

# 고강도 강재를 활용한 초고층건물의 경제성 및 적합성 분석

## Analysis of Economic Feasibility and Suitability of Highrise Buildings Using Highstrength Steel

김선웅<sup>1)\*</sup>

Kim, Seonwoong<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>영산대학교 건축플랜트학과

<sup>1)</sup>Department of Architecture and Plant Engineering, Youngsan University

### / A B S T R A C T /

This paper aims to analyze the economic feasibility and investigate the possibility of elastic seismic design of wind-designed highrise concentrically braced frames considering change of mechanical properties of Korean steel under the strong wind and the low seismicity in Korea. To this end, first, highrise concentrically braced frames were designed considering strong wind load. And then, analyses of the economics of them were performed. The seismic performance evaluation of wind-designed highrise buildings was conducted using the response spectrum analysis procedure. Analysis results show that it is possible to save up to approximately 90% of the amount of steel on the 10% increase in steel strength without serviceability. However, with serviceability, the design sectional area of the steel with relatively high strength tends to increment considerably because of the lateral stiffness due to reduction of the inertia moment and so on. This point might apply to limitation of the steel with high tensile yield strength.

**Key words:** Steel, Highrise building, Wind design, Economics, Seismic performance evaluation

## 1. 서론

최근 국내에서는 강재의 선진화의 일환으로 강종의 표기방식 및 인장항복강도를 상향하는 등의 기계적 물성의 변화를 모색하고 있다. 일반적으로 강구조물의 설계시에는 인장항복강도를 대부분 준용하고 있음에도 불구하고, 강종의 표기방식은 인장강도를 활용함으로써 현장에서 다소간의 혼란을 야기하였으며, 선진국에서도 인장항복강도에 의한 강종 표기방식이 일반적이다. 이에 그간 해외시장에서 국내강재의 사용시 인장항복강도의 불일치로 인해 문제가 되었던 외국 강종과의 호환성문제를 해결하기 위해 국가기술표준원에서는 강종의 인장항복강도를 상향하고, 인장항복강도를 활용한 강종 표기방식으로 전환하였다.

전세계적으로 초고층건물은 급격한 도시화로 인한 사회적/경제적/문화적 문제들을 해결하기 위한 대안으로 제시되고 있다. 이러한 초고층건물의

형태는 과거에는 정형에 기반하여 설계되었다면, 최근에는 다양한 비정형 형태로 변화되어가고 있다. 이러한 비정형 초고층건물의 고층부에서 시공상의 어려움을 해결하기 위해 우선적으로 자중을 줄이기 위한 수단으로서 강구조의 선택은 불가피하며, 고강도 강재의 사용이 가장 현실적인 대안이 될 수 있다.

Lee et al.[1], Kim[2], Kim et al.[3]은 여름철 태풍이 빈번하게 내습하는 강풍대이면서, 경주지진에서 확인한 바와 같이 단주기 성분이 지배적인 특성을 갖는 중앙지진대에 위치한 국내의 지진환경하에서 내풍설계된 초고층건물의 탄성설계 가능성을 제시하였다. 본 논문에서는 내풍설계된 초고층 철골조 중심가새골조를 대상으로 한국산업규격(Korea Industrial Standards, 이하KS) 개정에 따른 신강종의 경제성 분석 및 적합성을 검토하고자 한다. 이를 위해 우선, 비교대상강종으로서는 철골조 초고층건물에 가장 많이 적용되는 고강도 강종으로서 SM490을, 이에 상응하는 신강종인 SM355를 각각 선택하였다. 선택한 두 강종을 적용한 내풍설계된 초고층건물의 경제성을 분석하고, 응답스펙트럼을 활용한 내진성능평가를 수행하였다.

\*Corresponding author: Kim, Seonwoong

E-mail: seonwoong.kim0428@gmail.com

(Received June 19, 2017; Revised June 21, 2017; Accepted June 21, 2017)

**Table 1.** Tensile yield strength and tensile strength of the rolled steel for welded structure

Steel	Tensile yield strength (MPa)					Tensile strength (MPa)
	Thickness (t) (mm)					
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 75	75 < t ≤ 100	100 < t ≤ 200	
SM275	275	265	255	245	235	410~550
SM355	355	345	335	325	305	490~630
SM420	420	410	400	390	380	520~680
SM460	460	450	430	420	-	570~720

**Table 2.** Wind load conditions for the highrise steel concentrically braced frames per KBC 2016

Content	Value	Remarks
Basic design wind speed	26 m/sec	Seoul (Exposure A)
Importance factor	1.05	Highrise building
Topographic coefficient	1.0	Plane topography without wind speed-up effect
First natural frequency of a building	0.128 Hz	75/H*, Steel structures with other lateral load resisting system [ASCE 7-10]
First damping ratio in the along wind direction of a building	0.01	Steel frames

