



고강도강 혼용 사용을 위한 SM570TMC강 보-기둥 접합부의 성능평가 및 해석 비교

김문정¹ · 조석희² · 하태욱³ · 강창훈⁴ · 최우혁⁵ · 김정학⁶

현대건설(주) 연구개발본부 과장¹, 현대건설(주) 연구개발본부 부대²,
 현대건설(주) 연구개발본부 사원³, 현대엠코(주) 차장⁴, 현대제철(주) 대리^{5,6}

Performance Examination and Comparison of Steel Beam-Column Connection in SM570TMC for Mixed-Use

Kim, Moonjeong¹ · Cho, Sukhee² · Ha, Tae-Uk³ · Kang, Chang-Hoon⁴ · Choi, Woo-Hyuk⁵ · Kim, Jung-hak⁶

¹PhD. Senior Research Engineer, R&D Division, Hyundai Engineering & Construction, Gyunggi-do, Korea

²General Manager, R&D Division, Hyundai Engineering & Construction, Gyunggi-do, Korea

³Research Engineer, R&D Division, Hyundai Engineering & Construction, Gyunggi-do, Korea

⁴Ph.D, Deputy General Manager, HYUNDAI AMCO, Seoul, Korea

^{5,6}Assistant Manager, Technical Research Center, Hyundai Steel, Chungchun-do, Korea

Abstract: In recent years, the construction of high-rise buildings are promoted. According to these, there are many needs about new technologies to strengthen the building performance and high-strength steel is regarded as one of these for promoting building performance. In Korea, high-strength steels which stress are over 600MPa are on market and in abroad, super high-strength steels over 1000MPa are developing and they expected to promote the building performance. But there are still doubts about applying high-strength steel members because of size effect and worry of brittle fracture. In this reports, we propose results of performance and analysis tests for use with general steel. We propose the characteristic of high-strength steels first and next the results of performance test to show they satisfy the performance that designers expect. And last, we compare the results of test and analysis for acquire the analysis reliability in non-linear analysis with high-strength steels.

Key Words: high-strength steel, mixed-use of general and high strength steel, SM570TMC, SM490, intermediate moment frame, performance examination

1. INTRODUCTION

2000년부터 최근 10년 사이 전 세계적으로 다시 초고층건물의 건설 붐이 일어나고 있다. 국내에서도 2000년 이후 삼암동 IBC, 잠실 제2롯데월드, 부산 롯데 타운 타워 등 50층 이상의 초고층 건물 시공 계획이 활발히 이루어지고 있으며, 해외의 경우 초고층 건축을 통하여 주변 지역의 도시재생까지 도모하는 현상이 나타난다.

초고층 건물은 도시 밀집 현상을 완화하며 도시의

랜드마크적인 역할을 담당하는 순기능을 가지고 있어 서울과 같이 인구밀도가 높은 대도시에서 최적화된 건물로 평가되고 있다. 그러나, 건물의 초고층화가 진행되는 것과 더불어 해당 건축물에는 수직하중부하를 견디기 위해 고강도/고밀도 콘크리트와 같은 고성능재를 적용하기 위한 까다로운 시공법이 필요할 뿐 아니라, 세장비가 크게 나타나는 기하학적 모양으로 인하여 바람 및 지진과 같은 수평하중에 저항하기 위한 특수 공법 역시 필요로 하게 된다. 특히 2013년 실시된 초고층특별법의 제정과 관련하여 초고층 건물 건설은 더 높은 내진성능 및 화재와 같은 방재 기능 향

주요어: 고강도강, 일반강-고강도강 혼용, SM570TMC, SM490, 중간모멘트 골조, 성능평가

Corresponding author: Kim, Moonjeong

R&D Division, Hyundai Engineering & Construction, 102-4 Mabuk-dong, Gyunggi-do, 446-716, Korea.

