.092	0.572	0.211	0
	32or40	0.092	0.564	0.118	0.451	0.211	0
	33or39	0.118	0.441	0.165	0.233	0.211	0
	34or38	0.165	0.218	0.215	0	0.211	0
	35or37	0.208	0.014	0.213	0.009	0.211	0
	36	0.211	0	0.215	0	0.211	0
경사재	44or57	0.051	0.758	0.051	0.763	0.051	0.758
	45or56	0.075	0.645	0.075	0.651	0.075	0.645
	46or55	0.092	0.564	0.092	0.572	0.092	0.564
	47or54	0.118	0.441	0.118	0.451	0.118	0.441
	48or53	0.165	0.218	0.165	0.233	0.165	0.218
	49or52	0.211	0	0.213	0.009	0.211	0
	50or51	0.208	0.014	0.208	0.033	0.208	0.014

평면 트러스 해석과정에서 각 지점조건을 한단 핀, 한단 롤러로 설계하였을 때의 14 스팬으로 설계된 Pratt Truss와 Howe Truss 그리고 Warren Truss의 해석수행 결과를 표 3.7에 나타내었다.

핀과 롤러지점의 경우, Pratt Truss의 하중계수(Load F.)는 0.211, Howe Truss의 경우에는 0.215 그리고 Warren Truss의 하중계수는 0.211로 나타났다.

Pratt Truss의 경우, 하현부재의 손상하중계수는 0.007 ~ 0.211로 나타났으며, 상현부재에서는 0.007 ~ 0.026으로 나타났다. 또한, 수직부재의 경우에는 0.015 ~ 0.211, 경사부재에서는 0.051 ~ 0.211로 나타났으며, 수직부재와 경사부재에서는 외부에서 중앙부로 갈수록 손상하중계수가 점점 증가하고 있는 추세를 보였다. 또한, Pratt Truss의 부재감도지수를 살펴보면, 하현부재에서는 0 ~ 0.967로 나타났으며, 상현부재에서는 0.877 ~ 0.967로 나타났다. 그리고 수직부재 및 경사부재에서는 각각 0 ~ 0.929와 0 ~ 0.758로 나타났는데, 이를 통해 외부보다 중앙부의 중요도가 더 높음을 확인할 수 있었다.

Howe Truss의 경우에는 하현부재의 손상하중계수가 0.007 ~ 0.026으로 하중계수가 다른 부재들에 비해 가장 낮게 나타났다. 또한, 상현부재에서는 0.01 ~ 0.215로 나타났으다. 수직부재와 경사부재에서는 각각 0.075 ~ 0.215와 0.051 ~ 0.213으로 나타났다. 또한, 부재감도지수는 하현부재에서 0.879 ~ 0.967로 중요도가 높게 나타났다. 상현부재에서는 0 ~ 0.967로 외부에서 중앙부로 갈수록 그 중요도가 증가하였다. 반면에 수직부재의 경우 상현부재와 달리 0 ~ 0.651로 나타났으며, 경사부재에서도 0.009 ~ 0.763으로 외부에서 중앙부로 갈수록 부재의 중요도가 감소하였으며, 외부부재에서 가장 큰 부재감도지수를 나타내었다.

Warren Truss의 경우, 하현부재의 손상하중계수가 0.007 ~ 0.211로 나타났으며, 상현부재의 손상하중계수는 0.007 ~ 0.026으로 나타났다. 그리고 수직부재는 0.015 ~ 0.211, 경사부재는 0.051 ~ 0.211로 나타났다. 또한, Warren Truss의 부재감도지수를 살펴보면, Pratt Truss와 마찬가지로 하현재의 부재감도지수가 0 ~ 0.967로 외부부재와 그 외의 부재의 중요도 차이가 가장 심하게 나타났고, 상현부재의 경우에는 0.877 ~ 0.967로 중요도의 폭이 가장 작게 나타났다. 그리고 수직부재의 경우, 0 ~ 0.929로 나타났는데, 특히 부재감도지수가 0인 부재가 외부부재 그 외의 다른 부재에서 모두 나타났다. 경사부재의 경우에는 0 ~ 0.758로 다른 두 트러스와 마찬가지로 외부에서

중앙부로 갈수록 그 중요도가 감소함을 확인할 수 있었다.

3.3 평면 트러스 보강방법 및 보강 후 하중지지능력

부재감도지수(S.I.)에 따라 보강순서를 정한 후, 그림 3.4와 같이 원형강관에 스틸자켓(Steel Jacket)을 설치함으로써 부재의 단면적 및 전소성모멘트를 증가시켰으며, 각 부재의 크기에 따른 두께의 1/2을 스틸자켓의 두께로 설정하여 보강하였다. 또한, 스틸자켓을 연결시키기 위한 연결부와 볼트에 의한 영향은 없는 것으로 가정하였으며, 원형강관과 스틸자켓 사이의 마찰은 없는 것으로 가정하여 스틸자켓으로 보강 되었을 경우에 원형강관과 일체화된 것으로 가정하였다.

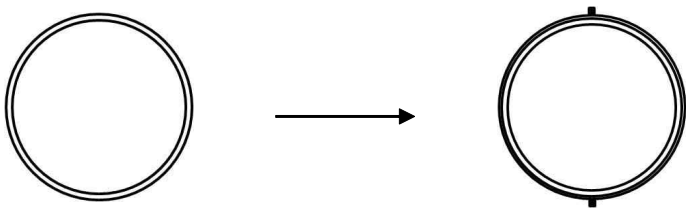


그림 3.4 원형강관의 보강방법

3.3.1 8스팬 평면 트러스의 보강 후 하중지지능력

가. 양단 고정 지점일 경우 하중지지능력

지점조건이 양단 고정일 경우, 8스팬 평면트러스의 부재감도지수와 그에 따른 보강순서를 표 3.8과 같이 나타내었다. 부재감도지수가 가장 높은 순서(중요부재임을 시사)로 보강순서부터 구성하였으며, 부재감도지수가 높은 보강순서 '1'부터 부재에 스틸자켓을 설치하여 각 부재의 단면적과 전소성모멘트를 증가시켰으며, 최종적으로 부재감도지수가 가장 낮은 부재에 스틸자켓을 설치함으로써 부재감도지수에 따른 보강은 종료가 된다.

모든 부재를 보강하여 해석이 완료되면, 부재감도지수에서 도출되는 중요부재를 순차적으로 보강함에 따라 도출되는 하중계수와 모든 부재를 보강한 후의 하중계수와의

비교를 통하여 중요부재를 판별하여 보강하는 것이 하중지지능력 향상에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

표 3.8 부재감도지수에 따른 8스팬 평면트러스의 보강순서
(양단 고정일 경우)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		S.I.	보강 순서	S.I.	보강 순서	S.I.	보강 순서
하현재	1 or 8	0.01	13	0.013	11	0.011	12
	2 or 7	0	14	0	13	0	13
	3 or 6	0	14	0.019	10	0.018	11
	4 or 5	0.019	11	0.019	10	0.08	9
상현재	9 or 16	0.858	5	0.008	12	0.866	3
	10 or 15	0.918	4	0.843	3	0.866	3
	11 or 14	0.934	2	0.908	2	0.938	1
	12 or 13	0.937	1	0.926	1	0.938	1
수직재	17 or 25	0.921	3	0.714	6	0.925	2
	18 or 24	0.807	7	0.754	4	0.422	8
	19 or 23	0.729	8	0.567	7	0.000	13
	20 or 22	0.549	9	0.038	9	0.423	7
	21	0.384	10	0	13	0	13
경사재	26 or 33	0.834	6	0.843	3	0.844	4
	27 or 32	0.729	8	0.74	5	0.745	5
	28 or 31	0.549	9	0.567	7	0.577	6
	29 or 30	0.012	12	0.074	8	0.073	10

그림 3.5는 평면트러스의 지점 조건이 양단 모두 고정일 경우, Pratt Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Pratt Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 12번, 13번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 12%만을 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순

서 2번과 보강순서 3번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 63%와 64% 이상의 하중지지능력을 확보할 수 있었으며, 보강순서 4번까지 보강을 실시하여 약 94% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 13번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

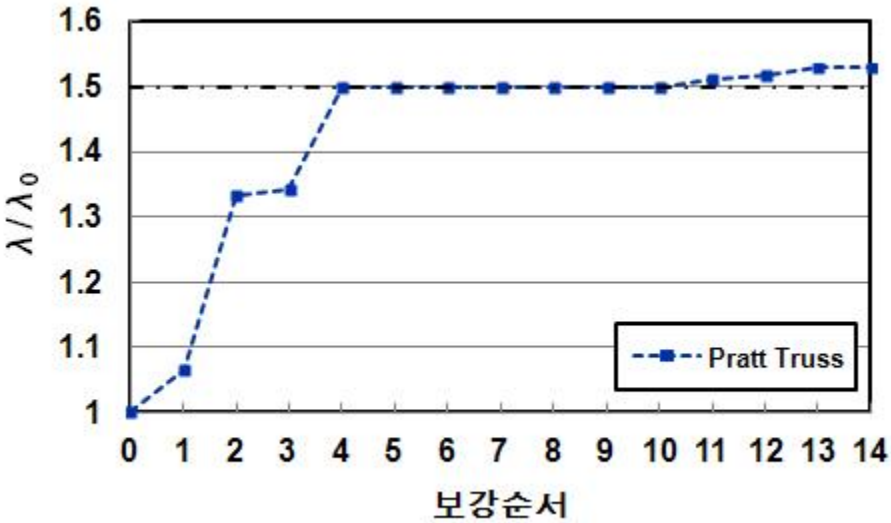


그림 3.5 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우)

그림 3.6은 평면트러스의 지점 조건이 양단 모두 고정일 경우, Howe Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Howe Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 12번, 13번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 47% 정도 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 92% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 11번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과

와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

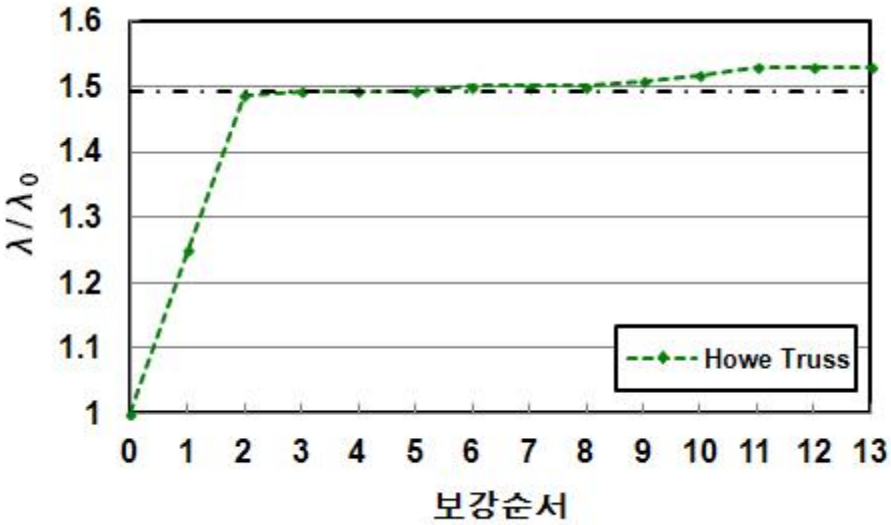


그림 3.6 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우)

그림 3.7은 평면트러스의 지점 조건이 양단 모두 고정일 경우, Warren Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Warren Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 11번, 12번, 13번, 14번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 93% 를 확보할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 12번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

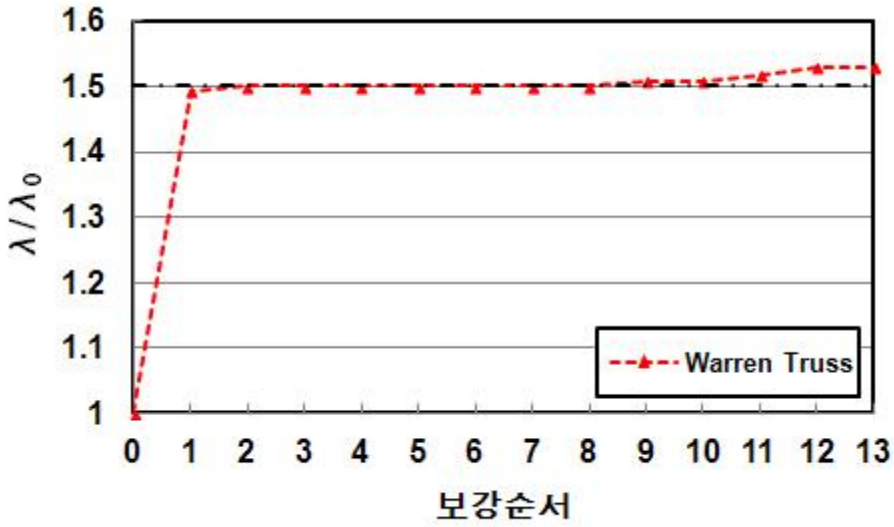


그림 3.7 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우)

나. 한단 핀 한단 롤러 지점일 경우 하중지지능력

지점조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, 8스팬 평면트러스의 부재감도지수와 그에 따른 보강순서를 표 3.9와 같이 나타내었다. 부재감도지수가 가장 높은 순서(중요부재임을 시사)부터 보강순서를 구성하였으며, 부재감도지수가 높은 보강순서 '1'부터 부재에 스틸자켓을 설치하여 각 부재의 단면적과 전소성모멘트를 증가시켰으며, 최종적으로 부재감도지수가 가장 낮은 부재에 스틸자켓을 설치함으로써 부재감도지수에 따른 보강은 종료가 된다.

모든 부재를 보강하여 해석이 완료되면, 부재감도지수에서 도출되는 중요부재를 순차적으로 보강함에 따라 도출되는 하중계수와 모든 부재를 보강한 후의 하중계수와의 비교를 통하여 중요부재를 판별하여 보강하는 것이 하중지지능력 향상에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

표 3.9 부재감도지수에 따른 8스팬 평면트러스의 보강순서
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		S.I.	보강순서	S.I.	보강순서	S.I.	보강순서
하현재	1 or 8	0	13	0.93	4	0	12
	2 or 7	0.926	5	0.959	3	0.959	4
	3 or 6	0.957	4	0.968	2	0.959	4
	4 or 5	0.966	2	0.97	1	0.97	1
상현재	9 or 16	0.926	5	0	12	0.93	5
	10 or 15	0.957	4	0.93	4	0.93	5
	11 or 14	0.966	2	0.959	3	0.968	2
	12 or 13	0.967	1	0.968	2	0.968	2
수직재	17 or 25	0.96	3	0.701	7	0.962	3
	18 or 24	0.819	7	0.762	6	0.403	10
	19 or 23	0.746	8	0.602	9	0	12
	20 or 22	0.576	10	0.036	11	0.405	9
	21	0.364	11	0	12	0	12
경사재	26 or 33	0.853	6	0.862	5	0.862	6
	27 or 32	0.746	8	0.762	6	0.762	7
	28 or 31	0.577	9	0.604	8	0.604	8
	29 or 30	0.012	12	0.074	10	0.074	11

그림 3.8은 평면트러스의 지점 조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, Pratt Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Pratt Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 12번, 13번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 12%만을 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 63% 이상의 하중지지능력을 확보할 수 있었으며, 보강순서 4번까지 보강을 실시하여 약 98% 이

상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 12번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

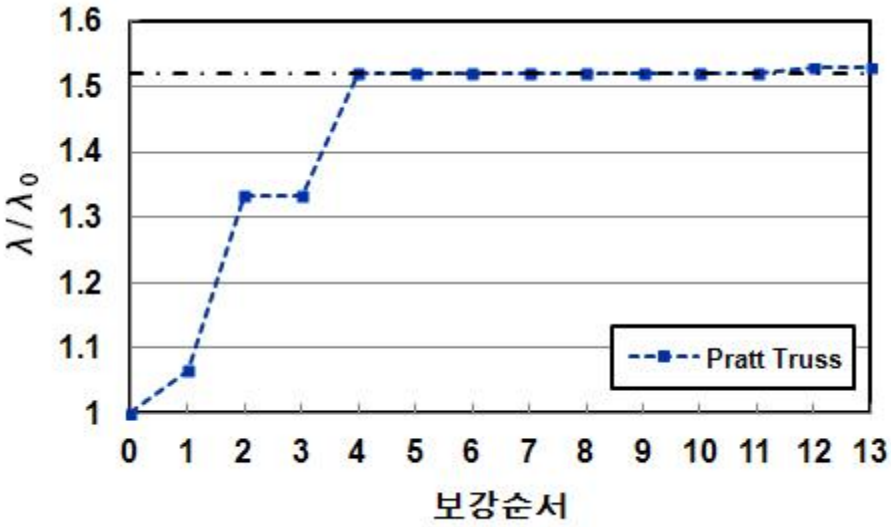


그림 3.8 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

그림 3.9는 평면트러스의 지점 조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, Howe Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Howe Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 하현재의 4번, 5번 부재를 보강하였을 경우, 하중지지능력의 변동은 없었지만, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 47% 정도의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 보강순서 3번까지의 보강을 실시하여 약 98% 이상의 하중지지능력을 확보할 수 있었으며, 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 11번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

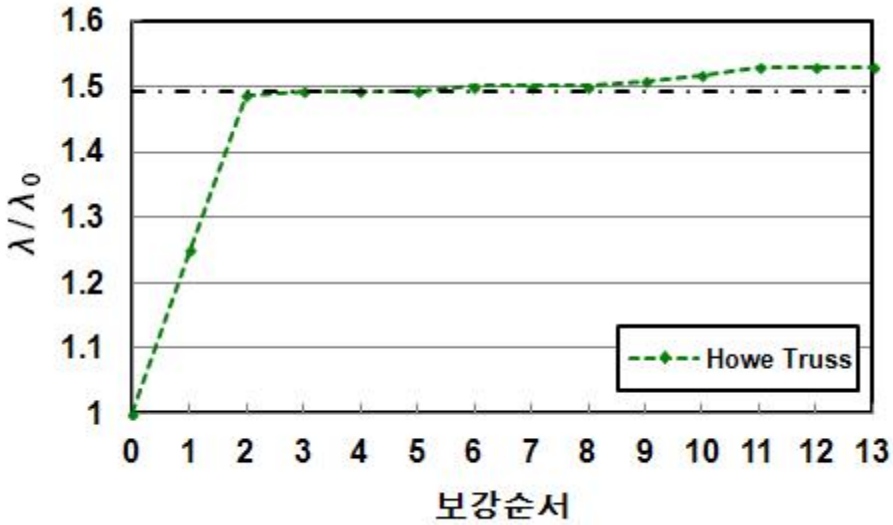


그림 3.9 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

그림 3.10은 평면트러스의 지점 조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, Warren Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Warren Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 하현재의 4번, 5번 부재를 보강하였을 경우, 하중지지능력의 변동은 없었지만, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 96% 정도의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 11번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

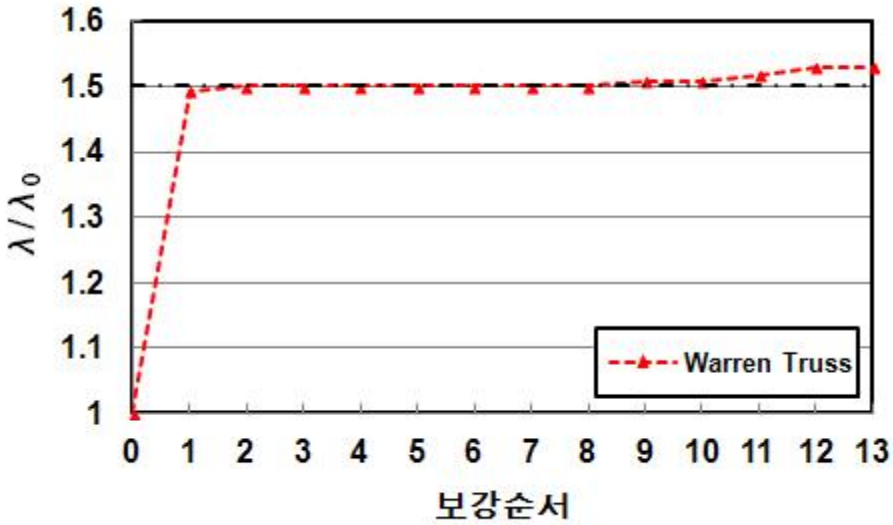


그림 3.10 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

3.3.2 10스팬 평면 트러스의 보강 후 하중지지능력

가. 양단 고정 지점일 경우 하중지지능력

지점조건이 양단 고정일 경우, 10스팬 평면트러스의 부재감도지수와 그에 따른 보강순서를 표 3.10과 같이 나타내었다. 부재감도지수가 가장 높은 순서(중요부재임을 시사)로 보강순서부터 구성하였으며, 부재감도지수가 높은 보강순서 '1'부터 부재에 스틸자켓을 설치하여 각 부재의 단면적과 전소성모멘트를 증가시켰으며, 최종적으로 부재감도지수가 가장 낮은 부재에 스틸자켓을 설치함으로써 부재감도지수에 따른 보강은 종료가 된다.