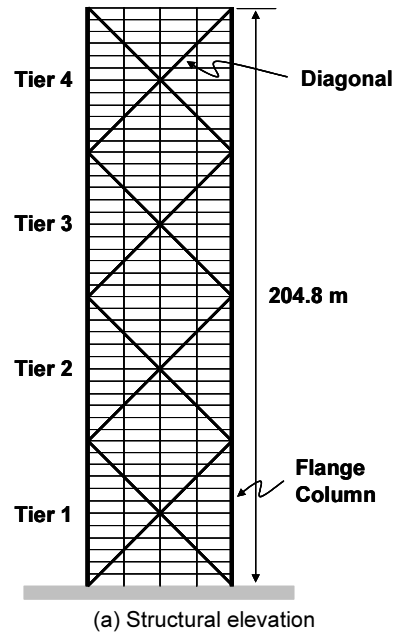
Height of a building\*

## 2. 강재의 기계적 성질

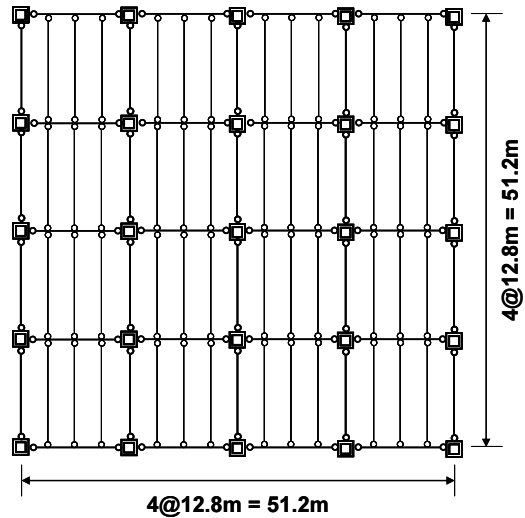
본 절에서는 구조용강재의 KS기준 개정에 따른 고강도 강재의 초고층 건물에 대한 적합성 여부를 판단하기 위한 신강종을 소개하고자 한다. 국내 구조용강재의 표기방식은 기존에는 인장강도를 기준으로 하였으나, 앞으로는 항복강도를 기준으로 표기하기로 2016년 12월에 KS기준이 개정되었다. 기존개정과 더불어 구조용강재의 항복강도를 상향하고, 일부강재는 인장강도를 조정하였으며, 기존 강재의 강도기준 두께를 더욱 세분화하였다. Table 1은 개정된 구조용 강재 중에서 용접구조용 압연강재의 인장항복강도 및 인장강도를 정리한 것이다[4].

## 3. 초고층 철골중심기새골조의 내풍설계 및 경제성 분석

본 절에서는 KBC 2016[5]에 따른 풍하중 산정조건을 적용하여 내풍설계를 하였다(Table 2 참조). 본 연구에서 채용한 초고층 중심기새골조(concentrically braced frames)는 횡하중에 대하여 강성 및 강도확보에 가장 효율적인 시스템이다. 이 구조시스템에서 횡력은 외곽부에 위치한 플랜지기둥(flange columns)과 대각가새(diagonals)로 이루어진 메가 수직트러스 시스템에 의해 전적으로 지지된다. 즉 플랜지기둥은 전도모멘트를, 대각가새는 전단력을 각각 분담하는 시스템이다. 본 연구에서는 고강도강재를 적용한 초고층건물의 경제성 및 적합성을 파악하기 위해 51.2 m × 51.2 m의 정방형 평면을 갖는 세장비[건물의 높이(H)/건물의 폭(B)] 7(358.4 m, 84층)의 초고층건물을 강구조 하중저항계수설계법을 적용하여 설계하였다. 초고층 중심기새골조의 12개 층을 1개의 단위골조(tier)로 묶어서 설



(a) Structural elevation



(b) Structural plan

**Fig. 1.** Structural elevation and structural plan of the highrise steel concentrically braced frames

계하였다(Fig. 1 참조). 본 과제의 대상모델이 위치할 지역을 서울지역으로 가정하고, 설계기본풍속은 26 m/sec, 지표면조도(노풍도)는 A를 채택하였다. 참고로 26 m/sec의 설계기본풍속은 시속으로 환산하면 93.6 km/h로서 허술한 주택이 붕괴될 수 있는 정도의 상당한 속도이다. 본 과제의 대상모델은 모두 35층 이상의 초고층건물로서 중요도는 1.05를 채택하였다. 아울러

건물의 1차고유진동수와 풍방향 1차감쇠정수는 KBC 2016에서 소개하고 있는 ASCE 7-10[6]의 '기타 수평하중저항 시스템을 가진 강구조'에 대한 근사식과 강에 대한 구조감쇠비율 각각 사용하였다. 고정하중 및 적재하중은 일반적인 철골조 사무소건물로 가정하고  $5.5 \text{ kN/m}^2$ ,  $2.5 \text{ kN/m}^2$ 을 각각 적용하였다. 매가 수직트러스를 구성하는 플랜지기둥과 대각가새는 뛰어난 휨강성을 가지면서도 비틀림에 우수한 성능을 발휘하는 조립각형강관으로 설계하였다(Table 3 참조). 모든 구조부재의 사용강종은 모두 SM490 강재(판두께 40 mm 이하일 때, 인장항복강도( $F_y$ ) = 315 MPa; 판두께 40 mm 초과할 때,  $F_y = 295 \text{ MPa}$ )와 KS 2017에 근거한 신강재 SM355를 각각 사용하였다. 아울러 모든 접합부는 단순접합으로 처리하여 접합비용을 최소화하는 것으로 가정하였다. 단, 소요단면적은 사용성을 고려하지 않은 내풍설계에 필요한 단면적이며, 설계단면적은 사용성을 고려한 내풍설계에 필요한 단면적이다.