Tel: +82-31-280-7350, Fax: +82-31-280-7070, E-mail: moonjeong.kim@hdec.co.kr

투고일: 2013년 7월 23일 / 수정일: 2013년 8월 21일 / 게재확정일: 2013년 9월 6일

상도 요구받게 되었다. 이러한 요구를 해결하기 위한 기술 중, 지진 등 수평하중에 의한 피해를 저감하기 위한 대표적인 기술은 제진장치 혹은 면진장치를 적용하는 방법이 주로 거론된다. 이 기술은 건물에 댐퍼 혹은 면진 아이솔레이터를 삽입 적용하는 방법으로 대표되며 이미 국내외의 많은 연구를 통하여 그 효과가 입증되었다. 단, 국내의 경우 이러한 면·제진장치를 실제 건축물에 투입하는 것은 아직 사례가 충분치 못하며 실제 적용 사례도 저층 건축물에 국한되어 있다는 문제가 있다. 또한 이러한 공법을 현장에 적용하는데 있어서도 현장에서의 상당한 거부감을 직면하는 경우가 많아 설득에 많은 어려움을 겪고 있다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위한 많은 연구 중 고강도 재료로 만들어진 비교적 작은 단면적의 보조 부재 혹은 골조를 구조물에 적용함으로써 내진성능에 있어 충분한 기대 성능을 발휘할 수 있다는 연구(Araki et al. 2011, Kim, 2012)는 현장의 거부감을 최소화 할 것으로 기대되고 있다. 이와 같은 방법은 대부분 특수한 기술 및 장치를 필요로 하지 않기에 비교적 현장에서의 적용이 용이할 것으로 판단된다. 특히 해외에서는 이미 1000MPa급의 초고강도 강재가 개발되고 있으며, 국내에서도 SM570과 같은 600MPa급의 고강도 강재가 시판되고 있으며 현재 800MPa급 강재가 개발되어 시판을 준비하고 있는 것을 고려하여 볼 때 앞으로 건축 및 토목 분야에서 이러한 고강도 강재 활용은 활발해 질 것으로 판단된다. 또한 고강도강의 경우, 같은 항복능력을 가진 일반강보다 더 콤팩트한 단면으로 동일 성능을 구현 가능할 것으로 기대되고 있으므로 기존 건축물의 내진성능 보강 부분 뿐 아니라 신규 건축물 적용에서도 부재 항복 후 층 전체의 성능 강화 및 단면 저감에 의한 공간 효율성 증가 등, 기본적인 건물 성능 강화에도 유리할 것으로 판단된다.

본 논문은 이 점에 착안하여, 일반 강재로 구성된 건축물의 성능 향상을 위하여 고강도강재를 골조 부재로서 부분적으로 이용하기 위한 기초 자료를 구축하는 것을 일차적 목적으로 한다. 이를 통해 기존에 사용되고 있는 트러스 등과 같은 인장부재 이외에도 고강도강 부재를 수월하게 현장에 적용시키기 위해 이와 같은 기초 연구 결과를 국내 사업 현장에 제시하여 고강도강 골조 부재의 신뢰성을 높이는 것을 궁극적 목표로 한다. 또한 설계 부분에서는 실측 실험체를 사용한 실험 결과와 고강도강 강재 성질을 적용한 유한요소해석(FEA) 결과를 비교하여 프로그램 해석을 통해 고강도강을 적용하여 건물을 설계하는 작업 및 FEA 해석을 통한 건물 성능 파악에 도움을 주는 기초 자료 축적을 목표로 하며 부가적으로 고강도강을 적용한 비선형 해석을 수행할 경우 좀 더 실제에 가

까운 해석 결과를 얻기 위한 보정자료를 얻는 것을 목적으로 한다.

2. 보-기둥 접합부 성능실험

1. 사용 고강도강의 특징

본 논문에서 사용하는 고강도 강재는 국내 H社가 개발한 시판 SM570TMC강이며 기존 시판 570MPa 강재보다 탄소 함량이 다소 높기에 소성 후 연성이 타 시판강보다 높게 나타나는 특성이 있다. 이 장에서는 성능실험을 통한 H社의 구조용 고강도강 성질을 정리해보기로 한다

1) 사용 고강도강의 화학적 성질

본 실험에서 사용한 SM570TMC강의 화학적 성질 및 기계적 특성은 다음 Table 1~2와 같다. 재료 실험 결과에 의하면 본 논문에 사용된 실험체의 재료 중 SM570TMC강의 항복 응력과 인장 응력은 각각 KBC2009 규정인 440MPa과 570MPa을 상회하는 것으로 나타나며 판재를 기준으로 H社의 강재 항복 여유치는 약 1.1~1.8으로 계산된다.

Table 1. Chemical Composition(wt%) of SM570TMC Steel

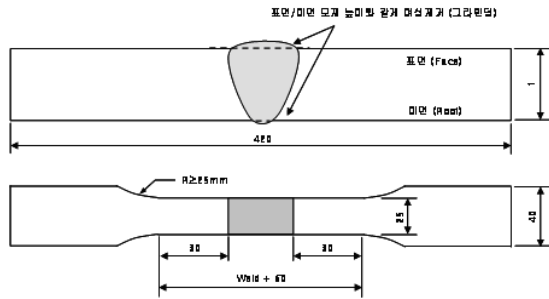
구분	C	Si	Mn	P	S
KS Spec.	≤0.10	≤0.55	≤1.80	≤0.002	≤0.006
화학적분	0.055	0.195	1.46	0.012	0.002

