

# 슬래브와 구조특성을 고려한 철골 모멘트 접합부의 지진거동

## Seismic Behavior of Steel Moment Connections with a Slab and Different Structural Characteristics

조창빈\*

Joh, Changbin

---

### ABSTRACT

The seismic behaviors of steel moment connections are investigated based on the numerical analysis of the connections with US and Japanese typical details. The rupture index, representing the fracture potential, is used to evaluate the ductility of the connections at the critical location. The results show that the presence of a slab increases the beam strength, imposes constraint near the beam top flange, and consequently, induces concentrated deformation near the beam access hall, which reduces the ductility of the connection. The total deformation capacity of the connection depends not only on a beam but also on a column and panel zone.

---

### 1. 서론

1994년 노스릿지(Northridge)지진과 1995년 효고현남부지진에서 예상 못한 취성적인 파괴 형태를 보인 철골 모멘트 접합부를 대처하기 위해서 개선된 상세를 가진 접합부가 제안되었다(FEMA, 2000, Joh and Chen, 1999). 그러나, 개선된 접합부의 근거가 되는 연구에서 슬래브의 합성작용을 고려하지 않았다. 따라서, 슬래브와 보가 부분적이든 혹은 완전합성이든 간에 합성구조로 되어 있고 지진시에도 합성이 유지될 수 있으므로 접합부의 실제 거동은 단순히 철골만을 실험한 결과와 상이할 가능성이 있다. 또한, 접합부를 구성하는 보, 기둥 및 패널존(Panel Zone)간의 상대강도가 연성에 미치는 영향이 고려되지 않았다.

이 논문에서는 미국과 일본의 철골 모멘트 접합부를 대상으로 한 실험에 대한 분석과 이들의 수치해석을 통해서 접합부의 연성에 대한 슬래브의 영향과 상대강도의 영향을 조사하였다.

### 2. 미국과 일본의 철골 모멘트 접합부

미국과 일본의 철골 모멘트 접합부의 상세는 비슷한 설계 개념에도 불구하고 서로 다르다. 이는

---

\* 정회원 · 한국건설기술연구원, 선임연구원

설계가 단순히 개념에 따라 결정되는 것이 아니라 오랫동안의 지역적인 실무, 재료 및 제작 관행에 의해 많은 영향을 받기 때문이다.

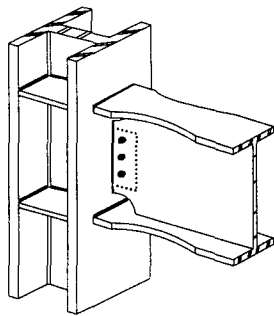


그림 1(a). RBS 접합부

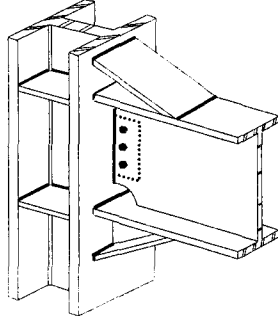


그림 1(b). 현치보강접합부

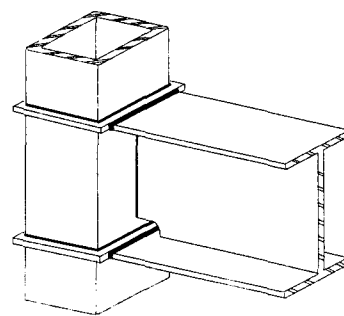


그림 1(c). 일본형식 접합부

## 2.1 미국의 철골 모멘트 접합부

노스릿지진전에 미국에서 지배적으로 사용되어온 지진에 대비한 철골 모멘트 접합부는 Welded Web-Bolted Flange (WFBW) 접합부이다(Joh and Chen, 1999). 이 형식의 접합부는 연속된 기둥에, 현장에서 용접으로 보의 플랜지를 연결하여 제작하게 된다. 노스릿지진에서 전체 조사된 접합부들 중 40%이상에서 보의 하부플랜지와 기둥 플랜지와의 용접부 경계면에서 취성적인 파괴가 발생하였다.

