

# 각형강관 기둥을 가진 철골모멘트 집합부의 변형능력 Deformation Capacity of Steel Moment Connections with RHS Column

김영주\*                      오상훈\*\*                      유홍식\*\*\*  
Kim, Young Ju              Oh, Sang Hoon              Ryu, Hong Sik

-----  
**ABSTRACT**

In this paper, deformation capacity of steel moment connections with RHS column was investigated. Initially, non-linear finite element analysis of five bare steel beam models was conducted. The models were designed to have different detail at their beam-to-column connection, so that the flexural moment capacity was different respectively. Analysis results showed that the moment transfer efficiency of the analytical model with RHS-column was poor when comparing to model with WF(Wide flange)-column due to out-of-plane deformation of the RHS-column flange. The presence of scallop and thin plate of RHS column was also a reason of the decrease of moment transfer efficiency, which would result in a potential fracture of the steel beam-to-column connections. Further test on beam-to-column connections with RHS column revealed that the moment transfer efficiency of a beam web decreased due to the out-of-plane deformation of column flange, which led to premature failure of the connection.

-----

## 1. 서론

일본의 철골모멘트 저항골조는 주로 기둥으로서 각형강관단면(Rectangular Hollow Section; 이하 RHS 사용)을 사용하고, 보로서 WF(Wide Flange; 이하 WF 사용)형 단면을 사용한다. RHS 기둥은 양면에 두개의 웨브가 있고, WF 보의 웨브와 일치하는 중심에는 기둥웨브가 존재하지 않는다. 따라서 이러한 집합부는 중심에 웨브가 있는 WF 기둥을 주로 사용하는 미국의 집합부와는 달리 RHS 기둥플랜지의 변형이 증가하게 된다(그림 1). 기둥플랜지의 면외변형과 집합부 근방의 스캘럽으로 인한 보웨브의 단면손실에 의해서, RHS 기둥의 플랜지는 보에서 유발하는 휨모멘트에 저항하는데 있어서 비효율적이다. 이러한 집합부의 응력전달 메카니즘은 기존의 집합부 설계에서 가정하던 보이론과는 매우 다르다는 것

\* 정회원 · 포항산업과학연구원, 연구원, 공학박사  
\*\* 정회원 · 포항산업과학연구원, 책임연구원, 공학박사  
\*\*\* 정회원 · 포항산업과학연구원, 선임연구원, 박사수료

을 나타낸다. 秋山 宏 등<sup>(1)</sup>과 岡田 健<sup>(2)(3)</sup> 등은 접합부의 변형능력을 파악함에 있어서 보웨브의 모멘트 전달효율에 주목했다. 특히, RHS 기둥을 가진 접합부에서는 기둥의 플랜지판이 변형되고, 스캘럽 등의 단면손실에 의해서 웨브의 모멘트 전달효율이 저하한다고 보고했고, 웨브의 모멘트 전달효율의 저하는 보플랜지에 변형도 집중과 깊은 관계가 있다는 것을 밝혀냈다. 즉, 웨브의 모멘트 전달효율의 저하는 접합부의 최대내력을 저하시킬 뿐 아니라 접합부의 극히 일부분만 항복내력에 근접하게 함으로써, 소성화 영역이 충분히 확대되지 않고 변형이 접합부 일부에 집중하기 때문에 접합부 부근의 보플랜지가 충분한 연성능력을 발휘하지 못하고 파단할 수 있음을 밝혔다. 결과적으로 모멘트 전달효율의 저하는 변형능력과 반비례함을 보였다.

본 연구에서는 해석결과에서 얻은 데이터를 활용하여 웨브에서의 모멘트 전달효율 메카니즘을 파악하고, 이후 실험결과를 통해서 해석결과를 검증하고자 한다.