모든 부재를 보강하여 해석이 완료되면, 부재감도지수에서 도출되는 중요부재를 순차적으로 보강함에 따라 도출되는 하중계수와 모든 부재를 보강한 후의 하중계수와의 비교를 통하여 중요부재를 판별하여 보강하는 것이 하중지지능력 향상에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

표 3.10 부재감도지수에 따른 10스팬 평면트러스의 보강순서
(양단 고정일 경우)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		S.I.	보강순서	S.I.	보강순서	S.I.	보강순서
하현재	1or10	0.009	18	0.011	14	0.009	12
	2or9	0	19	0	16	0	13
	3or8	0	19	0	16	0	13
	4or7	0	19	0.018	13	0	13
	5or6	0.019	16	0.018	13	0.019	10
상현재	11or20	0.827	6	0.007	15	0.827	4
	12or19	0.902	4	0.802	5	0.827	4
	13or18	0.925	3	0.889	3	0.925	2
	14or17	0.934	2	0.916	2	0.925	2
	15or16	0.937	1	0.927	1	0.937	1
수직재	21or31	0.899	5	0.54	9	0.899	3
	22or30	0.768	8	0.722	6	0.033	9
	23or29	0.7	10	0.591	8	0	13
	24or28	0.581	12	0.32	10	0.033	9
	25or27	0.302	14	0.036	12	0	13
	26	0.033	15	0	16	0.033	9
경사재	32or41	0.799	7	0.807	4	0.799	5
	33or40	0.703	9	0.709	7	0.703	6
	34or39	0.583	11	0.591	8	0.583	7
	35or38	0.304	13	0.32	10	0.304	8
	36or37	0.012	17	0.051	11	0.012	11

그림 3.11은 평면트러스의 지점 조건이 양단 모두 고정일 경우, Pratt Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Pratt Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 15번, 16번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 8%만을 확보할 수 있었으며, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 36% 정도의 하중지

지능력을 확보할 수 있었다. 하지만 보강순서 3번까지 보강을 실시하여 약 93% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 18번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

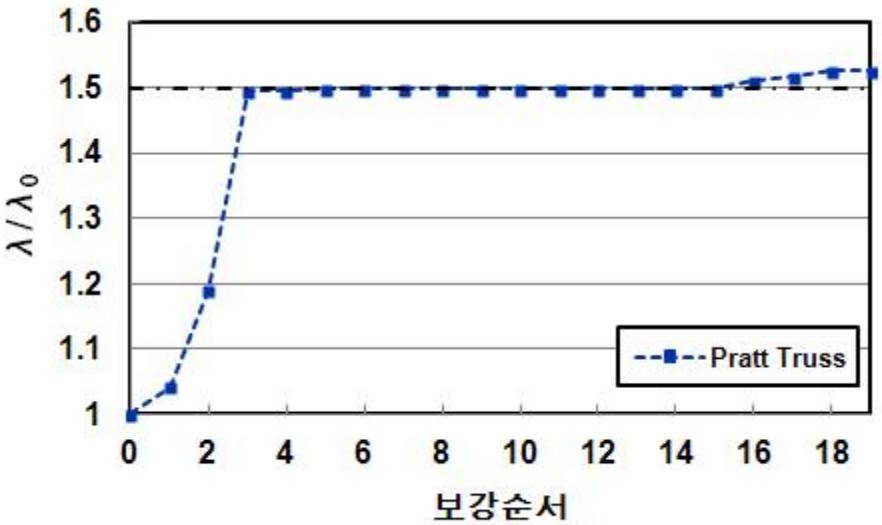


그림 3.11 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우)

그림 3.12는 평면트러스의 지점 조건이 양단 모두 고정일 경우, Howe Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Howe Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 15번, 16번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 26% 정도 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 92% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 14번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

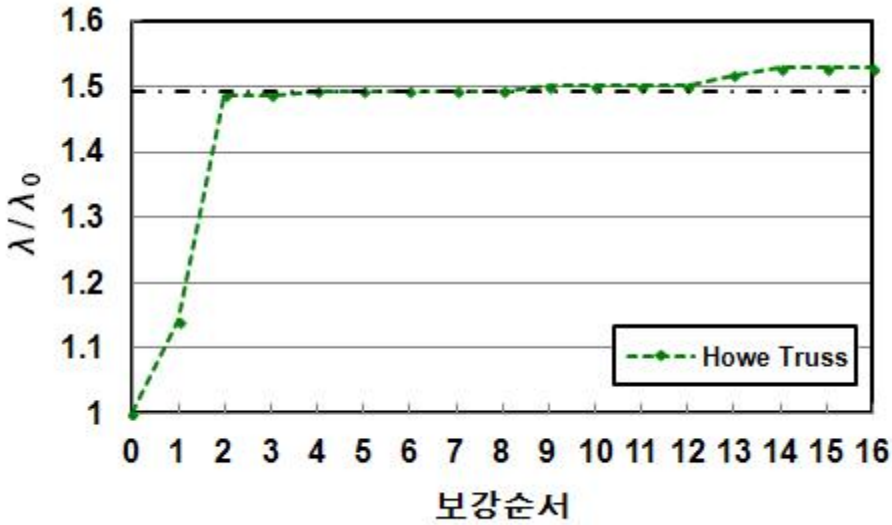


그림 3.12 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우)

그림 3.13은 평면트러스의 지점 조건이 양단 모두 고정일 경우, Warren Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Warren Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 15번, 16번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 36% 정도 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 93% 이상을 확보할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 12번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

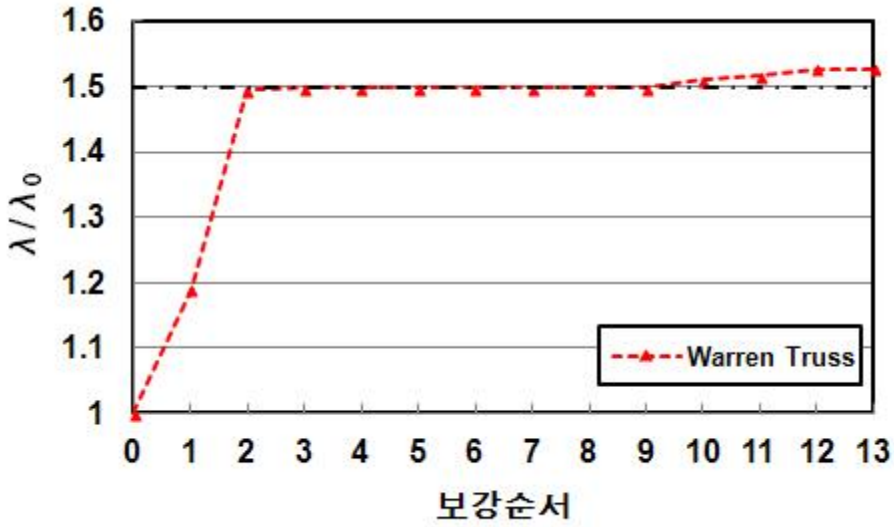


그림 3.13 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우)

나. 한단 핀 한단 롤러 지점일 경우 하중지지능력

지점조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, 10스팬 평면트러스의 부재감도지수와 그에 따른 보강순서를 표 3.11과 같이 나타내었다. 부재감도지수가 가장 높은 순서(중요부재임을 시사)부터 보강순서를 구성하였으며, 부재감도지수가 높은 보강순서 '1'부터 부재에 스틸자켓을 설치하여 각 부재의 단면적과 전소성모멘트를 증가시켰으며, 최종적으로 부재감도지수가 가장 낮은 부재에 스틸자켓을 설치함으로써 부재감도지수에 따른 보강은 종료가 된다.

모든 부재를 보강하여 해석이 완료되면, 부재감도지수에서 도출되는 중요부재를 순차적으로 보강함에 따라 도출되는 하중계수와 모든 부재를 보강한 후의 하중계수와의 비교를 통하여 중요부재를 판별하여 보강하는 것이 하중지지능력 향상에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

표 3.11 부재감도지수에 따른 10스팬 평면트러스의 보강순서
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		S.I.	보강 순서	S.I.	보강 순서	S.I.	보강 순서
하현재	1or10	0	13	0.914	5	0	12
	2or9	0.911	5	0.951	4	0.949	4
	3or8	0.949	4	0.963	3	0.949	4
	4or7	0.961	3	0.968	2	0.966	2
	5or6	0.966	2	0.97	1	0.966	2
상현재	11or20	0.911	5	0	13	0.911	5
	12or19	0.949	4	0.914	5	0.911	5
	13or18	0.961	3	0.951	4	0.961	3
	14or17	0.966	2	0.963	3	0.961	3
	15or16	0.969	1	0.968	2	0.969	1
수직재	21or31	0.949	4	0.52	9	0.949	4
	22or30	0.778	7	0.726	7	0.002	11
	23or29	0.715	8	0.617	8	0	12
	24or28	0.601	9	0.362	10	0.002	11
	25or27	0.336	10	0.014	12	0	12
	26	0.002	12	0	13	0.002	11
경사재	32or41	0.821	6	0.828	6	0.821	6
	33or40	0.715	8	0.726	7	0.715	7
	34or39	0.601	9	0.617	8	0.601	8
	35or38	0.336	10	0.362	10	0.336	9
	36or37	0.014	11	0.053	11	0.014	10

그림 3.14는 평면트러스의 지점 조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, Pratt Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Pratt Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 15번, 16번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 7%만을 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순서

2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 35% 이상의 하중지지능력을 확보할 수 있었으며, 보강순서 3번까지 보강을 실시하여 약 98% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 11번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

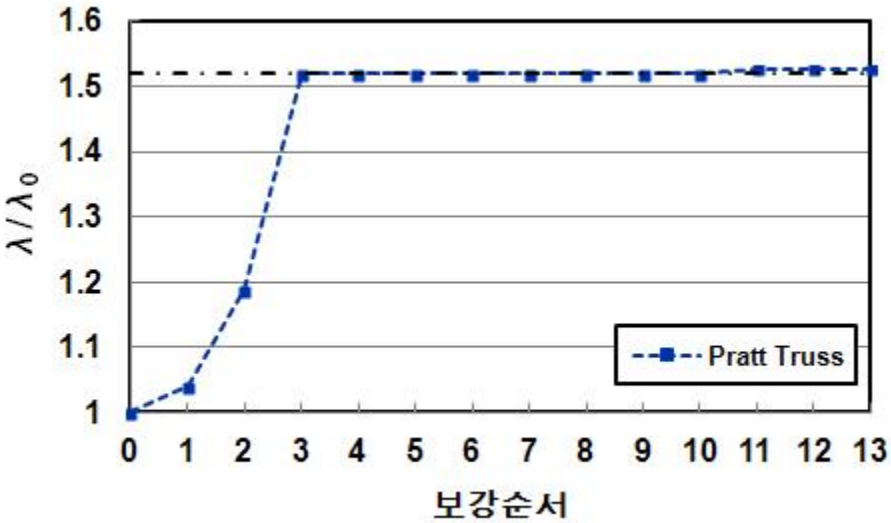


그림 3.14 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

그림 3.15는 평면트러스의 지점 조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, Howe Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Howe Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 하현재의 5번, 6번 부재를 보강하였을 경우, 하중지지능력의 변동은 없었지만, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 26% 정도의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 보강순서 3번까지의 보강을 실시하여 약 98% 이상의 하중지지능력을 확보할

수 있었으며, 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 12번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

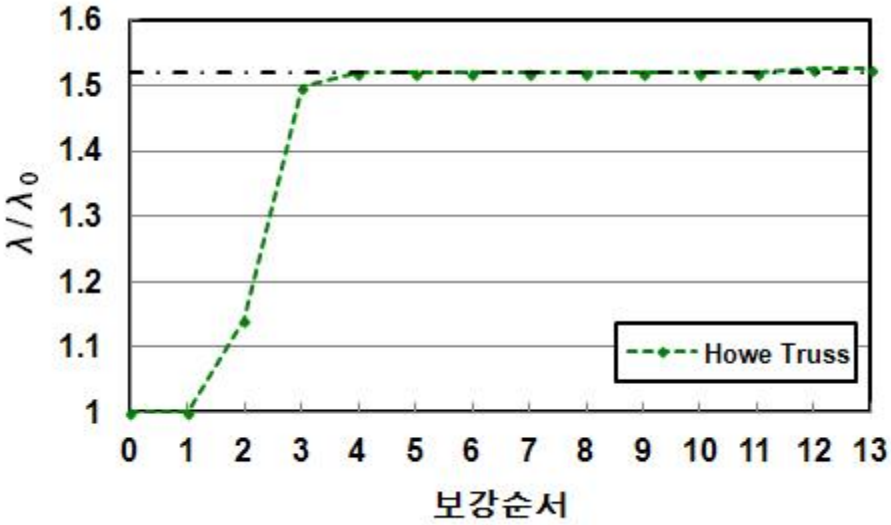


그림 3.15 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

그림 3.16은 평면트러스의 지점 조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, Warren Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Warren Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 15번, 16번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 35%만을 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순서 3번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 98% 이상의 하중지지능력을 확보할 수 있었으며, 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 10번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

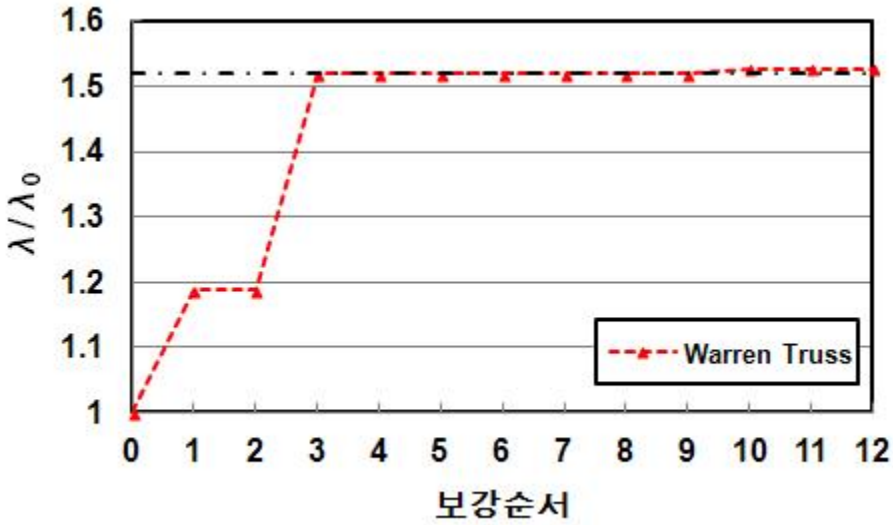


그림 3.16 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

3.3.3 14스팬 평면 트러스의 보강 후 하중지지능력

가. 양단 고정 지점일 경우 하중지지능력

지점조건이 양단 고정일 경우, 14스팬 평면트러스의 부재감도지수와 그에 따른 보강순서를 표 3.12와 같이 나타내었다. 부재감도지수가 가장 높은 순서(중요부재임을 시사)로 보강순서부터 구성하였으며, 부재감도지수가 높은 보강순서 '1'부터 부재에 스틸자켓을 설치하여 각 부재의 단면적과 전소성모멘트를 증가시켰으며, 최종적으로 부재감도지수가 가장 낮은 부재에 스틸자켓을 설치함으로써 부재감도지수에 따른 보강은 종료가 된다.

모든 부재를 보강하여 해석이 완료되면, 부재감도지수에서 도출되는 중요부재를 순차적으로 보강함에 따라 도출되는 하중계수와 모든 부재를 보강한 후의 하중계수와의 비교를 통하여 중요부재를 판별하여 보강하는 것이 하중지지능력 향상에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

표 3.12 부재감도지수에 따른 14스팬 평면트러스의 보강순서
(양단 고정일 경우)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		S.I.	보강 순서	S.I.	보강 순서	S.I.	보강 순서
하현재	1or14	0.009	16	0.009	17	0.009	13
	2or13	0	17	0	19	0	14
	3or12	0	17	0	19	0	14
	4or11	0	17	0	19	0	14
	5or10	0	17	0	19	0	14
	6or9	0	17	0.018	15	0	14
	7or8	0.018	14	0.018	15	0.018	11
상현재	15or28	0.766	7	0.004	18	0.766	5
	16or27	0.872	5	0.729	7	0.766	5
	17or26	0.908	4	0.853	5	0.908	3
	18or25	0.922	3	0.893	4	0.908	3
	19or24	0.931	2	0.911	3	0.931	2
	20or23	0.936	1	0.92	2	0.931	2
	21or22	0.936	1	0.924	1	0.936	1
수직재	29or43	0.862	6	0.08	13	0.862	4
	30or42	0.693	9	0.653	8	0	14
	31or41	0.638	10	0.56	10	0	14
	32or40	0.555	11	0.436	11	0	14
	33or39	0.427	12	0.209	12	0	14
	34or38	0.197	13	0	19	0	14
	35or37	0.014	15	0.013	16	0	14
	36	0	17	0	19	0	14
경사재	44or57	0.729	8	0.733	6	0.729	6
	45or56	0.638	10	0.64	9	0.638	7
	46or55	0.555	11	0.56	10	0.555	8
	47or54	0.427	12	0.436	11	0.427	9
	48or53	0.197	13	0.209	12	0.197	10
	49or52	0	17	0.013	16	0	14
	50or51	0.014	15	0.031	14	0.014	12

그림 3.17은 평면트러스의 지점 조건이 양단 모두 고정일 경우, Pratt Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로

평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Pratt Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 20번, 21번, 22번, 23번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 16%만을 확보할 수 있었으며, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 42% 정도의 하중지지능력을 확보할 수 있었다. 하지만 보강순서 3번까지 보강을 실시하여 약 91% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 16번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

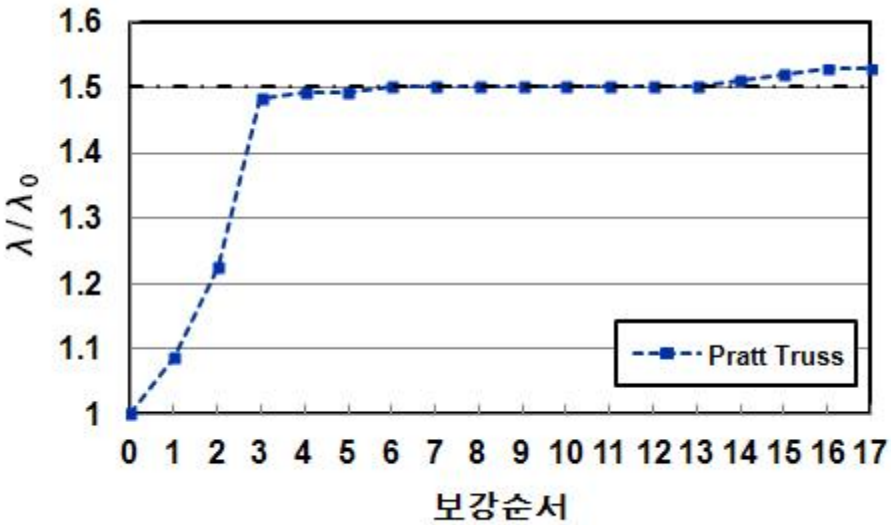


그림 3.17 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우)

그림 3.18은 평면트러스의 지점 조건이 양단 모두 고정일 경우, Howe Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Howe Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 21번, 22번 부재를 보강하였을 경우, 전

부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 12% 정도 확보할 수 있었으며, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 37% 정도의 하중지지능력을 확보할 수 있었다.하지만, 보강순서 4번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 92% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 17번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

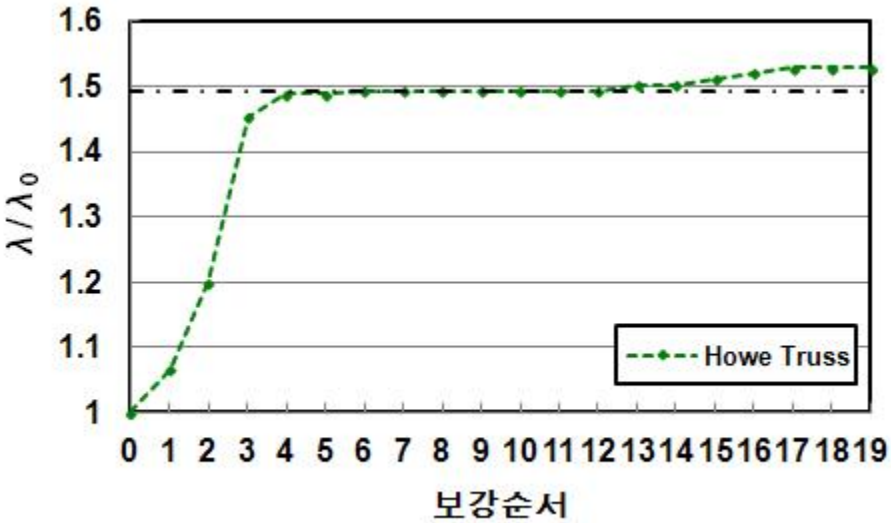


그림 3.18 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우)

그림 3.19는 평면트러스의 지점 조건이 양단 모두 고정일 경우, Warren Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Warren Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 21번, 22번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 16% 정도 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 91% 이상을 확보할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 13번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있

었다.

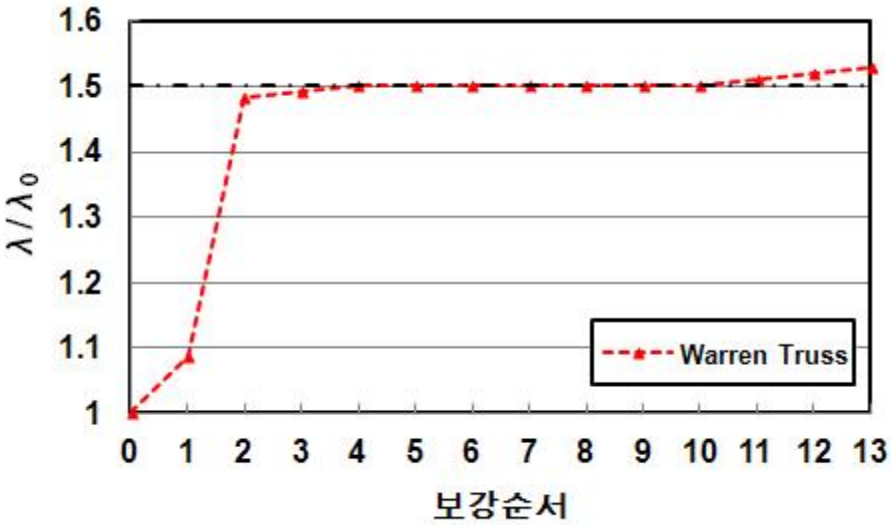


그림 3.19 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력(양단 고정일 경우)

나. 한단 핀 한단 롤러 지점일 경우 하중지지능력

지점조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, 14스팬 평면트러스의 부재감도지수와 그에 따른 보강순서를 표 3.13과 같이 나타내었다. 부재감도지수가 가장 높은 순서(중요부재임을 시사)부터 보강순서를 구성하였으며, 부재감도지수가 높은 보강순서 '1'부터 부재에 스틸자켓을 설치하여 각 부재의 단면적과 전소성모멘트를 증가시켰으며, 최종적으로 부재감도지수가 가장 낮은 부재에 스틸자켓을 설치함으로써 부재감도지수에 따른 보강은 종료가 된다.