NBC 2005[7]에서는 풍하중에 대한 사용성을 확보하기 위해 지붕층 횡변위가 건물고의 1/500이내에 들도록 권장하고 있다. 본 연구에서는 이를 반영하여 플랜지기둥의 횡변형모드와 대각가새의 전단변형모드의 제어를 통하여 지붕층 횡변위를 건물고의 1/500이내에 들도록 설계하였다. Table 4는 상용 전산구조해석 프로그램인 MIDAS Gen[8]을 사용하여 본 연구의 모델에 대한 3차원 고유치해석을 통해서 얻어진 지붕층 횡변위 결과를 나타낸 것이다. 이러한 사용성설계를 위한 변위제한조건, 내진설계용 폭 두께비 제한조건과 더불어 용접시공성 확보를 위해 플랜지기둥에 대한 강관의 안목치수를 일치시키면 부재의 크기가 대폭 증가하게 된다(특히 골조의 고층부에서, Table 3 참조).

Table 5는 철골조 중심가새골조의 초고층건물의 내풍설계로부터 얻어진 Table 3의 결과를 경제성측면에서 재정리한 것이다. 플랜지기둥의 경우, 사용성을 고려하지 않은 소요단면적(required sectional area)의 경우에는 구강종인 SM490 강재물량을 적용할 때에 비해, 신강종인 SM355를 적용할 경우 최대 82.83%의 강재물량을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 대각가새의 경우에도 최대 57.56%를 강재를 줄인 경제적 설계가 가능하다. 중력하중만을 저항하는 중력기둥은 73.26 ~ 90.30%의 강재물량을 줄일 수 있다. 하지만, 사용성(가령, 횡변위 제한)을 고려한 내풍설계 단면적의 경우에는 중력기둥의 단면축소로 인한 횡저항 강성 저하로 인해 전체 구조물의 횡저항 강성도 줄어들게 된다. 따라서 축소된 횡저항력은 횡력저항시스템의 구성요소인 플랜지기둥과 대각가새에 전가되므로, 구강종인 SM490 강재를 사용할 때에 비하여 급격하게 늘어난 설계단면적(design sectional area)을 요구하게 된다. 즉, 단순히 강도설계의 측면에서는 신강재의 도출로 인해 현저하게 강재의 소요물량을 줄일 수 있지만, 사용성이 고려되어야만 하는 구조시스템을 채용할 시에는 신강재의 사용은 경제성을 상실할 수 있음을 의미한다.

#### 4. 응답스펙트럼해석에 의한 내진성능평가

본 절에서는 앞의 3절에서 내풍설계된 초고층 철골중심가새골조에 대하여 43년(service level earthquake, 이하 SLE) 및 2,475년 재현주기 지진동(maximum considered earthquake, 이하 MCE)을 입력지진동으로 하는 응답스펙트럼해석을 통하여 주요 횡력저항부재인 초고층 철골중심가

새골조의 플랜지기둥과 대각가새부재의 탄성저항 가능성 및 내진성능을 평가하였다. Lee et al.[1]이 주장한 바와 같이, 초고층건물에 대한 응답스펙트럼해석결과는 선형시간이력해석에 의한 결과보다 대체적으로 보수적인 결과를 나타내므로, 본 연구에서는 응답스펙트럼해석에 의한 초고층 철골중심가새골조의 지진응답 및 내진성능을 평가하고자 한다.

초고층건물의 내진설계방안을 제시하고 있는 최근의 내진설계지침서[9-11]를 살펴보면, 중/저층건물을 대상으로 하는 일반구조기준[5]과는 다른 다음의 주요한 세 가지의 조건을 가지고 있다. 1) 현재 일반구조기준은 설계지진동으로서 2,475년 재현주기 지진동의 2/3크기를 준용하나, 위에 기술한 바와 같이, 초고층 내진설계지침서는 43년 및 2,475년 재현주기 지진동을 입력지진동으로 한다. 2) 일반구조기준은 5% 감쇠를 갖는 탄성내진설계스펙트럼을 적용하지만, 초고층 내진설계지침서는 2~2.5% 감쇠비를 갖는 탄성내진설계스펙트럼을 활용하도록 하고 있다. 그 근거는 다음과 같다. Satake[12]와 Tamura[13]는 건물의 높이와 감쇠비 간의 관계를 조사하였다. 주요구조재료의 종류와 상관없이 중/저층건물은 0.5 ~ 8% 범위 내의 감쇠비를 갖지만, 건물이 고층화될수록 감쇠비는 점차 줄어들어 200 m 이상의 초고층건물은 1% 내외의 감쇠비를 갖는다. 3) 일반적으로 동적해석에 의한 중/저층건물의 지진응답해석시에 양방향 지진동의 직교효과(orthogonal effect)는 100:30의 비율로 고려한다. 하지만 최근의 초고층 내진설계지침서는 양방향 지진동을 100:100의 비율로서 지진동에 의한 영향을 KBC 2016과 같은 일반구조설계기준에 비해 한층 크게 보고 있다. 본 연구에서도 이러한 초고층 내진설계지침서에 근거하여 지진동의 직교효과를 반영하였다.

