

# 신형상 메카니컬패스너를 사용한 엔드플레이트 형식 보-기둥 접합부의 변형성능

## Deformation Capacity of Endplate-type Beam-to- Column Connection with New Type Mechanical Fasteners

이 승 재\*  
Lee, Seung-jae

### 요 약

본 연구에서는 기존의 고력볼트의 축부절삭 가공방법을 이용한 신형상 메카니컬패스너를 개발하였다. 개발된 신형상 메카니컬패스너를 엔드플레이트 형식의 보-기둥 접합부에 적용하여 변형능력 및 강도특성에 대한 재하실험 및 유한요소법에 의한 수치해석을 수행하였다.

### Abstract

This study propose cutting body portion-high strength mechanical fasteners to improve deformation capacity of High strength bolts, which are the mechanical fasteners used for End-plate connections. And, we report that loading test results of steel beam-to-column connection using high deformation capacity-high strength bolts in accordance with SAC2000 loading program. As a result, the initial stiffness and the maximum strength of the connection using high deformation capacity-high strength bolts, are approximately the same in comparison with those of the end-plate connection using the existing high strength bolts. But the deformation capacity of the connection is more than twice as much as those.

**키워드 :** 축부 절삭가공형 고력 패스너, 고변형성능 고력볼트, 보-기둥 접합부, 엔드플레이트 형식, 최대강도, 변형성능

**Keywords :** Cutting body portion-high strength fasteners, High deformation-high strength bolt, Beam-to-column connection, End-plate type, Maximum strength, Deformation capacity

## 1. 서 론

강구조물은 콘크리트 구조물에 비해 비교적 재사용 및 재활용이 용이하며, 이런 강구조물의 보-기둥 접합부(특히, 엔드플레이트 접합부, 스플릿-티 접합부)에 사용되는 고력볼트는 나사부에 응력이 집중하여, 취성적인 파단을 보이는 단점을 가지고 있다. 엔드플레이트 형식의 강구조 보-기둥 접합부는 엔드플레이트를 공장용접하여 보의 단부를 제작하여 현장에서 고력볼트를 이용하여 접합부를 형성하는 접합형식이다. 또한 엔드플레이트의 고력볼트 배치

에 따라서 익스텐디드타입과 플러쉬타입으로 대별되어진다.

본 연구는, ① 현장용접에 기인하는 결함, 재질변화, 변형의 집중 현상으로 인한 파단현상의 방지 ② 접합부강도를 부재강도보다 낮게 설정하는 경우 부재의 파괴에 이르기까지의 연성능력 혹은 변형능력을 최우선으로 하지 않아도 되는 설계 ③ 접합부의 회전능력을 고력볼트와 같은 접합요소의 변형능력으로 예측 및 제어가 가능한 설계, ④ 손상이 발생하였을 경우 보수 및 교체가 가능한 디테일 개발을 연구목적으로 한다.

본 연구는 고변형성능 고력볼트 개발<sup>1)</sup>과 고변형성능 고력볼트를 엔드플레이트 형식의 접합부에 적

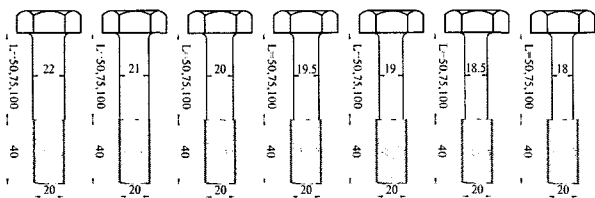
\* 정회원, 한국기술교육대학 건축공학부 교수  
Tel:041-560-1334, E-mail: leeseung@kut.ac.kr

용하여 반복가력에 의한 접합부 성능 확인실험을 실시하였다. 본 연구에서 제안한 고변형성능 고력볼트를 적극적으로 접합부에 활용하면 철골골조의 붕괴기구의 컨트롤이 가능하다. 즉, 강진시의 접합부 주변 프레임을 탄성범위에 머무르게 하고, 손상을 입는 요소인 접합요소만을 간단히 보수 및 교체가 가능하므로 구조부재의 재사용 및 재활용에 기여할 수 있는 설계전략이 가능하다.

## 2. 축부절삭가공형 고력패스너의 강도 및 변형성능

### 2.1 시험체의 개요

본 실험에서는 고력볼트의 축부를 절삭가공한 시험체에 대한 최대내력 및 변형성능을 파악하기위한 인장실험을 수행하였다. 시험체는 F10T급 M22 타입의 고력볼트를 <그림 1>과 같이 축부지름을 절삭가공하여 축부지름 당 2개씩 총 48개를 제작하였다. <표 1>에는 기준치수 및 축부지름, 축부단면적 감소율을 나타내었다.