모든 부재를 보강하여 해석이 완료되면, 부재감도지수에서 도출되는 중요부재를 순차적으로 보강함에 따라 도출되는 하중계수와 모든 부재를 보강한 후의 하중계수와의 비교를 통하여 중요부재를 판별하여 보강하는 것이 하중지지능력 향상에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

표 3.13 부재감도지수에 따른 14스팬 평면트러스의 보강순서
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

Disappearance Member		Pratt Truss		Howe Truss		Warren Truss	
		S.I.	보강 순서	S.I.	보강 순서	S.I.	보강 순서
하현재	1or14	0	14	0.879	5	0	13
	2or13	0.877	6	0.935	4	0.934	4
	3or12	0.934	4	0.953	3	0.934	4
	4or11	0.953	3	0.963	2	0.962	2
	5or10	0.962	2	0.967	1	0.962	2
	6or9	0.967	1	0.967	1	0.967	1
	7or8	0.967	1	0.967	1	0.967	1
상현재	15or28	0.877	6	0	14	0.877	6
	16or27	0.934	4	0.879	5	0.877	6
	17or26	0.953	3	0.935	4	0.953	3
	18or25	0.962	2	0.953	3	0.953	3
	19or24	0.967	1	0.963	2	0.967	1
	20or23	0.967	1	0.967	1	0.967	1
	21or22	0.967	1	0.967	1	0.967	1
수직재	29or43	0.929	5	0.037	11	0.929	5
	30or42	0.697	8	0.651	7	0	13
	31or41	0.645	9	0.572	8	0	13
	32or40	0.564	10	0.451	9	0	13
	33or39	0.441	11	0.233	10	0	13
	34or38	0.218	12	0	14	0	13
	35or37	0.014	13	0.009	13	0	13
	36	0	14	0	14	0	13
경사재	44or57	0.758	7	0.763	6	0.758	7
	45or56	0.645	9	0.651	7	0.645	8
	46or55	0.564	10	0.572	8	0.564	9
	47or54	0.441	11	0.451	9	0.441	10
	48or53	0.218	12	0.233	10	0.218	11
	49or52	0	14	0.009	13	0	13
	50or51	0.014	13	0.033	12	0.014	12

그림 3.20은 평면트러스의 지점 조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, Pratt Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력

을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Pratt Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 상현재의 19번, 20번, 21번, 22번, 23번, 24번 부재와 하현재의 6번, 7번, 8번, 9번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 42%정도를 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 91% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 13번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

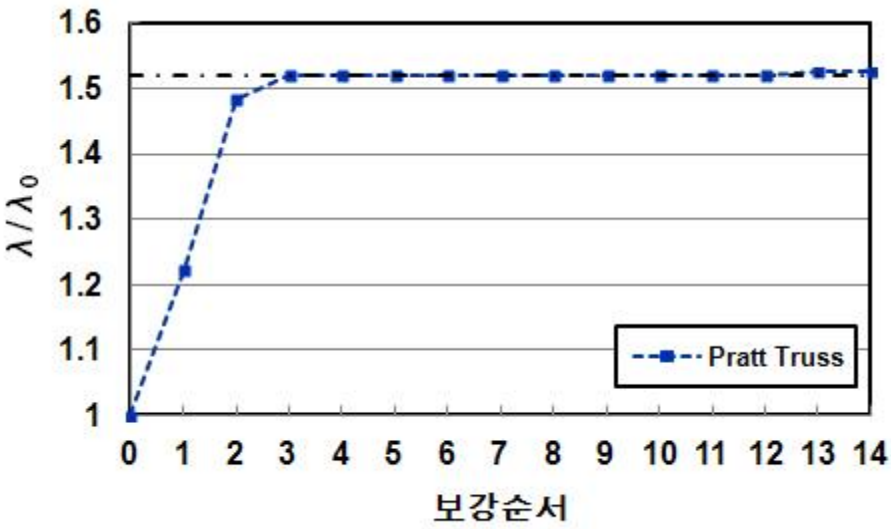


그림 3.20 보강순서에 따른 Pratt Truss의 하중지지능력
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

그림 3.21은 평면트러스의 지점 조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, Howe Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Howe Truss의 하중지지능력을 1로

나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 하현재의 5번, 6번, 7번, 8번, 9번, 10번 부재와 상현재의 20번, 21번, 22번, 23번 부재를 보강하였을 경우, 하중지지능력은 약 38%정도의 하중지지능력만을 확보하였으며, 보강순서 2번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 85% 정도의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 보강순서 3번까지의 보강을 실시하여 약 99% 이상의 하중지지능력을 확보할 수 있었으며, 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 13번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

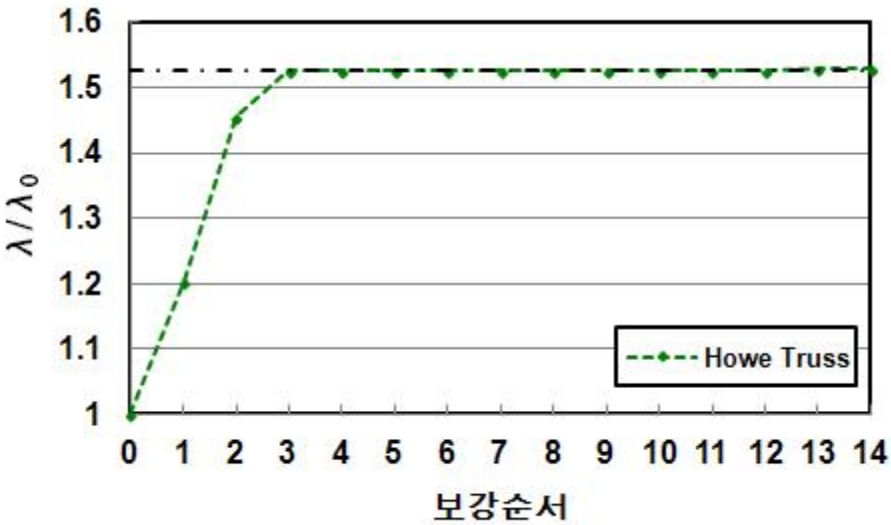


그림 3.21 보강순서에 따른 Howe Truss의 하중지지능력
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

그림 3.22는 평면트러스의 지점 조건이 한단 핀과 한단 롤러지점일 경우, Warren Truss의 보강순서에 따른 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 트러스의 하중지지능력을 정량적으로 평가하기 위해 보강을 시작하기 전의 Warren Truss의 하중지지능력을 1로 나타내었으며, 전 부재를 보강하였을 때에는 약 1.53의 하중지지능력을 나타내었

다.

부재감도지수가 가장 높은 부재인 하현재의 6번, 7번, 8번, 9번 부재와 상현재의 19번, 20번, 21번, 22번, 23번, 24번 부재를 보강하였을 경우, 전 부재를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 91% 정도를 확보할 수 있었다. 하지만, 보강순서 3번까지 보강을 실시하여 부재 전체를 보강하였을 때 하중지지능력의 약 99% 이상의 하중지지능력을 확보할 수 있었으며, 그 후 유사한 하중지지능력을 확보하다가 보강순서 12번의 부재들까지 보강을 실시하였을 때 전체 부재를 보강한 효과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

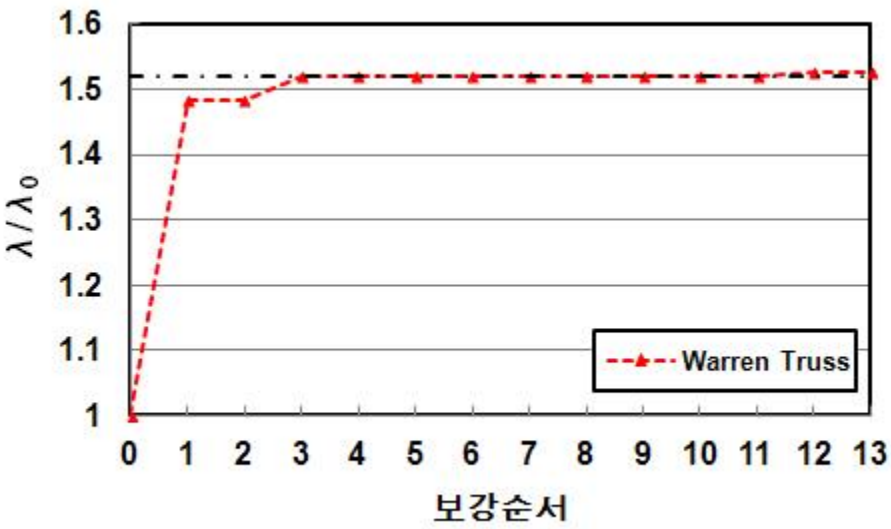
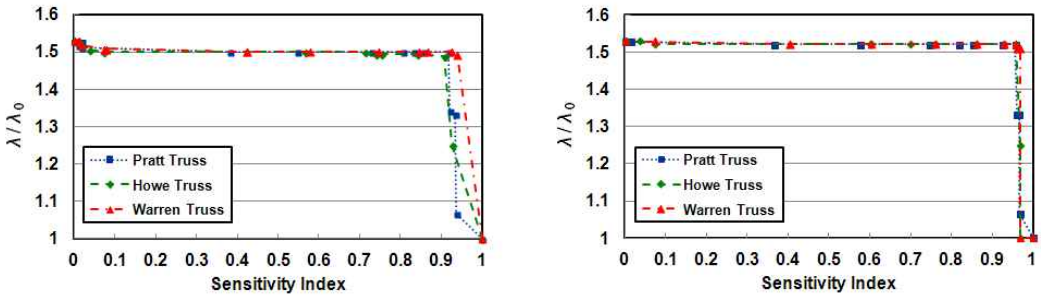


그림 3.22 보강순서에 따른 Warren Truss의 하중지지능력
(한단 핀, 한단 롤러지점일 경우)

3.4 평면 트러스의 하중지지능력 평가

부재감도지수(S.I.)에 따라 보강순서를 정한 후, 보강을 실시하여 하중지지능력의 향상에 미치는 영향을 평가하였다. 본 장에서는 이러한 부재감도지수에 따른 중요부재를 판별하여 어느정도 보강하는 것이 구조물의 하중지지능력 향상에 큰 영향을 미치는지에 대해서 살펴보았다.

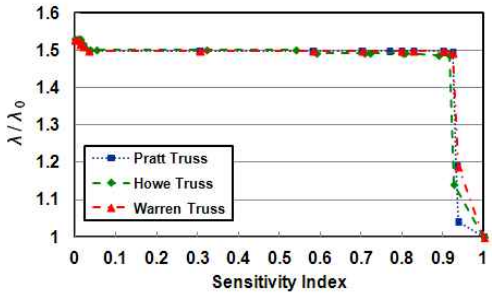
그림 3.23은 8스팬으로 된 평면트러스의 부재감도지수와 하중지지능력의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림 3.23(a)는 양단고정의 경우로, 부재감도지수가 0.9 ~ 1.0 사이에 있는 부재들을 보강하여 부재 전체를 보강하였을 경우의 약 90% 이상의 하중지지능력을 확보하였으며, 한단 핀과 한단 롤러로 지지된 그림 3.23(b)에서는 부재감도지수가 0.95 ~ 1.0 사이에 있는 부재들을 보강하여 부재 전체를 보강하였을 경우와 유사한 하중지지능력을 확보할 수 있었다.



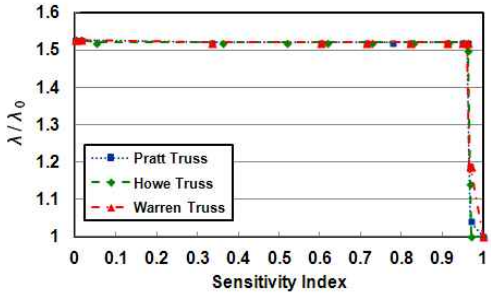
(a) 양단고정 (b) 한단 핀, 한단 롤러

그림 3.23 8스팬 평면트러스의 부재감도지수와 하중지지능력

또한, 그림 3.24는 10스팬으로 된 평면트러스의 부재감도지수와 하중지지능력의 관계를 나타낸 그래프이며, 8스팬의 평면트러스와 유사한 결과값을 나타내고 있다. 그림 3.24(a)는 양단고정의 경우로, 부재감도지수가 0.9 ~ 1.0 사이에 있는 부재들을 보강하여 부재 전체를 보강하였을 경우의 약 85 ~ 90% 이상의 하중지지능력을 확보하였으며, 한단 핀과 한단 롤러로 지지된 그림 3.24(b)에서는 부재감도지수가 0.95 ~ 1.0 사이에 있는 부재들을 보강하여 부재 전체를 보강하였을 경우와 유사한 하중지지능력을 확보할 수 있었다.



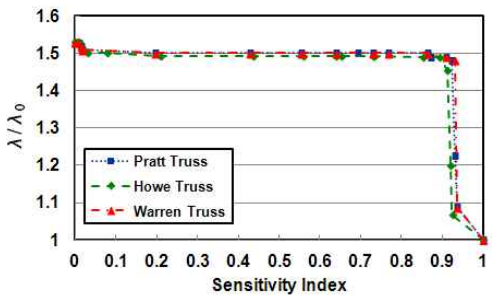
(a) 양단고정



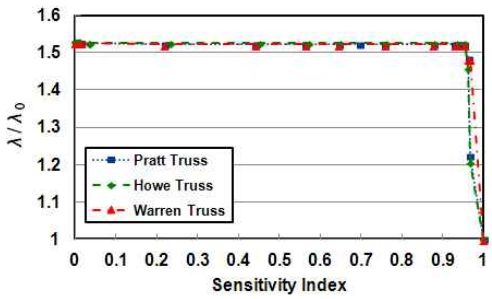
(b) 한단 핀, 한단 롤러

그림 3.24 10스팬 평면트러스의 부재감도지수와 하중지지능력

그리고, 그림 3.25는 14스팬으로 된 평면트러스의 부재감도지수와 하중지지능력의 관계를 나타낸 그래프이며, 8스팬, 10스팬의 평면트러스와 유사한 결과값을 나타내고 있다. 그림 3.25(a)는 양단고정의 경우로, 부재감도지수가 0.9 ~ 1.0사이에 있는 부재들을 보강하여 부재 전체를 보강하였을 경우의 약 90% 이상의 하중지지능력을 확보하였으며, 한단 핀과 한단 롤러로 지지된 그림 3.25(b)에서는 부재감도지수가 0.95 ~ 1.0 사이에 있는 부재들을 보강하여 부재 전체를 보강하였을 경우와 유사한 하중지지능력을 확보할 수 있었다.



(a) 양단고정



(b) 한단 핀, 한단 롤러

그림 3.25 14스팬 평면트러스의 부재감도지수와 하중지지능력

3.5 소결

본 장에서는 극한 해석의 하계정리를 기본으로 한 Compact Procedure Method를 이용하여 구조물의 각 부재들의 중요도를 도출하고 순차적으로 보강하여 구조물의 하중지지능력에 미치는 영향에 대해 평가하여 다음과 같은 소결을 얻을 수 있었다.

1) 양단 고정으로 지지되는 8스팬의 평면트러스의 경우, Pratt Truss에서는 약 24%의 부재를 보강하여 약 94%의 보강효과를 확보하였으며, Howe Truss의 경우에는 약 12%의 부재를 보강하여 약 92%의 보강효과를 얻을 수 있었다. 또한, Warren Truss에서도 약 12%의 중요부재를 보강하여 전체 보강효과의 약 93% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 한단 핀과 한단 롤러로 지지되는 8스팬의 평면트러스의 경우, Pratt Truss에서는 약 36%의 부재를 보강하여 약 98%의 보강효과를 확보하였으며, Howe Truss의 경우에는 약 12%의 부재를 보강하여 약 98%의 보강효과를 얻을 수 있었다. 또한, Warren Truss에서도 약 12%의 중요부재를 보강하여 전체 보강효과의 약 96% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다.

2) 양단 고정으로 지지되는 10스팬의 평면트러스의 경우, Pratt Truss에서는 약 14%의 부재를 보강하여 약 93%의 보강효과를 확보하였으며, Howe Truss의 경우에는 약 10%의 부재를 보강하여 약 92%의 보강효과를 얻을 수 있었다. 또한, Warren Truss에서도 약 14%의 중요부재를 보강하여 전체 보강효과의 약 93% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 한단 핀과 한단 롤러로 지지되는 10스팬의 평면트러스의 경우, Pratt Truss에서는 약 24%의 부재를 보강하여 약 98%의 보강효과를 확보하였으며, Howe Truss의 경우에는 약 34%의 부재를 보강하여 약 94%의 보강효과를 얻을 수 있었다. 또한, Warren Truss에서도 약 24%의 중요부재를 보강하여 전체 보강효과의 약 98% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다.

3) 양단 고정으로 지지되는 14스팬의 평면트러스의 경우, Pratt Truss에서는 약 14%의 부재를 보강하여 약 91%의 보강효과를 확보하였으며, Howe Truss의 경우에는 약 14%의 부재를 보강하여 약 92%의 보강효과를 얻을 수 있었다. 또한, Warren Truss에서도 약 11%의 중요부재를 보강하여 전체 보강효과의 약 91% 이상의 하중지지능력을 확보하는

것을 확인할 수 있었다. 또한, 한단 핀과 한단 롤러로 지지되는 14스팬의 평면트러스의 경우, Pratt Truss에서는 약 31%의 부재를 보강하여 약 99%의 보강효과를 확보하였으며, Howe Truss의 경우에는 약 31%의 부재를 보강하여 약 99%의 보강효과를 얻을 수 있었다. 또한, Warren Truss에서도 약 31%의 중요부재를 보강하여 전체 보강효과의 약 99% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 스팬의 개수에 상관없이 중요도가 높은 부재를 판별하여 보강하는 것이 경제적이고 효과적인 것으로 확인할 수 있었다.

제4장 벨트트러스가 설치된 구조물의 하중지지능력 평가

4.1 개요

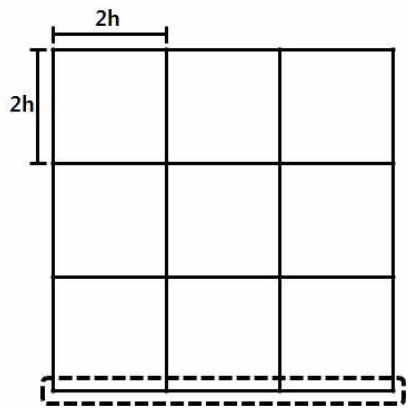
본 장에서는 Compact Procedure Method를 이용하여 하중계수와 부재감도 및 하중잔존율, 소성힌지 발생부분을 통하여 구조물의 수평 변위 제어에 널리 사용되는 코어 브레이스 및 벨트트러스의 설치 유·무에 따른 하중지지능력의 변화추이를 검토하였다. 또한, 우발적 외력에 의한 부재의 손실이 구조물의 하중지지능력에 미치는 영향에 대해서 검토하였다.

4.2 해석모델 및 적용하중

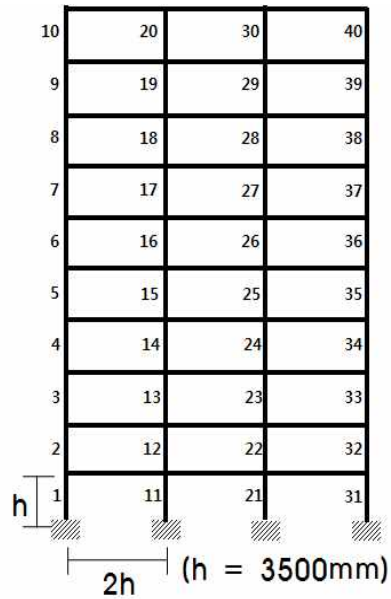
4.2.1 해석 구조물의 형태 및 부재의 특성

그림 4.1에 해석 구조물의 평면도 및 입면도를 나타내었다. 해석 구조물은 그림 4.1(a)와 같이 한 변의 스팬이 7m 인 3경간의 정사각형 평면을 가지고 있다. 그림 4.1(b)는 입면도를 나타내고 있으며 각 층의 층고가 3.5m 에 총 10개 층으로 되어있다. 또한, 기둥부재의 손실 시 구조물의 하중지지능력을 평가하기 위해 각 기둥에 숫자를 지정하여 판별하기 용이하도록 하였다.

간략화법 해석 수행을 위해 그림 4.1(a)에 나타낸 바와 같이 점선 부분의 2차원 평면을 모델링하였다. 또한, 브레이스 및 벨트트러스 설치 유・무의 효과를 검증하기 위하여 그림 4.1(b)와 그림 4.2에서 보이는 바와 같이 표준 구조물 CASE I (기본모델)에 중앙 코어부분에 브레이스를 수직방향으로 설치한 CASE II 비교모델과 중앙코어 브레이스 + 최상층 벨트트러스를 설치한 CASE III 비교모델의 하중지지능력을 검토하였다.

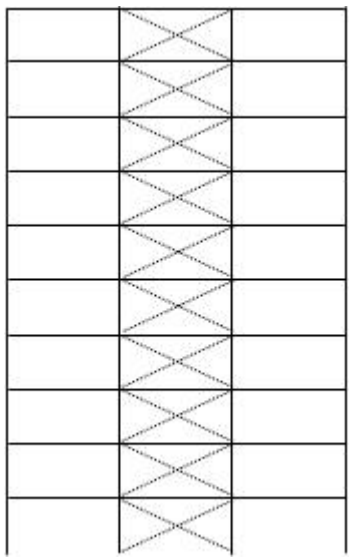


(a) 평면도

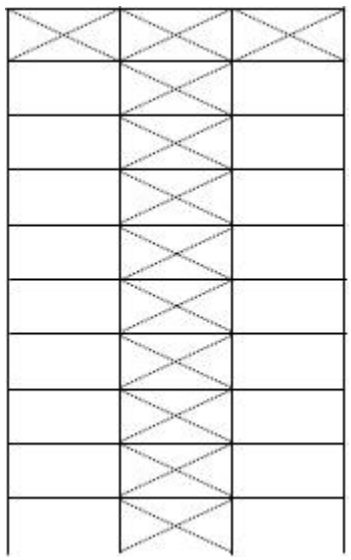


(b) 입면도

그림 4.1 기본모델(CASE I)



(a) CASE II
(중앙코어 브레이스)



(b) CASE III
(중앙코어 브레이스 + 최상층 벨트트러스)

그림 4.2 비교모델(CASE II, CASE III)

구조물의 설계하중을 산정하여 3스팬 10층 해석모델에 적용하고 브레이스와 벨트트러스의 설치 유·무와 기둥 손실 유·무에 대한 해석을 실시하였고, 기둥과 보, 브레이스는 SS400강재를 사용하였다. 또한, 부재 종류 및 부재 크기에 따른 전소성 모멘트(M_p)를 산정하였고, 각각의 부재치수는 표 2에 나타내었다. 기둥 손실에 대한 영향을 검토하기 위하여 본 장에서는 기둥($_cM_p$)과 보($_bM_p$)의 전소성 모멘트 비(ζ)를 1 : 6.7로 설계하였으며 강보약기둥의 구조물로서 접합부는 완전고정으로 가정하였다.

