Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.26, No.4, pp.299-309, August, 2014

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2014.26.4.299

800MPa급 고성능 강재 적용한 초고층 메가 부재 대안설계

조소훈[1] · 김도환[2*] · 김진원[2] · 이승은[2] · 김진호[3]

[1]공학박사, 창민우 구조 [2]책임연구원, POSCO 철강솔루션센터 건축건자재연구그룹
[3]수석연구원, POSCO 철강솔루션센터 건축건자재연구그룹

Alternative Design of Mega Structural Members of a Super-tall Building using 800MPa Grade High-performance Steel Plate

Cho, So Hoon[1], Kim, Do Hwan[2*], Kim, Jin Won[2], Lee, Seung Eun[2], Kim, Jin Ho[3]

[1]Chang Minwoo structural consultants, Seoul, 135-907, Korea
[2]Sr. Researcher, Building Materials and Structure Research Group, POSCO Steel Solution Center, Incheon, 406-840, Korea
[3]Sr. Pr. Researcher, Building Materials and Structure Research Group, POSCO Steel Solution Center, Incheon, 406-840, Korea

Abstract - HSA800 is a new high strength steel (HSS) plate for building structures developed by POSCO and RIST in 2011. It has upper and lower bounds for yield (F_y) and tensile (F_u) strength as of 650-770MPa and 800-950MPa, respectively, with yield ratio (F_y/F_u) limit as of 0.85 which make steel quality more reliable and enhance the seismic resistance of structures. As made by TMCP, it has a good weldability without increasing carbon percentage. The objective of this study is to provide alternative design of mega-structural members of the Lotte World Tower (555m, 123 story), a first super-tall building in Korea, using HSS considering structural safety, constructability, and cost-effectiveness. Steel outrigger trusses, belt-trusses and steel exterior columns were selected and analyzed to evaluate the structural performance between original and alternative designs using HSS. The results show that HSS can be applied to the members which do not affect lateral stiffness of a building and, in this study, approximately 1100tons of steel were saved. It implies that HSS can save overall construction costs – manufacturing, delivery, and erection costs – by reducing mega structural member size. HSA800 was very first applied to the Lotte World Tower based on the results of this study.

Keywords - Super-tall building, Mega structural member, High strength steel, HSA800, Alternative design

1. 서 론

초고층 시공기술의 발달과 재료 성능 향상으로 인해 세계적으로 초고층 빌딩 건설이 활발히 이루어져 왔다. 이러한 초고층 빌딩은 높이/폭 비율이 약 7-9 정도의 세장한 구조물로서 바람, 지진 등의 횡력에 저항하기 위해 메가기둥, 메가브레이스, 다이아그리드, 아웃리거 트러스, 벨트트러스 등을 적용하여 횡변위를 제어하게 된다. 따라서 이러한 부재들은 단면이 거대하며 높이는 보통 2-4개 층의 규모를 갖게 됨으로서 부재 제작 및 시공기간이 길어지는 원인을 제공한다.

초고층 구조시스템 중 아웃리거 트러스[1]는 코어와 외곽(메가)기둥을 연결하여 모든 기둥들을 일체로 거동하게 하여 횡강성을 증가시킨 시스템이다. 즉, 횡하중에 의하여 코어의 회전변형이 발생하게 되면 횡하중 방향의 기둥은 인장력, 반대방향의 기둥에는 압축력을 발생시켜 결국 모멘트를 기둥의 축력으로 바꿈으로써 횡변위를 줄일 수 있다. 벨트트러스는 주로 아웃리거 층에 함께 설치되며 외곽(메가)기둥에 균일하게 하중을 분배하는 역할과 동시에 초고층의 중력하중에 저항하면서 연쇄붕괴에 대한 저항도 갖는 부재이다.

HSA800 강재는 건축구조용 고성능 강재로서 일본의

Note.-Discussion open until February 28, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 14, 2014; revised June 29, 2014; approved on July 2, 2014.
Copyright ⓒ 2014 by Korean Society of Steel Construction
*Corresponding author.
Tel. +82-32-200-2434 Fax. +82-32-200-2449
E-mail. gte503q@gmail.com

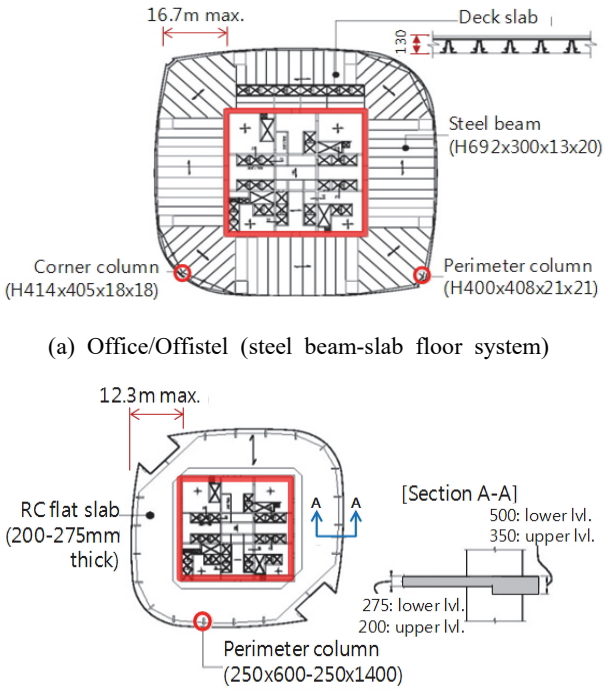
780MPa급 고강도 강재[2],[3],[4],[5],[6]보다 동등이상의 성능을 발휘하도록 개발되었다. 기계적 성질을 살펴보면 항복강도 650MPa-770MPa, 인장강도 800MPa-950MPa를 가지며 항복비(항복강도/인장강도) 또한 0.85이하로 규정되어 있다[7]. 또한 압연 시 냉각조건 제어를 통하여 미세 결정체에 의해 고강도를 얻는 열처리 방식인 TMCP(Thermo Mechanical Controlled Process) 기법으로 제조되어 40mm 이상의 두께에서도 강도 저감이 없으며 탄소함량이 낮아 뛰어난 용접성을 나타내는 특징이 있다. 따라서 국내 내진규정을 모두 만족하는 강재이며 많은 소재 및 부재시험[8],[9],[10],[11],[12],[13]을 통하여 성능이 검증되었다.