<그림 1> 시험체 상세도(mm)

### 2.2 실험방법

본 실험에서는 <그림 2>에서와 같이 980kN 급 UTM과 경사면이 없는 쇠기를 삽입한 고력볼트용 인장지그를 사용하여 인장가력 실험을 하였다. 하중 및 변형의 계측은 인장축의 로드셀, 외부설치 변위계 및 스트레인게이지에 의해 계측하였으며, 가력은 고력볼트가 파단시까지 가력하였다.

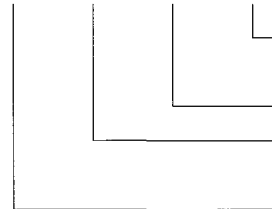
### 2.3 실험결과 및 분석

<그림 3>은 M22 타입의 하중-변위관계를 항목하

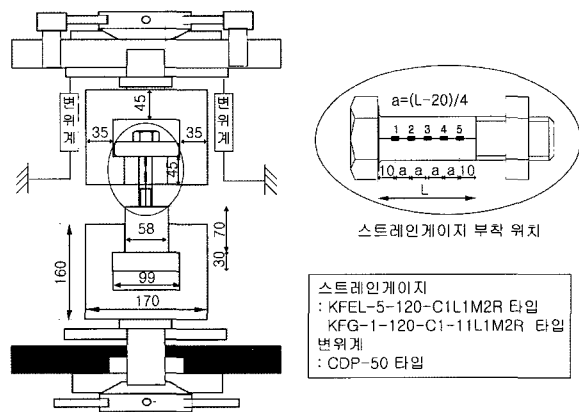
<표 1> 시험체 일람표

타입	기준치수(시리즈)		축부지름 (10-1mm)	축부단면적 감소율 (%)	수량
	축부(L) (mm)	나사부 (mm)			
M22	50	40	220	100	2
			210	91	2
			200	83	2
			195	79	2
			190	75	2
			185	71	2
	75	40	180	67	2
			220	100	2
			210	91	2
			200	83	2
			195	79	2
			190	75	2
	100	40	185	71	2
			180	67	2
			220	100	2
			210	91	2
			200	83	2
			195	79	2

M22 - 90 - 195 - F

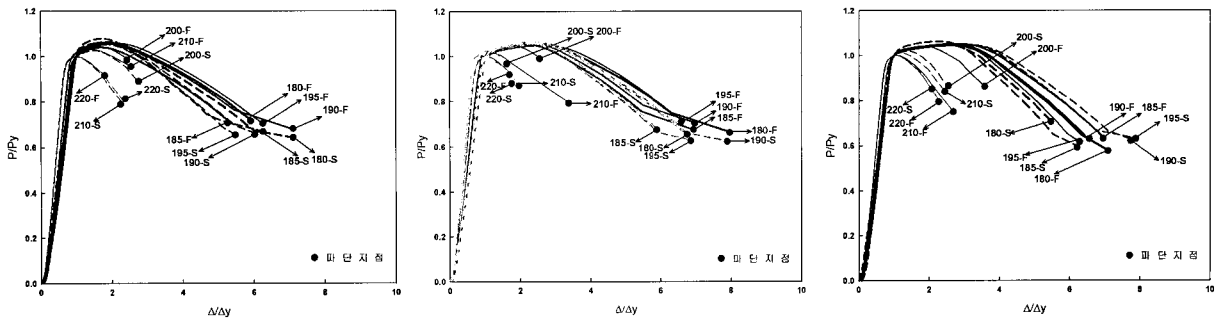


시험체 2개 중 첫 번째 사 (First, Second) 절삭가공 후 축부지름 : 19.5mm  
기준치수 (시리즈) : 축부+나사부 = 90mm  
타입 : 절삭 전 축부지름 22mm



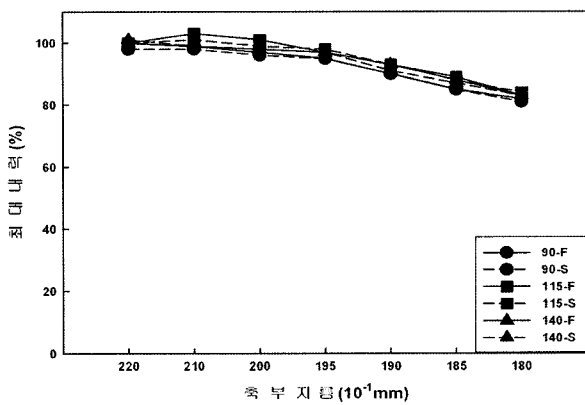
<그림 2> 계측계획(mm)