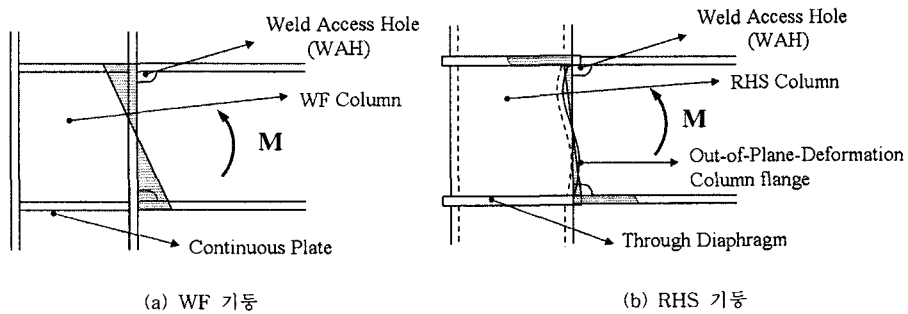


그림 1. 기둥-보 접합부의 변형

## 2. 유한요소해석

### 2.1 해석개요

해석에서는 5개의 접합부 모델을 바탕으로 유한요소해석을 수행하였다. 해석에서 기둥의 종류 즉, RHS 기둥과 WF 기둥, 용접접근구멍 (WAH: Weld Access Hole)의 유(이하 WHA)와 무(이하 NWAH: No WAH) 및 RHS 기둥플랜지의 두께 등을 변수로 사용하였다. 유한요소모델 및 대상모델들의 상세는 그림2에 나타났다. 본 연구는 접합부에서 보의 응력도 및 변형도에 주목하기 위해서, 모든 대상모델은 기둥과 패널존은 보에 비해서 강하게 설계하여 주요변형이 보에서만 발생하도록 유도하였다. 본 연구의 해석모델에서 강재는 3차원 솔리드 요소인 SOLID45 요소를 사용하였다. 또한, 재료비선형을 고려하기 위하여 실제 실험한 인장시편 데이터를 바탕으로 다중선형 등방성 경화 (Multi-linear isotropic hardening) 모델을 사용하였다. 각 모델들은 기하학적인 대칭조건을 고려하여 전체모델 중 1/2만을 모델링하였으며, 기둥 상하부는 힌지로 처리하였다. 가력은 하부플랜지가 인장을 받도록 1방향 단조가력의 방법으로 하였다. 해석변수별 내용은 아래와 같다.

- WF-N : WF 기둥+ NWAH
- WF-W : WF기둥+ WAH
- RHS-N : RHS 기둥+ NWAH
- RHS-W : RHS 기둥+ WAH
- RHS-W : RHS 기둥+ WAH + Thin column flange