본 연구는 인장강도 800MPa급 건축구조용 고강도 강재인 HSA800을 실제 초고층 건물의 주요 철골 구조부재를 대상으로 적용성을 평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 구조시스템의 안전성, 사용성, 경제성 등을 주요 평가지표로 선택하여 원설계 해석결과와 고강도 강재를 적용한 대안설계 해석결과를 비교 평가하고자 한다. 해석은 하중조합에 따라 중력저항모델, 횡력저항모델 그리고 연쇄붕괴에 대한 안전성을 검토하기 위한 연쇄붕괴 모델을 대상으로 실시하였다. 이를 통해 추후 고강도 강재를 적용하여 초고층 빌딩을 경제적으로 설계 및 시공하기 위한 방법론을 제시하고자 한다.

2. 대상구조물 분석

HSA800을 이용한 고강도 강재 대안설계를 위해 대상 구조물로 완공시 국내 최고 높이인 롯데월드타워(LWT)를 대상으로 하였다. LWT는 높이 555m(123층) 규모로 건설되어질 예정이며 업무시설, 숙박시설, 판매시설, 문화시설 등 복합용도로 사용될 예정이다. 각 용도별 바닥구조시스템을 Fig. 1에 나타내었다.

LWT의 구조시스템은 Fig. 2에 보인 것처럼 두 개의 철골 아웃리거 트러스와 벨트트러스가 RC 코어월 및 RC 메가기둥과 함께 이루어져있는 하이브리드 구조시스템이다. 철골 아웃리거 트러스는 39층-44층(5개층 높이)와 72층-76층(4개층 높이)에 직사각형 조립 박스형 단면 형태로 위치하고 있다. 벨트트러스의 경우 상층부 아웃리거와 같은 위치인 72층-76층에 1개소, 그리고 호텔층 제일 윗부분인 102층-107층에 역시 직사각형 조립 박스형 단면형태로 위치하고 있다. RC 코어월의 경우 지하 6층에서 120층까지 위치하고 있으



(a) Office/Offistel (steel beam-slab floor system)

(b) Hotel (RC flat slab system)

Fig. 1. Floor flaming system of lotte world tower

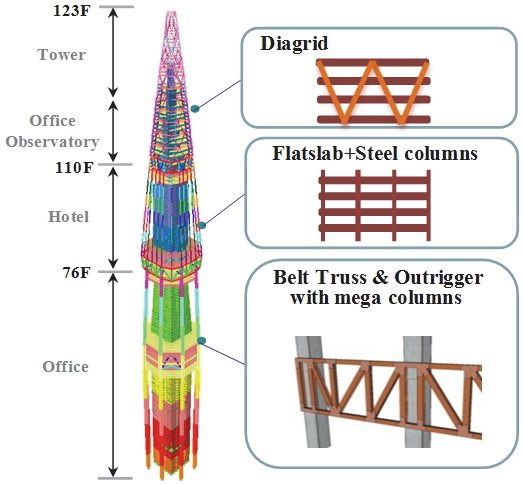
며 두께는 위로 올라갈수록 2,000mm-500mm로 줄어들며 80MPa-60MPa 강도를 갖는 콘크리트를 사용하였다. 빌딩의 각 측면에는 2개의 RC 메가기둥이 총 8개 위치하고 있으며 단면크기는 바닥에서 3m x 3m, 상층부에서 2m x 2m로 줄어들며 80MPa-70MPa의 고강도 콘크리트가 사용되었다. Fig. 2에서 76층-110층까지는 호텔층(Fig. 19b 평면도 참조)으로서 상하 벨트트러스를 연결하는 철골 기둥이 조립 박스형 단면 형태로 외곽에 위치하고 있다. 110층 위로는 전망대 등이 위치하고 있으며 원형 다이아그리드 구조시스템을 가지고 있다. 원형강관의 크기는 φ610x60t~φ219.1x15t로 높이에 따라 두께와 직경이 줄어드는 구조이다.

3. 고강도 강재 적용성 평가

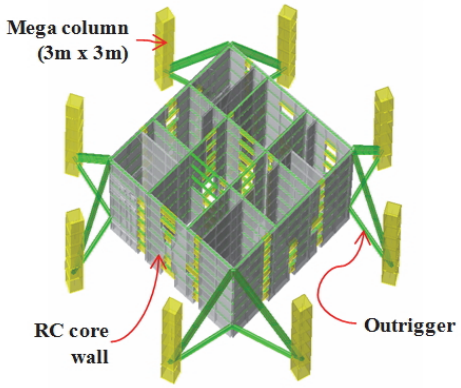
3.1 고강도 강재 적용을 위한 검토부재 선정

3.1.1 대상부재 목록

구조물의 구조설계에서 검토해야 하는 주요 요소로는 안전성, 사용성 및 내구성을 들 수 있다. 이 중에서 고강도 강재를 적용하여 설계할 때 안전성과 관련된 재료의 강도 확보



(a) Overall structural system of LWT



(b) Main lateral force resisting system of LWT

Fig. 2. Mega structural system of LWT

의 측면에서는 일반강도 강재와 비교하였을 때 충분한 장점이 있다. 그리고 내구성 확보의 측면에서는 일반강도로 설계할 경우와 고강도로 설계할 경우가 크게 다르지 않다. 그러나 고강도로 설계하여 부재치수를 줄일 경우에 부재의 강성이 줄어들게 되므로 고강도 강재를 사용할 경우 사용성능의 저감이 발생된다. 그러므로 고강도 강재를 적용하기 위해서는 사용성능의 저감으로 인하여 추가물량이 발생하지 않는 부분에서 가장 경제적으로 적용할 수 있다.

고강도 강재의 LWT 적용 검토를 위한 철골구조부재 종류를 Table 1에 나타내었다. 여기서 강재량이 미소하거나 고강도강 사용시 저하된 사용성 만회를 위해 추가 강재가 요구되는 Hanging truss, Lantern(diagrid) frame, 바닥보, Spandrel beam 등의 부재는 Table 1의 비고란에 보여진 것처럼 적용검토대상에서 제외(uncheck)되었다. 따라서 Fig. 3에 나타낸 것처럼 벨트트러스, 외곽부 기둥, 아웃리거 등을 적용 검토(check) 부재로 선정하였다.