스트레인게이지 : KFEL-5-120-C1L1M2R 타입  
KFG-1-120-C1-11L1M2R 타입  
변위계 : CDP-50 타입

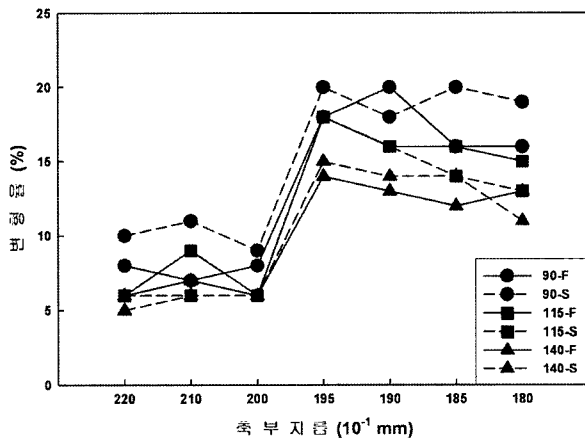


(a) M22-90 시리즈 (b) M22-115 시리즈 (c) M22-140 시리즈

〈그림 3〉 M22 타입 시험체의 하중-변위 관계



〈그림 4〉 M22 타입 축부 절삭에 따른 최대내력(%)



〈그림 5〉 시험체별 축부 절삭에 따른 파단시 변형율(%)

중과 항복변위로 무차원화하여 나타낸 것이다. 이때의 항복하중과 항복변위는 0.2% 오프셋 방법으로 산출된 항복강도에서의 하중과 변위이다. M22 타입의 경우 축부의 절삭에 따라 파단시 항복변위의 최대 8배 정도의 변위가 발생하였다.

〈그림 4〉은 M22 시리즈에서 220-F 시험체의 최

대내력 값을 기본으로 하여 최대내력을 나타낸 것이다. 최대내력은 축부길이의 변화에 따른 영향을 받지 않기 때문에 변형율의 변동계수보다 상대적으로 작은 변동계수가 나타났다.

〈그림 5〉는 고력볼트의 파단시 축부 및 나사부에서 발생한 변형의 평균값을 기준길이(축부길이와 나사6산길이의 합)에 대한 변형율로 나타낸 것이다.

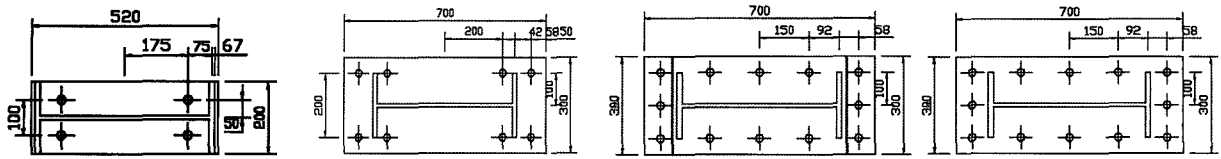
본 실험에서는 나사부길이는 일정하고 축부길이만 변동되는데 변형율은 축부길이의 변화에 따라 발생하는 변형의 값이 아닌, 나사부 및 축부에서 발생하는 변형의 평균값을 기준길이에 대한 변형율로 나타낸 것이기 때문에 변형율의 변동계수가 크게 나타났다.

M22 타입의 195 시험체의 경우는, 시리즈에 관계없이 고력볼트의 축부에서 파단이 되었고, 그림 3과 같이 파단시 항복변위의 5배 이상의 변위가 발생하였다. 또한 〈그림 4〉와 같이 220 시험체에 비해 최대내력은 5% 정도 저감되었으나, 그림 5와 같이 파단시 변형율은 약 2배 이상 증가하였다.