노스릿지진 후, SAC Joint Venture를 중심으로 기존의 접합부를 개선하기 위한 실험이 진행되어(FEMA, 2000), 그림 1(a)와 같이 위험단면을 기둥전면에서 약간 떨어뜨린 Reduced Beam Section (RBS) 접합부나 그림 1(b)와 같이 현치나 판으로 보강한 접합부가 우수한 지진거동을 나타내는 것으로 보고되었다. 그러나, 이들 실험에서는 슬래브의 합성효과가 고려되지 않았다.

## 2.2 일본의 철골 모멘트 접합부

일본에서 철골 빌딩은 대개 박스형 기둥, H형의 보 및 관통형 다이어프램으로 구성된 접합부로 이루어져 있다(Nakashima et al., 1998, 그림 1(c)). 특징은 응력집중부의 현장용접을 최소화하여 취성파괴를 방지하려 한 것이다. 그러나, 효고현남부지진 후, 이러한 형식의 접합부에서도 역시 많은 손상이 발견되었다(Nakashima et al., 1998). 보에 약간의 소성변형과 국부적인 좌굴이 발생하기는 했으나, 대부분의 파괴는 보의 하부플랜지의 용접부 끝 부근의 용접금속과 보 사이에서 발생하였다. 이는 우선 낮은 파괴인성을 갖고 있는 스캐럽 부근 형상의 급격한 변화로 인한 응력집중과 짧은 다이어프램으로 인한 용접의 집중 그리고 남겨진 Backing Bar에 의한 것으로 판단된다.

## 3. 슬래브를 포함한 철골 모멘트 접합부 실험.

### 3.1 미국형식의 접합부 실험 및 수치해석 모델

미국에서 사용되는 철골 모멘트 접합부의 조사를 위해서 Civjan et al.(2001)의 실험이 수치모델을 통해서 분석되었다. 이 실험의 본래 목적은 현존하는 철골 모멘트 접합부를 위한 효과적이고 경제적인 보강 방법을 찾는 것이었다. 4개의 시편이 실험되었으며, 그중 DB2와 HCH4는 합성 접

합부이고 DB1과 HCH3는 비합성 철골 모멘트 접합부이다. 또한 DB1과 DB2는 RBS 접합부이며 HCH3와 HCH4는 현치보강된 시편이다. (표 1).

표 1. 수치모델링된 접합부 상세

모델	형식	슬래브	비고
DB1	US(RBS)	No	기둥:(Gr.50) W12x279 보:(A36) W30x99
DB2	US	160mm	
HCH3	US(Haunch)	No	
HCH4	US(Haunch)	160mm	
S01	Japan	200mm	기둥: SM490 B-Box-450x450x22 보: SM490 H-612x202x13x23
S02	Japan	No	
S04	Japan	130mm	

표 2. 상대강도 비교

모델	S01	S02
$P_o/P_b$	1.96	3.77
$P_z/P_b$	1.72	3.32
모델	DB1	DB2
$P_o/P_b$	2.13	1.75
$P_z/P_b$	0.63	0.52
모델	HCH3	HCH4
$P_o/P_b$	1.84	1.51
$P_z/P_b$	0.52	0.42

그림 2는 DB2의 수치해석모델로 실험조건도 보여주고 있다. 슬래브에는 경량 콘크리트가 메탈릭(Metal Deck)과 함께 사용되었다. 현존하는 빌딩에 사용된 부분 합성보를 모사하기 위해서 시편들은 현재의 AISC LRFD규정에 의하여 18%정도의 부분 합성보로 제작되었다.

본래의 실험목적에 대한 실험결과는 단순히 RBS 보강방법을 적용하는 것은 충분하지 못하며 현치 보강은 상당한 효과가 있는 것으로 나타났다.