표 4.1 사용된 부재의 특성

부재	강도	부재크기	소성단면계수 Z_p [mm^3]	전소성모멘트 M_p kN·cm]	ζ
Column	SS400	H-150x150x7x10	$2.46x10^5$	$5.8x10^3$	1
Beam		H-450x200x9x14	$1.69x10^6$	$3.9x10^4$	6.7
Brace		H-150x150x7x10	$2.46x10^5$	$5.8x10^3$	-

여기서, ζ:전소성모멘트 비 = $_cM_p$ / $_bM_p$

4.2.2 부재 손실 유·무에 따른 적용하중

가. GSA(General Service Administration) 2003 가이드라인

General Service Administration (GSA, 2003)에서 제시한 가이드라인에서는 연쇄붕괴해석을 위한 대체경로법에 따르면 정적해석을 위해 그림 4.4와 같이 부재가 제거된 부분의 인접해 있는 양 경간에 충격에 의한 증폭계수를 고려하여 정상상태에서의 적용하중의 2배를 적용한 하중조합을 사용하고, 정상 상태에서는 그림 4.3와 같이 증폭계수를 사용하지 않고 모든 경간에 동일한 하중을 가할 것을 제시하고 있다. 여기서, Dead Load 는 고정하중을 Live Load는 활하중을 의미한다. 또한, 구조물의 설계하중은 KBC 2009의 설계하중조건을 참고하여 고정하중(DL) 4.3 kN/m^2, 활하중(LL) 2.4 kN/m^2를 적용하였다.

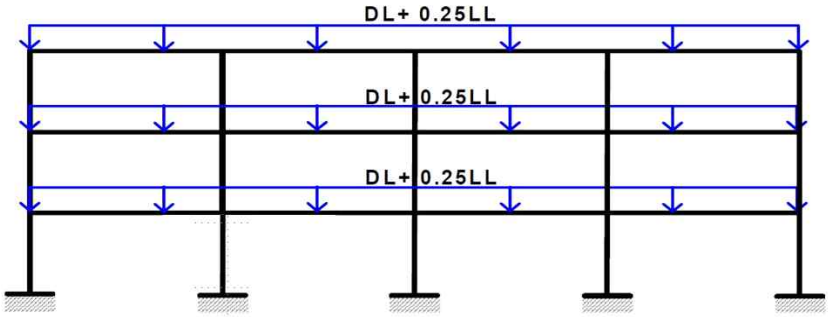


그림 4.3 정상상태에서의 적용하중(GSA 2003)

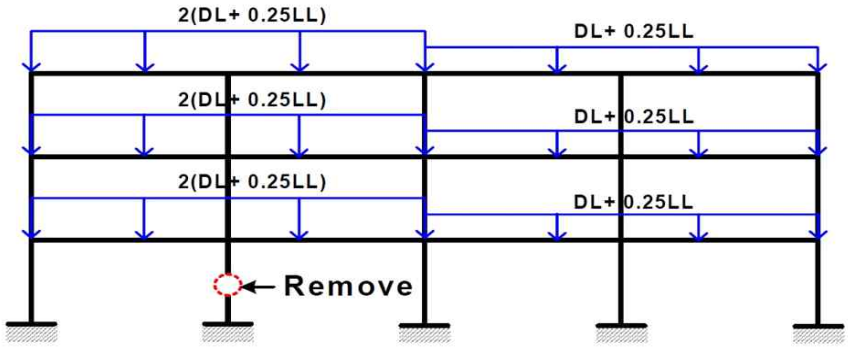


그림 4.4 부재손실 발생 시 적용하중(GSA 2003)

나. DoD(Department of Defence) 2005 가이드라인

Department of Defence (DoD, 2005)에서 제시한 가이드라인에서는 General Service Administration (GSA, 2003)에서 제시한 가이드라인과 유사하게 정적해석을 위해 그림 4.6와 같이 부재가 제거된 부분의 인접해 있는 양 경간에 충격에 의한 증폭계수를 고려하여 정상상태에서의 적용하중의 2배를 적용한 하중조합을 사용하고, 정상 상태에서는 그림 4.5와 같이 증폭계수를 사용하지 않고 모든 경간에 동일한 하중을 가할 것을 제시하고 있다. 다만, DoD 2005에서는 GSA 2003 보다 더 큰 수직하중과 풍하중을 포함한 하중조합을 사용하도록 권고하고 있다. 여기서, Dead Load(DL)는 고정하중을 Live

Load(LL)는 활하중을 의미하며, Wind Load(WL)는 풍하중을 의미한다. 또한, 구조물의 설계하중은 KBC 2009의 설계하중조건을 참고하여 고정하중(DL) 4.3 kN/m^2, 활하중(LL) 2.4 kN/m^{2}를 적용하였으며, 표 4.2는 풍하중(WL)을 산정하기 위한 조건을 나타내고 있다.

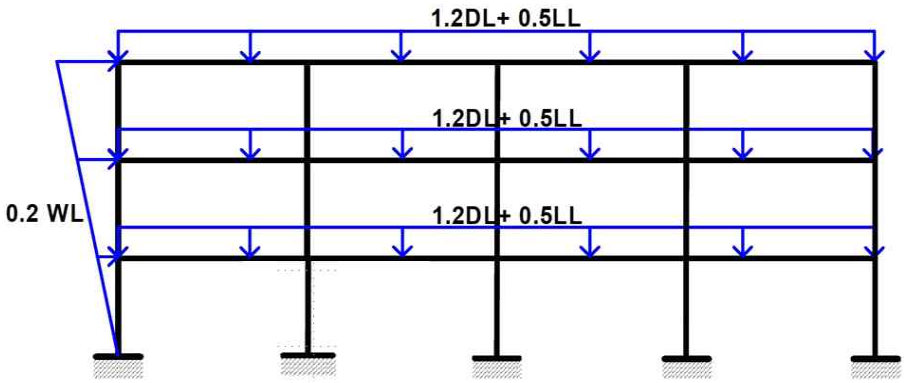


그림 4.5 정상상태에서의 적용하중(DoD 2005)

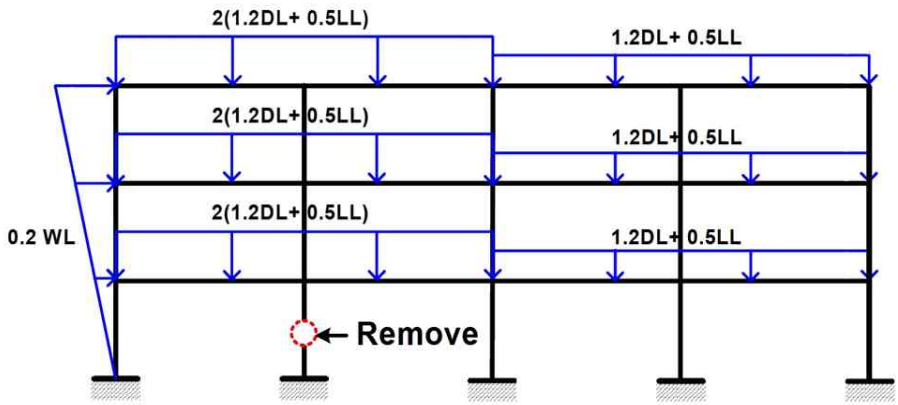


그림 4.6 부재손실 발생 시 적용하중(DoD 2005)

표 4.2 설계 풍하중 산정을 위한 조건

건축물의 중요도	특
중요도 계수	1.0
지형 계수	1.0
지표면 조도구분	B
기본풍속	30m/s
가스트 영향 계수	1.7

본 장에서는 대상 건축물을 연면적 1000㎡ 이상의 국가 청사 건물로 설정하였으며, 산, 언덕 및 경사지의 영향을 받지 않는 평탄한 지역으로 주변 지역의 지표면 상태는 높이 3.5m 정도의 주택과 같은 건축물이 밀집해 있고 중층건물이 산재해 있는 지역으로 가정하였다. 또한, 100년 재현기간에 대한 지역별 기본풍속은 광주지역의 기본풍속을 따랐으며, 건축물의 고유진동수가 1Hz 이하인 경우 또는 바람에 의한 공진효과를 무시할 수 없는 유연구조물로 가정하여 설계 풍하중을 산정하였다.

4.3 해석결과

4.3.1 GSA 2003에서 제시한 하중조합 적용

가. 하중계수(λ)에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

표 4.3, 4.4, 4.5은 간략화법 해석을 통한 하중계수(λ)와 그에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중 잔존율(R.R.)을 나타내었다. 부재의 중요도를 알 수 있는 감도지수가 1.0에 가까운 값이 될수록 중요부재(파괴 시 위험 부재) 임을 나타낸다. 건축물이 정상상태일 때, 브레이스 및 벨트트러스의 설치 유·무에 따른 하중계수를 살펴보면 기본모델인 CASE Ⅰ은 9.637, 중앙부코어에 브레이스를 설치한 CASE Ⅱ는 11.940, 중앙부 브레이스 + 최상층 벨트트러스를 설치한 CASE Ⅲ는 12.493으로 하중지지능력이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

외부기둥부재의 손실이 발생할 경우 CASE Ⅰ과 CASE Ⅱ의 하중계수는 별다른 변화가 없지만 CASE Ⅲ는 약 4배의 하중지지능력을 확보하였고, 내부기둥부재의 손실이 발생할 경우 CASE Ⅰ과 CASE Ⅱ, Ⅲ를 비교해보면 약 3 ~ 4배 정도의 하중지지능력을 확보하였다.

CASE Ⅰ의 경우 내・외부 기둥 손실 시 부재감도지수를 살펴보면 0.838 ~ 0.886으로 높은 감도지수를 나타내고 있으며, 하중 잔존율은 11 ~ 16%로 내·외부기둥의 부재중요도가 비슷하게 나타났다.

반면에, CASE Ⅱ의 경우에는 내부기둥 손실 시 부재감도지수는 0.5 ~ 0.613, 외부기둥 손실 시 부재감도지수는 0.899 ~ 0.908 로 나타났고 하중 잔존율은 내부기둥 손실 시 39 ~ 50%, 외부기둥 손실 시 9 ~ 10%로 나타났다. 이는 외부기둥이 내부기둥보다 부재중요도가 높은 것을 알 수 있다.

여기서, 외부기둥(1 or 31, 9 or 39번 부재)의 손실로 인한 CASE Ⅰ과 CASE Ⅱ의 λ_{damage}가 같은 값을 나타내고 있을지라도 원래의 정상상태의 하중계수와 비교할 때 CASE Ⅱ의 경우가 더욱 큰 폭으로 저하되어 있음을 알 수 있다. 따라서, 손실된 부재의 부재감도지수(S.I.)는 높아졌으며, 하중 잔존율은 낮게 나타났다. 이는 중앙코어 브레이스의 설치만으로는 외부기둥이 손실되더라도 구조안전성에는 별다른 영향을 끼치지 못하는 것으로 판단된다. 반면에, CASE Ⅲ와 같이 최상층 벨트트러스 설치와 병용하게 되면 외부기둥 손실 시 약 5배의 연직하중지지능력이 상승됨을 알 수 있다.

또한, CASE Ⅲ의 경우 부재감도 지수와 하중 잔존율이 각각 0.499 ~ 0.522와 48 ~ 50%로 나타났다. 이는 내·외부기둥의 부재중요도가 전체적으로 CASE Ⅰ 보다 낮은 것을 알 수 있다.

표 4.3 CASE Ⅰ의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		CASE Ⅰ		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	9.637	-	-
1 or 31	$\lambda_{1\ or\ 31}$	1.201	0.875	12%
9 or 39	$\lambda_{9\ or\ 39}$	1.089	0.886	11%
11 or 21	$\lambda_{11\ or\ 21}$	1.556	0.838	16%
19 or 29	$\lambda_{19\ or\ 29}$	1.528	0.841	15%

표 4.4 CASE II의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		CASE II		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	11.940	-	-
1 or 31	$\lambda_{1\ or\ 31}$	1.201	0.899	10%
9 or 39	$\lambda_{9\ or\ 39}$	1.089	0.908	9%
11 or 21	$\lambda_{11\ or\ 21}$	4.610	0.613	39%
19 or 29	$\lambda_{19\ or\ 29}$	5.970	0.5	50%

표 4.5 CASE III의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		CASE III		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	12.493	-	-
1 or 31	$\lambda_{1\ or\ 31}$	5.970	0.522	48%
9 or 39	$\lambda_{9\ or\ 39}$	5.970	0.522	48%
11 or 21	$\lambda_{11\ or\ 21}$	6.247	0.499	50%
19 or 29	$\lambda_{19\ or\ 29}$	6.247	0.499	50%

그림 4.7은 부재손실의 발생에 따른 하중지지능력의 감소정도를 나타내고 있다.

CASE I과 CASE II에서는 외부기둥에서 부재 손실이 발생하였을 때 하중계수가 일정하게 나타나고 내부기둥에서는 외부기둥과 큰 차이를 보이지 않는 CASE I과 달리 CASE II의 하중계수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 브레이스가 중앙부에 설치됨에 따라 외부기둥보다 내부기둥에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

CASE III의 경우 CASE I과 비교해보면 정상상태뿐만 아니라 부재의 손실이 일어나더라도 높은 하중지지능력이 유지됨을 일 수 있다. 이는 중앙코어에 설치한 브레이스와 최상층에 설치한 벨트트러스가 내·외부기둥 모두에게 동일한 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

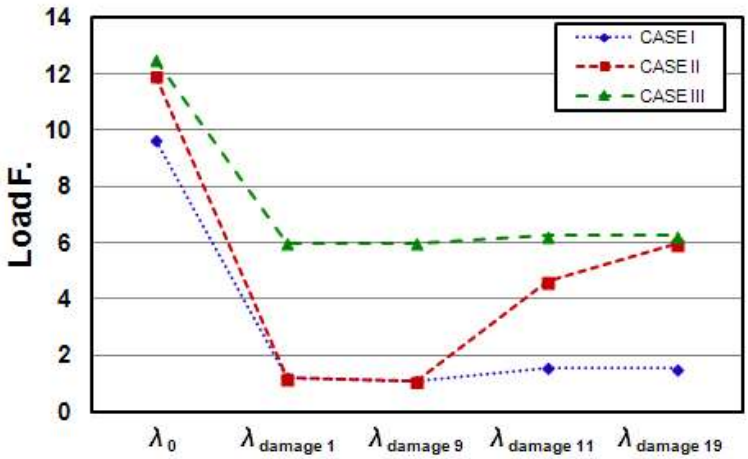
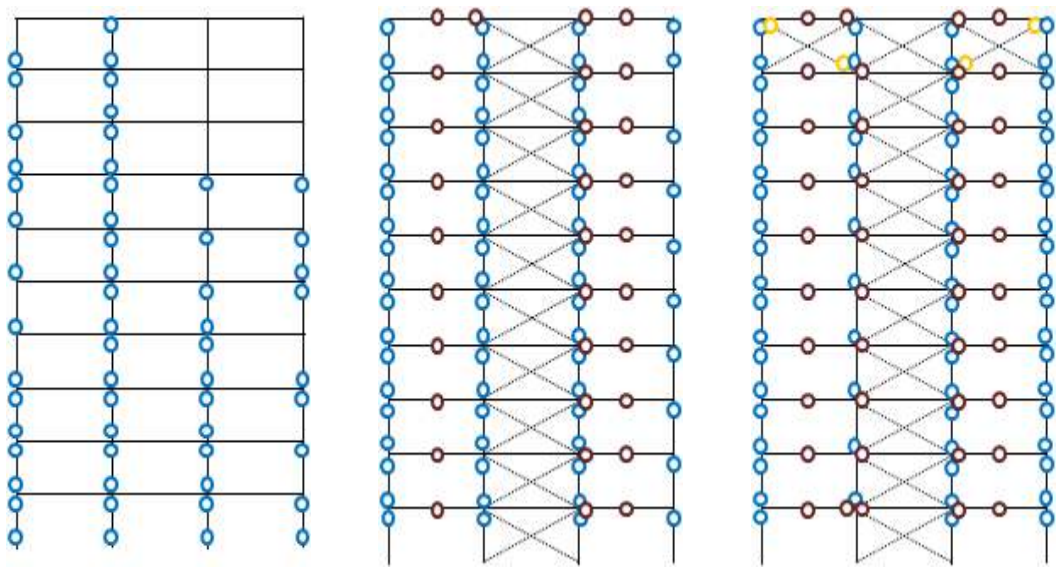


그림 4.7 CASE 별 하중계수 비교(GSA 2003)

나. 소성힌지 발생 지점



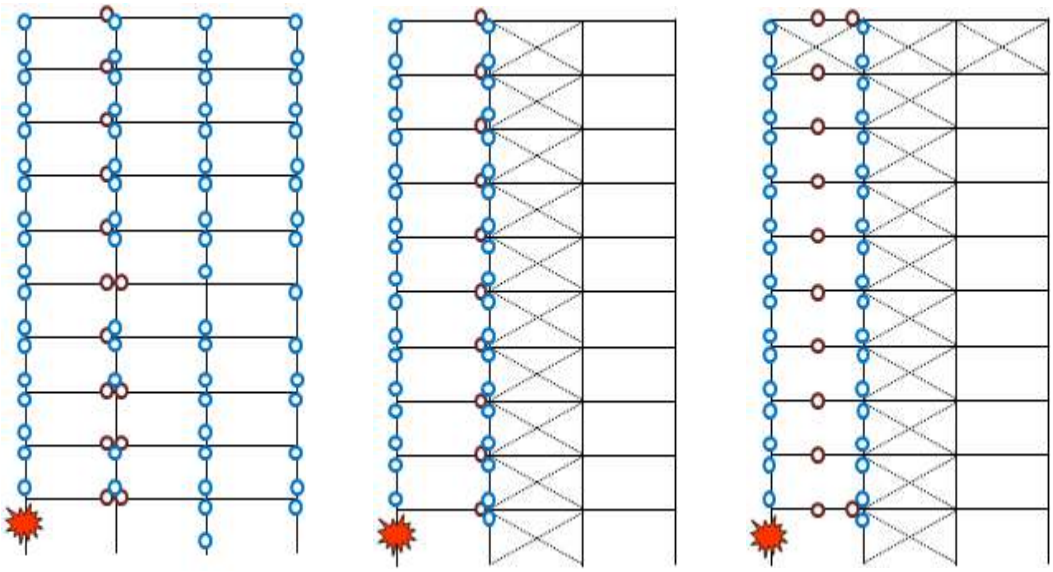
CASE I
(기본모델)

CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및
최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.8 정상상태에서의 소성힌지 발생지점(GSA 2003)

그림 4.8에서 보이는 바와 같이 정상상태에서의 소성힌지 발생지점은 CASE I, CASE II, CASE III 모두 구조물 전 층에서 고루 분포되어있어 효율적인 응력 재분배가 이루어져 있음을 알 수 있다.



CASE I
(기본모델)

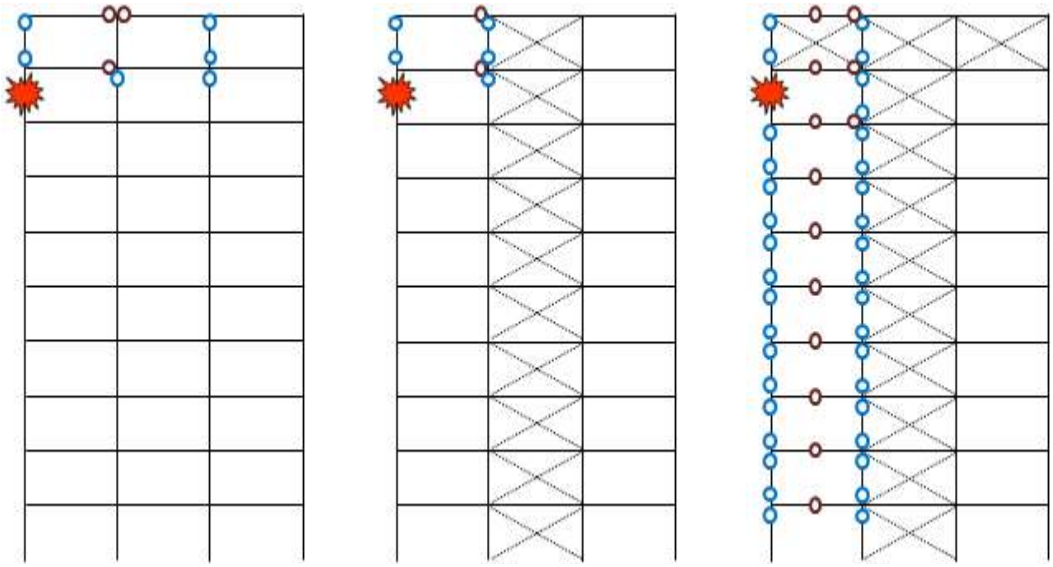
CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및 최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.9 1층 외부기둥(1번 부재) 손실 시 소성힌지 발생지점(GSA 2003)

그림 4.9은 1층 외부기둥의 손실이 일어날 때의 소성힌지 발생지점이다. CASE I에서는 구조물 전 층에 고루 분포되어있으나, CASE II와 CASE III의 경우는 중앙코어 브레이스 설치부를 기점으로 기둥 손실이 발생된 부분에 집중적으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 CASE II와 CASE III에서는 손실이 발생한 부분을 포함한 경간에서만 부분적으로 붕괴가 발생할 수 있다.

하지만 CASE I에서는 CASE II와 CASE III에서 발생할 수 있는 부분적인 붕괴뿐만 아니라 다른 경간에서의 기둥 손실이 심각하게 발생하는 것을 알 수 있다.



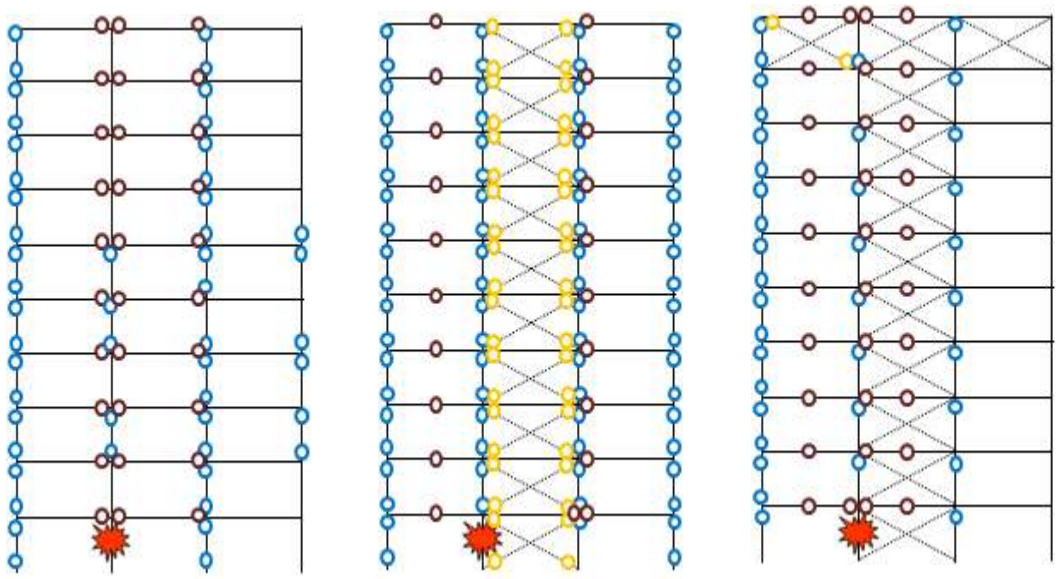
CASE I
(기본모델)

CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및
최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.10 9층 외부기둥(9번 부재) 손실 시 소성힌지 발생지점(GSA 2003)

그림 4.10에서 보이는 바와 같이 상층부(9층) 외부기둥의 손실이 일어날 때의 소성힌지 발생지점은 CASE I과 CASE II와 같은 경우, 손실이 일어난 층부터 구조물에 소성힌지가 분포되는 반면에 CASE III는 1층 외부기둥의 손실이 일어날 때와 비슷한 소성힌지가 분포되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 붕괴가 일어날 시, CASE I과 CASE II의 경우 손실 층 윗부분에서 국부적인 붕괴가 일어날 수 있다, 반면에 CASE III의 경우 한 경간 전 층에서 붕괴가 발생할 수 있음을 알 수 있다.