Table 2. Mechanical Properties of SM570TMC Steel

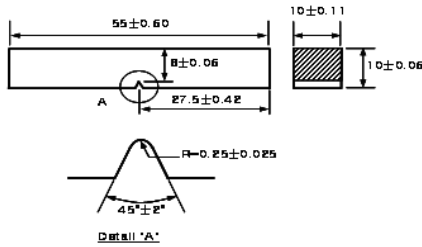
구분	Direction	Y.P (MPa)	T.S (MPa)	EL (%)	
KS D3515	16 < t ≤ 40mm 40 < t ≤ 75mm	≤1.80	≤0.002	≤0.006	
모재두께		최대값/최소값			
t=20mm	T	판상	501/493	672/671	31/29
t=30mm		봉상	585/559	669/665	24/23
t=50mm			533/505	642/629	27/26

2) SM570TMC강의 용접성 평가

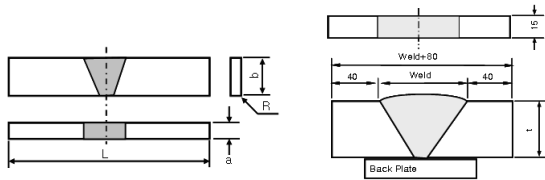
본 논문에서의 실험체는 FCAW, SAW 용접기법을 이용하여 용접부 기계적 성능 평가를 위하여 용접부 인장시험, 측면 굽힘시험, 충격시험, 경도시험 그리고 미세조직 관찰 시험을 실시하였다. 이를 위한 세부 평가 시험편 형상은 Fig. 1에 나타내었다.



(a) Tensile Test Specimen



(b) Charpy V-notch Impact Test Specimen



(c) Side-Bend Test Specimen (d) Macro Specimen

Fig. 1 Specimen for Weldability Estimation

Table 3. Tensile Test in Welded Joints of SM570TMC

두께 (mm)	용접기법	Y.P(MPa)	T.S(MPa)	E.L (%)
		모재		
		≥450	570~720	≥20
		용접부 (맞대기 인장 시험)		
		-	570~720	-
20	FCAW	524	643	22
		522	633	24
	SAW	522	631	23
		541	637	23
30	FCAW	586	674	24
		555	668	25
	SAW	557	647	25
		562	653	25
50	FCAW	559	657	33
		556	655	33
	SAW	556	655	24
		669	654	23

용접부 기계적 성능 평가 결과는 Table 3~5에 나타난 것이다. 강재두께/용접기법에 따른 인장시험 결과, 본 시험편은 KS 규격을 모두 만족하였으며, 맞대기 인장시험편 모두 모재부에서 파단되는 양상을 보여주었

다. 용접부 샤르피 충격시험 결과는 KS 규격에서 요구하는 시험온도 0℃에서 용접금속 및 용접열영향부 (Fusion Line ~ F.L.+20mm) 모두 충격값 47J 이상을 안정적으로 만족하였다.

용접부 비커스 경도시험 결과, 모든 용접부에서 도로교표준시방서(2005)에서 제한하고 있는 370Hv 이하를 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

Table 4. Charpy Impact Energy in Welded Joints of SM570TMC

용접기법	충격에너지 (J, Avg.)	≥47J @ -5℃ (Base metal)
FCAW	91~395J	
SAW	145~368J	

Table 5. Hardness Test in Welded Joints of SM570TMC

용접기법	경도값(Hv)	도로교표준시방서 Max. 370Hv ↓
FCAW	Max. 269Hv	
SAW	Max. 228Hv	

3) 용접부 저온 균열 감수성 평가

SM570TMC 강재에 대한 저온균열 발생을 방지하고 건전한 용접부 확보를 위하여 용접부 저온균열감수성평가를 실시하였다. 저온균열감수성은 강재두께 (30/50mm) 및 예열온도(상온, 50℃, 75℃, 100℃)로 변화시켜 경사 y형 구속 균열시험(y-groove test)를 이용하여 현장용접 시 적정 용접예열온도 선정을 위한 평가를 실시하였다. 시험편 제작을 위하여 구속/시험 용접은 FCAW 용접을 적용하였고 용접재료는 국내 H社 60kg급 FCAW 용접재료를 사용하였으며, 용접입열량은 17KJ/cm로 용접을 실시하였다. 용접 완료 후 상온에서 48시간 경과 후 균열관찰 단면시험편에 대한 균열발생율을 측정하였다. 저온균열감수성 평가결과 두께 30mm에서는 상온(≒15℃)에서도 루트균열과 같은 저온균열은 발생되지 않았으며, 50mm에서는 상온에서는 일부 균열이 관찰되었으나, 예열온도 50℃ 이상에서는 균열이 관찰되지 않았다. 따라서, 50mm 두께에서는 저온균열 발생을 방지하기 위해 현장 용접 시 최소 50℃ 이상 예열이 요구되어진다.