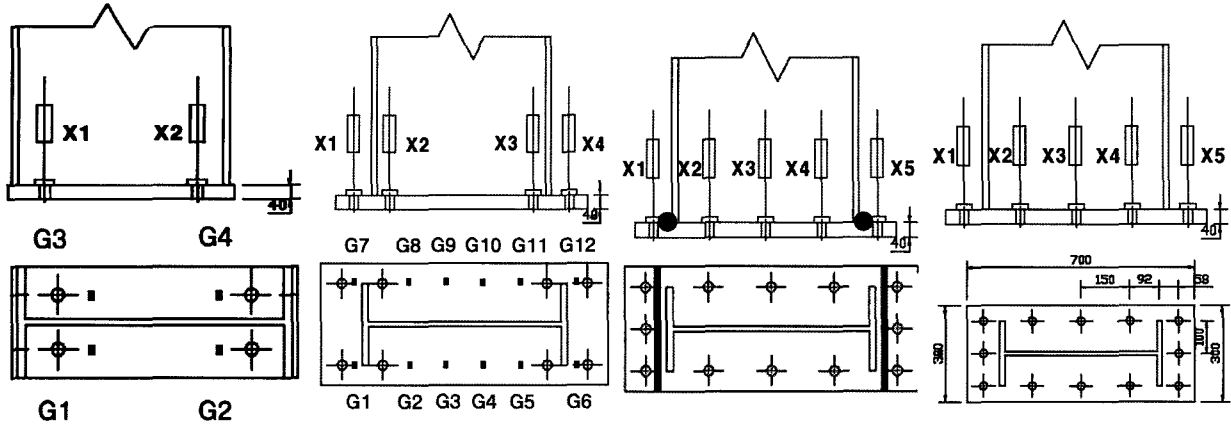
### 3. 고변형 성능 패스너의 접합부 내진 성능

#### 3.1 실험체 계획

〈그림 6〉은 보의 단부에 용접접합 되어지는 SM490급 강재를 사용한 엔드플레이트의 상세를 나타낸다. 엔드플레이트의 형식은 플러쉬 타입과 익스텐디드 타입의 2종류로 하였다. 플러쉬 타입은 엔드플레이트의 사이즈 및 고변형성능 고력볼트의 수를



〈그림 6〉 엔드플레이트의 상세도



〈그림 7〉 엔드플레이트의 변위계 및 스트레인 게이지 부착위치

〈표 2〉 실험체 일람표

TYPE	축부 유효단면적 (mm <sup>2</sup> )	고변형성능 고력볼트 수	축부길이 (mm)	비고
FP-180	254.34	4	80	
FP-195	298.49	4	80	
FP-220	379.94	4	80	
EP-195-A	298.49	8	80	
EP-195-B	298.49	12	80	가우징
EP-195-C	298.49	12	80	

동일하게 하고 기존의 F10T-M22 고력볼트를 사용하여 체결한 실험체 1개, 기존의 F10T-M22 고력볼트의 직경 22mm 축부를 19.5mm 및 18.0mm로 절삭가공한 고변형성능 고력볼트를 사용하여 체결한 실험체 2개를 제작하였다. 또한 익스텐디드 타입의 실험체는 고변형성능 고력볼트가 파단하는 붕괴기구 및 고변형성능 고력볼트와 엔드플레이트가 동시에 파단하는 붕괴기구를 모의하기 위하여 선행연구에서 변형성능이 가장 우수하다고 판명된 축부지름 19.5mm의 고변형성능 고력볼트를 사용하여 체결하고, 고변형성능 고력볼트의 수 및 가우징 유무를 실험 파라미터로 설정하여 3개의 실험체를 제작하였다. 가우징은 <그림 6>에 나타내는 익스텐디드 엔드플레이트의 좌측단 및 우측단의 볼트구멍의 중심

위치와 보의 좌우 플랜지 단부와의 중심위치에 깊이 2cm의 가우징을 엔드플레이트의 단변방향 길이에 걸쳐 실시하였다.

H형강 보는 SM490급 압연 H형강 H-500×200×10×16 강재를 사용하였으며, 엔드플레이트와 보의 전 둘레를 30° 개선 후 홈용접 하였다. <표 2>에 실험체 일람을 나타낸다.

또한 <그림 7>과 같이 변위계 및 스트레인 게이지를 부착하여 계측을 실시하였다.

### 3.2 측정계획 및 가력계획

본 연구에서는 고변형성능 고력볼트가 파단에 이르기까지 각 보 요소, 엔드플레이트 요소의 소성화 유무를 판정하기 위해 <그림 7>과 같이 플러쉬 타입의 엔드플레이트 4개소, 익스텐디드 타입 엔드플레이트 12개소, 그리고 각 고변형 성능볼트에 2개의 스트레인게이지를 부착하여 변형량을 측정하였다. 또한 보-기둥 접합부의 전체 회전각을 구성하는 보의 처짐각, 엔드플레이트의 변형각, 고변형성능 고력볼트의 인장변형에 의한 회전각 성분을 분리하기 위하여 보의 액츄에이터 가력점에 설치한 변위계를 비롯하여 고변형성능 고력볼트의 헤드부분에 강성이 충분한 봉형의 철물을 용접 부착하여 강선으

로 변위계에 정착하여 변위를 측정하였다. 또한 엔드플레이트만의 변형각을 측정하기 위하여 엔드플레이트의 좌측단 및 우측단에 고변형성능 고력볼트 헤드부분과 마찬가지로 봉형의 철물을 용접하여 강선으로 변위계에 정착하였다. 그림 8과 같이 실험체는 최대하중 용량 2000kN, 스트로크 ±300mm를 가진 준정적 액추에이터와 연결되어 접합부에 모멘트하중을 작용시키도록 하였다. 또한 보의 횡좌굴을 방지하기 위하여 삼각 프레임으로 구성된 횡좌굴 방지대를 설치하였다.