ASCE 41-13[14]에서 언급한 바와 같이, 내풍설계된 초고층 철골중심가새골조의 주요 횡력저항요소인 플랜지기둥과 대각가새부재의 탄성 및 비탄성거동은 식 (1)의 DCR을 통하여 쉽게 판별할 수 있다. 강도요구(strength demand)는 응답스펙트럼해석을 통해 얻어진 SRSS(square root of the sum of the squares)값을, Table 3의 주요구조부재의 보유강도(strength capacity)는 강구조 하중저항계수설계법의 압축재(플랜지기둥)와 휨압축재(대각가새)의 강도산정식을 사용한다. 아울러 플랜지기둥과 대각가새부재의 보유강도산정에 필요한 강도저감계수(strength reduction factor)는 모두 1.0으로 택하고, 인장항복강도는 공칭항복강도(nominal yield strength) 대신에 KBC 2016에서 소개하고 있는 SM490의 재료초과강도계수( $R_y$ )와 국내 제강사의 자료를 토대로 얻어진 강재의 기대항복강도( $F_{ye} = 1.15F_y$ (SM355),  $F_{ye} = 1.2F_y$ (SM490))를 각각 적용하였다. 이러한 제반사항을 종합하여 식 (1)의 DCR 조건을 만족하는 부재는 탄성부재로, DCR이 1을 초과하는 부재는 비탄성영역에 진입한 부재로 판별한다.

$$DCR = \frac{\text{Strength demand}}{\text{Strength capacity}} \leq 1.0 \quad (1)$$

Fig. 2(a) 및 2(b)는 SM490 강재와 SM355 신강재를 사용하여 내풍설계된 초고층 철골중심가새골조에 대한 KBC 2016에서 제시하고 있는 지진구역 I과 중요도(1)의 단단한 지반조건( $S_b$ )에서의 SLE와 MCE를 입력 지진동으로 하는 응답스펙트럼해석으로부터 얻어진 DCR의 분포를 각각 도시한 것이다. Fig. 2의 최우측은 DCR분포의 등고선(contour)을 나타낸 것이다. SM355 신강재의 경우, 내풍설계과정에서 유입된 잠재적 시스템

**Table 3.** Size of main structural members

(a) Flange columns

Steel	Tier	Required section	Required sectional area (mm <sup>2</sup> )	DCRR	Design section	Design sectional area (mm <sup>2</sup> )	DCRD	Strength increment (%)
SM490 (Old)	1	□-909×909×55	187,880	0.999	□-995×995×59	220,896	0.932	17.6
	2	□-402×402×25	37,700	0.999	□-961×961×57	206,112	0.609	446.7
	3	□-295×295×19	20,976	0.996	□-759×759×45	128,520	0.641	512.7
	4	□-265×265×17	16,864	0.999	□-642×642×40	96,320	0.566	471.2
	5	□-257×257×16	15,424	1.000	□-594×594×37	82,436	0.494	434.5
	6	□-249×249×16	14,912	0.997	□-514×514×32	61,696	0.472	313.7
	7	□-219×219×15	12,240	0.999	□-401×401×25	37,600	0.418	207.2
SM355 (New)	1	□-360×360×24	32,256	0.995	□-1,445×1,445×90	487,800	0.007	1,412.3
	2	□-332×332×22	27,280	0.993	□-1,413×1,413×88	466,400	0.006	1,609.7
	3	□-308×308×20	23,040	0.996	□-1,365×1,365×85	435,200	0.005	1,788.9
	4	□-280×280×19	19,836	0.999	□-1,318×1,318×82	405,408	0.005	1,943.8
	5	□-252×252×17	15,980	0.995	□-1,205×1,205×75	339,000	0.004	2,021.4
	6	□-225×225×15	12,600	0.997	□-1,123×1,123×72	302,688	0.003	2,302.3
	7	□-188×188×13	9,100	0.997	□-1,029×1,029×66	254,232	0.002	2,693.8

(b) Diagonals

Steel	Tier	Required section	Required sectional area (mm <sup>2</sup> )	DCRR	Design section	Design sectional area (mm <sup>2</sup> )	DCRD	Strength increment (%)
SM490 (Old)	1	□-596×596×38	84,816	1.000	□-775×775×46	134,136	0.771	58.1
	2	□-598×598×39	87,204	0.998	□-775×775×46	134,136	0.730	53.8
	3	□-554×554×35	72,660	0.999	□-720×720×43	116,444	0.732	60.3
	4	□-491×491×32	58,752	0.999	□-642×642×40	96,320	0.677	63.9
	5	□-429×429×27	43,416	0.999	□-570×570×36	76,896	0.638	77.1
	6	□-340×340×22	27,984	0.999	□-466×466×29	50,692	0.617	81.1
	7	□-235×235×15	13,200	0.995	□-369×369×23	31,832	0.510	141.2
SM355 (New)	1	□-385×385×25	36,000	0.995	□-1,152×1,152×73	315,068	0.012	775.2
	2	□-374×374×25	34,900	0.996	□-1,130×1,130×72	304,704	0.011	773.1
	3	□-360×360×24	32,256	0.997	□-1,107×1,107×71	294,224	0.010	812.2
	4	□-341×341×23	29,256	0.999	□-1,076×1,076×69	277,932	0.010	850.0
	5	□-321×321×21	25,200	0.992	□-1,060×1,060×68	269,824	0.008	970.7
	6	□-290×290×19	20,596	0.991	□-1,029×1,029×66	254,232	0.007	1,134.4
	7	□-242×242×16	14,464	0.999	□-998×998×65	242,580	0.005	1,577.1