이러한 낮은 예열온도는 강재의 낮은 탄소당량 (Ceq.=0.37) 및 용접균열감수성지수(Pcm=0.17)와 관련이 되며, 각각의 지수를 낮게 관리함으로써 고강도 극후판재에서 발생되기 쉬운 용접균열의 발생 위험성을 크게 감소시킬것으로 판단되어진다.

참고로, AWS D1.1(Structural Welding Code-Steel,

2010)에서는 동절기에 모재 표면온도가 0℃ 이하로 낮아지면 현장 용접작업을 금지하고 있으며, 용접 필요 시 20℃이상 가열하여 모재 수분을 완전히 제거한 후 용접을 실시하도록 필수사항으로 규제하고 있다. Fig. 2는 강재두께/예열온도에 따른 균열 발생을 측정 결과를 나타낸 그래프이다.

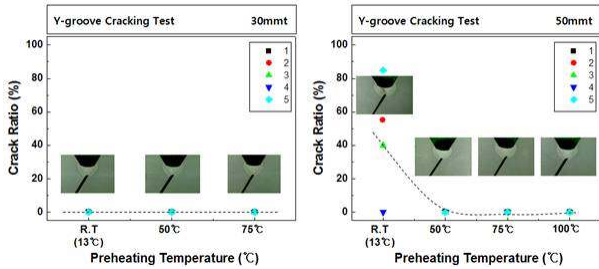


Fig. 2 Effect of Preheating Temperature on Cracking (y-groove test)

2. 모델 개요

1) 실대형 실험체 및 실험 조건

고강도 강재를 일반 골조부재 재료로 사용하기 위한 성능 검증을 위하여 보-기둥 접합부 성능실험을 실시한다. 성능실험은 고강도강 SM570TMC를 사용한 보-기둥 부재와 성능 비교를 위하여 동일 항복 성능을 가진 것으로 추정되는 SM490강 보와 SM570TMC강 기둥 부재로 구성된 보-기둥 접합부의 성능평가를 각각 시행하여 결과를 비교한다. 기둥 부재는 층고의 1/2을 가정한 3500mm로, 보 부재는 모멘트 변곡점인 스패의 1/3을 가정한 4000mm로 설정하였다. 덧붙여 부재 콤팩트 화가 진행되고 있는 고강도 강재 접합부의 접합부재 고강도화를 피하기 위하여 일반적으로 쓰이는 F10T 고장력 볼트 뿐 아니라 F13T 고장력 볼트의 사용에 관한 성능평가도 동시에 실시한다.

본 논문에서 사용한 보-기둥 접합 실험체의 성능 확인을 위한 정적증분하중은 KBC2009의 성능평가용 하중에 따르며 0713.10.2.2에 따라 보 플랜지를 안전용입용접한 후 보 웨브를 고력볼트로 접합하였다. 또한 실험체의 보 최대 치수를 700mm로 하여 보의 굽이 750mm를 넘지 않는다는 중간모멘트 골조 정의의 만족시켰다. 각 실험체의 명칭 및 보, 기둥 부재 단면 및 연결 고력볼트 재원은 Table 6에 제시하며 실험체의 형상 및 배치는 Fig. 3에 나타낸다.

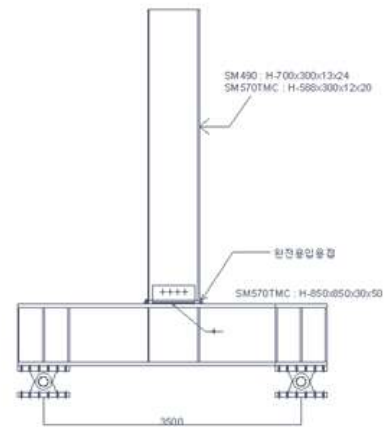
2) 예상 성능

SM570TMC 강재를 이용한 본 실측 실험체는 보-기둥 접합에 있어서 중간모멘트 골조의 성능 이상을 기대하고 있다. 각 실험체는 보 항복 구조로 설계

됨을 전제하였기에 실험체 성능은 보의 항복에 지배될 것으로 예상된다. 각 실험체의 보 부재 소성 공칭 모멘트는 Table 7과 같다.