Table 1. Member list of LWT to be replaced by HSS

Member list	Design consideration	Steel material in original design	Remark
Belt truss	Progressive collapse	SM520 (Built-Up)	Check
Exterior column	Progressive collapse	SM570 (Built-Up)	Check
Hanging Truss	Vibration control	SM490 (Built-Up)	Uncheck
Pipe Hanger	Progressive collapse	SM490 (Rolled&Built-Up)	Uncheck
Lantern (diagrid) Frame	-	SS400 & SM490	Uncheck
Outrigger (diagonal member)	Lateral stiffness	SM570 (Built-Up)	Check
Floor framing beam	Gravity force	SS400 (Rolled) SM490 (Built-Up)	Uncheck
Spandrel Beam	Gravity force	SM490 (Gusset plate: SM570)	Uncheck
Deflection control post	Deflection control	STKN400W	Uncheck

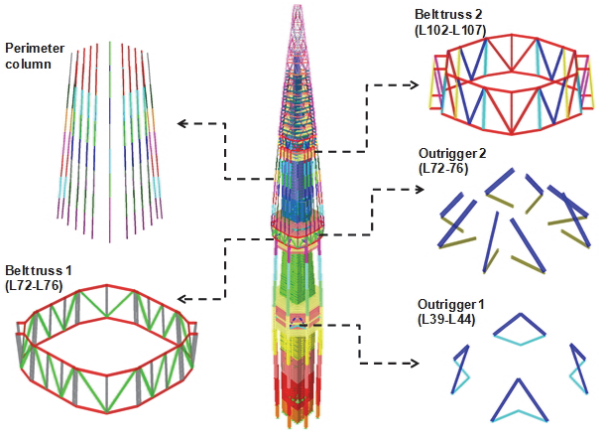


Fig. 3. Selected mega structural members to be replaced by high-strength steel

특히 벨트트러스 현재(chord)의 경우 바닥판과 호텔층 외곽부 기둥으로부터 전해지는 수직하중에 의한 휨을 주로 받는 부재이므로 고강도 강재 적용이 불리하게 여겨지나 부재

제작성, 자중 절감에 의한 크래인 양중 능력 향상 및 고층 용접작업 편의성 등 시공성 향상을 위해 사재 및 수직재와 같이 고강도 단일부재로 적용하여 검토하였다.

3.1.2 등가 고강도 강재 단면결정

일반적으로 조립단면 부재는 H형 단면과 Box형 단면이 주로 사용되며 플랜지(상, 하)와 웨브(좌, 우)의 두께에 따라 접합부 상세도 변경된다. 먼저 일반적인 형태는 H형 단면과 같이 플랜지가 두꺼운 형태이며, 이는 힘의 효율적인 전달을 위하여 스티프너가 다수 필요하다. 따라서 접합부 제작에 있어서 시공성이 떨어지는 단점이 있다. 반면 Box형 단면과 같이 웨브가 두꺼운 경우에는 스티프너가 불필요하다. 이는 웨브 부분을 일체화로 제작이 가능하다는 장점이 있다. LWT에 사용된 조립부재의 단면은 접합부 시공성을 고려하여 Fig. 4에 나타낸 것처럼 웨브가 두꺼운 박스형 단면이 사용되었다. 특이한 점은 일반적인 박스형 단면과 달리 양측면 웨브가 상/하 플랜지 넘어 다소 돌출되었다는 점을 들 수 있다.

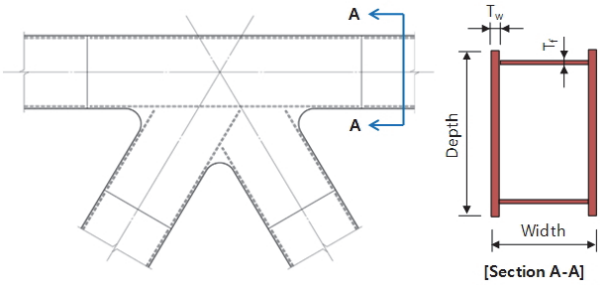


Fig. 4. Typical cross-section shape of LWT steel members

Table 2. Equivalent thickness from SM520 to HSA800

Thickness	Equiv. thick (t×355/650)	HSA800 thickness
80	43.7	45
20	10.9	12
50	27.3	30

Table 3. Equivalent thickness from SM570 to HSA800

Thickness	Equiv. thick (t×420/650)	HSA800 thickness
20	12.9	15
25	16.2	18
30	19.4	20
35	22.6	25
40	25.8	28
45	29.1	45
50	32.3	35
55	35.5	38
60	38.8	40
65	42	45
70	45.2	48
75	48.5	50
80	51.7	55

고강도 강재를 적용할 때 강도에 의하여 부재설계가 되는 경우로 가정하고 Fig. 4의 단면에서 각 부분(T_w or T_f)의 치수를 Tables 2와 3과 같이 강도에 비례하여 감소되도록 부재 치수를 조정하였다. 가령, SM520 80t의 경우 등가 HSA800 두께는 $t_{_HSA800}=t_{_SM520}\times F_{y_SM520}/F_{y_HSA800}=80\times 355/650=43.7$(say 45mm)와 같이 등가 두께가 결정되어진다.

이와 같은 방법으로 앞에서 선정된 적용 검토대상 부재에 대해 HSA800 적용시의 등가단면을 적용하여 고강도 강재 적용에 따른 각 부재의 횡강성 변화가 전체 초고층 구조물의 횡강성에 어떠한 영향을 미치는지 평가하기 위해 구조해석 프로그램인 ETABS[14]를 이용하여 횡강성 모드해석을 수행하였다.

3.1.3 고강도 강재 적용 횡강성 모드해석

LWT의 고유모드 형상을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 1차 모드는 y-방향에 대하여 발생하고 2차 모드는 x-방향에 대하여 발생한다. 그리고 3차 모드는 비틀림 성분에 대하여 발생한다.

앞 절에서 설명한 것과 같이 벨트트러스 2곳과 외곽부 기둥 그리고 아웃리거 1, 2 각각에 대하여 고강도 강재를 적용

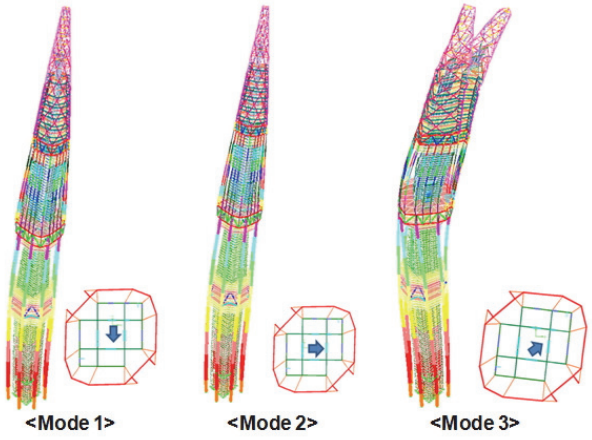


Fig. 5. First three mode shapes of LWT

할 경우의 모드별 주기를 변경전(원설계)와 비교하여 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 살펴보면 아웃리거 1(1차모드 1.27% 증가)과 아웃리거 2(1차모드 0.8% 증가)의 경우에는 고강도 강재를 적용하였을 때 구조물의 횡강성에 미치는 영향이 벨트트러스 1, 2, 외곽부 기둥(1차모드 0.06% 증가) 보다 상대적으로 크므로 고강도 강재로 변경 설계하는 것이 적합하지 않은 것으로 판단된다.