(c) Gravity columns, girders and beams

Steel	Tier	Gravity column	Design sectional area (mm <sup>2</sup> )	DCR	Girder	Beam
SM490 (Old)	1	□-1,562×1,562×94	551,968	0.999	W610×307 (DCR = 0.987)	W250×167 (DCR = 0.996)
	2	□-1,446×1,446×87	472,932	0.999		
	3	□-1,312×1,312×80	394,240	1.000		
	4	□-1,183×1,183×71	315,808	1.000		
	5	□-1,019×1,019×62	237,336	0.999		
	6	□-844×844×50	158,800	0.999		
	7	□-561×561×36	75,600	0.998		
SM355 (New)	1	□-463×463×31	53,568	0.995	W360×24 (DCR = 0.990)	H-244×252×11×11 (DCR = 0.998)
	2	□-445×445×30	49,800	0.994		
	3	□-427×427×28	44,688	0.998		
	4	□-402×402×27	40,500	0.998		
	5	□-375×375×25	35,000	0.994		
	6	□-337×337×23	28,888	0.997		
	7	□-285×285×19	20,216	0.993		

\*DCRR = DCR (demand-to-capacity ratio) for the required sectional area according to wind load, \*\*DCRD = DCR for the wind design sectional area considering the serviceability

**Table 4.** Check of roof displacement for target models

Steel	Roof displacement (mm)	Limited value (mm)
SM355 (New)	717.34	717.36 (H/500)
SM490 (Old)	717.33	

**Table 5.** Economic analysis of main structural members

(a) Flange columns

Tier	Required sectional area (mm <sup>2</sup> )		
	Steel		Strength increasement (%)
	SM490 (Old)	SM355 (New)	
1	187,880	32,256	-82.83
2	37,700	27,280	-27.64
3	20,976	23,040	9.84
4	16,864	19,836	17.62
5	15,424	15,980	3.60
6	14,912	12,600	-15.50
7	12,240	9,100	-25.65

Tier	Design sectional area (mm <sup>2</sup> )		
	Steel		Strength increasement (%)
	SM490 (Old)	SM355 (New)	
1	220,896	487,800	120.83
2	206,112	466,400	126.28
3	128,520	435,200	238.62
4	96,320	405,408	320.90
5	82,436	339,000	311.23
6	61,696	302,688	390.61
7	37,600	254,232	576.15

(b) Diagonals

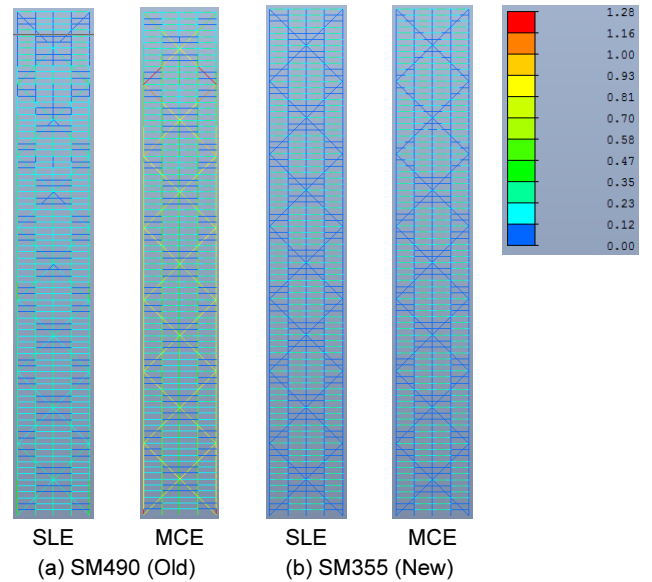
Tier	Required sectional area (mm <sup>2</sup> )		
	Steel		Strength increasement (%)
	SM490 (Old)	SM355 (New)	
1	84,816	36,000	-57.56
2	87,204	34,900	-59.98
3	72,660	32,256	-55.61
4	58,752	29,256	-50.20
5	43,416	25,200	-41.96
6	27,984	20,596	-26.40
7	13,200	14,464	9.58

Tier	Design sectional area (mm <sup>2</sup> )		
	Steel		Strength increasement (%)
	SM490 (Old)	SM355 (New)	
1	134,136	315,068	134.89
2	134,136	304,704	127.16
3	116,444	294,224	152.67
4	96,320	277,932	188.55
5	76,896	269,824	250.89
6	50,692	254,232	401.52
7	31,832	242,580	662.06