Table 6. Member Sections of Specimens

실험체	보	기둥	고력볼트
1	H-588x300x12x20 (SM570TMC)	H-850x850x30x50 (SM570TMC)	10T-M24
2	H-588x300x12x20 (SM570TMC)	H-850x850x30x50 (SM570TMC)	13T-M24
3	H-700x300x13x24 (SM490)	H-850x850x30x50 (SM570TMC)	10T-M24
4	H-700x300x13x24 (SM490)	H-850x850x30x50 (SM570TMC)	13T-M24



(a) Beam-to-Column connection specimen



(b) plan of Beam-to-Column connection specimen

Fig. 3 Large Scale Beam-Column Connection Specimen

Table 7. Nominal Plasticity Moments of Specimen Beams

실험체	1	2	3	4
Mp(kN-m)	2193.2	2193.2	2186.4	2186.4

3. 성능 실험

보-기둥 골조를 이용한 보-기둥 성능실험에 대한 평가는 KBC2009에서 규정하고 있는 ‘중간 모멘트 골조’를 목표로 한다. 단, 이 실험에서는 부재에 가려지는 축력에 대한 영향은 고려하지 않는다. 본 실험에서 적용하는 중간 모멘트 골조의 성능은 KBC 규정에 따라 (1) 접합부는 최소 0.02rad의 층간변위각을 발휘할 수 있을 것, (2) 기둥 외주면 접합부 휨강도는 0.02rad 층간변위각에서 적어도 보의 공칭소성모멘트의 80% 이상일 것 두 가지를 만족하는 것으로 한다.

1) 보-기둥 모멘트 골조 접합부의 M-θ 이력도

본 성능실험은 KBC2009 기준에 따라 예상 층간변위각 0.04rad 까지 증분하중재하 하는 것을 원칙으로 한다. 각 실험체의 성능을 나타내는 M-θ 이력도는 Fig. 4에 그래프로 나타낸다. 그래프 중 세로축은 보-기둥 모델 접합부에 부가되는 휨 모멘트를 나타내며 가로축은 보의 회전각으로 유추한 층간변위각을 나타낸다. Fig. 4을 살펴보면 고강도강재를 이용한 실험체의 경우 단면적 저감에 의한 세장비의 영향에도 불구하고 4개의 실험체 모두 중간모멘트골조의 성능한계인 0.02rad에서 강성 저감 등의 성능 손상 없이 거동하는 것을 알 수 있다.

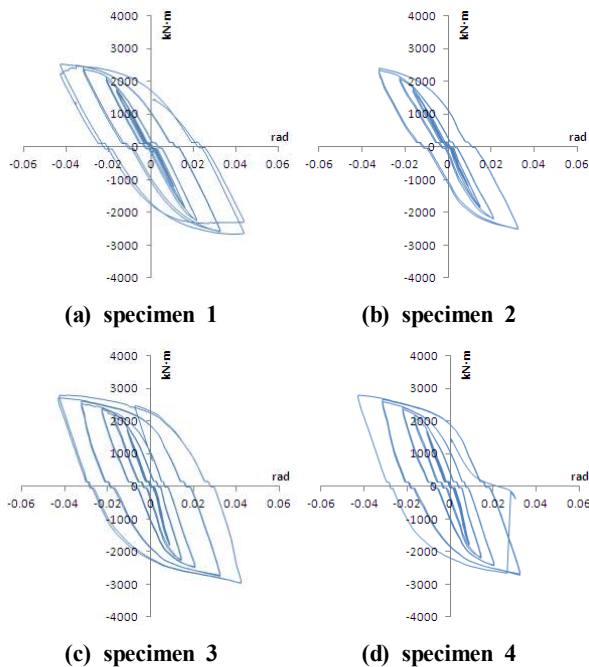


Fig. 4 History of Moment-Story Deformation Angle(M-θ)

Table 8은 보-기둥 접합부 실험에 대한 실험 결과를 나타낸다. 표 중 전소성 모멘트는 Table 7에 나타난 SM570TMC 및 SM490의 KBC2009 공칭강도에

의한 전소성 모멘트가 아닌, 재료 실험을 통한 실험체 구성 재료의 응력 중 평균값을 이용한 것이다. Table 8에 나타난 실험 결과를 살펴보면 4대의 실험체 모두 전소성 모멘트의 80% 이상의 성능을 나타내고 있으며 고강도강의 경우 SM490 일반강보다 다소 낮은 성능을 나타낼 수 있다. 또한, 같은 강종의 동일 단면을 사용한 실험체에서도 F10T를 이용하여 최적설계 접합을 실행한 실험체가 F13T를 이용한 실험체 보다 다소 높은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

Table 8. Performance Examination of Specimens (kN·m)

실험체	1	2	3	4
전소성모멘트	2193.2	2193.2	2186.4	2186.4
80%	1754.56	1754.56	1749.12	1749.12
0.02rad시 최대 모멘트 (실험치)	2410.0	2070.0	2625.0	2516.0
여유도	1.37	1.18	1.50	1.44

2) 파괴 형상

보-기둥 성능실험의 파괴 형상을 Fig. 5에 나타낸다. 보 항복형 구조로 설계된 본 실험체는 보의 휨파괴에 지배된 형태로 항복함을 예상하였고 Fig. 5에 의하면 대부분의 실험체에서 보 단부에 소성 힌지가 생성되는 것을 알 수 있다. 단, 단면 크기에 의한 단면 2차 모멘트의 영향으로 700 시리즈의 실험체 3~4에서는 휨 정도가 매우 낮게 나타나며 특히 실험체 4의 경우에는 재하 마지막 사이클에서 전단 균열이 나타나는데 이는 항복응력을 넘어설 때까지 매우 큰 2차 단면 모멘트의 영향으로 휨 변형이 억제된 것이 원인으로 사료된다.