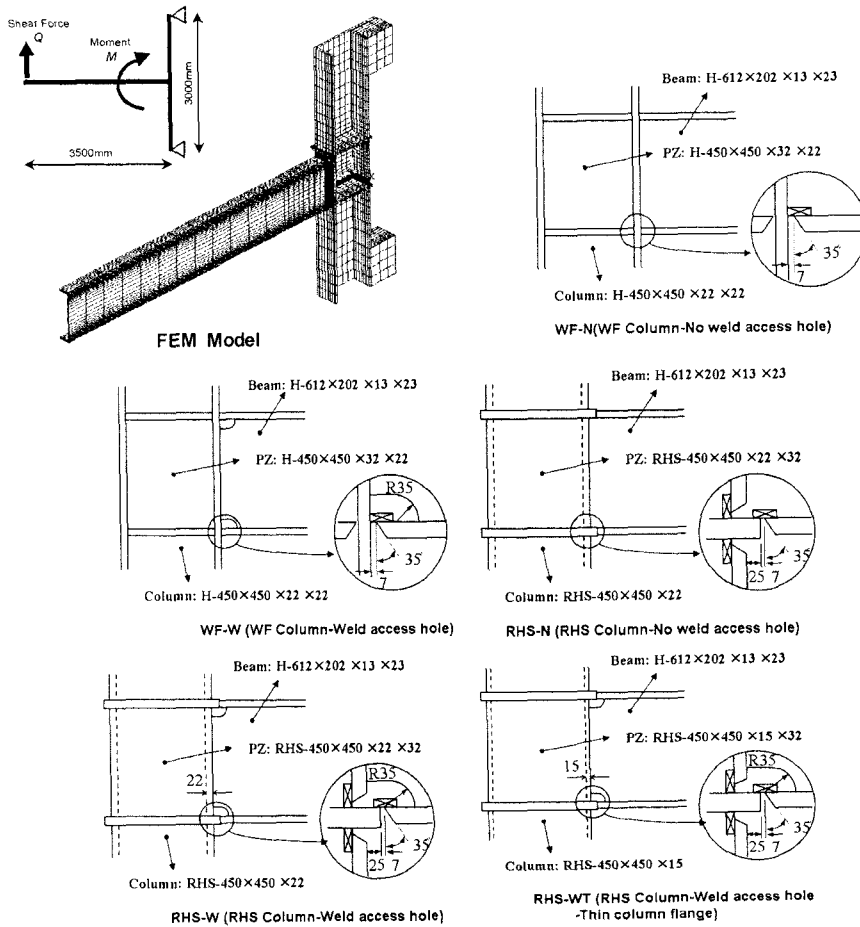


그림 2. 해석모델 및 접합부모델 상세

## 2.2 해석결과

그림 3은 5개 모델을 해석한 후에 모멘트-회전각 관계를 나타낸 것이다. 종축의 모멘트는 보단부의 엑츄에이터로부터 얻은 전단력에 보길이를 곱하여 구하였고, 횡축의 회전각은 보단의 수직변위를 보길이로 나누어서 구하였다. 그림 3(a)는 전체 모멘트-회전각 곡선을 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 보다 자세한 관찰을 위해서 각 그래프의 항복점 부근으로 예상되는 A부분을 확대하여 나타낸 것이다. 또한, 각 접합부의 내력의 성능을 가늠하기 위해서 보의 항복모멘트( $M_b = 1276 \text{ kNm}$ )와 전소성모멘트( $M_p = 1403 \text{ kNm}$ )를 그림에 함께 나타냈다. 그림 3(b)를 보면, WF-N 접합부 모델을 제외한 나머지 접합부들은 보의 전소성모멘트에 도달하기 전에 보단면이 급격히 소성화하는 것을 알 수 있다. 더욱이 RHS-W 모델과 RHS-WT 모델의 경우는 보의 항복모멘트에 도달하기 전에 이미 보가 소성화하고 있는 것을 나타낸다. 그리고, 접합부의 구성요소 및 형상이 같지 않아도 WAH와 RHS 기둥의 존재는 접합부가 조기에 항복하게 하는 것을 그림을 통해 알 수 있다. 이러한 사실은 RHS 기둥플랜지의 면외변형과 WAH의 영향이 접합부의 성능을 저하시키는 요인으로 파악된다.

그림 4의 경우는 RHS 기둥의 영향을 더욱더 자세히 보여주고 있다. 그림 4는 각 접합부 모델의 Von Mises 응력분포를 접합부 부근을 중심으로 나타낸 것이다. WF-N 모델의 경우, 기둥과 접합된 보

웹 중심부근의 일부영역에서는 응력을 거의 전달하지 못하는 것으로 보이며, 이러한 현상은 RHS 기둥을 가진 접합부에게서 더욱 뚜렷이 관찰되고 있다. 특히 RHS-WT 접합부 모델의 경우는 응력을 전달하지 못하는 영역이 가장 넓게 분포하는 것으로 나타났는데, 이러한 사실은 모멘트-회전각 관계에서 모멘트 성능이 가장 저하한 사실과 같은 맥락으로 이해될 수 있다. 지금까지 일반적으로 철골모멘트 접합부는 보의 휨이론에 근거하여 설계되어 왔다. 그러나, 여러 연구들<sup>(7)(8)</sup>로 통해서 접합부를 설계하는데 있어서 단순히 휨이론을 적용하는 것이 부적절하다는 점이 지적되었다. 그 예로 이철호<sup>(7)</sup> 등은 보-WF 기둥을 가진 접합부의 웹을 볼트로 접합한 RBS 접합부의 경우, 보플랜지의 절삭으로 인해 “structural fuse”를 도입하더라도 보웹 볼트의 성능저하에 의해서 조기 취성과 단항 가능성이 크다는 사실에 주목하였다. 이러한 사실은 RHS 기둥을 가진 접합부에서 보웹 볼트 기둥면에 용접을 할지라도 기둥플랜지의 면외변형이 결국 보웹 볼트로 접합한 경우와 비슷한 응력전달 메카니즘을 갖는 것을 뒷받침 해준다고 할 수 있다.