CASE I
(기본모델)

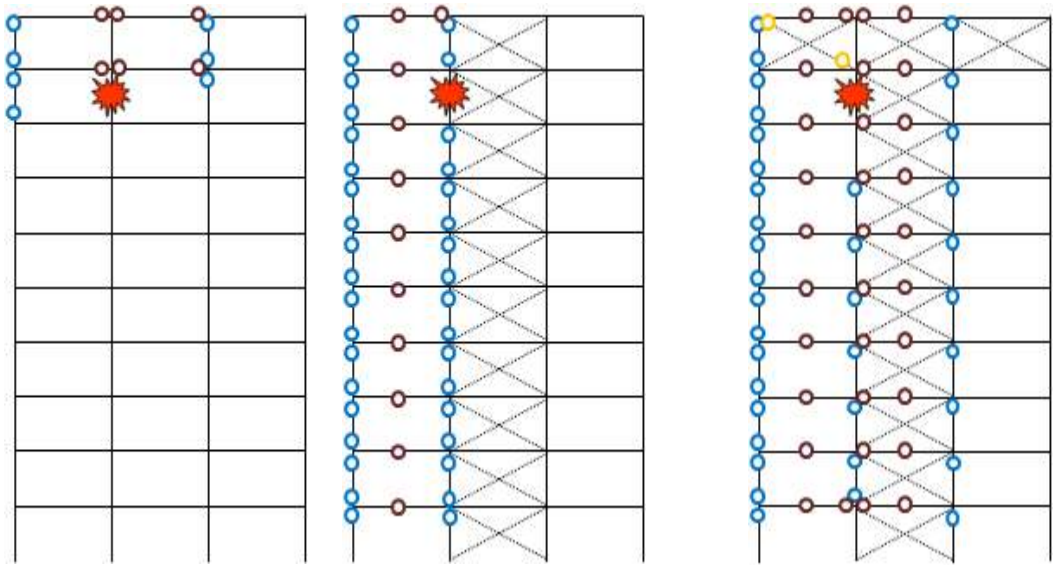
CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및
최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.11 1층 내부기둥(11번 부재) 손실 시 소성힌지 발생지점(GSA 2003)

그림 4.11은 1층 내부기둥(11번 부재)의 손실이 일어났을 경우 소성힌지 발생현황을 나타낸 것이다. CASE I에서는 손실된 기둥에 인접해있는 양 경간에서 집중적으로 소성힌지가 발생하고, CASE II에서는 기존 구조물뿐만 아니라, 중앙부 코어 부분에 설치한 브레이스에도 소성힌지가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한, CASE III에서는 손실된 기둥에 인접해있는 양 경간에 소성힌지가 분포되어있고 특히 외부기둥과 인접해 있는 경간에 집중적으로 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 CASE I과 CASE III에서는 손실된 기둥의 양 경간에서 붕괴가 발생하고 CASE II에서는 건축물 전체에서 붕괴가 발생할 수 있다.

CASE I과 CASE II에서 소성힌지의 분포만으로 검토하였을 경우, CASE II가 더 위험하다 볼 수 있다. 하지만 CASE II의 하중 잔존율이 39%로 CASE I의 하중 잔존율 16%보다 더 크므로 CASE II가 더 안전하다고 할 수 있다.



CASE I
(기본모델)

CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및
최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.12 9층 내부기둥(19번 부재) 손실 시 소성힌지 발생지점(GSA 2003)

그림 4.12에서 보이는 바와 같이 9층 내부기둥의 손실이 일어날 시, 소성힌지 발생지점의 경우 CASE I에서는 손실이 일어난 층부터 구조물에 소성힌지가 분포되는 반면 CASE II에서는 중앙코어 브레이스 설치부를 기점으로 기둥 손실이 발생된 부분에 집중적으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한, CASE III의 경우에는 1층 내부기둥의 소성힌지 분포와 비슷한 것을 확인할 수 있다. 따라서, 소성힌지 발생 분포에 대한 검토 결과, CASE I보다 CASE II와 CASE III에서 형성되는 붕괴기구가 전체 구조물 붕괴의 가능성이 높은 것으로 판단되나, 구조물 자체의 손상하중계수(λ_{damage})는 각각 4배 이상 더 큰 것을 알 수 있다.

4.3.2 DoD 2005에서 제시한 하중조합 적용

가. 하중계수(λ)에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

표 4.6, 4.7, 4.8은 간략화법 해석을 통한 하중계수(λ)와 그에 따른 부재감도지수

(S.I.) 및 하중 잔존율(R.R.)을 나타내었다. 부재의 중요도를 알 수 있는 감도지수가 1.0에 가까운 값이 될수록 중요부재(파괴 시 위험 부재) 임을 나타낸다. 건축물이 정상상태일 때, 브레이스 및 벨트트러스의 설치 유・무에 따른 하중계수를 살펴보면 기본모델인 CASE Ⅰ은 3.519, 중앙부코어에 브레이스를 설치한 CASE Ⅱ는 9.201, 중앙부 브레이스 + 최상층 벨트트러스를 설치한 CASE Ⅲ는 9.627로 하중지지능력이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

외부기둥부재의 손실이 발생할 경우 CASE Ⅰ과 CASE Ⅱ의 하중계수는 별다른 변화가 없지만 CASE Ⅲ는 약 5배의 하중지지능력을 확보하였고, 내부기둥부재의 손실이 발생할 경우 CASE Ⅰ과 CASE Ⅱ, Ⅲ를 비교해보면 약 2 ~ 4배 정도의 하중지지능력을 확보하였다.

CASE Ⅰ의 경우 내・외부 기둥 손실 시 부재감도지수를 살펴보면 0.659 ~ 0.762의 감도지수를 나타내고 있으며, 하중 잔존율은 26 ~ 34%로 내부기둥의 부재 중요도가 외부기둥의 부재 중요도보다 조금 낮게 나타났다.

반면에, CASE Ⅱ의 경우에는 내부기둥 손실 시 부재감도지수는 0.5 ~ 0.699, 외부기둥 손실 시 부재감도지수는 0.899 ~ 0.909 로 나타났고 하중 잔존율은 내부기둥 손실 시 30 ~ 50%, 외부기둥 손실 시 9 ~ 10%로 나타났다. 이는 외부기둥이 내부기둥보다 부재중요도가 높은 것을 알 수 있다.

여기서, 외부기둥(1 or 31, 9 or 39번 부재)의 손실로 인한 CASE Ⅰ과 CASE Ⅱ의 λ_{damage}가 같은 값을 나타내고 있을지라도 원래의 정상상태의 하중계수와 비교할 때 CASE Ⅱ의 경우가 더욱 큰 폭으로 저하되어 있음을 알 수 있다. 따라서, 손실된 부재의 부재감도지수(S.I.)는 높아졌으며, 하중 잔존율은 낮게 나타났다. 이는 중앙코어 브레이스의 설치만으로는 외부기둥이 손실되더라도 구조안전성에는 별다른 영향을 끼치지 못하는 것으로 판단된다. 반면에, CASE Ⅲ와 같이 최상층 벨트트러스 설치와 병용하게 되면 외부기둥 손실 시 약 5배의 하중지지능력이 상승됨을 알 수 있다.

또한, CASE Ⅲ의 경우 부재감도 지수와 하중 잔존율이 각각 0.46 ~ 0.4813과 48 ~ 50%로 나타났다. 이는 내·외부기둥의 부재중요도가 전체적으로 CASE Ⅰ 보다 낮은 것을 알 수 있다.

표 4.6 CASE I의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		CASE I		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	3.519	-	-
1 or 31	$\lambda_{1\ or\ 31}$	0.925	0.737	26
9 or 39	$\lambda_{9\ or\ 39}$	0.839	0.762	24
11 or 21	$\lambda_{11\ or\ 21}$	1.199	0.659	34
19 or 29	$\lambda_{19\ or\ 29}$	1.177	0.666	33

표 4.7 CASE II의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		CASE II		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	9.201	-	-
1 or 31	$\lambda_{1\ or\ 31}$	0.925	0.899	10
9 or 39	$\lambda_{9\ or\ 39}$	0.839	0.909	9
11 or 21	$\lambda_{11\ or\ 21}$	2.77	0.699	30
19 or 29	$\lambda_{19\ or\ 29}$	4.6	0.500	50

표 4.8 CASE III의 하중계수에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		CASE III		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	9.627	-	-
1 or 31	$\lambda_{1\ or\ 31}$	4.6	0.522	48
9 or 39	$\lambda_{9\ or\ 39}$	4.813	0.500	50
11 or 21	$\lambda_{11\ or\ 21}$	4.813	0.500	50
19 or 29	$\lambda_{19\ or\ 29}$	4.813	0.500	50

그림 4.13은 DoD 2005의 하중조건을 부여하였을 경우, 부재손실의 발생에 따른 하중지지능력의 감소정도를 나타내고 있다.

CASE I과 CASE II에서는 외부기둥에서 부재 손실이 발생하였을 때 하중계수가 일정하게 나타나고 내부기둥에서는 외부기둥과 큰 차이를 보이지 않는 CASE I과 달리 CASE

II의 하중계수가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 브레이스가 중앙부에 설치됨에 따라 외부기둥보다 내부기둥에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

CASE III의 경우 CASE I과 비교해보면 정상상태뿐만 아니라 부재의 손실이 일어나더라도 높은 하중지지능력이 유지됨을 알 수 있다. 이는 중앙코어에 설치한 브레이스와 최상층에 설치한 벨트트러스가 내·외부기둥 모두에게 동일한 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

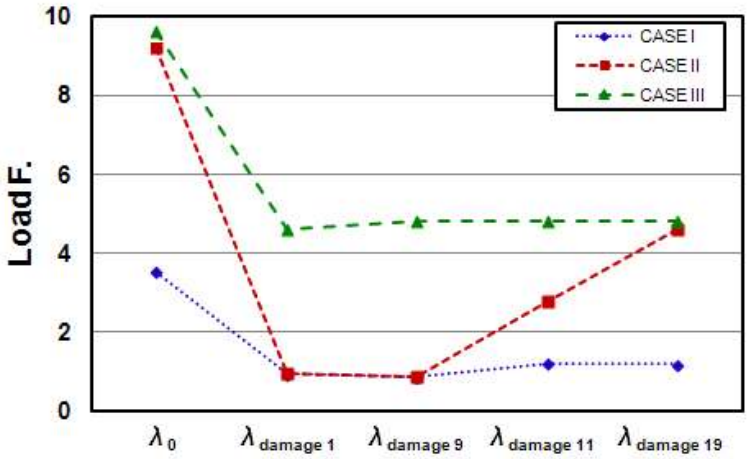
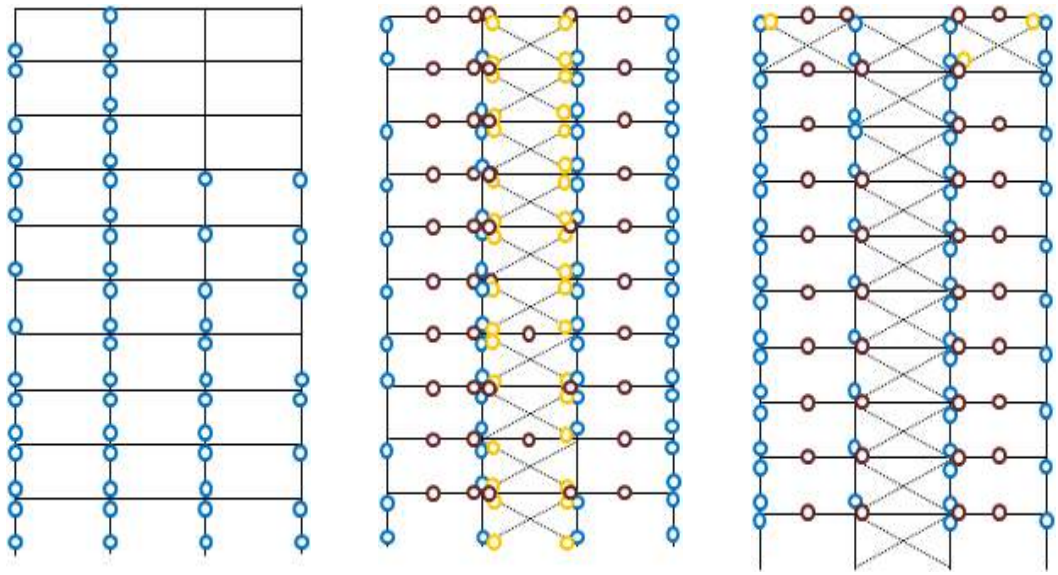


그림 4.13 CASE 별 하중계수 비교(DoD 2005)

나. 소성힌지 발생 지점

그림 4.14에서 보이는 바와 같이 정상상태에서의 소성힌지 발생지점은 CASE I의 경우에는 기둥부재에만 소성힌지가 발생하는 것을 확인할 수 있었고, CASE II, CASE III 모두 구조물 전 층에서 고루 분포되어있어 효율적인 응력 재분배가 이루어져 있음을 알 수 있다.



CASE I
(기본모델)

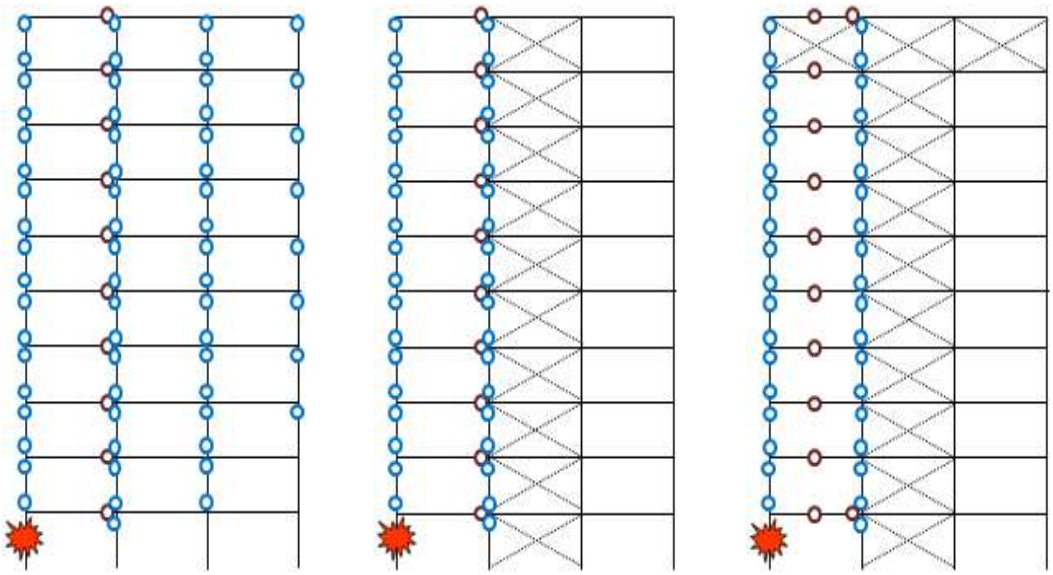
CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및
최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.14 정상상태에서의 소성힌지 발생지점(DoD 2005)

그림 4.15은 1층 외부기둥의 손실이 일어날 때의 소성힌지 발생지점이다. CASE II와 CASE III의 경우는 중앙코어 브레이스 설치부를 기점으로 기둥 손실이 발생된 부분에 집중적으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있고, CASE I에서는 중앙코어 브레이스 설치부를 기점으로 기둥 손실이 발생된 부분에 집중적으로 분포되어있고 그 외의 기둥에서도 소성힌지가 발생하였다. 따라서 CASE I, CASE II와 CASE III에서는 손실이 발생한 부분을 포함한 경간에서만 부분적으로 붕괴가 발생할 수 있다.

하지만 CASE I에서는 CASE II와 CASE III에서 발생할 수 있는 부분적인 붕괴뿐만 아니라 다른 경간에서의 기둥 손실이 심각하게 발생하는 것을 알 수 있다.



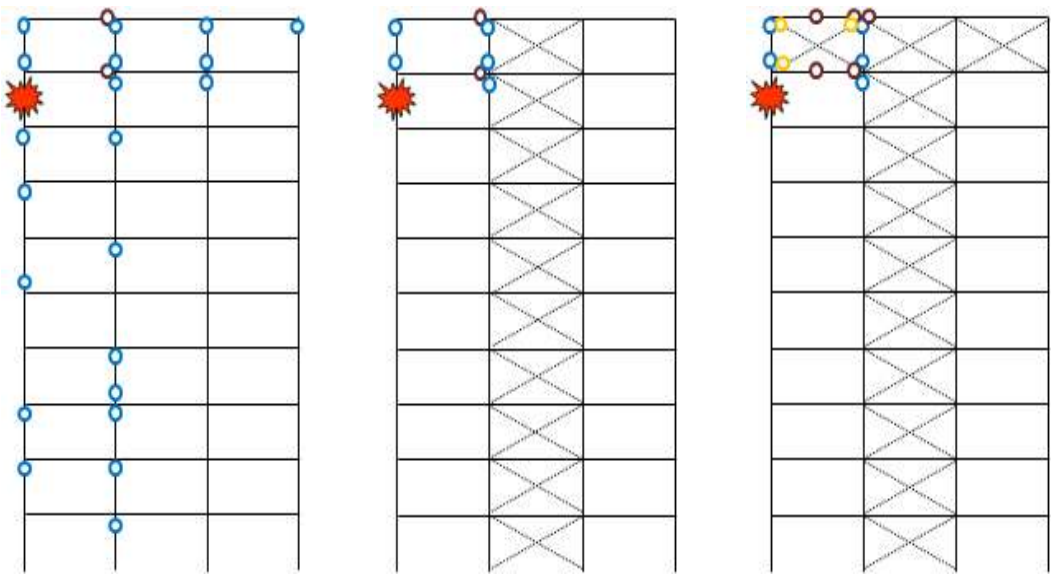
CASE I
(기본모델)

CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및
최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.15 1층 외부기둥(1번 부재) 손실 시 소성힌지 발생지점(DoD 2005)

그림 4.16에서 보이는 바와 같이 상층부(9층) 외부기둥의 손실이 일어날 때의 소성힌지 발생지점은 CASE II와 CASE III의 경우, 손실이 일어난 층부터 구조물에 소성힌지가 분포되는 반면에 CASE I는 손실이 일아난 층뿐만 아니라 기둥이 손실된 층 아랫부분에서도 부분적으로 소성힌지가 분포되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 붕괴가 일어날 시, CASE I과 CASE II, CASE III 모두 손실 층 윗부분에서 국부적인 붕괴가 일어날 수 있으며, CASE I의 경우 부분적인 기둥의 파괴가 발생할 수 있음을 알 수 있다.



CASE I
(기본모델)

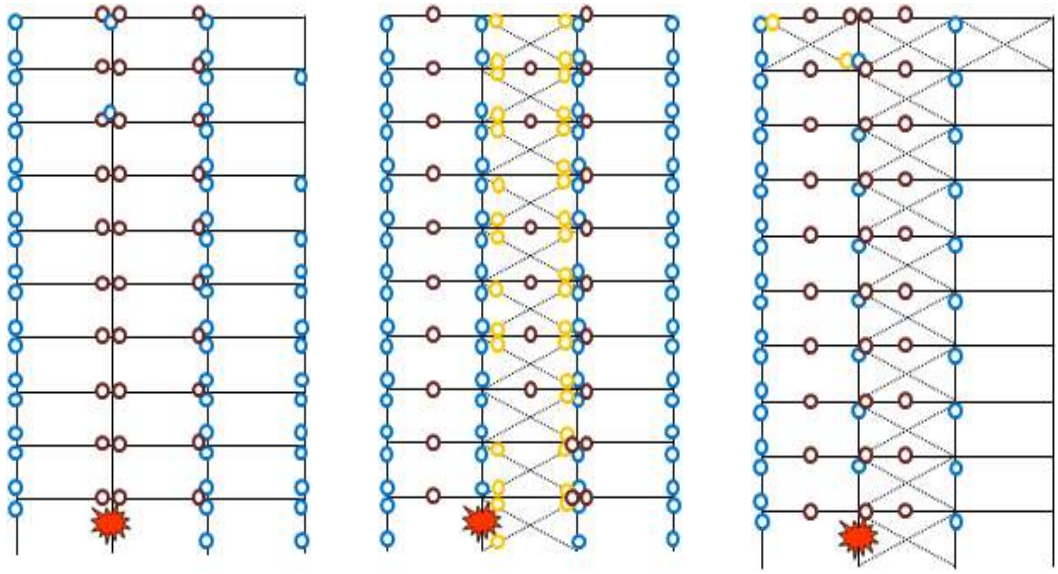
CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및
최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.16 9층 외부기둥(9번 부재) 손실 시 소성힌지 발생지점(DoD 2005)

그림 4.17은 1층 내부기둥(11번 부재)의 손실이 일어났을 경우 소성힌지 발생현황을 나타낸 것이다. CASE I에서는 손실된 기둥에 인접해있는 양 경간에서 집중적으로 소성힌지가 발생하고, CASE II에서는 기존 구조물뿐만 아니라, 중앙부 코어 부분에 설치한 브레이스에도 소성힌지가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한, CASE III에서는 손실된 기둥에 인접해있는 양 경간에 소성힌지가 분포되어있고 특히 외부기둥과 인접해 있는 경간에 집중적으로 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 CASE I과 CASE III에서는 손실된 기둥의 양 경간에서 붕괴가 발생하고 CASE II에서는 건축물 전체에서 붕괴가 발생할 수 있다.

CASE I과 CASE II에서 소성힌지의 분포만으로 검토하였을 경우, CASE II가 더 위험하다 볼 수 있다. 하지만 CASE II의 하중 잔존율이 39%로 CASE I의 하중 잔존율 16%보다 더 크므로 CASE II가 더 안전하다고 할 수 있다.