가력계획으로서는 기존의 연구결과를 참고하여 SAC2000의 재하프로그램에 의거하여 보와 접합부의 전체 변형각을 대상으로 각 싸이클에서 최대하중이 실험체 최대하중의 60%이하로 저하하여 더 이상 성능을 발휘하지 못할 때까지 정부 동일 변위제어 방식으로 가력하였다.

### 3.3 소재실험

실험체 제작에 사용된 강재의 재료적 특성을 파악하기 위하여 KS B 0801의 금속재료 인장시험편 규정을 따라 실험체로부터 시험편을 채취하여 1000kN 만능시험기를 이용하여 KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 의해 소재 실험을 실시하였다. 소재실험 결과를 <표 3>에 나타내었다.

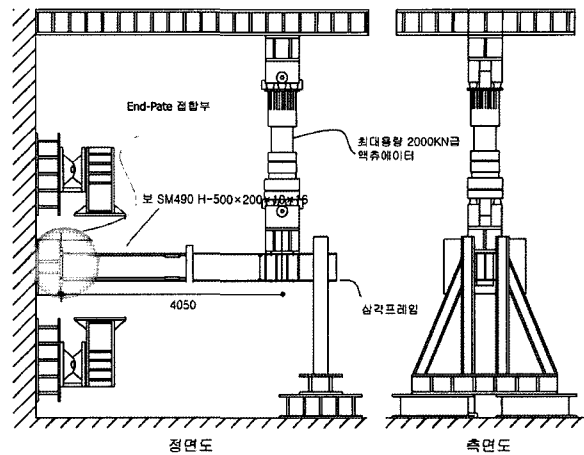
<표 3> 소재시험 결과

시험체	No.	항복응력 (MPa)	최대응력 (MPa)	연신율 (%)	항복비 (%)
Web	1	435.1	556.9	20	76
	2	418.9	547.9	21	74
	3	412.1	558.8	20	74
Flange	1	356.9	528.3	25	68
	2	342.0	498.6	24	68
	3	347.8	511.3	24	68

### 3.4 실험결과 및 고찰

#### 3.4.1 플러쉬 타입 엔드플레이트

<그림 8>에 기존의 고력볼트를 사용한 플러쉬 타입 엔드플레이트 실험체 FP-220의 작용한 모멘트와 보의 탄성변형을 포함한 전체 회전각의 관계를 나



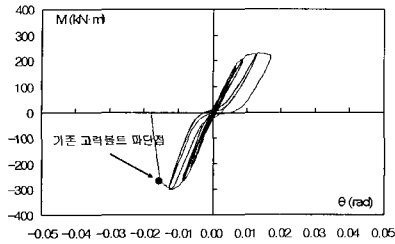
<그림 8> 실험장치 개요도

타낸다. 모멘트-회전각 관계는 전형적인 슬립형의 역 S자형의 이력거동을 보이고 있으며 하부의 고력볼트 2개의 파단으로 실험을 중지하였다. 그림에 의하면 고력볼트가 최대 인장변형을 경험 후 이간상태에서 다시 반대측의 고력볼트가 인장 변형시에 약간의 강성저하 현상을 관찰할 수 있으나 전체적인 강성의 현저한 변화는 관찰되지 않았다. 실험체는 전체 변형각 약 0.015(rad)에서 고력볼트의 너트 바로 밑 부분의 나사산에서 파단을 일으켜 실험을 중지하였다. 플레이트에 부착한 스트레인게이지의 변형율은 평균 520 마이크로로서 탄성 상태였음을 확인할 수 있었다.

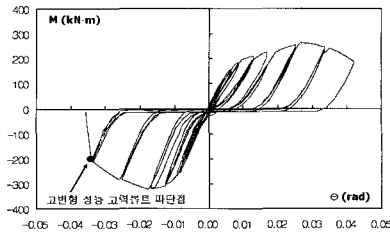
<그림 9> 및 <그림 10>은 축부지름 19.5mm 및 18mm로 절삭가공한 고변형성능 고력볼트를 사용한 플러쉬 타입 엔드플레이트 실험체 FP-195와 FP-180의 실험결과를 나타낸다. <그림 9>의 경우 파단시 회전각이 0.034(rad)으로 <그림 8>의 기존 고력볼트를 사용한 접합부 회전각의 2배 이상의 변형능력을 발휘함을 알 수 있다. 모멘트-회전각 관계는 FP-220과 마찬가지로 슬립형의 역 S자형의 이력거동을 보인다. 최대내력 및 가력에 따른 강성변화는 FP-195와 FP-220의 실험결과는 큰 차이가 발견되지 않았다. 그러나 FP-220과 FP-180의 최대내력에 있어서는 FP-180의 축부 유효단면적의 감소로 인한 약 10% 정도의 내력저하 현상이 발견되었다.