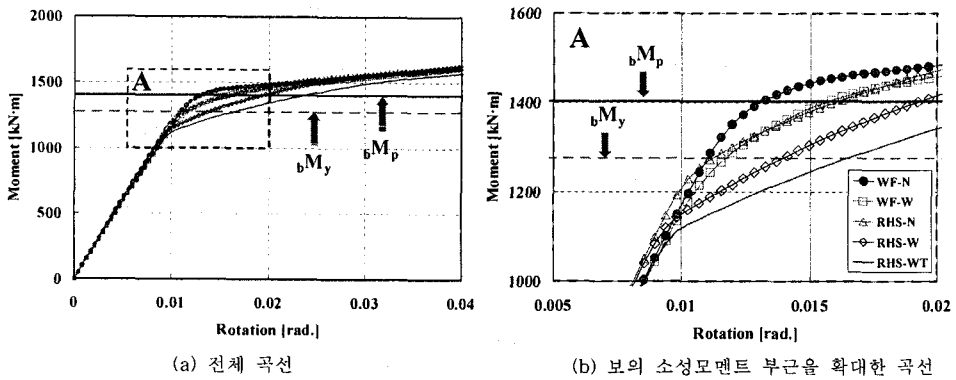


그림 3. 모멘트-회전각 관계곡선

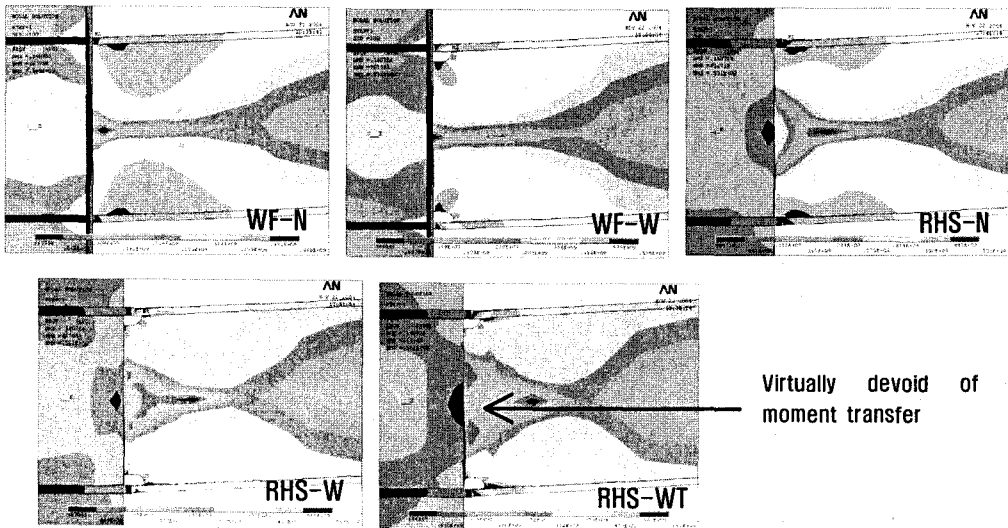


그림 4. Von Mises 응력분포

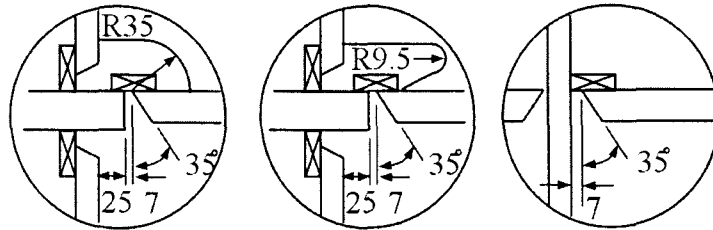
### 3. 실험프로그램

#### 3.1 실험체

본 실험에서는 중층규모 철골 건물의 외측부분의 기둥-보 접합부를 대상으로 한 T형 실험체를 이용했다. 실험체에 이용된 강재는 모두 SM490재이다. 실험체 일람을 표 1에 나타냈다. 모두 5개의 접합부 실험체를 제작하였고, 그 중에서 RHS 기둥을 사용한 실험체가 4개이다. 보는 압연 WF보(WF-600x200x11x17)를 사용하였고, 기둥은 춤과 폭이 450인 용접성형(built-up) RHS 기둥 및 WF 기둥을 제작하여 사용하였다. 주요변수는 기둥과 WAH의 형상이다. RHS 기둥의 경우 관통다이아프램 형식의 접합부를 채택하였고 기둥플랜지의 면외변형에 의한 접합부의 변형능력 저하정도를 파악하고자 했다. 그림 5와 같이 WHA은 기존 WAH 타입(conventional type), FEMA 350에서 제시하는 Post-Northridge 상세에서 제안된 타입(Modified type), 및 No WAH 타입을 적용하였다. 본 실험은 기둥-보 접합부의 파괴상황 및 변형능력의 파악에 주목하였기 때문에 기둥의 축력은 무시하였고, 특히, 패널존은 덧판 및 두꺼운 판재를 사용하여 기둥과 달리 충분히 강하게 하여 접합부가 종국상태에 이르렀을 때에도 탄성에 머물도록 하였다.

표 1. 실험체 일람

Specimen	Column	Beam	Weld access hole
RHS12C	RHS-450x450x12	R-H-600x200x11x17	Conventional type
RHS12M	RHS-450x450x12	R-H-600x200x11x17	Modified type
RHS12N	RHS-450x450x12	R-H-600x200x11x17	No weld access hole
RHS19M	RHS-450x450x19	R-H-600x200x11x17	Modified type
WF19M	WF-450x450x19x19	R-H-600x200x11x17	Modified type



(a) Conventional type      (b) Modified type      (c) No WAH type

그림 5. 용접접근공(WAH) 상세

#### 3.2 가력장치 및 가력방법

실험은 최대하중용량 2000 kN, 스트로크 용량  $\pm 300$ mm의 성능을 가진 정적 액츄에이터를 사용하여 가력을 하였으며, 실험체 셋팅상황 사진을 그림 6에 나타냈다. 실험체와 반력벽과의 접합은 기둥상 하단에 대해 핀접합부이고, 시험체의 자유단은 액츄에이터와 연결되어 수직하중을 작용시키도록 했다. 기둥의 중심으로부터 가력점까지의 거리는 3500mm, 기둥의 상하지점간 거리는 3000mm 이다. 또한, 실험중에는 그림 6에 나타낸 것같이 구면외의 면외변형을 구속하기 위한 횡좌굴 방지 구좌를 설치하였다. 가력은 SAC protocol에 의해서 그림 7의 목표 가력패턴에 따라서 실시하였다(SAC, 1997).