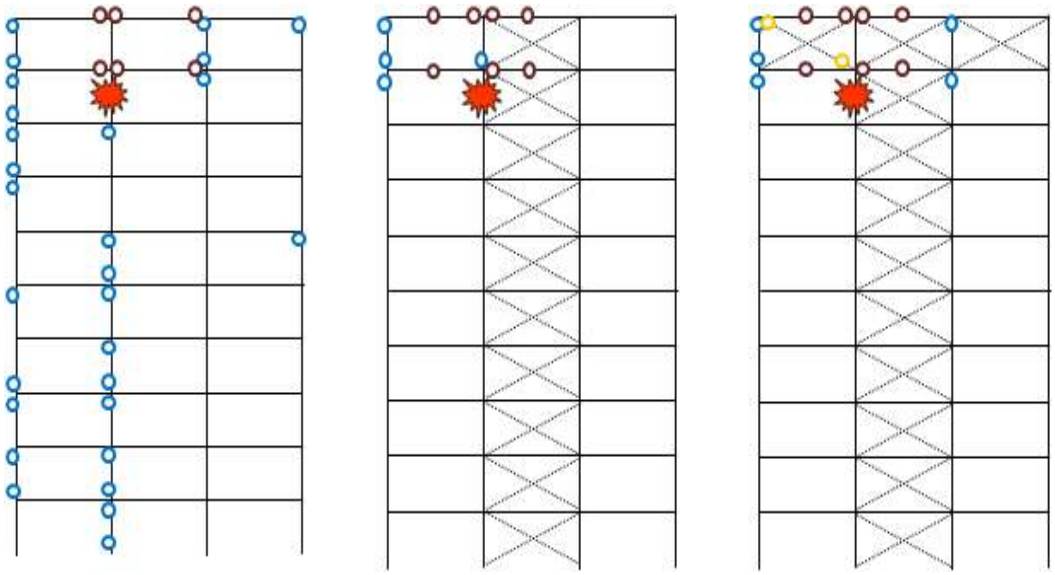
CASE I
(기본모델)

CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및
최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.17 1층 내부기둥(11번 부재) 손실 시 소성힌지 발생지점(DoD 2005)

그림 4.18에서 보이는 바와 같이 9층 내부기둥의 손실이 일어날 시, 소성힌지 발생지점의 경우 CASE I에서는 손실이 일어난 층부터 구조물에 소성힌지가 분포되며 그 외의 기둥부분에서도 소성힌지가 분포되어있는 반면 CASE II와 CASE III에서는 중앙코어 브레이스 설치부를 기점으로 기둥 손실이 발생된 부분에 집중적으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서, 소성힌지 발생 분포에 대한 검토 결과, CASE I이 CASE II와 CASE III에서 형성되는 붕괴기구보다 구조물에서 부분 붕괴의 가능성이 높은 것으로 판단된다.



CASE I
(기본모델)

CASE II
(중앙코어 브레이스 설치)

CASE III
(중앙코어 브레이스 및
최상층 벨트트러스 설치)

그림 4.18 9층 내부기둥(19번 부재) 손실 시 소성힌지 발생지점(DoD 2005)

4.4 소결

브레이스 및 벨트트러스를 구조물에 설치함으로써 구조물의 하중지지능력이 향상됨을 알 수 있었다. 또한, 부재의 우발적인 손실로 인한 하중지지능력의 저하 또한 상당부분 완화시키는 효과가 있음이 확인되었고, 부재의 손실이 발생할 경우에 하중계수와 소성힌지 발생지점을 비교해보았을 때, CASE의 종류에 상관없이 내부기둥보다 외부기둥이 우발적인 하중에 취약하다는 것을 알 수 있었다.

또한, CASE I의 경우, 내·외부 기둥의 손실 시 구조물 전체에서 소성힌지가 비교적 고루 분포하고 있어 효율적인 응력 재분배가 이루어짐을 알 수 있었다. 반면, 중앙부 코어 브레이스가 설치된 경우(CASE II)와 중앙부 코어 브레이스와 최상층에 벨트트러스가 설치된 경우(CASE III)에는 정상상태 이외엔 소성힌지의 분포가 상대적으로 편향되게 발생하는 경향이 나타남으로써 응력재분배 측면에서는 다소 불리함을 알 수 있으나 최상층에 벨트트러스를 설치함으로 하중지지능력은 비약적으로(4 ~ 5배)으로 향상됨을 확인하였다.

제5장 오클라호마 시(市) 연방청사의 하중지지능력 평가

5.1 개요

본 장에서는 실제 차량을 이용한 폭탄테러에 의한 비정상하중이 발생하여 연쇄붕괴를 일으켰던 미국의 Alfred P. Murrah Federal Building을 모델로 하여 Compact Procedure Method 를 이용하여 하중지지능력을 평가하였으며, 부재감도지수(S.I.)를 통하여 취약 층을 판별하고 트랜스퍼 층으로 보강함으로써 연쇄붕괴를 방지하고자 하였으며, 보강 전과 후의 구조물의 하중지지능력을 평가하였다.

그림 5.1 Alfred P. Murrah Federal Building 붕괴사고

5.2 해석모델 및 적용하중

5.2.1 해석 구조물의 형태 및 부재의 특성

그림 5.1에 실제 붕괴되었던 Alfred P. Murrah Federal Building을 철골조로 가정하여 모델하였다. 1층 한 변의 스팬길이가 6m 인 5경간과 층고높이는 8m이며, 1층 이외의 층에서는 스팬길이가 3m 이며 총 10경간에 층고높이 4m를 가지는 구조물이다. 또한, 판별하기 용이하도록 하기 위해 각 기둥에 숫자를 지정하였으며, G8, G12, G16, G20, G24, G28 과 같이 기둥의 그룹을 정하였다.

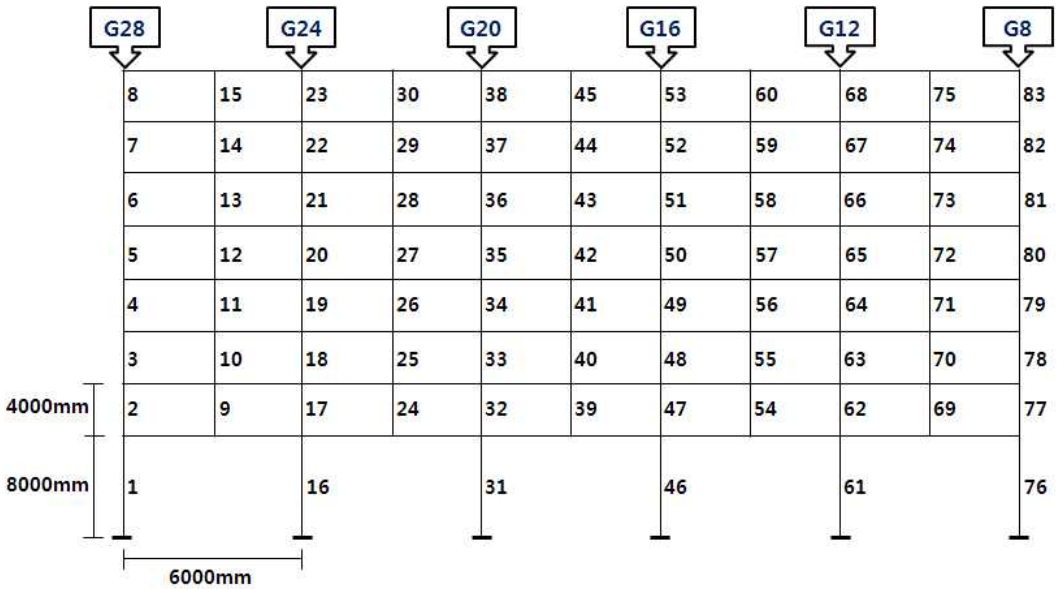


그림 5.2 해석모델

기둥과 보, 브레이스는 SS400강재를 사용하였다. 또한, 부재 종류 및 부재 크기에 따른 전소성 모멘트(M_p)를 산정하였고, 각각의 부재치수는 표 5.1에 나타내었다.

표 5.1 사용된 부재의 특성

부재	강도	부재크기	소성단면계수 Z_p [mm^3]	전소성모멘트 M_p {kN・cm]
Column(1F)	SS400	H-250x250x9x14	$9.61x10^5$	$2.26x10^4$
Column(2 ~ 8F)		H-175x175x7.5x11	$3.69x10^5$	$8.67x10^3$
Beam		H-500x300x11x15	$2.79x10^6$	$3.13x10^4$
Brace		H-175x175x7.5x11	$3.69x10^5$	$8.67x10^3$

5.2.2 부재 손실 유・무에 따른 적용하중

Alfred P. Murrah Federal Building은 연방 청사 건물이다. 따라서, 연방청사 건물에 적용되는 하중은 General Service Administration (GSA, 2003)에서 제시한 가이드라인을 따랐으며, GSA 2003에서는 연쇄붕괴해석을 위한 대체경로법에 따르면 정적해석을 위해 그림 5.4와 같이 부재가 제거된 부분의 인접해 있는 양 경간에 충격에 의한 증폭계수를 고려하여 정상상태에서의 적용하중의 2배를 적용한 하중조합을 사용하고, 정상 상태에서는 그림 5.3과 같이 증폭계수를 사용하지 않고 모든 경간에 동일한 하중을 가할 것을 제시하고 있다. 여기서, Dead Load 는 고정하중을 Live Load는 활하중을 의미한다. 또한, 구조물의 설계하중은 KBC 2009의 설계하중조건을 참고하여 고정하중(DL) 4.3 kN/m^2, 활하중(LL) 2.4 kN/m^2를 적용하였다.

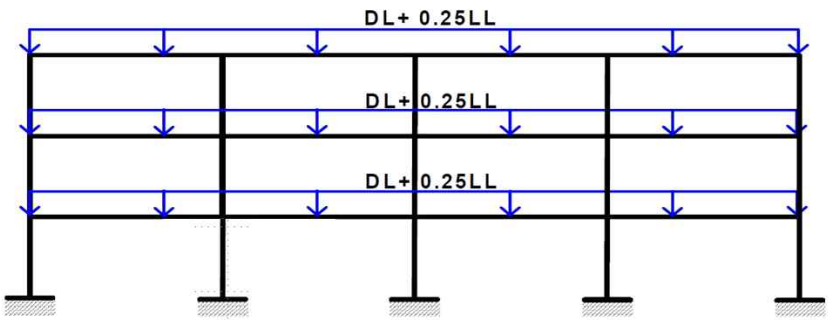


그림 5.3 정상상태에서의 적용하중(GSA 2003)

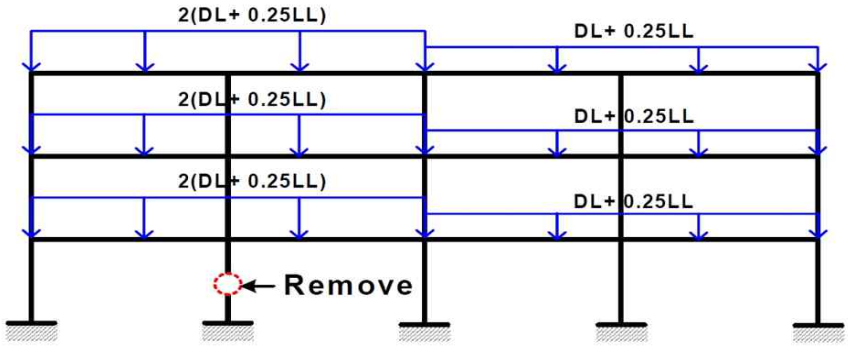


그림 5.4 부재손실 발생 시 적용하중(GSA 2003)

5.3 해석결과

5.3.1 보강 전 하중계수(λ)에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

표 5.2에는 그룹 8(G8)과 그룹 28(G28)의 기둥들에 대한 하중계수에 따른 부재감도지수 및 하중잔존율을 나타내었다. 부재손실 전의 하중계수는 1.428이고, 이 때 구조물의 하중잔존율은 100% 이다.

그러나, 1번 부재가 손실되었을 경우, 하중계수는 0.526으로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.632, 그리고 하중잔존율은 37%로 나타났다. 또한, 2번 부재가 손실되었을 경우에는 하중계수가 0.609로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.574, 하중잔존율은 43%로 나타났다. 이런 식으로 기둥손실의 위치가 올라갈수록 하중계수와 하중잔존율은 점점 작아졌으며, 부재중요도를 판별할 수 있는 부재감도지수는 그만큼 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 1번과 76번 부재가 손실되었을 경우 건축물의 하중잔존율은 37%로 현저히 떨어진 것을 확인할 수 있었으며, 부재감도지수 또한 가장 높은 값을 나타내었다.

표 5.2 G28, G8 기둥열의 하중계수에 따른
부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		G28 기둥열		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	1.428	-	100
1 or 76	$\lambda_{1\ or\ 76}$	0.526	0.632	37
2 or 77	$\lambda_{2\ or\ 77}$	0.609	0.574	43
3 or 78	$\lambda_{3\ or\ 78}$	0.662	0.536	46
4 or 79	$\lambda_{4\ or\ 79}$	0.82	0.426	57
5 or 80	$\lambda_{5\ or\ 80}$	1.06	0.258	74
6 or 81	$\lambda_{6\ or\ 81}$	1.115	0.219	78
7 or 82	$\lambda_{7\ or\ 82}$	1.108	0.224	78
8 or 83	$\lambda_{8\ or\ 83}$	0.868	0.392	61

표 5.3에는 그룹 12(G12)과 그룹 24(G24)의 기둥들에 대한 하중계수에 따른 부재감도지수 및 하중잔존율을 나타내었다.

16번 부재가 손실되었을 경우, 하중계수는 0.607로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.575, 그리고 하중잔존율은 43%로 나타났다. 또한, 17번 부재가 손실 되었을 경우에는 하중계수가 0.72로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.496, 하중잔존율은 50%로 나타났다. 그리고, 최상층인 23번 부재에서는 하중계수가 1.144로 나타났으며 그에 따른 부재감도지수는 0.199, 하중잔존율은 90%로 나타났다. 여기서도, 기둥 손실의 위치가 올라갈수록 하중계수와 하중잔존율은 점점 작아졌으며, 부재중요도를 판별할 수 있는 부재감도지수는 그만큼 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 16번과 61번 부재가 손실되었을 경우 건축물의 하중잔존율은 43%로 현저히 떨어진 것을 확인할 수 있었으며, 부재감도지수 또한 가장 높은 값을 나타내었다.

표 5.3 G24, G12 기둥열의 하중계수에 따른
부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		G28 기둥열		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	1.428	-	100
16 or 61	$\lambda_{16\ or\ 61}$	0.607	0.575	43
17 or 62	$\lambda_{17\ or\ 62}$	0.72	0.496	50
18 or 63	$\lambda_{18\ or\ 63}$	0.842	0.41	59
19 or 64	$\lambda_{19\ or\ 64}$	0.982	0.312	69
20 or 65	$\lambda_{20\ or\ 65}$	1.108	0.224	78
21 or 66	$\lambda_{21\ or\ 66}$	1.129	0.209	79
22 or 67	$\lambda_{22\ or\ 67}$	1.142	0.2	80
23 or 68	$\lambda_{23\ or\ 68}$	1.144	0.199	80

표 5.4에는 그룹 16(G16)과 그룹 20(G20)의 기둥들에 대한 하중계수에 따른 부재감도지수 및 하중잔존율을 나타내었다.

31번 부재가 손실되었을 경우, 하중계수는 0.664로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.535, 그리고 하중잔존율은 46%로 나타났다. 또한, 32번 부재가 손실 되었을 경우에는 하중계수가 0.795로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.443, 하중잔존율은 56%로 나타났다. 그리고, 최상층인 38번 부재에서는 하중계수가 1.142로 나타났으며 그에 따른 부재감도지수는 0.2, 하중잔존율은 80%로 나타났다. 여기서도, 기둥손실의 위치가 올라갈수록 하중계수와 하중잔존율은 점점 작아졌으며, 부재중요도를 판별할 수 있는 부재감도지수는 그만큼 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 31번과 46번 부재가 손실되었을 경우 건축물의 하중잔존율은 46%로 현저히 떨어진 것을 확인할 수 있었으며, 부재감도지수 또한 가장 높은 값을 나타내었다.

표 5.4 G20, G16 기둥열의 하중계수에 따른
부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		G28 기둥열		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	1.428	-	100
31 or 46	$\lambda_{31\ or\ 46}$	0.664	0.535	46
32 or 47	$\lambda_{32\ or\ 47}$	0.795	0.443	56
33 or 48	$\lambda_{33\ or\ 48}$	0.904	0.367	63
34 or 49	$\lambda_{34\ or\ 49}$	0.994	0.304	70
35 or 50	$\lambda_{35\ or\ 50}$	1.124	0.213	79
36 or 51	$\lambda_{36\ or\ 51}$	1.137	0.204	80
37 or 52	$\lambda_{37\ or\ 52}$	1.141	0.201	80
38 or 53	$\lambda_{38\ or\ 53}$	1.142	0.2	80

5.3.2 실제 사례의 붕괴기구 검토 및 트랜스퍼 층 보강 위치

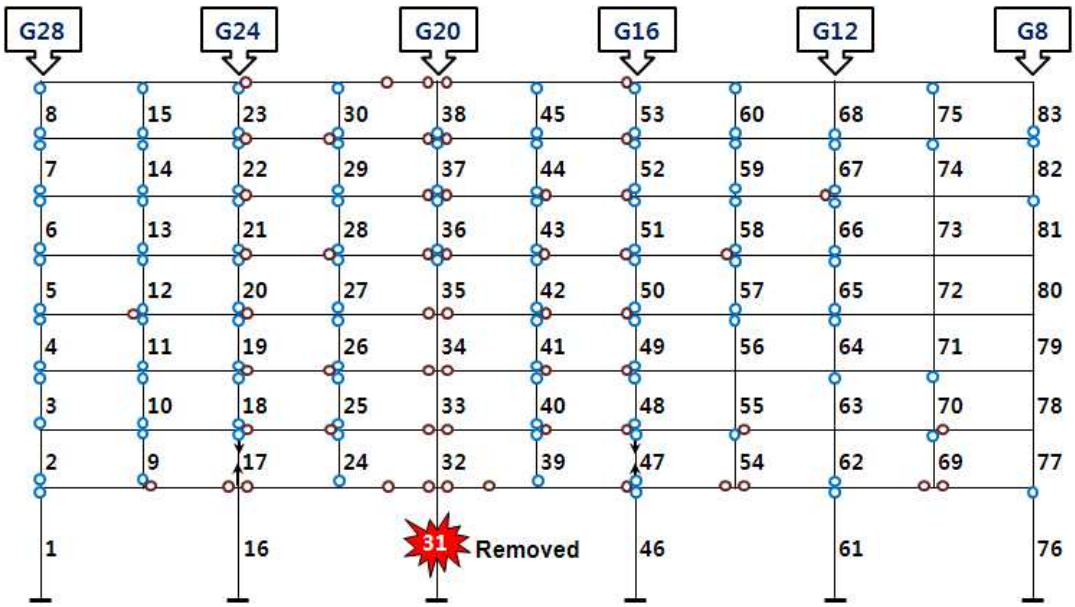


그림 5.5 실제 사례의 붕괴기구

그림 5.5는 Alfred P. Murrah Fedral Building 의 실제 테러에 의한 기둥 손실이 발생하였을 경우, 붕괴기구를 검토한 것이다. 아래와 같이 테러에 의해 31번 부재가 손실되었으며, 손실된 기둥을 중심으로 많은 붕괴기구가 나타났다.

이러한 붕괴기구의 분포 양상으로 미루어 보아 실제 붕괴 사진인 그림 5.1 과 같은 붕괴양상이 나타날 것으로 판단되어지며, 하중계수에 따른 부재감도지수 및 하중잔존율을 통해서도 가장 취약하게 나타난 1층 기둥 부재들의 손실이 이러한 참사를 일으킨 것으로 판단되어진다. 따라서, 가장 취약한 1층 기둥 부재들의 보강이 필요한 시점이며, 1층 기둥에 대한 하중분배를 효율적으로 이루기 위해 2층에 트랜스퍼 층으로 보강하고자 하였다.(그림 5.6)

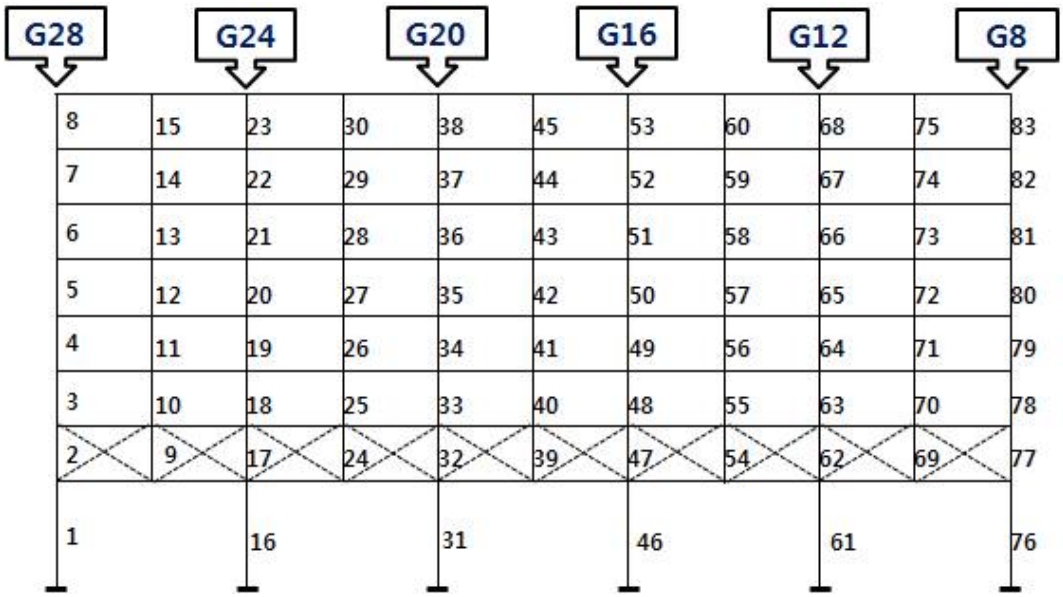


그림 5.6 트랜스퍼 층 보강 위치

5.3.3 트랜스퍼 층 보강 후 하중계수(λ)에 따른 부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

표 5.5에는 트랜스퍼 층 보강 후의 그룹 8(G8)과 그룹 28(G28)의 기둥들에 대한 하

중계수에 따른 부재감도지수 및 하중잔존율을 나타내었다. 부재손실 전의 하중계수는 1.871이고, 이 때 구조물의 하중잔존율은 100% 이다.