**Table 5.** Economic analysis of main structural members (continued)

(c) Gravity columns

Tier	Design sectional area (mm <sup>2</sup> )		
	Steel		Strength increasement (%)
	SM490 (Old)	SM355 (New)	
1	551,968	53,568	-90.30
2	472,932	49,800	-89.47
3	394,240	44,688	-88.66
4	315,808	40,500	-87.18
5	237,336	35,000	-85.25
6	158,800	28,888	-81.81
7	75,600	20,216	-73.26



**Fig. 2.** DCR distribution obtained from the response spectrum analysis

초과강도로 인해서 SLE 및 MCE 지진에 대해서 모두 탄성거동을 보이고 있다. 한편, SM490 강재의 경우, SLE에 대해서는 탄성저항하나, MCE에 대해서는 플랜지거동은 최하층에서, 대각가새는 최상단 Tier에서 일부 비탄성거동이 예측된다.

ASCE 41-13은 탄성해석의 경우에 특정 지진재해수준에 대해서 부재 수준과 시스템수준에서 내진성능을 각각 평가할 수 있도록 평가방법을 제시하고 있다. 우선 부재수준에서 ASCE 41-13은 구조부재를 크게 변위지배(deformation-controlled action)부재와 하중지배(force-controlled action)부재로 나누고 있으며, 구조시스템 및 구조부재의 역할에 따라 지배부재의 종류를 각각 구분하고 있다. 변위지배부재는 부재의 연성능력이 충분히 발휘될 것으로 예상되는 부재로서, 식 (1)의 DCR값이 1을 초과하여 비탄성영역에 진입하더라도 강도측면에서 손실이 발생하지 않는 부재이다. 이러한 비탄성영역에서의 부재의 기대연성(expected ductility)은 선형해석의 경우에는 식 (2)의 m-계수를 활용하여 검토할 수 있도록 제시하고 있다. 반면에 하중지배부재는 부재의 연성능력을 기대하기 어려운 부재로서, 부재의 비탄성거동을 허용하지 않는 부재이다. 즉 특정 부재력에 대해서 식 (1)을 만족하지 못할 경우에는 부재에 부여된 역할이 상실된 것으로 판단하



**Table 6.** Provision of seismic performance evaluation for the steel diagonal member under flexural-compression per the linear analysis procedure in ASCE 41-13

Rectangular steel member	m-factor		
	IO	LS	CP
$Kl/r \geq 1,876.7/\sqrt{F_y}$	1.25	5	7
$Kl/r \geq 938.4/\sqrt{F_y}$	1.25	4	6
$938.4/\sqrt{F_y} \leq Kl/r \leq 1,876.7/\sqrt{F_y}$	Linear interpolation		

\*K: effective length factor, \*\*l: member length, \*\*\*r: radius of gyration of area

는 것이다. 아울러 ASCE 41-13은 특정지진동에 대한 내진성능수준을 즉시거주(immediately occupancy, 이하 IO), 인명안전(life safety, 이하 LS), 그리고 붕괴방지(collapse prevention, 이하 CP)수준으로 분류하고 있다. 변형지배부재는 식(2)의 m-계수를 사용하여 ASCE 41-13에 제시하고 있는 수치에 따라 구조시스템과 구조부재의 역할에 따른 내진성능수준을 결정할 수 있고, 하중지배부재는 식(1)을 만족하지 못할 경우에는 붕괴된 것으로 판별한다.

$$m = \frac{1}{\kappa} DCR \tag{2}$$

여기서,  $\kappa$ 는 지식계수(knowledge factor)이다. 지식계수는 내진성능평가를 수행할 대상건물의 보강목표수준(rehabilitation objective)과 재료의 불확실성을 반영하는 지표이다. 본 연구에서의 지식계수는 ASCE 41-13의 Table 6-1에 근거하여 1.0을 채택하였다. 즉 본 연구에서 식(2)의 m-계수는 식(1)의 DCR과 동일한 값이다.

초고층 내진설계지침서는 2개의 지진재해수준에 대한 성능목표(performance objective)로서 SLE에 대해서는 탄성응답(elastic response)을, MCE에 대해서는 붕괴방지를 목표로 하고 있다. ASCE 41-13은 탄성응답에 대한 내진성능수준을 제시하고 있지 않으므로, 본 연구에서는 즉시거주수준을 탄성응답으로 같음한다. ASCE 41-13에서는 본 연구의 횡력저항 시스템인 가새골조에 대해서는 플랜지기둥은 하중지배부재로서, 대각가새부재는 변형지배부재로서 각각 분류하고 있다. Table 6은 ASCE 41-13의 선형해석절차에 대하여 힘압축력을 받는 철골가새부재의 m-계수에 따른 내진성능수준을 SI단위로 환산하여 유효세장비(effective slenderness ratio)에 따라 정의한 것이다.