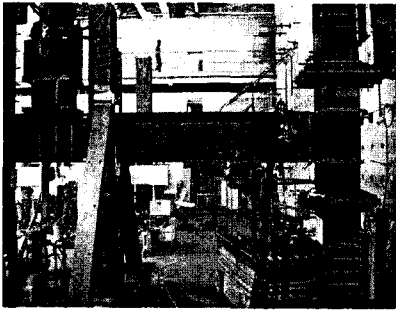


그림 6. Test setup

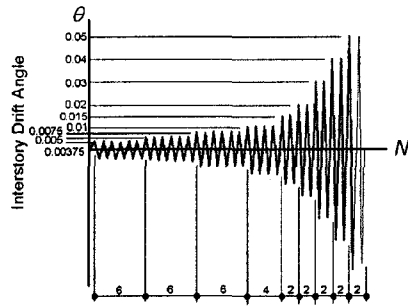


그림 7. 가력패턴

## 4. 실험결과

### 4.1 이력거동

각 실험체의 모멘트-회전각 관계를 그림 8에 나타냈다. 그림 8에서 종축은 접합부에 작용하는 모멘트를 나타낸 것이고, 횡축은 보단변위를 보길이로 나눈 회전각을 나타낸 것이다. 그림 9는 실험후의 최종파단 사진을 나타낸 것이다.

기존 WAH을 가진 RHS12C의 경우 이력루프형태는 물론 실험체와 유사한 형태를 나타냈지만, 다른 실험체에 비해 조기에 파단한 것을 알 수 있다. 실험중 관찰한 결과 보웨브가 용접된 기둥플랜지의 면외변형이 관찰되었으며 이는 해석결과와 같은 양상을 나타낸 것이고, 결국 웨브의 모멘트 전달능이 저하되어 보 플랜지에 응력부담이 증가했다는 것을 알 수 있다. 최종파단은 0.02 rad.의 두 번째 사이클에서 하부플랜지가 파단하였다. 그림 9를 보면 이 실험체는 WAH의 끝단부에서 시작된 균열로 인해 급격한 취성파단의 형태를 나타냈다. 기존의 WAH을 가진 접합부의 경우에는 WAH 끝단부의 노치효과에 의해서 조기에 파단되거나 변형능력면에 있어서 현저한 저하를 나타내는 것을 다른 많은 연구에서도 보고된바 있다. 그러나, FEMA350의 수정된 WAH 상세를 가진 RHS12M의 경우 RHS12C보다도 큰 변형성능을 나타냈으며 최종파단은 용접열영향부에서 일어났다. 0.03 rad. 두 번째 사이클을 가력하는 과정에서 보 하부플랜지의 양단 용접열영향부에서 시작된 균열이 보플랜지 중심으로 진전되었고 이윽고 큰 평응과 함께 파단에 도달하였다. WAH에서의 노치효과를 완전히 배제하기 위해서 적용한 No WAH을 가진 RHS12N의 경우는 같은 기둥플랜지 두께를 가진 타 실험체에 비해서 가장 우수한 이력특성을 나타냈다. 최종파단은 0.04 rad.의 첫 번째 사이클에서 발생했으며, RHS12M의 실험체와 마찬가지로 보하부플랜지의 양쪽 용접열영향부를 기점으로 하는 균열에 의해서 파단한 것이 관찰되었다.

RHS19M의 경우 같은 디테일을 가진 RHS12M과 거의 유사한 이력거동을 나타냈다. 기둥플랜지 두께가 RHS12M에 비해서 더 두꺼워 짐으로써 변형능력 향상을 기대했으나 현저한 성능향상은 보이지 않았지만 변형이 조금더 진전되었다. 최종파단은 0.03rad.의 두 번째 사이클에서 열영향부에서 시작된 균열에 의해서 파단이 일어났다. 기둥형상이 WF인 WF19M의 경우에는 RHS기둥의 가진 타 실험체가 파단한 시점에서도 접합부에는 어떤 균열도 발생하지 않았음을 알 수 있었다. 0.04 rad.의 첫 번째 사이클의 부가력때 면외방지장치를 설치했음에도 불구하고 횡좌굴이 발생하여 일부 내력이 저하되었고, 0.04rad.의 두 번째 사이클의 정가력 과정에서 횡좌굴이 심화되어 실험을 종료하였다.