아웃리거의 대각부재는 기존 강도를 유지함으로써 강성의 변화를 주지 않는 대신, 코어월에 매립된 아웃리거의 수평 상/하현재에만 고강도 강재를 적용하여 구조물의 모드별 주기를 분석하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 Mode 1 주기를 살펴보면, 원설계(9.0218sec) 대비 Outrigger 1-Chord와 Outrigger 2-Chord의 주기는 각각 9.0271sec와 9.0284sec로서 전체구조물의 횡강성에 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한, Table 5의 "HSA800"은 Table 4에서 검토한 결과에 근거하여 전체 구조물의 횡강성에 크게 영향을 주지 않는 모든 메가부재(벨트트러스 1, 벨트트러스 2, 외곽기둥, 아웃리거 1과 2의 코어월 매립부 상/하현재)를 고강도 강재로 대안 설계하여 부재크기를 변경하였을 때의 모드별 주기이다. Mode 1을 살펴보면 원설계(9.0218sec) 대비 HSA800 모델은 9.0419sec로서 약 0.22% 증가하였으므로 전체 구조물의 횡강성에 큰 영향이 없다 여겨진다. 이 결과로부터 벨트트러스 1 & 2, 외곽부 기둥 및 아웃리거 트러스의 코어월 매립부 상/하현재에 고강도 강재 적용이 가능하다 판단된다.

Table 4. Fundamental periods 1 of LWT

Mode	Original	Belt truss 1	Belt truss 2	Ext. col.	Outrigger 1	Outrigger 2
1	9.0218	9.0209	9.0270	9.0274	9.1368	9.1020
2	8.6238	8.6235	8.6267	8.6294	8.7351	8.7016
3	3.2816	3.2852	3.2959	3.2974	3.2961	3.2941
4	3.1464	3.1444	3.1488	3.1460	3.1510	3.1492
5	2.9929	2.9986	3.0020	3.0197	3.0095	3.0086
6	1.8497	1.8515	1.8571	1.8570	1.8500	1.8559

Table 5. Fundamental periods 2 of LWT

Mode	Original	Outriger 1 - Chord	Outrigger 2 - Chord	HSA800
1	9.0218	9.0271	9.0284	9.0419
2	8.6238	8.6287	8.6288	8.6408
3	3.2816	3.2823	3.2825	3.3154
4	3.1464	3.1466	3.1468	3.1451
5	2.9929	2.9937	2.9937	3.0336
6	1.8497	1.8497	1.8504	1.8659

3.2 고강도 강재 적용에 따른 구조성능 평가

3.2.1 해석모델 및 설계하중 조합

LWT는 구조물의 횡강성을 확보하기 위하여 설치하는 아웃리거의 설치 시점을 다른 부재보다 지연시킬 계획이므로 아웃리거의 경우 중력하중에 대하여서는 저항하지 못하도록 해석모델을 분리하여 설계되었다. 그러므로 고강도 강재를 적용하였을 때의 구조물에 대한 검토도 아웃리거의 강성이 해석모델에 포함되도록 한 횡력저항 모델과 아웃리거의 강성을 무시한 중력저항 모델로 분리하여 각 목적에 맞게 2개의 해석모델에 선택적으로 적용하였다. 사용된 설계하중조합[15]은 식 (1)~(5)와 같다.

1.4D(중력저항모델) (1)

1.2D+1.6L(중력저항모델) (2)

1.2D+1.6W+0.5L(횡력저항모델) (3)

0.9D+1.6W(횡력저항모델) (4)

연쇄붕괴(중력저항모델) (5)

위의 하중 조합 중에서 연쇄붕괴 하중은 Fig. 6에 보이는 것과 같이 특정부재(가령, Fig. 6에서 대각부재)가 파괴된 것을 가정하고 파괴된 부재와 접해있던 상하현재에는 소성힌지가 발생하는 것으로 간주하고 그 때의 안전성을 검토하였다.

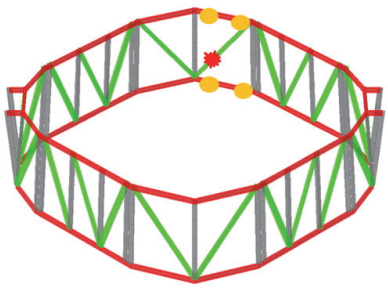


Fig. 6. Schematic view of progressive collapse

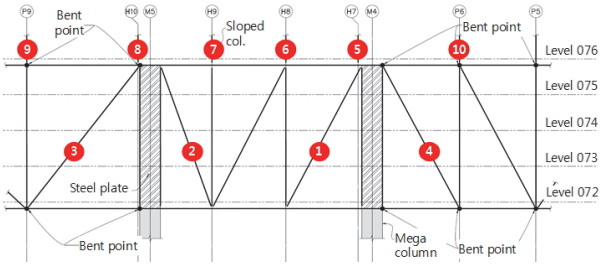


Fig. 7. Collapse member scenario of belt truss 1 (L072-L076)

연쇄붕괴를 검토한 시나리오는 원설계와 동일하게 Fig. 7에 나타난 10개의 부재에 대하여 개별적으로 파괴가 발생하는 상황을 재현할 수 있도록 중력저항모델에서 파괴를 가정한 부재를 삭제한 수정모델 각각에 대해서 해석을 통하여 구조물의 안전성을 검토하였다.

3.2.2 안전성 검토

안전성의 검토에는 1) 축력에서의 저항성능에 대한 설계부재력의 비(P ratio); 2) 강축(M_{major})방향 모멘트에서의 저항성능에 대한 설계부재력의 비(MMaj ratio); 3) 약축(M_{minor})방향 모멘트에서의 저항성능에 대한 설계부재력의 비(MMin ratio); 4) 축력과 모멘트 조합에서의 저항성능에 대한 설계부재력의 비(PMM ratio)를 사용하였다. 구조부재에 작용하는 부재력의 종류에는 축력과 모멘트 이외에도 전단력이 있으나, 대부분의 철골 부재에서는 전단력에서 여유치가 많은 경우가 대부분이고 본 연구에서 검토된 구조부재에서도 전단력비는 여유치가 많은 것으로 검토되어 전단력에 대한 검토결과는 포함하지 않았다.