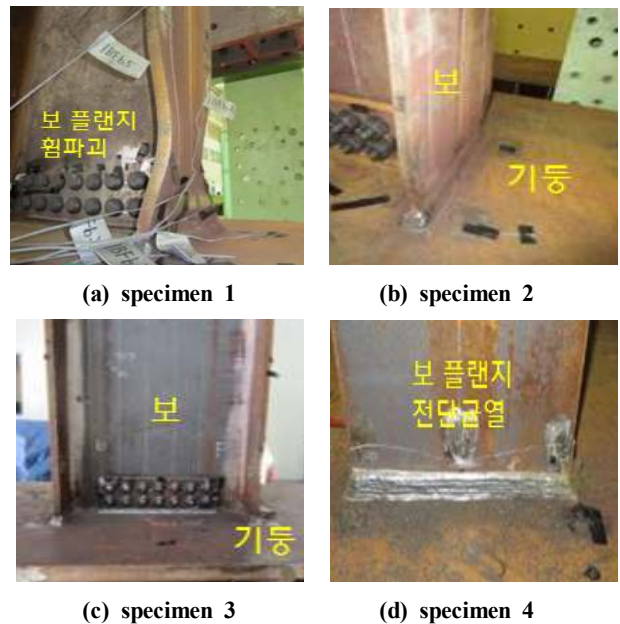


Fig. 5 Failure Shape of Beam-Column Connection

3. 비선형 유한요소 해석에 의한 성능평가

본 장에서는 SM490과 SM570TMC 강재의 성능 실험에서 도출한 값을 이용한 비선형 유한요소 해석의 결과를 제시한다. 본 장은 유한요소 해석결과와 실제 실험의 결과 비교를 통하여 향후 고강도 강재를 적용하는 건물의 구조설계에 있어서의 신뢰성 확보를 목적으로 한다.

1. 해석 조건

본 논문에서 사용하는 수치 해석은 비선형 유한요소 해석을 기본으로 하며 사용 프로그램은 범용 유한요소 해석프로그램은 ANSYS를 선택하였다. 본 해석에서 사용된 재료 비선형 관계는 다음 식 (1)(2)와 같이 인장시험결과로 얻어진 engineering stress-strain 관계를 true stress-strain 관계로 변환하여 고려하였다.

$$\epsilon_{ln} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (1)$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng}) \quad (2)$$

모든 접합부에 대한 해석모델은 3차원 입방체요소인 SOLID45 요소를 사용하였으며 8개의 절점은 x, y, z 방향 변위에 대하여 3개의 자유도를 가짐을 가정한다. 본 논문의 보-기둥 접합부 성능평가에서는 반복하중 하에서의 바우싱거 효과를 고려하기 위하여 BKIN (Bi-linear Kinematic Hardening) 모델을 선택하였고 이는 Fig. 6에 나타낸다.

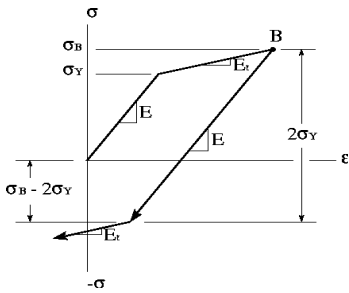


Fig. 6 BKIN Model

2. 해석 모델 및 해석 결과

1) 해석 모델

본 논문의 비선형 해석에 사용하는 모델은 실험과 동일한 보-기둥 실험체를 사용하며 볼트 접합에 있어서는 이음 볼트를 별도 모델링하지 않고 이음판과 볼트 위치의 노드를 병합(node merging)하여 모델링하였다.

2) 해석 결과

비선형 시간이력해석을 통한 보-기둥 접합 실험체의 해석 결과를 Fig. 7과 8에 나타낸다. 해석 결과를 살펴보면 모든 접합부가 0.04rad에서 보의 전소성모멘트의 80% 이상의 내력을 보유한 안정적 이력거동을 하는 것이 나타나 해석상으로도 중간모멘트 골조 능력을 만족함을 알 수 있다. 또한, 탄성강성을 비롯하여 바우싱거 효과를 고려한 2차 강성 역시 실험체와 해석체가 거의 유사하게 나타나는 것이 관찰된다. 단, 0.04rad 이상의 변형을 주는 반복하중 해석에서 실제 실험에서는 실험체 4에서 전단파괴가 나타난 것과는 달리 해석에서는 모든 모델의 보-기둥 접합부에서 취성파괴가 발견되지 않는 것이 발견된다.