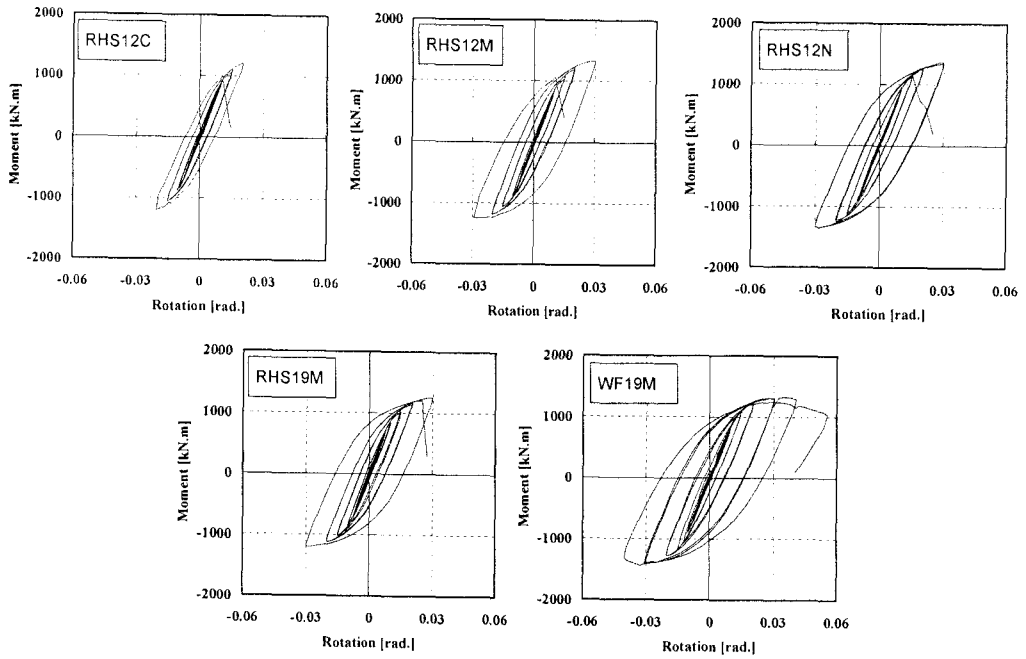


그림 8. 모멘트-회전각 관계

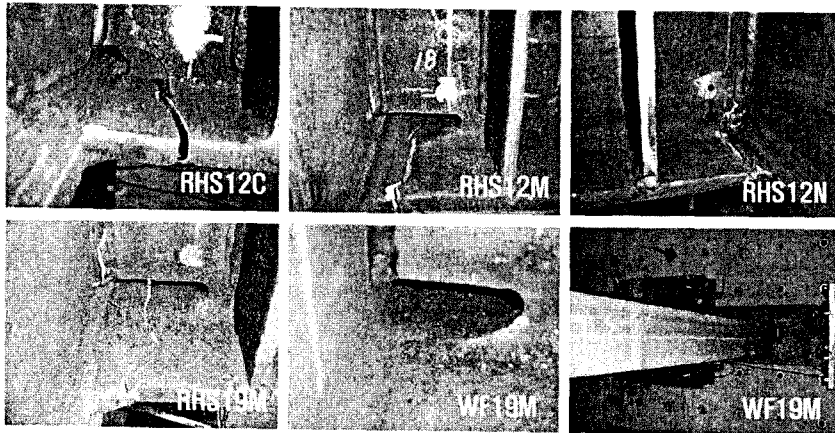


그림 9. 파단사진

#### 4.2 접합부의 변형능력과 에너지 흡수능력

접합부의 실험결과 RHS기둥을 가진 접합부 실험에서는 WAH의 형태가 접합부의 변형능력에 미치는 영향을 관찰할 필요가 있다. 그림 10은 소성회전각을 막대그래프로 나타낸 것이다. 기존의 WAH를 가진 RHS12C의 경우 소성회전각이 0.0068 rad.을 나타냈지만, WAH 상세를 개선시킨 RHS12M은 소성회전각이 0.0154rad.을 나타냈다. 또한, No WAH를 가진 RHS12N의 소성회전각은 0.0162 rad.을 나타냈다. 이는 기존 WAH를 가진 접합부는 늦치효과에 의해서 조기에 취성파단하는 결과를 나타냈지만, WAH를 개선한 것과 No WAH의 경우는 더 큰 소성회전을 경험한 후에 용접열영향부에서 파단하였기 때문이라고 판단된다. 따라서, WAH의 상세가 접합부의 변형능력에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있다. 기둥플랜지를 증가시킨 RHS19M의 경우 RHS12M에 비해 소성회전각이 미약하게 증가하였지만 뚜렷한 개선 효과는 관찰되지 않았다. 두께를 더 증가시킨 실험의 필요성이 제기되는 부분이다.