검토 대상부재의 원설계와 HSA800 적용한 대안설계 부재 내력비(D/C)를 비교하여 Fig. 8-10에 나타내었다. 여기서 x축은 부재 명을 나타내며 y축은 부재 내력비를 나타낸다. 축력과 모멘트에 대한 설계 부재 내력비 값이 1을 초과하는 부재는 기준에서 허용하는 응력을 초과하는 부재들로 볼 수 있다. 이 부재들이 내력비 1.0을 초과하는 이유는 본 해석이 상세설계(DD100%)단계를 기본으로 모델링 및 해석을 수행하였기에 구조물에 가해지는 모든 조건을 반영하지 못하고 주요 횡하중 및 중력하중에 저항하도록 구조시스템을 결정하는데 초점을 맞추어 부재를 설계했기 때문이다. 따라서 본 안전성 검토에서는 원설계와 HSA800을 적용한 대안설계 해석모델의 내력비 변화 추이에 초점을 맞추어 비교/평가하였다. 내력비 1.0을 초과한 부재들은 추후 실시설계(CD)

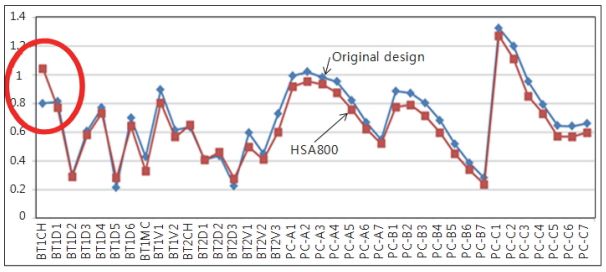


Fig. 8. Analysis results of the gravity force resisting model (GFRM)

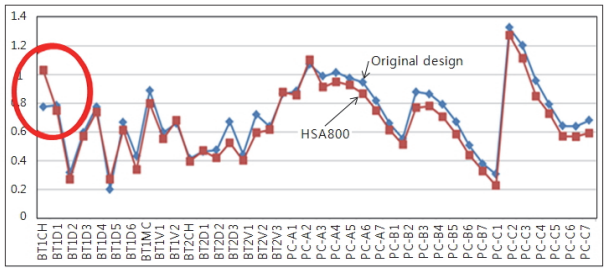


Fig. 9. Analysis results of the lateral force resisting model (LFRM)

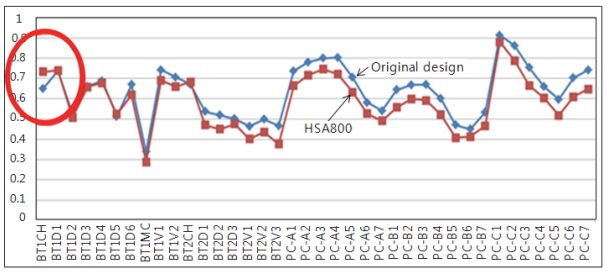


Fig. 10. Analysis results of the progressive collapse model (PCM)

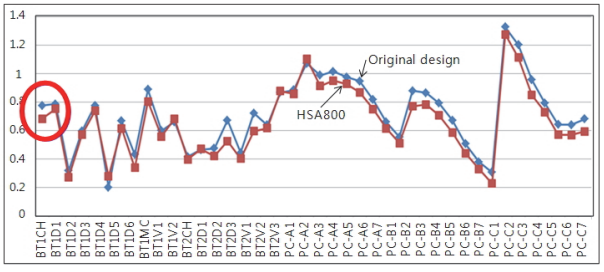


Fig. 11. Analysis results of the lateral force resisting model after increasing flange thickness of BT1CH

단계에서 단면 최적화를 통하여 1.0보다 적게끔 재설계되었다.

Fig. 8-10에서 D/C ratio가 1을 초과하는 부재는 BT1CH (Beltruss 1-chord), PC-C1 & C2(Perimeter Column-

Corner_Zone 1(76F~80F) & Zone 2(80F~ 84F))이며 이 부재들의 부재 내력비를 중력저항모델(GFRM), 횡력저항모델(LFRM), 연쇄붕괴모델(PCM) 별로 정리하여 Table 6에 나타내었다. 이를 살펴보면 모두 PMM ratio가 govern하며 MMin은 무시할 만큼 작은 값을 나타내었다. 또한 BT1CH는 축력(P)보다 휨(MMaj)이 govern하며 PC부재들은 모두 축력(P)가 govern하는 것을 알 수 있다.

BT1CH의 경우 Fig. 8-10에서 원으로 강조한 바와 같이 기존 설계안(약 0.8)보다 내력비가 높아졌다(약 1.03). 이는 폭두께비에 따른 단면분류에 있어서 기존 강재 적용시 조밀(Compact) 단면인데 반하여 고강도 강재 적용시 폭두께비 제한값은 항복강도의 제곱근에 반비례하기 때문에 세장(slender)한 단면으로 분류되었기 때문이다. 이 경우 부재 전단면이 유효하지 못하고 유효하지 못한 부분의 내력이 추가적으로 감소하게 되어 고강도 강재를 적용할 때 내력비가 높아지는 현상을 보였다. 따라서 고강도 강재를 적용할 때 벨트트러스 1의 상하현재에 대해서는 Table 2에서 결정된 플랜지 두께를 12t에서 15t로 증가시켜(TB-800x400x12x45→TB-800x400x15x45) Slender가 아닌 비조밀(Non-compact) 단면으로 분류하여 재해석을 수행하였다. 그 결과 최대 응력 발생 부재의 설계 결과 및 기존 강재를 적용한 경우의 내력비를 비교한 것을 Fig. 11에 나타내었다. 여기서, 내력비는 저항 모멘트가 약 50%정도 증가함에 따라 1.03(Slender)에서 0.68(Non-compact)로 약 34% 감소하였고 기존 강재(D/C=0.79)보다 더 높은 안전율을 나타내었으므로 고강도 강재 적용하여도 안전성에는 영향이 없다는 것을 알 수 있다.

3.2.3 사용성 검토

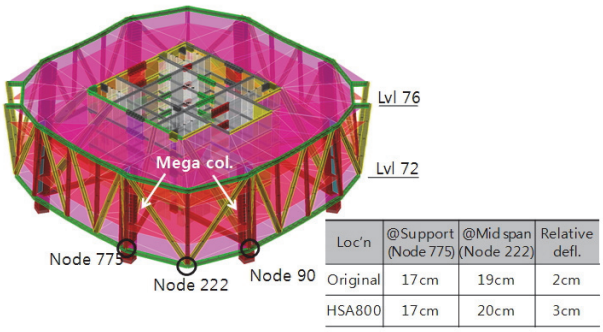
사용성 검토를 위해 부재의 고강도 강재 적용 전후의 처짐을 비교하였다. 벨트트러스 1 처짐량의 경우 최대처짐은 Fig. 12의 Node 222에서 발생하였다. Node 222는 빌딩 코너에 위치한 벨트트러스 하현재(Node 775-222-90)의 중간 절점에 해당된다. 따라서 하현재 양 끝단 메가기둥 지지점(Node 775 & 90)을 기준으로 하현재 중앙(Node 222)에서의 상대처짐을 측정하여 사용성을 비교 검토하였다. 검토결과, Fig. 12에 보여진 것처럼 HSA800 모델의 사하중과 활하중을 모두 합친 상대처짐은 3cm로서 원설계 모델(2cm)보다 약 1cm 증가하였다. 이는 부재 경간(L=23m)을 고려했을 때의 허용 처짐한계치 L/240(9.5cm)보다 작은 값으로서 사용성 허용범위를 만족함을 알 수 있다.