#### 3.4.2 익스텐디드 타입 엔드플레이트

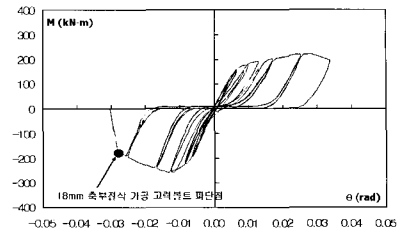
<그림 12>은 익스텐디드 타입의 엔드플레이트에



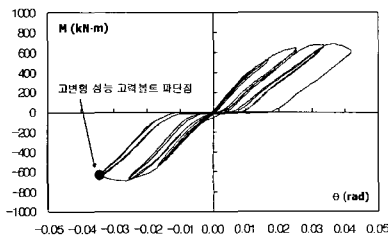
<그림 9> 모멘트-회전각 곡선 (FP-220)



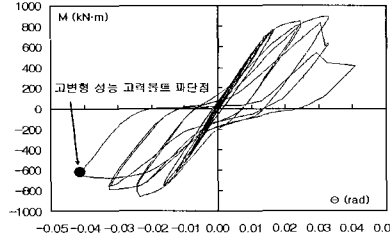
<그림 10> 모멘트-회전각 곡선 (FP-195)



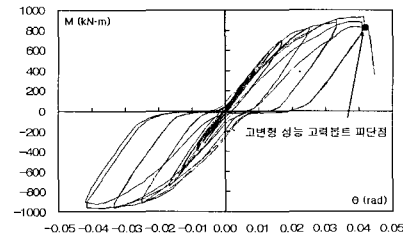
<그림 11> 모멘트-회전각 곡선 (FP-180)



<그림 12> 모멘트-회전각 곡선 (EP-195-A)



<그림 13> 모멘트-회전각 곡선 (EP-195-B)



<그림 14> 모멘트-회전각 곡선 (EP-195-C)

<표 4> 실험결과 요약

실험체	최대 휨내력 (kNm)	(Mu/My)	파단시 회전각 (rad)	파단형상
FP-180	258.4	1.2	0.02829	볼트파단
FP-195	321.1	1.2	0.03430	볼트파단
FP-220	301.6	1.2	0.01534	볼트파단
EP-195-A	688.2	1.2	0.03540	볼트파단
EP-195-B	898.4	1.2	0.04084	플레이트, 볼트파단
EP-195-C	966.5	1.2	0.04296	볼트파단

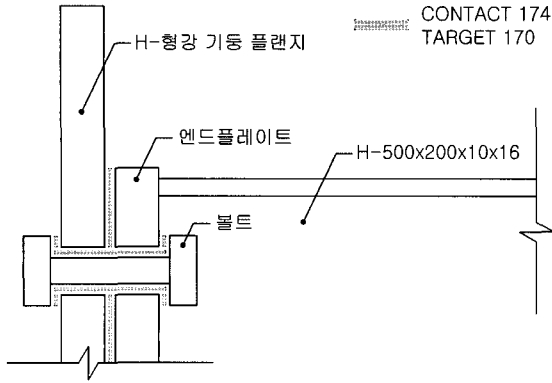
동일한 고변형성능 고력볼트 8개를 사용하여 체결한 실험결과이다. 실험결과에 따르면 고변형성능 고력볼트의 항복으로 인한 볼트붕괴형의 결과를 나타내고 있다. 또한 <그림 13>는 엔드플레이트의 항복 및 고변형성능 고력볼트가 항복하여 붕괴기구를 형성하도록 가우징을 실시한 실험체의 결과이다. <그림 13>의 종축의 플러스와 마이너스를 교차하는 부분의 내력의 크기가 엔드플레이트가 부담하고 있는 저항능력으로 평가할 수 있을 것이다. <그림 14>은 가우징을 실시하지 않은 엔드플레이트 실험체의 실험결과이다. <그림 13> 및 <그림 14>에 의하면 동일 회전각 반복 가력에 의한 내력저하 현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다. <표 4>에 실험의 최종결과를 나타낸다.