RHS기동을 가진 접합부 실험체는 WF 기동을 가진 실험체에 비해서 변형능력이 대체로 저하됨을 나타냈다. RHS기동을 가진 실험체의 평균 소성회전각은 0.0137rad.을 나타냈지만, WF19M의 경우 0.0276rad.을 나타냈다. 같은 형상이면서 기동만 다른 RHS19M의 경우도 0.0162rad.의 소성회전능력을 나타낸 것을 보면 기동의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이는 해석결과에서 밝힌 바와 같이 RHS기동의 경우 기동플랜지의 면외변형에 의해서 보웨브가 기동에 전달하는 모멘트가 저하하고 상대적으로 보가 부담하는 모멘트가 증가되게 된다. 이러한 영향은 상대적으로 취약한 접합부의 용접부나 WAH에 응력집중의 발생을 초래할 가능성이 커지게 된다. 그러나 WF 기동을 가진 접합부의 경우 보웨브 중심이 기동웨브 중심과 일치하는 선상에 있기 때문에 보웨브의 응력을 RHS기동에 비해서는 잘 전달하는 것으로 판단된다.

그림11은 각 실험체의 에너지 흡수량을 나타낸 것이다. 그림 11(a)는 누적변위에 따른 누적 에너지를 나타낸 것이고, 그림 11(b)는 총에너지를 막대그래프로 나타낸 것이다. 흡수에너지는 소성회전각과 거의 같은 분포를 나타내었다. RSH12C의 흡수에너지를 1.0으로 두면, RSH12M, RSH12N, RSH16M 및 WF19M의 흡수에너지는 각각 22, 32, 27 및 53을 나타낸다. 개선된 WAH을 가질경우 접합부의 에너지 흡수능력이 증가하는 것을 나타냈다. 또한, WF19M은 RHS19M에 비해서 약 2.0배의 에너지를 흡수했다. 즉, 기동의 형상이 에너지 흡수능력에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

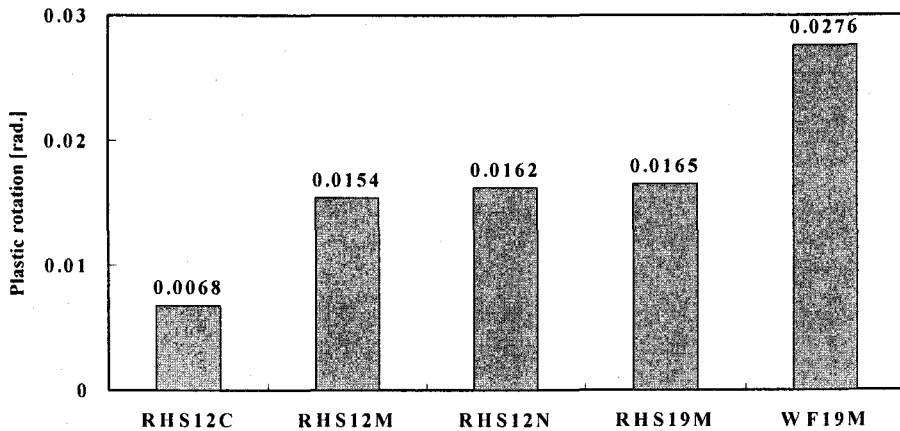
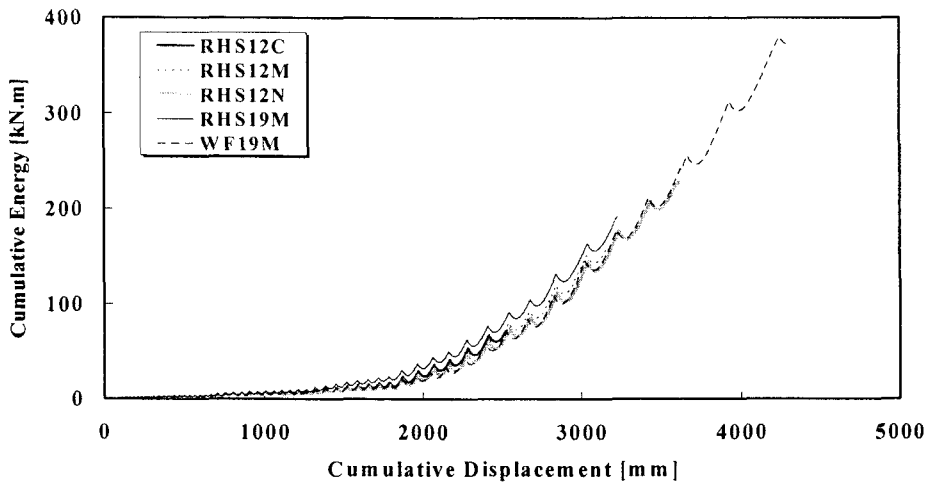
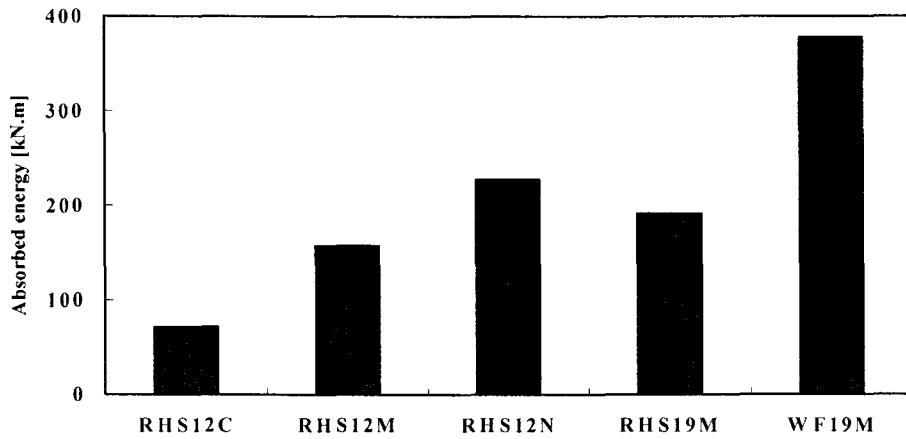