외곽부 기둥(Fig. 13)은 상대변위가 약 30% 증가하였으나 원설계안에 대해서도 사용성을 만족시키기 위하여 기둥 축소량 보정이 필요한 상태이므로 고강도 강재를 적용하여 설계할 때 기둥 축소량 보정치수를 조절하면 사용성능을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 풍하중에 대한 구조물 전체 변위 검토 결과(Table 7), 수평방향(Ux) 증가율은 고층부로 갈수록 증가하는데 약 2~3% 정도까지 증가하는 것을 알 수 있다. 전체 빌딩의 횡변위 허용 한계치를 H/500으로 할 경우 사람이 거주하는 최상층인 123층(512m)에서의 허용 횡변위는 1.024m이며 원설계(0.89m)와 대안설계(0.91m) 모두 횡변위 제한값을 만족함을 알 수 있다. 따라서 대상 부재에 고강도 강재를 적용하여도 사용성을 만족한다는 것을 알 수 있다.

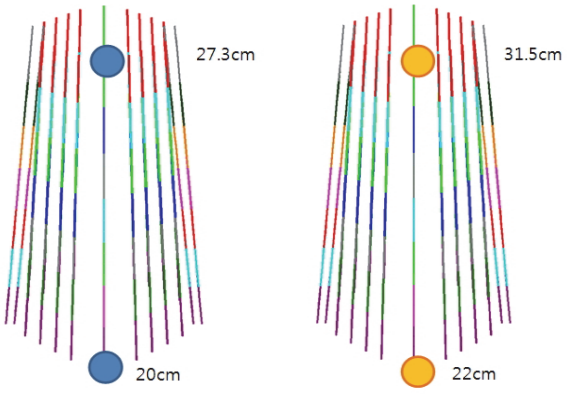
Table 6. D/C ratios of the members for D/C>1

Member ID		Original (DD100%)				HSA800			
		PMM	P	MMaj	MMin	PMM	P	MMaj	MMin
BT1CH	GFRM	0.799	0.412	0.355	0.031	1.042	0.031	1.002	0.009
	LFRM	0.777	0.394	0.354	0.029	1.031	0.026	0.995	0.01
	PCM	0.65	0.391	0.234	0.03	0.733	0.062	0.702	0.014
PC-C1	GFRM	1.325	1.169	0.156	0	1.271	1.017	0.254	0
	LFRM	1.327	1.17	0.156	0	1.274	1.018	0.255	0.001
	PCM	0.913	0.819	0.092	0.005	0.88	0.739	0.138	0.005
PC-C2	GFRM	1.2	1.162	0.038	0	1.11	1.049	0.061	0
	LFRM	1.202	1.164	0.038	0	1.112	1.051	0.061	0
	PCM	0.862	0.844	0.02	0.001	0.788	0.758	0.033	0



Loc'n	@Support (Node 775)	@Mid span (Node 222)	Relative defl.
Original	17cm	19cm	2cm
HSA800	17cm	20cm	3cm

Fig. 12. Comparison of deflection of belt truss 1



(a) Original model (b) HSA800 model

Fig. 13. Comparison of vertical deformation of the perimeter columns at hotel levels

3.2.4 물량비교

원설계와 HSA800 적용한 대안설계에 따른 철골물량을 비교 요약하여 Table 8에 나타내었다. 여기서, 기존 설계 물량 4061톤 대비 HSA800 대안설계 물량은 2901톤으로 약 1100톤(29%)을 절감하였다.

아웃리거 트러스의 수평부재의 경우 원설계시 SM570이었던 것을 HSA800으로 대체함으로써 약 9%절감이 가능하였으며(예: BBT950x500x80x20 → BBT950x500x55x15), 벨트트러스(SM520 → HSA800)는 41%절감(예: BBT800x400x80x50 → BBT800x400x45x30), 외곽부 기둥(SM520 → HSA800)은 28%절감(예: BBT400x400x80x40 → BBT400x400x55x28)이 가능하였다. 따라서 초고층 구조물 부재 중 강성에 거의 영향을 받지 않고 강도에 의하여 설계되는 부재에서는 항복강도의 증가비와 물량감소량이 거의 비례하다는 것을 알 수 있다.

4. HSA800의 아웃리거 적용 방안 및 시공성 향상을 위한 대안 상세

아웃리거 부재의 경우에 횡강성에 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문에 강도비에 따라 단면을 줄인 부재크기를 적용하기는 어려운 것으로 앞 절에서 검토되었다. 아웃리거 부재의 단면변화에 따른 구조물의 횡강성 변화를 평가하기 위하여 Fig. 14에 나타낸 것처럼 총 5가지 경우의 단면에 대해 모드해석을 수행하였다. 여기서, Case 3은 강관 내부에 콘크리트를 채워 부재의 강성을 키운 상세이다.

아웃리거 부재 단면 변화에 따른 구조물의 모드별 주기를 산정한 결과를 그래프로 도시하여 Fig. 15에 나타내었다. 이

Table 7. Comparison of vertical deformation of the exterior columns

Story	Original		Alternative (HSA800)		Increasement	
	UX	UY	UX	UY	UX	UY
130	1.02860	1.13030	1.05140	1.15890	1.022	1.025
124-129	1.02280	1.09310	1.04010	1.12040	1.017	1.025
123	0.79490	0.89390	0.80960	0.91310	1.018	1.021
121-122	0.78350	0.88330	0.79790	0.90200	1.018	1.021
111-120	0.74800	0.84690	0.76120	0.86380	1.018	1.020
101-110	0.66220	0.75620	0.67140	0.76780	1.014	1.015
91-100	0.57990	0.66940	0.58620	0.67710	1.011	1.012
81-90	0.50220	0.57640	0.50650	0.58140	1.009	1.009
71-80	0.42840	0.49090	0.43130	0.49420	1.007	1.007
61-70	0.36550	0.42140	0.36750	0.42380	1.005	1.006
51-60	0.29320	0.33750	0.29450	0.33910	1.004	1.005
41-50	0.22690	0.25820	0.22780	0.25930	1.004	1.004
31-40	0.17300	0.19800	0.17370	0.19890	1.004	1.005
21-30	0.11590	0.13220	0.11620	0.13260	1.003	1.003
11-20	0.06680	0.07660	0.06700	0.07680	1.003	1.003
1-10	0.03010	0.03380	0.03020	0.03390	1.003	1.003