1번 부재가 손실되었을 경우, 하중계수는 1.091으로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.417, 그리고 하중잔존율은 58%로 나타났다. 또한, 2번 부재가 손실 되었을 경우에는 하중계수가 1.327로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.291, 하중잔존율은 71%로 나타났다.

표 5.5 G28, G8 기둥열의 하중계수에 따른
부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		G28 기둥열		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	1.871	-	100
1 or 76	$\lambda_{1\ or\ 76}$	1.091	0.417	58
2 or 77	$\lambda_{2\ or\ 77}$	1.327	0.291	71
3 or 78	$\lambda_{3\ or\ 78}$	1.269	0.322	68
4 or 79	$\lambda_{4\ or\ 79}$	1.253	0.330	67
5 or 80	$\lambda_{5\ or\ 80}$	1.229	0.343	66
6 or 81	$\lambda_{6\ or\ 81}$	1.189	0.365	64
7 or 82	$\lambda_{7\ or\ 82}$	1.108	0.408	59
8 or 83	$\lambda_{8\ or\ 83}$	0.868	0.536	46

표 5.6에는 트랜스퍼 층 보강 후의 그룹 12(G12)과 그룹 24(G24)의 기둥들에 대한 하중계수에 따른 부재감도지수 및 하중잔존율을 나타내었다.

16번 부재가 손실되었을 경우, 하중계수는 1.105로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.409, 그리고 하중잔존율은 59%로 나타났다. 또한, 17번 부재가 손실 되었을 경우에는 하중계수가 1.467로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.216, 하중잔존율은 78%로 나타났다. 그리고, 최상층인 23번 부재에서는 하중계수가 1.509로 나타났으며 그에 따른 부재감도지수는 0.193, 하중잔존율은 81%로 나타났다.

표 5.6 G24, G12 기둥열의 하중계수에 따른
부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		G28 기둥열		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	1.871	-	100
16 or 61	$\lambda_{16\ or\ 61}$	1.105	0.409	59
17 or 62	$\lambda_{17\ or\ 62}$	1.467	0.216	78
18 or 63	$\lambda_{18\ or\ 63}$	1.407	0.248	75
19 or 64	$\lambda_{19\ or\ 64}$	1.509	0.193	81
20 or 65	$\lambda_{20\ or\ 65}$	1.509	0.193	81
21 or 66	$\lambda_{21\ or\ 66}$	1.509	0.193	81
22 or 67	$\lambda_{22\ or\ 67}$	1.509	0.193	81
23 or 68	$\lambda_{23\ or\ 68}$	1.509	0.193	81

표 5.7에는 트랜스퍼 층 보강 후의 그룹 16(G16)과 그룹 20(G20)의 기둥들에 대한 하중계수에 따른 부재감도지수 및 하중잔존율을 나타내었다.

31번 부재가 손실되었을 경우, 하중계수는 1.096으로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.414, 그리고 하중잔존율은 59%로 나타났다. 또한, 32번 부재가 손실 되었을 경우에는 하중계수가 1.442로 나타났으며, 그에 따른 부재감도지수는 0.229, 하중잔존율은 77%로 나타났다. 그리고, 최상층인 38번 부재에서는 하중계수가 1.546으로 나타났으며 그에 따른 부재감도지수는 0.174, 하중잔존율은 83%로 나타났다.

표 5.7 G20, G16 기둥열의 하중계수에 따른
부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		G28 기둥열		
		Load F.	S.I.	잔존율(R.R.)
Non	λ_0	1.871	-	100
31 or 46	$\lambda_{31\ or\ 46}$	1.096	0.414	59
32 or 47	$\lambda_{32\ or\ 47}$	1.442	0.229	77
33 or 48	$\lambda_{33\ or\ 48}$	1.473	0.213	79
34 or 49	$\lambda_{34\ or\ 49}$	1.529	0.183	82
35 or 50	$\lambda_{35\ or\ 50}$	1.534	0.180	82
36 or 51	$\lambda_{36\ or\ 51}$	1.538	0.178	82
37 or 52	$\lambda_{37\ or\ 52}$	1.542	0.176	82
38 or 53	$\lambda_{38\ or\ 53}$	1.546	0.174	83

표 5.8에는 트랜스퍼 층으로 보강되기 전과 후의 가장 취약함을 보인 1층 기둥에 대한 하중계수에 따른 부재감도지수와 하중잔존율을 나타내었다. 정상상태에서의 보강 전 하중계수는 1.428에서 보강 후 1.871로 증가하였으며, 보강 전과 후의 하중잔존율 또한 큰 차이로 증가한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 부재의 중요도를 알 수 있는 부재감도지수 또한 감소한 것을 확인할 수 있었다.

표 5.8 1층 기둥에 대한 하중계수에 따른
부재감도지수(S.I.) 및 하중잔존율(R.R.)

Disappearance Member		트랜스퍼 층 無			트랜스퍼 층 有		
		Load F.	S.I.	잔존율 (R.R.)	Load F.	S.I.	잔존율 (R.R.)
Non		1.428	-	100	1.871	-	100
G28 or G8	1 or 76	0.526	0.632	37	1.091	0.417	58
G24 or G12	16 or 61	0.607	0.575	43	1.105	0.409	59
G20 or G16	31 or 46	1.083	0.242	76	1.549	0.172	83

5.3.4 트랜스퍼 층 보강 후 붕괴기구 검토

트랜스퍼 층 보강 후 붕괴기구를 검토해보면, 보에서의 소성힌지 분포는 감소하였으나, 전체적으로 붕괴기구는 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 트랜스퍼 층을 형성한 부분에서 소성힌지 뿐만 아니라 압축과 인장에 의한 부재의 항복도 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 실제 테러에 의한 31번 부재의 손실이 발생하였을 경우, 붕괴기구의 검토만으로는 트랜스퍼 층을 통한 보강이 연쇄적인 붕괴를 방지할 수 있다고 말할 수 없으나, 구조물의 손상하중계수가 보강 전에 1.083이었던 것이 보강 후 1.549로 보강 전 정상상태에서의 하중계수보다 더 높은 것을 확인할 수 있다. 따라서, 트랜스퍼 층을 형성하였을 경우, 실제 테러와 같은 비정상 하중에 의한 동일한 위치의 기둥 부재가 손실되더라도 Alfred P. Fedural Bilding의 연쇄적인 붕괴는 방지할 수 있었을 것으로 사료되어진다.

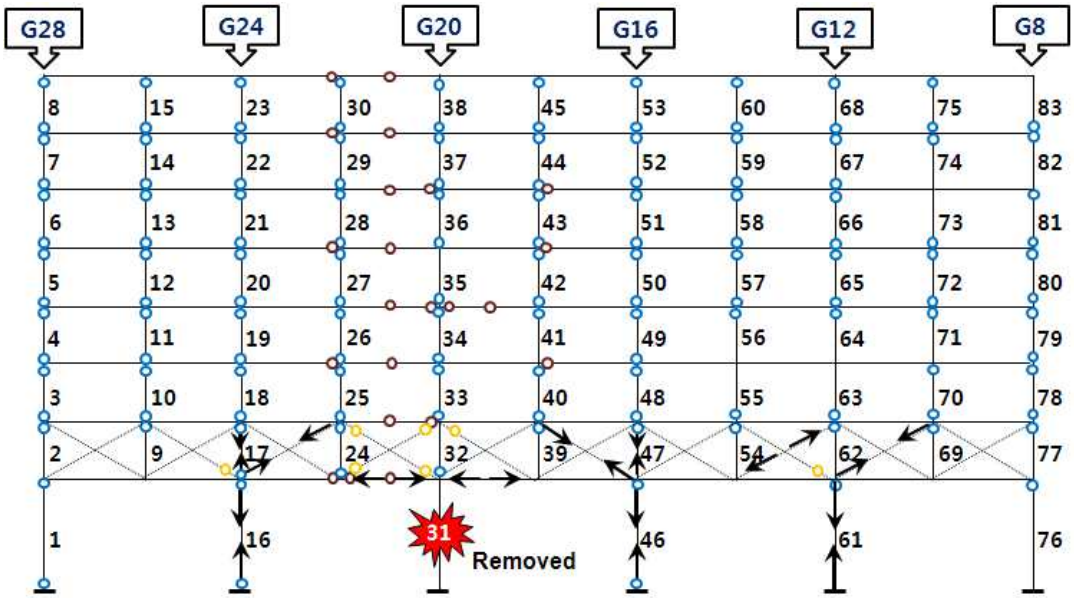


그림 5.7 트랜스퍼 층 보강 후 붕괴기구

5.4 소결

실제 차량을 이용한 폭탄테러에 의한 비정상하중이 발생하여 연쇄붕괴를 일으켰던 미국의 Alfred P. Murrah Federal Building을 모델로 하여 Compact Procedure Method를 이용하여 하중지지능력을 평가하여 다음과 같은 소결을 얻을 수 있었다.

트랜스퍼 층 보강을 위해 구조물의 부재감도지수가 높은 부재(중요부재)들을 판별하여 하중분산을 위해 트랜스퍼 층을 형성함으로써 구조물의 하중지지능력이 향상됨을 확인할 수 있었다. 또한, 실제 테러에 의한 31번 부재의 손실이 발생하였을 경우, 붕괴기구의 검토만으로는 트랜스퍼 층을 통한 보강이 연쇄적인 붕괴를 방지할 수 있다고 말할 수 없으나, 손상하중계수가 보강 전에 1.083이었던 것이 보강 후 1.549로 보강 전 정상상태에서의 하중계수인 1.428보다 더 높게 나타났으므로 Alfred P. Fedural Bilding의 연쇄적인 붕괴와 같은 사고는 방지할 수 있었을 것으로 판단되어진다.

제6장 철골 주차장에서의 화재 시 안전성 평가

6.1 개요

최근 주차장에서의 차량화재로 인한 피해가 빈번해지고 있으며, 이로 인해 많은 인명 및 재산상의 피해를 입히고 있다. 그 중 철골주차장은 구조의 단순화, 공사비의 경제성, 대지의 활용도가 우수하여 많이 이용되고 있다. 이러한 철골주차장에서 차량화재가 발생하게 되면 고온에 노출 된 철골부재의 인장강도와 항복강도가 상온에서의 강도보다 현저히 감소하게 된다.

따라서, 본 장에서는 화재 시 대규모 피해가 우려되는 승용차 밀집공간인 자주식철골주차장의 차량화재 시 각 부재별 온도를 CFAST를 통하여 산출하고 이를 통해 시간별 강재의 내력저하곡선을 산정하였다. 또한, 극한해석을 통해 내력저하에 따른 구조물의 하중지지능력을 검토하였고, 일반구조용 강재와 내화강재의 화재 시 내력저하 추이와 하중지지능력에 대해서 검토하였다.

6.2 화재시뮬레이션 CFAST

미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology) 산하의 BFRL(Building and Fire Research Laboratory)에서 개발한 프로그램인 CFAST는 화재가 발생할 경우 건축물의 구획들을 통해 연기, 유해가스, 온도의 전개 분포를 계산하기 위해 사용되는 Two - 존 화재 모델이다. 존 모델은 구획실을 2개의 경계층으로 단순하게 표현하여 보존방정식을 구획별로 적용한다. 여기서 사용되는 모델링 방정식은 초기값 문제를 가지고 있는 수학식을 보통미분 방정식(Ordinary Differential Equation, ODEs)의 시스템으로 간주하는데, 이러한 방정식은 질량보존 및 에너지보존 법칙, 이상기체의 상태방정식과 밀도와 내부에너지와 관계를 이용하여 유도가 가능하다. 또한, 2개의 경계층에서 질량과 엔탈피의 축적으로 이루어지는 압력, 경계층의 높이, 온도 등이 시간경과에 따라 예측된다.

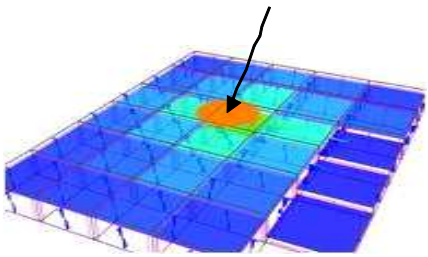
CFAST의 결과물은 화재 시 구획내부의 상태를 평가할 수 있도록 각 경계층의 온도, 천정, 벽, 바닥 온도 등을 포함하며 구획의 체적 크기가 1m^{3}부터 1,000m^{3}까지 사용이 가능하고 모델 결과값이 실제 실험값의 10 ~ 25% 범위 내에서 만족하는 비교적 정확한

예측이 가능한 프로그램이다.

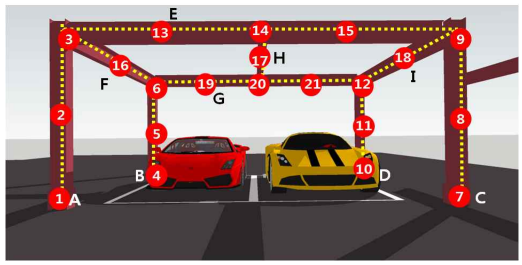
본 장에서는 화재시뮬레이션 결과 도출된 온도값을 토대로 각 부재의 온도에 따른 항복강도를 산정한 후 간략화법을 통하여 화재가 철골구조물에 미치는 영향을 평가하였다.

6.2.1 화재 발생지점 및 대상공간 설정

화재시뮬레이션 해석을 위하여 화재 발생지점 및 대상공간을 설정하였다. 그림 5.1(a)는 화재 발생지점을 나타낸 그림이다. 대상 구조물은 주변에서 흔히 볼 수 있는 자주식 철골 주차장을 모델링한 것으로 화살표 부분에서 화재가 발생하였다고 가정하였다. 그리고 그림 5.1(b)는 화재가 발생한 대상공간만을 확대하여 3D로 모델링한 것이다. 대상공간의 좌측 차량에서 화재가 발생하였으며 우측 차량까지 전파되었다고 가정하여 해석을 수행하였다. 또한, 대상공간의 부재에는 온도 측정 위치를 숫자로 표현하며 Target으로 지정하였다. 여기서 A ~ D는 기둥을, E ~ H는 보를 나타낸다.



(a) 화재 발생지점



(b) 대상공간

그림 6.1 화재 발생지점 및 대상공간

표 5.1은 대상 공간의 제원을 나타낸 것이다. 대상 공간의 층고높이는 2.7m이며, 폭은 5m인 구조물이며 기둥은 H-400 X 400 X 13 X 21를 사용하였고, 보는 H-600 X 300 X 14 X 23를 사용하였다.

표 6.1 대상 공간의 제원

기둥	H-400 X 400 X 13 X 21
보	H-600 X 300 X 14 X 23
층고높이	2.7m

표 5.2는 대상공간을 시뮬레이션하기 위한 설정값을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 시간은 60분으로 설정하였으며, 내·외부의 온도는 동일하게 20℃로 설정하였으며, 출력간격은 0.5분, 대기압은 101300pa, 습도는 50%로 설정하여 해석을 수행하였다.

표 6.2 대상공간의 설정값

구분	내용	
초기 설정값	설정	설정값
	Simulation Time	3600s
	Text Output Interval	30s
	내/외부의 Temperature	20/20° c
	Relative Humidity	50%
	Pressure	101300pa

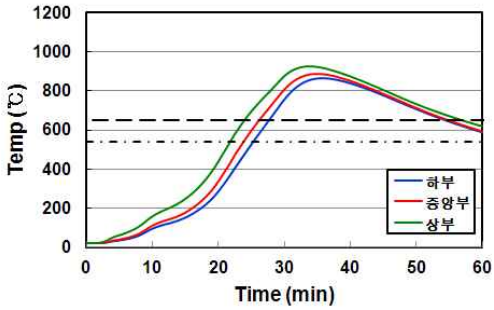
6.2.2 각 부재별 온도분포

각 부재별 온도분포에서는 한국표준협회 KS F 2257 - 1,4,5,6에서 제시한 허용 온도 538℃와 최대 허용 온도 649℃를 그래프에 표시하여, 강재의 표면 온도가 허용 온도 및 최대 허용 온도에 도달하는 시간을 확인하고자 하였다.

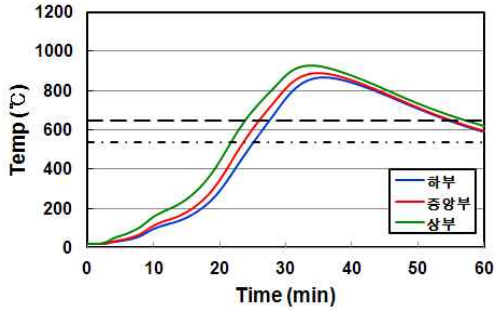
Column의 위치별 온도분포를 살펴보면, 모든 Column의 상부에서 가장 높은 온도분포를 보이고 있으며 약 35분 경에 최대온도(약 900℃)에 도달한 후 온도가 서서히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

우선, 상부에서 가장 높은 온도를 보이는 이유는 화재가 상부로 전파되는 특성을 가지고 있기 때문이며, 30분이 지난 후 차량의 화재가 전소되어 강재의 표면 온도가 하락하는 것을 확인할 수 있었다.

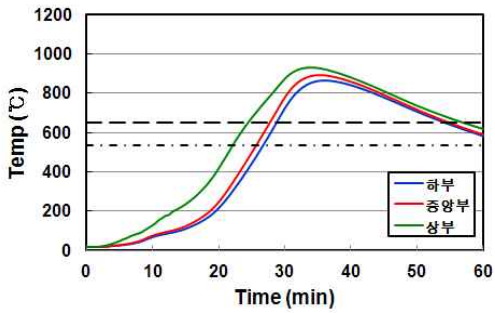
또한, Column A,B,C,D 하부의 경우에는 약 28분 경에 최대 허용 온도인 649℃에 도달하게 되고, 상부의 경우에는 약 24분 경에 최대 허용 온도인 649℃에 도달하는 것을 확인할 수 있었다.(그림 6.2)



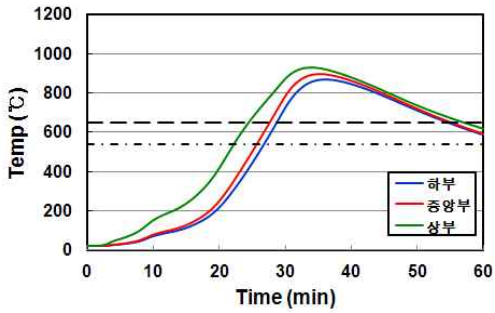
(a) Column A의 위치 별 온도



(b) Column B의 위치 별 온도



(c) Column C의 위치 별 온도



(d) Column D의 위치 별 온도

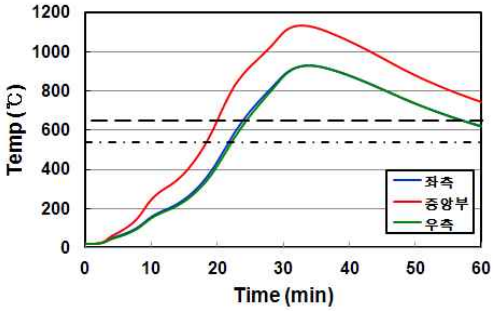
그림 6.2 Column의 위치별 시간 - 온도 관계

Beam의 위치별 온도분포를 살펴보면, 부재의 중앙부에서 가장 높은 온도분포를 보이고 있으며 약 35분 경에 최대온도(약 900℃ ~ 1100℃)에 도달한 후 온도가 서서히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

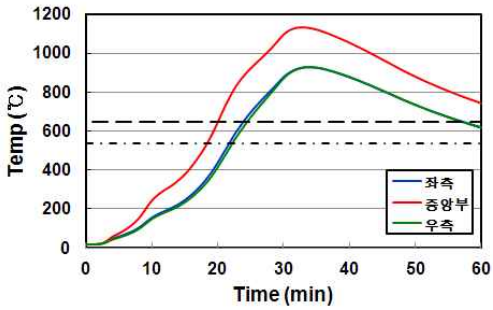
특히, Beam E와 G의 경우 중앙부와 다른 부분의 온도가 약 200℃ 정도 차이가 나는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 중앙부가 화기에 접한 부분이 다른 부분보다 더 크기 때문이며, Beam F와 I에서는 화기에 접한 부분이 그렇게 크지 않아서 비슷한 온도분포를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

그리고 Beam H의 경우에는 다른 보의 온도 분포보다 각 위치 별 온도 분포가 더 높은 것을 볼 수 있는데 이는 보 E와 G의 중앙부와 마찬가지로 화기에 접한 부분이 다른 부분보다 더 크기 때문이다.

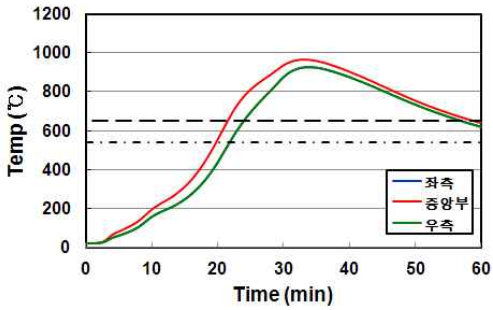
또한, Beam E,F,G,H,I 에서는 약 20 ~ 25분 경에 최대 허용 온도인 649℃에 도달하게 되는 것을 확인할 수 있었다.(그림 6.3)



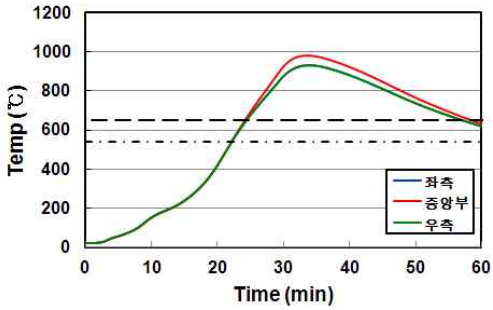
(a) Beam E의 위치 별 온도



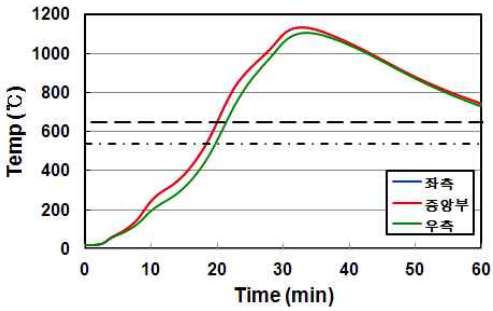
(b) Beam G의 위치 별 온도



(c) Beam F의 위치 별 온도 분포



(d) Beam I의 위치 별 온도



(e) Beam H의 위치 별 온도

그림 6.3 Beam의 위치별 시간 - 온도 관계

6.2.3 온도에 따른 강재의 항복강도

간략화법 해석을 통해 구조물의 하중지지능력을 평가하기위하여 각 구조부재의 온도 해석 결과를 통해 강재의 항복강도를 산정하였다.