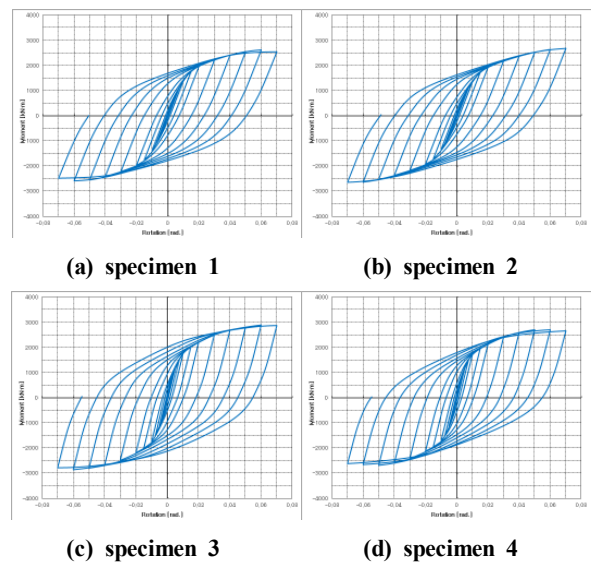


Fig. 7 History of Moment-Story Deformation Angle (M-Θ, analysis)

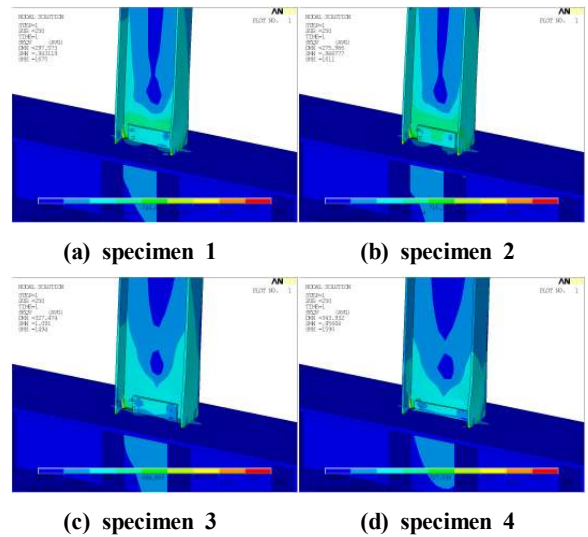


Fig. 8 Local Stress of Specimens (analysis)

3. 실험 결과와의 비교

보-기둥 접합부를 모사한 실험체 1~4의 정적증분 하중실험결과와 해석결과 데이터를 비교한 그래프를 Fig. 9에 제시한다. 그래프 중 실선은 실험 결과값을, 점선은 해석 결과값을 나타낸다. 그래프에 의하면 공칭인장값이 아닌 사용 강재의 인장 실험값을 적용한 경우, 초기 및 2차 강성, 변형은 실험값과 거의 유사하게 나타나지만 항복 능력은 실험 결과 보다 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

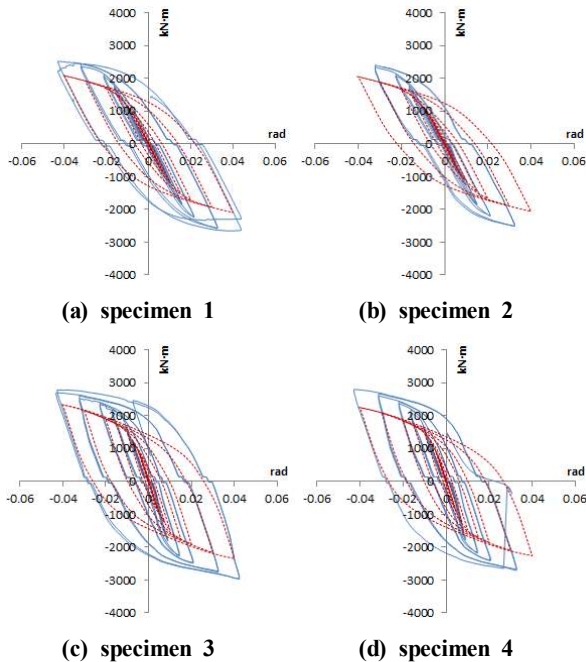


Fig. 9 Comparisons of M-θ History (test vs. analysis)

4. 정리 및 고찰

보-기둥 접합부를 모사한 실험체 1~4의 증분정적 하중재하 실험 및 해석을 통해 다음과 같은 것을 알 수 있다.