Table 7은 응답스펙트럼해석을 통해 얻어진 본 연구의 대상모델에 대한 플랜지기둥과 대각가새부재, 중력기둥부재의 최대 DCR값 또는 최대 m-계수값, 그리고 부재수준의 내진성능수준을 각각 정리한 것이다. ASCE 41-13의 내진성능평가기준을 참조할 때, 하중지배부재인 플랜지기둥은 SLE에 대해서는 SM355 신강재 및 SM490 강재 모두 1.0 미만의 DCR값을 보이므로 “탄성응답”의 내진성능수준을 보이고 있다. MCE에 대해서는 SM355 신강재는 “탄성응답”을, SM490 강재는 DCR이 1.0 이상의 값을 나타내므로 “붕괴”된 것으로 간주한다. 즉 초고층 내진설계지침서를 참조할 때, SM355 신강재 및 SM490 강재를 사용하여 내풍설계된 본 연구의 대상모델들의 플랜지기둥은 SLE에서 요구하는 내진성능수준은 모두 만족

**Table 7.** Seismic performance evaluation results of the member level by the response spectrum analysis

(a) SM490 (Old)

Member	Tier	SLE		MCE	
		Maximum DCR or Maximum m-factor	Seismic performance	Maximum DCR or Maximum m-factor	Seismic performance
Flange column	1	0.437	IO	1.218	Collapse
	2	0.309	IO	0.661	IO
	3	0.346	IO	0.729	IO
	4	0.352	IO	0.740	IO
	5	0.306	IO	0.657	IO
	6	0.300	IO	0.626	IO
	7	0.231	IO	0.364	IO
Diagonal	1	0.299	IO	0.923	IO
	2	0.262	IO	0.823	IO
	3	0.278	IO	0.868	IO
	4	0.299	IO	0.924	IO
	5	0.282	IO	0.924	IO
	6	0.315	IO	1.099	IO
	7	0.354	IO	1.280	LS
Gravity column	1	0.485	IO	0.574	IO
	2	0.487	IO	0.585	IO
	3	0.487	IO	0.580	IO
	4	0.488	IO	0.578	IO
	5	0.488	IO	0.568	IO
	6	0.493	IO	0.547	IO
	7	0.490	IO	0.576	IO

(b) SM355 (New)

Member	Tier	SLE		MCE	
		Maximum DCR or Maximum m-factor	Seismic performance	Maximum DCR or Maximum m-factor	Seismic performance
Flange column	1	0.004	IO	0.008	IO
	2	0.003	IO	0.006	IO
	3	0.003	IO	0.006	IO
	4	0.003	IO	0.006	IO
	5	0.003	IO	0.005	IO
	6	0.002	IO	0.004	IO
	7	0.001	IO	0.001	IO
Diagonal	1	0.006	IO	0.012	IO
	2	0.006	IO	0.011	IO
	3	0.006	IO	0.010	IO
	4	0.005	IO	0.009	IO
	5	0.005	IO	0.008	IO
	6	0.004	IO	0.007	IO
	7	0.003	IO	0.005	IO
Gravity column	1	0.520	IO	0.529	IO
	2	0.519	IO	0.530	IO
	3	0.522	IO	0.534	IO
	4	0.522	IO	0.535	IO
	5	0.520	IO	0.535	IO
	6	0.522	IO	0.538	IO
	7	0.520	IO	0.537	IO

**Table 8.** Seismic performance evaluation results of the system level by the response spectrum analysis

Steel	SLE		MCE	
	Maximum story drift (%) (story)	Seismic performance	Maximum story drift (%) (story)	Seismic performance
SM355 (New)	0.09 (80F)	IO	0.44 (79F)	IO
SM490 (Old)	0.12 (73F)	IO	0.58 (73F)	N.A.*

\* N.A. : Not applicable

시키고 있으나, SM490강재를 사용한 모델은 MCE에 대해서 요구하는 내진성능수준을 충족시키지 못하고 있다.

SM355 신강재를 적용한 경우, 변형지배부재인 대가가새부재는 SLE 및 MCE에 대해서 모두 “즉시거주수준”을 만족시키고 있다. SM490 강재를 적용한 경우, 대가가새부재는 SLE에 대해서는 “즉시거주수준”을,

MCE에 대해서는 “인명안전수준”을 각각 보이고 있다. 다시 말해서, SM355 신강재 및 SM490 강재를 사용하는 본 연구의 대상모델의 대가가새부재는 모두 초고층 내진설계지침서에서 요구하는 내진성능수준을 모두 만족시키고 있다.

ASCE 41-13은 구조시스템의 내진성능에 대한 직접적인 기여도가 제한적인 2차 구조부재(secondary component)인 중력기둥은 중력하중에 대한 DCR 값이 0.5를 초과할 경우에 하중지배부재로서 간주하도록 권고하고 있다. 즉, 플랜지기둥과 마찬가지로 DCR 값이 1.0을 넘을 경우, 중력기둥은 붕괴된 것으로 간주한다. SM355 신강재 및 SM490 강재를 적용한 본 과제의 대상모델들의 중력기둥은 SLE 및 MCE에 대해서 모두 “즉시거주수준”을 나타내고 있다.