그림 10. 소성회전각





(a) 누적변위에 따른 누적에너지 그래프



(b) 총 흡수에너지 막대그래프

그림 11. 에너지 흡수량

## 5. 결론

본 연구에서는 모멘트 집합부의 변형능력을 파악하고자 해석을 선수행하고, 이후에 실험을 행하였다. 해석 및 실험결과는 RHS기둥을 가진 모멘트 집합부의 경우에 보웨브가 기둥에 전달하는 모멘트가 저하하여 결국, 보 플랜지가 부담해야할 응력이 매우 증가하는 것으로 나타났고, 이는 WF기둥을 가진 집합부에 비해 조기에 취성파단하는 결과를 나타냈다. 따라서, RHS기둥을 가진 모멘트 집합부의 경우, 웨브의 모멘트 전달효율을 고려하여 설계에 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (04산학연A04-03)에 의한 것으로서 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 秋山 宏, 山田 哲, 松本由香, 松岡三郎, 小倉桂治, 北村春幸, “實大振動台實驗による柱梁接合部の破壊性狀に關する研究”, 日本建築學會構造係論文集, 第512号, p. 165-172, 1998
2. 岡田 健, 松本由香, 山田 哲, “H形鋼梁の変形能力に柱梁接合部における継手効率が及ぼす影響の評価”, 日本建築學會構造係論文集, 第568号, p. 131-138, 2003
3. 岡田 健, 吳 相勳, 山田 哲, “合成梁の塑性變形能に力柱梁接合部における継手効率が及ぼす影響”, 日本建築學會構造係論文集, 第573号, p. 185-192, 2003
4. 김영주, 오상훈, 문태섭, “철골모멘트 접합부에서 웨브의 모멘트 전달효율과 변형도 집중과의 관계에 관한 해석적 연구”, 한국강구조학회논문집, 제16권 제5호, p.695-704, 2004.
5. 김영주, 오상훈, 문태섭, “슬래브의 합성작용을 고려한 기존 철골 모멘트접합부의 내진보강”, 대한건축학회 논문집(구조계), 제 19권 9호, p.3-10, 2003
6. 오상훈, 김영주, 문태섭, “바닥슬래브에 의해 구속된 철골 모멘트접합부의 내진보강에 관한 실험적 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제 16권 2호, p.247-255, 2004.
7. Goel, S. C., Stojadinovic, B., and Lee, H. K., “Truss analogy for steel moment connections”, Eng. Journal, 34(2), p. 43-53, 1997.
8. 이철호, 김재훈, “보 플랜지 정취형(독본) 내진 철골모멘트 접합부의 응력전달 메카니즘 재평가”, 한국지진공학회 추계학술대회 논문집, p.221-230, 2003