- 1) 동일 접합조건을 가진 실험체의 경우 강성에 대하여 다음과 같은 것이 관찰된다.
 - (1) 초기강성 : 일반강 (SM490) 보로 구성된 실험체보다 SM570TMC의 고강도강 보로 구성된 실험체의 초기 강성이 다소 낮은 것으로 나타났다. 이는 부재의 고강도화로 동일 소성능력을 기준으로 설계 시 부재 단면적이 작아지므로 단면 2차 모멘트 역시 줄어든 것을 원인으로 들 수 있다.
 - (2) 2차 강성 : SM570TMC강 실험체는 약 11%, SM490강은 약 6% 전후로 계산되

어 지진 시 고강도강 보를 적용한 층의 부재 항복 후 성능이 높음을 알 수 있다.

- 2) 동일 접합조건을 가진 실험체의 경우, 일반강 (SM490) 보로 구성된 실험체보다 SM570TMC의 고강도강 보로 구성된 실험체의 에너지 흡수 능력이 다소 낮은 것으로 나타나지만 영구 변형은 고강도강 실험체가 0.01rad 정도 낮게 나타난다.
- 3) 동일 강재를 사용한 보-기둥 접합부 실험체의 경우, 높은 강도 (F13T) 고강도 볼트를 사용하여 볼트 개수를 줄인 실험체 보다 일반 강재의 접합에 적용되고 있는 고강도 볼트(F10T)를 적용하여 개수를 늘린 실험체의 경우가 다소 성능 여유도가 높게 나타났다.
- 4) 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 보면 다음과 같은 것이 관찰된다.
 - (1) 항복능력 : 일반/고강도강 모두 해석값이 실험값의 약 89% 정도로 나타났다.
 - (2) 초기강성 : 초기강성의 경우, 실험값과 해석값이 거의 유사하게 나타났다.
 - (3) 2차 강성 : SM490의 경우, 거의 비슷한 결과가 나타나지만 SM570TMC강의 경우 다소 낮은 수치로 나타났다.

위와 같은 정리를 통해 본 논문에서는 다음과 같은 사항을 제시한다.

- 1) 고강도 강재를 사용한 골조부재의 경우, 일반강재보다 줄어드는 단면적 사이즈로 골조 탄성 강성에 문제가 생길 것을 우려하였지만 정리 1)의 (1)과 같이 600x300 시리즈 이상의 실제 적용 사이즈의 경우 설계 목표 성능을 만족하는 것을 알 수 있다.
- 2) 실험 결과 SM570TMC강 부재는 탄성 영역에 머무르는 시간이 길며 영구 변형 역시 SM490 보다 낮게 나타난다. 우리나라와 같이 지속적으로 긴 시간 유지되는 지진 발생율이 극히 낮은 중저 지진대에서는 에너지 소비량을 증가시키는 방법 보다는 부재의 탄성을 길게 유지시키는 편이 유리하다고 판단된다.
- 3) 범용 구조해석 프로그램에 의한 해석 결과는 항복용량이 약 10% 정도 낮게 평가되는 것이 관찰되나, 부재의 변형 정도 및 영구 변형에 있어서는 실험과 동일한 값이 산출된다. 구조해석에 의한 응력의 낮은 성능평가는 KBC2009의 설계 기준 중 강도 저감 계수가 0.9인 것을 고려할 때 허용 가능한 수치로 판단되어 해석 신뢰도가 충분하다고 간주한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This experimental study had been conducted under the financial support provided by Hyundai steel Co., Ltd., Hyundai Engineering & Structure Co., Ltd., and Hyundai AMCO Co., Ltd., The support is appreciated.

References

- Architectural Institute of Korea (2009), *Korea Bulding Code and Commentary (KBC)*, Seoul, KOREA. (in Korean)
- Araki, Y., Kim, M., Hamada, Y., and Kimura, H. (2011), "Prevention of Excessive Residual Deformation by Controlling Post-yield Story Stiffness Using High-strength Steel Stud Columns," *JSSC Journal of Constructional Steel*, Vol. 17, No. 65, Tokyo, Japan, pp. 63-70. (in Japanese)
- Kim, M. (2012), "Proposal of the Structure Design using SM570TMC for Preventing Deformation Concentration by $P-\Delta$ Effect on Lower Story in Steel Ramen," *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 3, No. 3, Seoul, Korea, pp. 31-37. (in Korean)
- Lee, K., Jeong, H. T., Yoon, S. R., Lee, E. M., and Oh, K. H. (2008), "Cyclic Testing of Bracket and WUF-B Type Weak-Axis Steel Moment Connection," *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 20, No. 4, Seoul, Korea, pp. 483-491. (in Korean)
- Architectural Institute of Japan (2006), "Report of High Strength Steel(780N/mm²) and New Buildings," *The 2006 Japan Construction Symposium*, Nagoya, Japan. (in Japanese)