#### 4. 탄소성 유한요소 해석

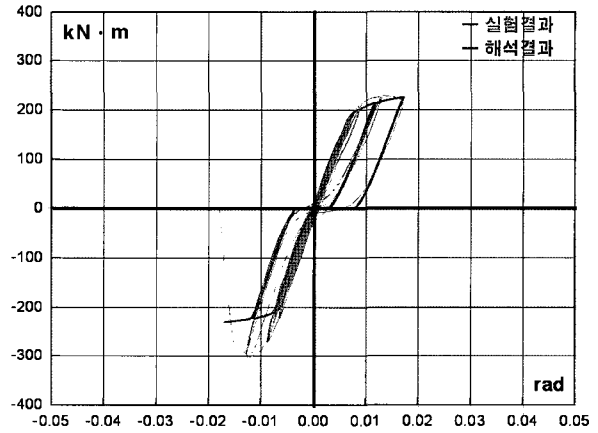
본 연구에서 제안하는 신형상 메카니컬패스너를 사용한 엔드플레이트 형식의 보-기둥 접합부의 탄소성 유한요소해석을 수행하여, 사이클릭 가력시의 응력 및 변형을 어느정도까지 추적 가능한가에 대한 검토를 실시하였다.

탄소성 유한요소 해석 프로그램은, 상용 프로그램인 Ansys 10.0을 이용하였다. 보-기둥 접합부 해석 시 가장 중요한 요소인, 메카니컬패스너와 엔드플레이트 및 기둥 플렌지와의 접촉요소로서는 컨택 174번 요소와 타깃 170번 요소를 이용하였다. 접촉요소의 적용상태를 <그림 15>에 나타낸다.

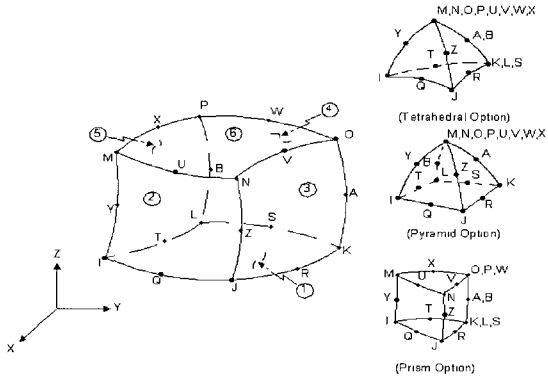
또한 유한요소 모델링은 솔리드95번 요소인 3차원 입방체요소를 사용하였다. 이 요소는 소성, 응력경화, 대변형 등의 해석에 적합하며, 20개의 절점으로 구성되고 각 절점에 x,y,z 방향의 자유도 3개씩을 갖는다. <그림 16>에 솔리드 95번요소의 자유도를 나타낸다. 하중증분에 따른 오차를 해결하기 위하여 뉴튼-랩슨법을 사용하였고, 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 소성관련 옵션 중 BKIN(Bilinear Kinematic Hardening)을 사용하였다. 이것은 탄소



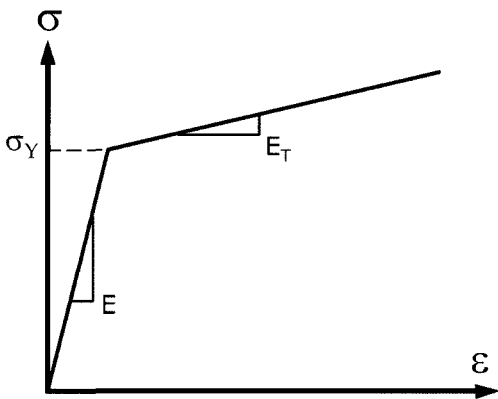
<그림 15> 접촉요소 적용 상태



<그림 18> 탄소성 유한요소 해석 결과



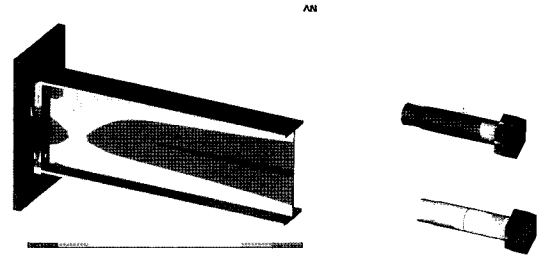
<그림 16> SOLID95 Geometry



<그림 17> 응력-변형률 곡선

계수와 접선계수 및 항복응력을 필요로 하며, 보수성거 효과가 포함되어 있는 운동학적 경화 모델의 von Mises 항복기준을 사용한다. <그림 17>에 사용한 요소의 응력-변형률 곡선을 나타낸다.

탄소성 유한요소 해석결과를 실험결과와 함께 <그림 18>에 접합부에 작용한 모멘트와 보의 전체



<그림 19> 탄소성 유한요소 해석 결과

회전각을 나타낸다.