Table 8. Summary of steel quantity

Member		Original	Alternative
Outrigger	diagonal	757ton (SM570)	757ton (SM570)
	chord	309ton (SM570)	216ton (HSA800)
Belt truss		1811ton (SM520)	1075ton (HSA800)
Exterior column		1184ton (SM520)	853ton (HSA800)
Total		4061ton	2901ton (29%↓)

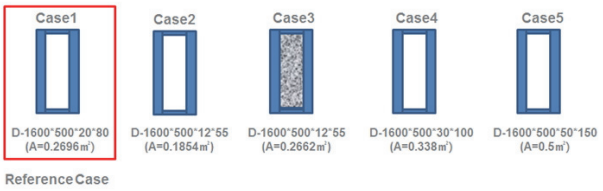


Fig. 14. Cases of outrigger cross-section

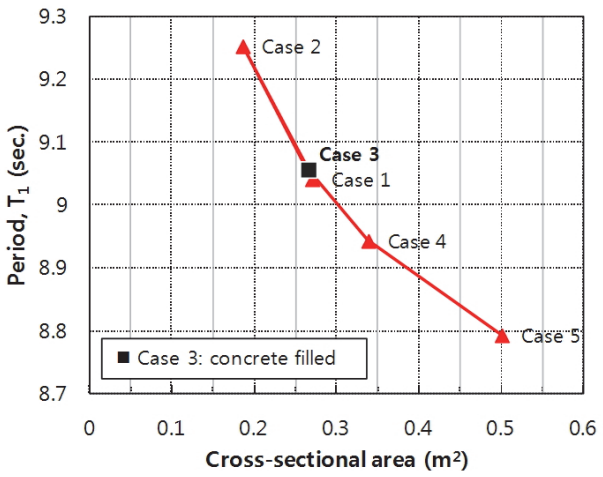
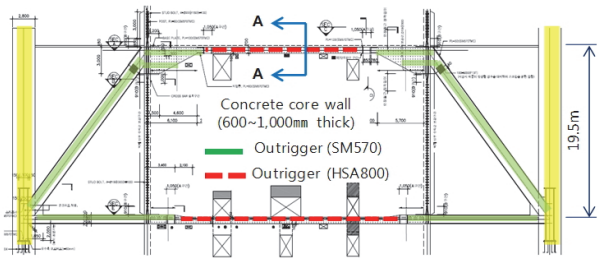


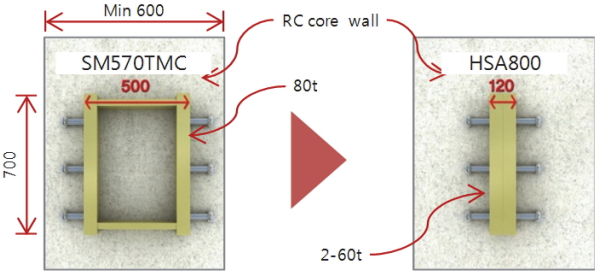
Fig. 15. Changes of the fundamental period per outrigger cross-section cases

를 보면 고강도 강재를 적용한 후에 콘크리트를 채웠을 때(Case 3)의 주기가 원설계(Case 1)과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 아웃리거에 고강도 강재를 적용하기 위해서는 콘크리트를 채워 강성을 증가 시키는 것과 같은 추가 대안이 제시되어야 할 것으로 여겨진다.

또한, 아웃리거 트러스는 Fig. 16(a)에 보인 것처럼 코어월 반대쪽 아웃리거와 연결하여 횡하중을 전달하기 위해 코어월에 매립된 상/하현재(Fig. 16(a)의 점선)를 필요로 한다. 이 경우 하중 전달의 역할 만을 하고 있기 때문에 강성보다는 강도에 의해서만 부재크기가 결정된다. 그러나 벽체두께에 비해 매립강재가 차지하는 폭이 크고 합성거동을 위한 전단연결재 길이까지 추가할 경우 벽 두께를 초과하게 되며 벽체의 수직 주철근과의 간섭 또한 발생함으로서 시공성에 지장을 주게 된다. 따라서 LWT에서는 Fig. 16(b)에 보인 것처럼 아웃리거 트러스와 코어월이 만나는 접합노드(SM570 TMC 80T, 박스형 단면)에서부터 점차적으로 부재의 폭을 감소시켜 HSA800 60t plate 두 개를 맞댄 상세를 적용함으로서 강재물량 절감과 벽체 철근과의 간섭 해소 등에 의한 시공성 향상 효과를 볼 수 있었다.



(a) Elevation of outrigger-core wall



(b) Section A-A of outrigger chord-core wall

Fig. 16. Detail of outrigger-core wall

5. 결 론

초고층 메가부재 대상 고강도 강재 적용을 위한 대안설계 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 고강도 강재 적용 가능한 부재는 구조물의 전체 강성에 영향을 주지 않으면서 부재의 사용성을 확보하기 위하여 추가 강재를 요구하지 않는 벨트트러스와 외곽부 기둥 그리고 아웃리거 트러스의 코어월 매립 상/하현재인 것으로 검토되었다.

(2) 선정된 메가부재에 고강도 강재를 적용하여 부재크기를 줄였을 경우에 전체 구조물 1차 주기는 원설계 대비 약 0,2% 증가하였으며 이 경우 수평변위는 약 2~3% 정도 증가하였다.

(3) 벨트트러스 1에서는 고강도 강재를 적용하여 부재를 변경하였을 때 기존보다 수직 처짐이 약 1cm 정도 증가하였으나, 허용 처짐을 만족하였다.

(4) 고강도 강재 적용시 폭두께비 제한값의 감소로 인해 벨트트러스 현재와 같은 휨부재 단면의 경우 원설계시 compact한 단면이 slender한 단면으로 변함으로서 내력비(D/C ratio)가 1을 초과하는 경우가 발생한다. 이러한 부재에서는 강도 저감을 방지하기 위해 해당 단면(플랜지 혹은 웨브) 두께 증가를 통하여 Compact 혹은

Non-compact 단면으로 전환이 필요하다.

(5) 대안설계 결과 원설계대비 약 1,100톤 (30%) 가량의 물량 절감이 가능하였다.

(6) 초고층 구조의 횡강성에 큰 영향을 미치는 아웃리거 트러스의 대각부재에 고강도 강재 적용을 위해서는 단면 두께 감소로 인해 줄어든 횡강성을 보완하기 위해 콘크리트 채움이 필요하다 여겨진다.