위에서 언급한 바와 같이, ASCE 41-13은 시스템수준에서 내진성능평가의 주요지표인 구조물의 최대층간변위로서 내진성능을 평가할 수 있도록 하고 있다. 앞에 기술한 부재수준의 내진성능평가는 접합부의 파단 등을 고려한 것이 아닌 온전히 부재만의 내진성능수준을 평가하는 것이다. 하지만 지진이 내습한 후에는 순수 부재의 성능보다는 접합부의 파단 등이 구조 성능을 판가름하는 지배요소이므로 시스템수준에서 층간변위에 의한 내진성능수준을 정확하게 평가해야만 한다. ASCE 41-13은 철판가새골조의 경우에 층간변위가 0.5%, 1.5%, 그리고 2.0%를 넘지 않으면, 철판가새골조의 내진성능은 즉시거주, 인명안전, 그리고 붕괴방지수준으로 각각 평가할 수 있다. Table 8은 SM355 신강재 및 SM490 강재를 사용하여 각각 내풍설계된 본 과제의 대상모델들에 대해서 응답스펙트럼해석을 통해 얻어진 최대층간변위 및 시스템수준의 내진성능수준을 정리한 것이다. SLE에 대해서 본 연구의 해당모델들은 강재종류에 상관없이 모두 0.5% 미만의 층간변위를 보이므로 “즉시거주”의 내진성능수준을 만족시키고 있다. 반면에, MCE에 대해서는 SM355 신강재는 “즉시거주수준”의 내진성능을 충족시키고 있으나, SM490 강재를 사용한 모델의 경우에는 식(1)의 DCR에 의해 예상되는 비탄성거동으로 인하여 정확한 층간변위를 알 수 없으므로 내진성능수준을 평가할 수 없다.

## 5. 결론

여름철에 태풍이 내습하는 강풍대이면서 중약진대에 속하는 국내의 지진환경하에서 고강도강재를 적용한 내풍설계된 초고층 철판가새골조의 경제성을 분석하고, 한국산업규격 개정에 따른 초고층건물에 대한 신강종의 적합성을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 구강재에 비해 인장항복강도를 상향한 고강도를 갖는 신강재를 적용하여 사용성을 반영하지 않고 내풍설계를 수행할 경우, 주요 구조부재 중 일부에 대해서는 최대 약 90%의 강재물량을 절감할 수 있다.
- 2) 하지만, 사용성을 고려하게 되면, 강재의 항복강도 증가로 인해 소요 단면적이 현저하게 작기 때문에 구강재에 비해서 소요단면적에 대한 내풍설계 단면적은 상당히 증가하는 경향을 보인다. 구조시스템의 횡강성은 탄성계수와 단면2차모멘트에 의해 지배되기 때문에 신강재의 적용으로 인한 소요단면적의 축소가 이러한 횡강성의 저하를 초래하게 되는 것이다.
- 3) 횡강성의 감소는 풍하중에 대해서 급격한 설계단면적의 증가가 요구되기 때문에, 내진성능에서도 월등한 성능을 보이는 것은 자명함을 확인하였다.
- 4) 이러한 경향은 철판조 초고층건물의 저항시스템에 주요사용강재로서 사용되던 강재가 재료물성의 변화로 인해 사용이 제한되는 결과를 초래함을 확인할 수 있다. 즉 약간의 항복강도만을 증가시켰음에도 불구하고, 초고층건물에 전면적으로 적용해서는 경제성을 확보할 수 없음을 알 수 있었다.

## / 감사의 글 /

본 연구는 2016년 영산대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행되었음.

## / REFERENCES /

1. Lee CH, Kim S. Elastic Seismic Design of Steel High-rise Buildings in Regions of Strong Wind and Moderate Seismicity. *International Journal of Steel Structures*, 2007 Dec;7(4):253-261.
2. Kim S, Lee K. Seismic performance of wind-designed diagrid tall steel buildings in regions of moderate seismicity and strong wind. *Steel and Composite Structures*, 2013 Feb;14(2): 155-171.
3. Kim S, Lee K. Potentials of elastic seismic design of twisted high-rise steel diagrid frames. *Steel and Composite Structures*, 2015 Jan;18(1):121-134.
4. Korean Agency for Technology and Standards (KATS). Rolled steel for welded structure: KS D 3515. KATS, 2016.
5. Architectural Institute of Korea (AIK). Korean Building Code and Commentary 2016. AIK, 2016.
6. American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE 7-10. ASCE, c2010.
7. National Building Code of Canada (NBCC). User's Guide-NBC 2005

- Structural Commentaries (Part 4 of Division B): NBCC 2005, c2005,
8. MIDAS Genw. General Structure Design System for Windows, MIDASIT, c2010.
  9. Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH). Recommendations for the Seismic Design of Highrise Buildings, CTBUH, c2008.
  10. Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council (LATBSDC). An alternative procedure for seismic analysis and design of tall buildings located in the Los Angeles region: consensus document, LATBSDC, c2011.
  11. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Tall Buildings Initiative Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings: Report No. 2010/05, PEER, c2010.
  12. Satake N, Suda K, Arakawa T, Sadaki K, Tamura Y. Damping evaluation using full scale data of buildings in Japan, Journal of Structural Engineering, 2003;129(4):470-477.
  13. Tamura Y. Amplitude dependency of damping in buildings and estimation techniques, Proceedings of 12th AWES Wind Engineering Workshop; Queenstown, New Zealand; c2006.
  14. American Society of Civil Engineers (ASCE). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings: ASCE 41-13, ASCE, c2014.