그림 6.4는 강재의 항복강도를 구하기 위한 각 부재의 평균온도를 나타낸 그래프이다. Beam H에서 가장 높은 온도분포를 보이고 있으며, Beam F, G, I, E에서도 Column에 비해 비교적 높은 온도 분포를 나타내었다. 또한, 권인규 (2006)는 구조용 강재의 내화 특성에 관한 실험적 연구에서 다양한 종류의 강재의 온도실험을 통하여 회귀식을 제안하였으며, 그 중 SM490 강재와 FR490 강재의 회귀식을 통해 온도 곡선에 따른 강재의 항복강도를 산출하고자 하였다.

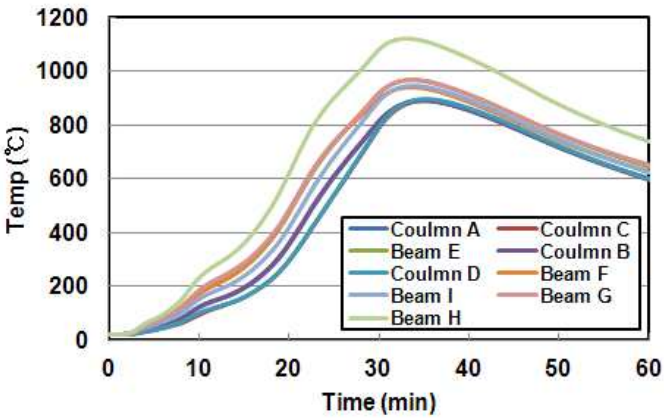


그림 6.4 각 부재의 평균 온도 분포

화재시뮬레이션 수행 결과 도출된 각 부재 별 표면 온도를 아래의 식들에 대입하여 항복강도를 산출하였다.

식(10)은 SM490강재의 항복강도를, 식(11)은 FR490의 항복강도를 산정하는 식이다. 이 식들을 통해 강재의 온도에 따른 항복강도를 산정할 수 있다.

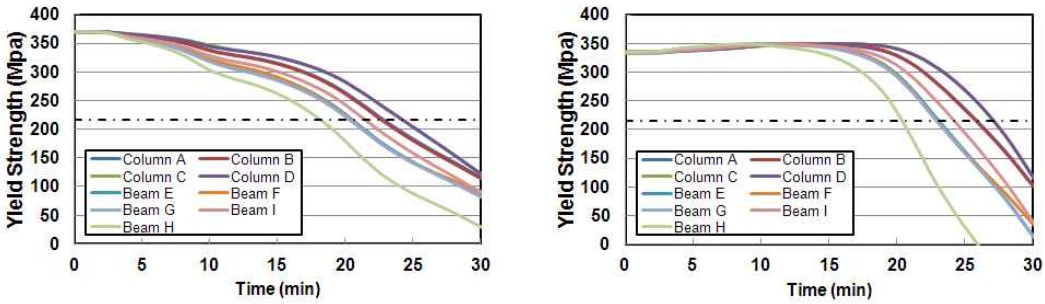
$$\sigma_y(\text{SM490}) = -0.32T + 452.88 \text{ [Mpa]} \quad (9)$$

$$\sigma_y(\text{FR490}) = -0.0006T^2+0.21T+330.29 \text{ [Mpa]} \quad (10)$$

여기서, σ_y : 항복강도,

T : 각 부재 별 온도.

그림 6.4에 나타낸 각 부재의 평균 온도를 식(10)과 식(11)에 대입하여 시간에 따른 강재의 항복강도를 산정한 그래프를 그림 6.5에 나타내었다.



(a) SM490 강재의 부재 별 항복강도 (b) FR490 강재의 각 부재 별 항복강도

그림 6.5 일반 구조용 강재 및 내화 강재의 항복강도

SM490 강재의 경우, 그림 6.5(a)에서 보이는 바와 같이 Beam H에서 가장 먼저 강재의 허용응력(216 Mpa)에 도달하였으며, Column C, D에서 마지막으로 강재의 허용응력에 도달하였다. 이때 강재의 허용응력에 도달하는 시간을 살펴보면, Beam H에서는 약 18분, Column C,D에서는 약 24분이 걸리는 것을 확인할 수 있었다.

FR490 강재의 경우에는 SM490 강재의 경우와 마찬가지로 Beam H에서 가장 먼저 강재의 허용응력에 도달하였으며, Column C, D에서 마지막으로 강재의 허용응력에 도달하였다. 그리고 강재의 허용응력 도달 시간을 살펴보면, Beam H에서는 약 22분이 걸렸고. Column C,D에서는 약 29분이 걸리는 것을 확인할 수 있었다.(그림 6.5(b))

SM490강재와 FR490강재 모두 Beam에서 가장 먼저 항복응력에 도달하였으며, Column에서 가장 마지막으로 항복응력에 도달하는 것을 확인하였다. 이를 통해 화재 발생 시

Beam이 가장 취약한 부재로 판단된다.

또한, 일반구조용 강재에서 모든 부재가 25분 내에서 모두 항복하였으므로, 내화강재와의 비교를 위해서 25분 동안의 강재 별 하중지지능력을 비교하고자 하였다.

6.3 간략화법에 의한 해석

6.3.1 해석모델 및 부재의 특성

6.2장에서 화재시뮬레이션을 수행하여 도출된 강재의 표면 온도를 통해 강종별 항복강도를 산정할 수 있었다. 이를 통해 간략화법에 의한 해석수행이 가능해졌으며, 해석을 통해 구조물의 하중지지능력을 판별할 수 있었다. 간략화법에 의한 해석을 수행하기 위한 해석모델은 그림 6.6과 같다. 화재시뮬레이션의 해석모델에서 간략화법 해석을 위한 2D모델을 산정하기 위해 노란선으로 연결된 부분 즉, A - E - C 부분의 골조를 모델링하여 해석을 수행하였다.

또한, 각 부재의 특성은 표 6.3과 같이 나타내었으며, 일반구조용 강재(SM490)와 내화강재(FR490)의 비교를 위해 동일한 부재 크기를 사용하였으며, 각 부재의 전소성모멘트(M_p)는 상온(20℃)일 때의 값만을 나타내었다. 그리고 온도에 따른 각 강재의 항복강도와 소성단면계수(Z_p)를 곱하여 화재 발생 후 온도가 올라가는 것에 따른 전소성모멘트를 산출할 수 있었다.

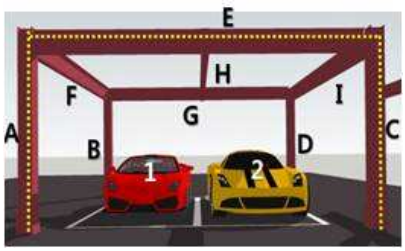


그림 6.6 해석모델

표 6.3 해석모델의 각 부재 특성

강재 종류	부재	부재 크기	소성단면계수 Z_p (mm^3)	전소성모멘트 M_p (kN・cm)
SM490 (일반구조용 강재)	Column A	H - 400 x 400 x 13 x 21	$3.67x10^6$	$1.35x10^5$
	Column C			
	Beam E	H - 600 x 300 x 14 x 23	$5.2x10^6$	$1.92x10^5$
FR490 (내화강재)	Column A	H - 400 x 400 x 13 x 21	$3.67x10^6$	$1.23x10^5$
	Column C			
	Beam E	H - 600 x 300 x 14 x 23	$5.2x10^6$	$1.74x10^5$

6.3.2 구조물의 하중지지능력 평가

간략화법에 의한 해석수행 결과 다음과 같은 시간에 따른 구조물의 하중계수 그래프를 산출할 수 있었다.(그림 6.7 ~ 6.9)

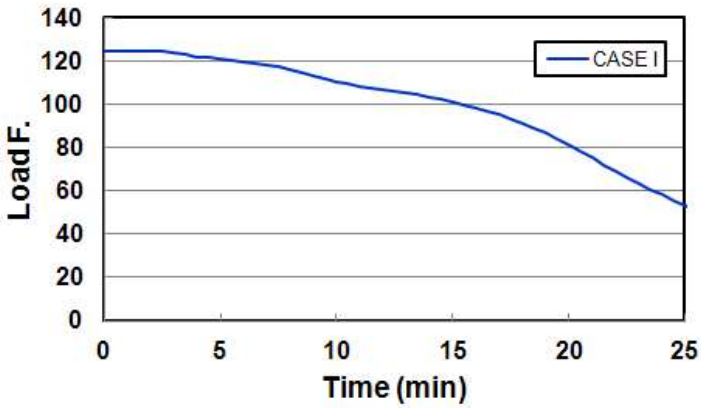


그림 6.7 일반구조용 강재(SM490)로 설계된 구조물의 하중계수

그림 6.7는 일반구조용 강재로 설계된 구조물의 하중계수를 나타낸 그래프이다. SM490 강재를 사용하여 설계한 구조물의 화재 발생 전 하중계수(λ)는 124.64로 나타났다. 그리고 화재 발생 후 5분이 지났을 때는 120.84로 소폭 하락하였으며, 10분 경

과 후 110.46을 나타내었으며, 화재 발생 25분이 경과하였을 때 53.39로 화재 발생 전의 하중계수보다 현저히 떨어졌다. 이는 구조물의 화재 발생 전의 하중계수에 비해 약 4배 정도의 하중지지능력을 상실한다는 것을 확인할 수 있었다.

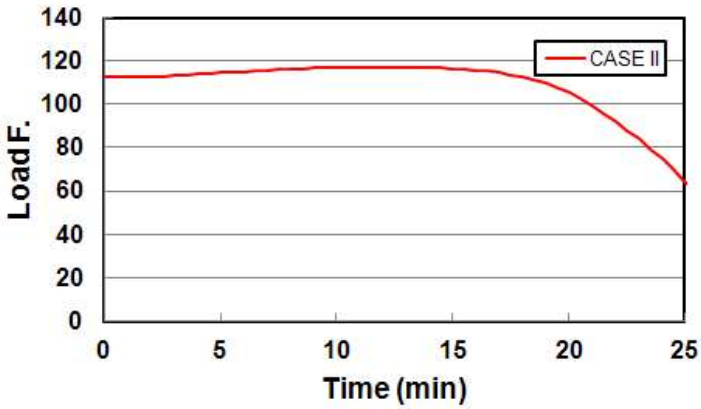


그림 6.8 내화 강재(FR490)로 설계된 구조물의 하중계수

그림 6.8은 내화 강재로 설계된 구조물의 하중계수를 나타낸 그래프이다. FR490 강재의 경우, 구조물의 화재 발생 전 하중계수는 112.74로 나타났다. 그러나 화재 발생 약 15분이 경과할 때까지 내화강재의 특성으로 인하여 하중계수는 116.53으로 상승하다가 5분 여 동안 서서히 감소한 후 화재 발생 약 20분이 경과하자 급격한 감소를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 급격한 감소에도 불구하고 일반구조용 강재(SM490)보다 더 큰 하중계수를 보이고 있는데, 이를 통해 화재 발생 시 내화강재로 설계된 구조물의 하중지지능력이 일반구조용 강재로 설계된 구조물보다 더 뛰어남을 확인할 수 있었다.

하지만, 내화강재는 비용 측면에서 일반 구조용 강재와 차이를 보이고 있는 것은 사실이다. 따라서, 경제성을 고려하여 구조물의 하중지지능력을 향상시키기 위해 화재에 가장 취약한 부재인 Beam에 내화강재(FR490)를 사용하여 그 효용성을 비교하였다.

Column에는 일반 구조용 강재를 사용하였고, 화재에 특히 취약함을 보인 Beam에는 내화강재를 사용하여 다음과 같은 그래프를 얻을 수 있었다.

상온에서의 하중계수는 117.708로 일반구조용 강재를 사용하였을 때와 내화강재를

사용하였을 때의 중간 값을 나타내고 있었다. 이를 통해 내화강재만을 사용하였을 경우의 상온에서의 하중지지능력 저하는 일정부분 방지하였다는 것을 확인할 수 있었고, 화재 발생 후에도 내화강재의 특성과 비슷하게 하중지지능력이 소폭 상승하다 약 20분 후에 급격하게 떨어지는 모습을 보이고 있었다. 하지만 그 편차는 내화강재만을 사용하였을 경우와 비교하면 급격함이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.(그림 6.9)

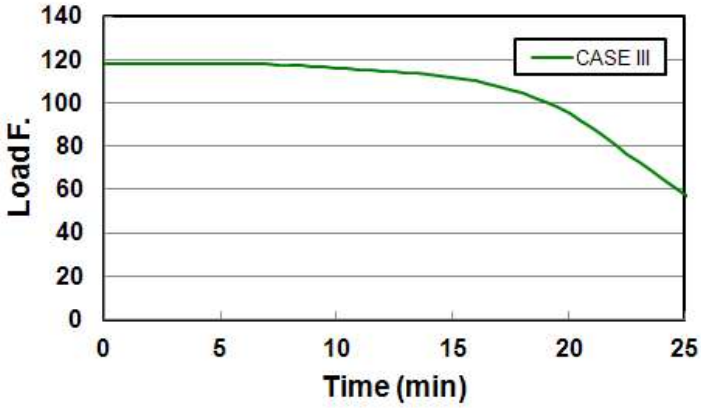


그림 6.9 Beam(내화 강재) + Column(일반구조용 강재)의 하중지지능력 비교

그림 6.10에서는 일반구조용 강재만을 사용하였을 경우와 내화강재만을 사용하였을 경우 그리고 구조물에서 화재에 가장 취약한 Beam에 내화강재를 사용한 경우의 하중지지능력을 나타낸 그래프이다. 일반구조용 강재를 사용하였을 경우에 비해 더 높은 하중지지능력을 확보하였으며, 내화강재만을 사용하였을 경우에 비해서는 다소 낮게 나타났다. 하지만 내화강재를 사용하였을 경우의 최소 약 80% 이상의 하중지지능력을 확보하는 것을 확인할 수 있었다.

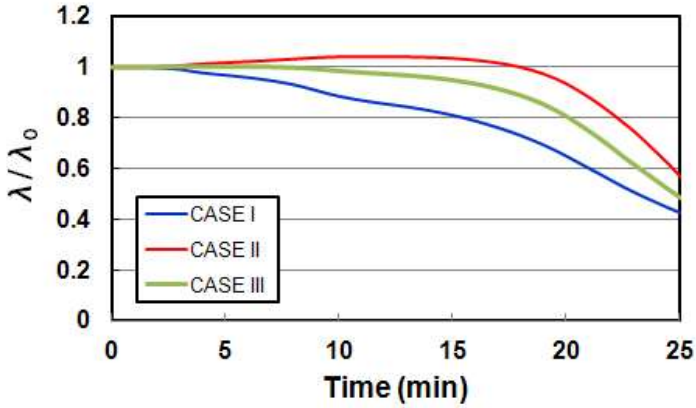


그림 6.10 일반구조용 강재와 내화 강재의 하중지지능력 비교

6.4 소결

실물실험이 어려운 화재실험을 화재시뮬레이션인 CFAST를 통하여 강재의 표면 온도를 산출하였고 그에 따른 강재의 항복강도를 산출하여 부재 별 허용응력에 도달하는 시간을 확인할 수 있었다. 또한, 이를 토대로 시간에 따른 구조물의 하중지지능력 저하 추이를 확인할 수 있었다.

일반구조용 강재(SM490)를 사용하여 설계하였을 경우, 화재 발생 후 온도가 최고점이 되었을 때의 하중지지능력과 화재 발생 전 상온에서의 구조물의 하중지지능력은 약 5배 정도 감소하였으며, 내화강재(FR490)를 사용하여 구조물을 설계하였을 경우에는 화재 발생 약 15분이 경과할 때까지 하중지지능력은 소폭 상승하였다가 약 20분 경과 후 급격한 하중지지능력의 하락을 보였으나, 일반구조용 강재에 비해 하중지지능력은 크게 향상됨을 확인하였다.

또한, 구조물에서 화재가 발생하였을 때 가장 취약한 Beam만을 내화강재로 설계하였을 경우, 내화강재만을 사용하였을 때의 하중지지능력에 최소 80% 이상을 확보하였으며, 이를 통해 화재에 취약한 부재를 판별하여 부분적인 내화강재 설계가 경제성과 구조물의 안전성을 동시에 확보할 것으로 사료된다.

제7장 결론

본 논문에서는 극한 해석의 하계 정리를 기본으로 한 Compact Procedure Method를 이용하여 비정상하중에 의한 우발적 하중이 발생하였을 경우 대상 구조물의 하중지지능력을 평가하였고, 비정상하중에 가장 취약한 부재를 판별하여 보강함으로써 구조물의 하중지지능력 향상에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다.

1. 평면트러스 해석결과, 구조물의 각 부재들의 중요도를 도출하고 순차적으로 보강하여 구조물의 하중지지능력에 미치는 영향에 대해 평가하였으며, 스팬의 개수와 지지조건에 상관없이 중요도가 높은 부재를 판별하여 보강하는 것이 경제적이고 효과적인 것으로 판단되어진다.

2. 벨트트러스 설치 유·무에 따른 해석결과, 하중조건에 상관없이 브레이스 및 벨트트러스를 구조물에 설치함으로써 구조물의 하중지지능력이 향상됨을 알 수 있었다. 또한, 부재의 우발적인 손실로 인한 하중지지능력의 저하 또한 상당부분 완화시키는 효과가 있음이 확인되었고, 부재의 손실이 발생할 경우에 하중계수와 소성힌지 발생지점을 비교해보았을 때, CASE의 종류에 상관없이 내부기둥보다 외부기둥이 우발적인 하중에 취약하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 중앙코어 브레이스 및 벨트트러스는 수평하중에 더 크게 저항함을 검토하였으며, 연직하중만 작용할 경우보다 수평하중이 동시에 작용할 때에 하중지지능력이 큰 폭으로 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 오클라호마 시(市) 연방청사의 하중지지능력 평가에 대한 해석결과, 트랜스퍼 층 보강을 위해 구조물의 부재감도지수가 높은 부재(중요부재)들을 판별하여 보강함으로써 구조물의 하중지지능력이 향상됨을 확인할 수 있었으며, 트랜스퍼 층 보강을 통해 실제 테러에 의한 부재의 손실이 발생하였을 경우, 붕괴기구의 검토만으로는 트랜스퍼 층을 통한 보강이 연쇄적인 붕괴를 방지할 수 있다고 말할 수 없으나, 손상하중계수가 보강 전 정상상태에서의 하중계수보다 높게 나타났으므로 Alfred P. Fedural Bilding의 연쇄적인 붕괴는 방지할 수 있었을 것으로 사료된다.

4. 강재의 표면 온도에 따른 강재의 항복강도를 산출하여 부재 별 허용응력에 도달하는 시간을 확인할 수 있었으며, 일반구조용 강재와 내화강재의 화재 발생 시 구조물의

하중지지능력에 미치는 영향에 대해 확인하였다. 또한, 가장 취약한 부재를 내화강재로 설계하였을 경우, 내화강재만을 사용하였을 때의 하중지지능력에 최소 80% 이상을 확보하는 것을 확인할 수 있었고, 이를 통해 화재에 취약한 부재를 판별하여 부분적인 내화강재 설계가 경제성과 구조물의 안전성을 동시에 확보할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

국내논문

1. 곽윤근, 김우석, 이정제, 웨브부분의 내화피복재가 손상된 강재기둥의 내화성능해석, 대한건축학회논문집 구조계, 제26권 3호, pp.35-44, 2010

2. 권인규, 구조용 강재의 내화 특성에 관한 실험적 연구, 학위논문(박사), 한양대학교, 2003

3. 김진구, 김태완, 커버플레이트 보강 보-기둥 접합부로 구성된 철골 모멘트 골조의 붕괴저항 성능평가, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 대한건축학회, 제26권 제1호, pp.273-276, 2006

4. 김진구, 김태완, 비선형동적해석 방법을 이용한 철골모멘트골조의 연쇄붕괴저항성능 평가, 대한건축학회논문집 학술발표대회논문집, 대한건축학회, 제28권 제1호, pp.77-80, 2007

5. 김진구, 홍수민, 연쇄붕괴 시 철골조의 거동 분석, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 대한건축학회. 제28권 제1호, pp.77-80, 2008

6. 김진구 외 2인, 철골조의 연쇄붕괴 민감도 해석, 한국전산구조공학회논문집, 한국전산구조공학회, 제21권 제3호, pp.211-216, 2008

7. 김진구 외 2인, 내진 및 연쇄붕괴 저항성능 향상을 위한 기존 구조물의 효율적인 보강방법에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 구조계, 대한건축학회, 제25권 제2호, pp.91-98, 2009

8. 김한수, 초고층건물에서 연쇄붕괴 방지를 위한 요구수평하중, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 대한건축학회, 제26권 제1호, pp.45-48, 2006

9. 김한수, 최형근, 아웃리거와 벨트트러스가 고층 건물의 연쇄붕괴 방지에 미치는 효과, 대한건축학회논문집 구조계, 대한건축학회, 제25권 제3호, pp.51-58, 2009

10. 김화중, 이지희, 이창준, 추연희, 무피복FR강을 사용한 철골주차장의 화재시 거동성상 예측에 관한 연구, 한국전산구조공학회 1998년도 봄학술발표회 논문집, pp.398-405, 1998

11. 박성수, 김시모, 벨트트러스 시스템을 가지는 초고층 건물의 연쇄붕괴 근사해석, 대한건축학회지회연합회 학술발표대회논문집, 대한건축학회, 10(1) pp.197-201, 2010

12. 이철호, 독본(dogbone) 내진접합부를 갖는 철골 모멘트골조의 횡강성 평가, 한국전산구조공학회 논문집, 한국전산구조공학회, 제15권 제4호, pp.639-647, 2002

13. 이철호, 철골모멘트골조의 비선형 동적 연쇄붕괴 근사해석, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 대한건축학회, 제 27권 제1호, pp.353-356, 2007

국외논문

14. Jea-hyouk Choi ,Dong-kuk Chang, Prevention of progressive collapse for building structures to member disappearance by accidental actions. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, pp.1016-1019, 2009

15. Longinow, A. and Mniszewski, K.R, Protecting Buildings Against Vehicle Bomb Attacks. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 1(1), pp.51-54, 2003

16. OHI Kenichi, et al, Sensitivity analysis on vertical load carrying capacity of framed structures to member disappearance, JSSC, Ver. No 11, pp.325-332, 2003

단행본

17. FEMA, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of

buildings. FEMA-356, Federal Emergency management Agency, Washington D.C, 2000

18. NIST, Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings, 2006

19. The U.S. General Srevices Administration(GSA), Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, 2003

20. Unified Facilities Criteria (UFC) DoD, Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, 2005