<그림 19>에 해석결과와 본 미세소 상당응력을 엔드플레이트를 비롯한 보의 응력분포 및 신형상 메카니컬 패스너의 응력분포를 나타낸다.

## 5. 결론

본 연구는 고변형성능 고력볼트 개발과 고변형성능 고력볼트를 엔드플레이트 형식의 접합부에 적용하여 반복하중에 의한 접합부 성능 확인실험을 실시하였다.

### 5.1 축부절삭가공형 고력볼트의 강도 및 변형성능

축부를 절삭가공한 F10급 M22, M24 타입의 고력볼트의 축부를 절삭가공한 시험체에 대한 내력, 변형성능 등을 파악하기 위하여 인장실험한 그 결과는 다음과 같다.

1) M22 타입은 2.5mm 정도, M24 타입은 2.7mm 정도 절삭가공한 고력볼트 시험체는 나사부와 축부

전 영역에 걸쳐 응력이 고르게 분포한다. 이때 시험체의 축부 단면적은 절삭 전 시험체의 축부 단면적의 79% 정도 이다.

2) M22타입의 195 시험체의 경우는 시리즈에 관계없이 나사부와 축부의 전 영역에 걸쳐 응력이 고르게 분포하고, 파단시 항복변위의 5배 이상의 변위가 발생하였다. 또한 220 시험체에 비해 최대내력은 5% 정도 저감되었으나, 파단시 변형율은 약 2배 이상 증가하였다.

본 실험의 결과에 의하면, 기존의 고력볼트를 절삭가공하여 고변형성능 고력볼트를 제작하는 경우의 한계 절삭치는 M22 타입의 경우는 19.5mm로 예측할 수 있다.

## 5.2 고변형 성능 고력볼트의 접합부 내진성능

본 연구의 범위 내에서는 플러쉬타입의 실험체의 경우 기존 고력볼트를 사용한 접합부(FP-220)와 고변형성능 고력볼트(FP-195)를 사용한 접합부의 회전능력은 2배 이상 증가함을 알 수 있었다. 또한 이력중의 현저한 강성저하 현상 및 최대내력의 감소현상은 발견되지 않았다.

변형성능이 입증된 고변형성능 고력볼트를 적극적으로 접합부에 활용하면 철골골조의 붕괴기구의 컨트롤이 가능하다. 즉, 강진시의 접합부 프레임을 탄성범위에 머무르게 하고, 손상을 입는 요소인 접합요소만을 간단히 보수 교체가능하게 하므로 구조부재의 재사용 및 재활용에 기여를 할 수 있을 것이다.

철골골조 형식을 이용하여 중고층 구조물을 설계할 경우, 고변형성능 고력볼트를 이용한 엔드플레이트 형식의 보-기둥 접합부를 브레이스 및 탄소성이력댐퍼 등의 내진요소와 병용하여 사용한다면 중소지진은 강성이 큰 브레이스 또는 탄소성댐퍼의 소성화를 유도함으로써 지진에너지를 흡수시키고, 대지진이 발생하였을 경우, 접합부의 고변형성능 고력

볼트가 지진에너지를 흡수함으로써 주변 프레임의 소성화를 방지하는 구조시스템을 채용하는 내진설계의 방법도 생각할 수 있으므로 이후의 추가적인 연구가 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 2004년 건설핵심기술연구개발비(04핵심기술A03-03)의 연구결과의 일부로서, 건설교통부의 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 박현숙, 이승재, 오상훈, 강창훈, 이성민, "축부 절삭가공형 고력볼트의 강도 및 변형성능에 관한 연구", 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, 2005
2. 김승구, 이승재, 오상훈, 강창훈, "고변형성능 고력볼트의 접합부 내진성능에 관한 연구", 한국강구조학회 학술발표대회, 2006 투고 중
3. 오상훈, 김영주, 유홍식, 최홍배, 강창훈, "탄소성 이력댐퍼를 부착한 기둥-보 접합부의 이력거동", 대한건축학회 논문집, 2005
4. Kenichi OHI, Seung-jae LEE, Yosuke SHIMAWAKI, Hideo OHTSUKA, Ruben GUZMAN, "Inelastic Behaviors of End-plate Connections during Earthquakes and Improvement on their Rotation Capacity", Bull. ERS, No.33, 2000
5. Amadeo Benavent Climent, Sang-Hoon Oh, Hiroshi Akiyama (1998), Ultimate Energy Absorption Capacity of Slit-Type Steel Plates Subjected to Shear Deformations, 日本建築學會構造係論文集 第 503號