(7) 아웃리거층 시공성 향상을 위해 롯데월드타워에서는 아웃리거트러스의 코어월 매립부재에 대해서 SM570TMC 80t 박스형 단면을 HSA800 60t x 2장 평판형 단면으로 대안설계 및 현장 적용하여 물량절감 및 시공성 향상 효과를 보았다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2013년도 첨단도시개발사업(09첨단도시 A01)에 의해 수행된 것으로 지원에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] Choi, H.S., Ho, G., Joseph, L., and Mathias, N. (2012) *Outrigger Design for High-Rise Buildings (CTBUH Technical Guide)*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, USA.

[2] 日本國土交通大臣(2006) 建築構造用 高性能 780N/mm^2 鋼材 BT-HT630B, BT-HT630C 認定(MSTL-0175), 日本國土交通省, 日本.
Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2006) *Certification of 780N/mm^2 High-strength Steel for Building Structures, BT-HT630B, BT-HT630C (MSTL-0175)*, Japan MLIT, Japan (in Japanese).

[3] 日本國土交通大臣(2007) 建築構造用 低降伏比 780N/mm^2 鋼材 JFE-HITEN780TB, JFE-HITEN780TC 認定(MSTL-0205), 日本國土交通省, 日本.
Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2007) *Certification of Low Yield Ratio 780N/mm^2 Steel for Building Structures, JFE-HITEN780TB, JFE-HITEN780TC (MSTL-0205)*, Japan MLIT, Japan (in Japanese).

[4] 日本國土交通大臣(2008) 建築構造用 1,000N/mm^{2}級 熱間延鋼材（鋼板） SSS1000 認定 (MSTL-0232), 日本國土交通省, 日本.
Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2008) *Certification of 1,000N/mm^2 Grade Hot-Rolled Steel (Plate) for Building Structures, SSS1000 (MSTL-0232)*, Japan MLIT, Japan (in Japanese).

[5] 日本國土交通大臣(2009) 建築構造用 800N/mm^{2}級 熱間延鋼材 (鋼板) SSS800 認定 (MSTL-0271), 日本國土交通省, 日本.
Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2009) *Certification of 800N/mm^2 Grade Hot-Rolled Steel (Plate) for Building Structures, SSS800 (MSTL-0271)*, Japan MLIT, Japan (in Japanese).

[6] Yoshida, Y., Obinata, T., Nishio, M., and Shiwaku, T. (2009) Development of High-Strength (780 N/mm^2) Steel for Building Systems, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.9, No.4, pp.285-289.

[7] 국가기술표준원(2011) 건축구조용 고성능 압연강재(KS D 5994: 2011).
Korean Agency for Technology and Standards (2011) *High-Performance Rolled Steel for Building Structures* (KS D 5994: 2011), Korea (in Korean).

[8] 하태휴, 김진호, 이승은, 정경수, 정미영(2010) 800MPa급 교량용 강재의 소재, 용접 특성 및 건축구조용 고성능 강재의 개발 전략, 한국강구조학회 2010년 학술대회발표 논문집, 한국강구조학회, pp.353-354.
Ha, T.H., Kim, J.H., Lee, S.E, Chung, K.J., and Jung, M.Y. (2010) Material and Welding Properties of 800MPa Grade Steel for Bridges and Development Strategies of High-Performance Steel for Buildings, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.353-354 (in Korean).

[9] 김도환, 이승은, 김진호, 하태휴, 유승호(2012) 건축구조용 고성능 강재 HSA800 소재 성능 평가, 한국강구조학회 2012년 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp.267-268.
Kim, D.H., Lee, S.E, Kim, J.H., Ha, T.H., and Yu, S.H. (2012) Material Tests of the HSA800 - The High Performance Steel for Building Structures, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.267-268 (in Korean).

[10] Lee, C.-H., Han, K.-H., Uang, C.-M., Kim, D.-K., Park, C.-H., and Kim, J.-H. (2013) Flexural Strength and Rotation Capacity of I-Shaped Beams Fabricated from 800-MPa Steel, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.139, No.6, pp.1043-1058.

[11] 이철호, 김대경, 한규홍, 박창희, 김진호, 이승은, 김도환

(2013) HSA800 후판재의 맞댐용접부 인장강도 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp. 431-440.
Lee, C.H., Kim, D.K., Han, K.H., Park, C.H., Kim, J.H., Lee, S.E., and Kim, D.H. (2013) Tensile Testing of Groove Welded Joints Joining Thick-HSA800 Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No. 4, pp.431-440 (in Korean).

[12] 이강민, 이명재, 오영석, 김태수, 김도환(2013) 중심압축력을 받는 건축구조용 고성능강(HSA800) 용접H형 단주의 국부좌굴거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.289-297.
Lee, K., Lee, M.J., Oh, Y.S., Kim, T.S., and Kim, D.H. (2013) Local Buckling Behavior of Stub H-Shaped Columns Fabricated with HSA800 High Performance Steels Under Concentric Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.289-287 (in Korean).

[13] 유정한, 김주우, 양재근, 강주원, 이동우(2013) 국부좌굴을 고려한 건축구조용 고성능강(HSA800) 조립각형강관 압축재의 적용성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.223-231.
Yoo, J.H., Kim, J.W., Yang, J.G., Kang, J.W., and Lee, D.W. (2013) Evaluation on Applicability of Built-up Square Tubular Compression Members Fabricated with HSA800 High Performance Steel Considering Local Buckling, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.223-231 (in Korean).

[14] Computers & Structures (2013) *ETABS 2013 User's Guide*, CSI, USA.

[15] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009), 대한건축학회.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korean Building Code −Structural* (KBC 2009), AIK, Korea (in Korean).

요 약 : HSA800은 건축구조용 고성능 강재로서 KS규격에 항복강도 650MPa-770MPa, 인장강도 800MPa-950MPa를 가지며 항복비(항복강도/인장강도) 또한 0.85이하로 제한되어있으며 TMCP 기법으로 제조되어 뛰어난 용접성을 나타내는 특징이 있다. 본 연구에서는 국내 최초의 초고층 빌딩인 롯데월드타워의 메가 구조부재를 대상으로 고강도 강재 적용시 구조물 안전성의 변동사항 및 시공성 개선 등을 검토하여 경제적 설계를 위한 대안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 대상 부재로는 아웃리거 코어월 매립부 상/하현재, 벨트트러스, 외곽 철골기둥이 선정되었다. 원설계 단면을 등가 도강도 강재 단면으로 환산하여 두께를 결정한 후 중력저항모델, 횡력저항모델, 연쇄붕괴 모델을 구조해석시뮬레이션을 통하여 성능을 비교 평가하였다. 그 결과 횡강성에 영향을 주지 않는 부재는 고강도 강재 적용이 가능하며 원설계 대비 약 1100톤의 물량 절감 효과가 있었다. 따라서, 고강도 강재를 사용하면 부재 두께를 줄일 수 있으므로 부재 제작성 및 시공성이 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 초고층 빌딩, 메가부재, 고강도 강재, HSA800, 대안설계