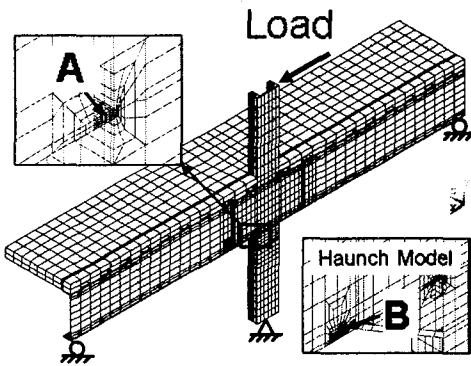


그림 2(a). DB2 수치모델

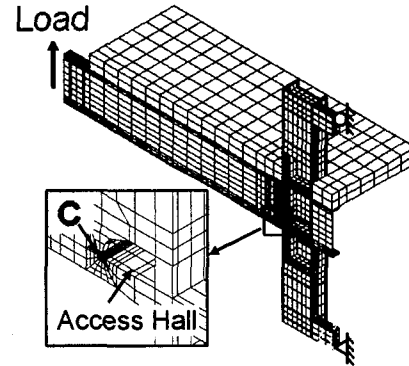


그림 2(b). S01 수치모델

그림 3(a)와 3(b)는 실험된 시험체들의 2사분면의 첫번째 사이클의 최대값을 연결한 포락선을 나타낸다. 여기서 변위는 하중을 재하한 기둥의 상부에서 측정된 것이다(이하 '기둥 선단 변위'). 슬래브의 합성효과로 인해 DB2가 DB1에 비해서 강도가 큰 것으로 나타났으며 연성에 있어서도 DB2가 우수한 것으로 나타나 있다. HCH4와 HCH3의 비교에서도 비슷한 양상이 나타난다. 합성 접합부인 DB2의 경우 소성회전(Plastic Rotation)이 0.02에 이른 반면 비합성 접합부인 DB1의 경우 0.006에서 0.009에 그쳤다. 현치 보강된 경우도 이와 마찬가지로 합성 접합부인 HCH4의 경우 0.028-0.055에 도달하였으나 비합성 접합부인 HCH3 경우 0.012-0.023에 그쳤다.

이 실험결과에 따르면, 슬래브가 연성을 증가시키는 것으로 생각된다. 그러나 이러한 현상은 슬래브의 여러 역할중 접합부에 대한 횡방향 지지와 이로 인한 횡좌굴 발생지연에 의한 것이다. 참고문헌(Civjan et al., 2001)에 따르면, 실험장치의 이상으로 비합성 접합부는 실험중에 횡방향 불안정이 발생했다. 그러나 이러한 슬래브의 긍정적인 역할은 모든 철골 빌딩에 슬래브가 필수적인

것을 감안하면 기본적으로 주어진 것이므로 이런 효과가 없어서 연성이 감소되는 현상은 실제 철골 빌딩에서는 나타날 수가 없다. 상세한 사항은 참고문헌(Civjan et al., 2001)에 언급되어 있다.

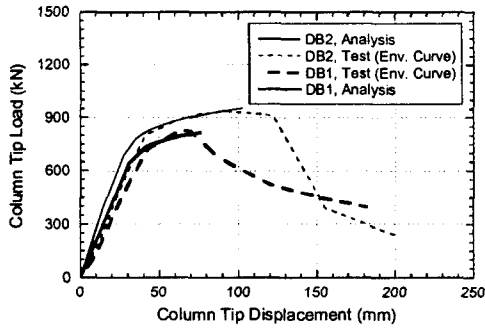


그림 3(a). DB1 & DB2,

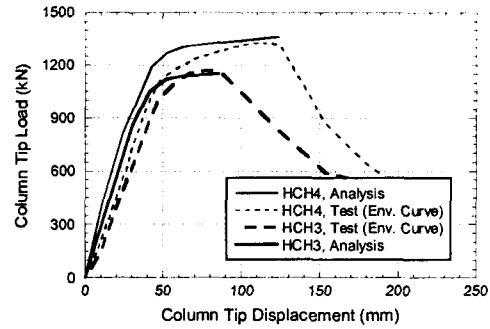


그림 3(b). HCH3 & HCH4

수치모델(그림 2)은 대칭성에 의해서 1/2만 모델링되었으며 ANSYS(ANSYS, 1994)의 8개의 절점을 가지 3차원 솔리드요소가 사용되었다. 재료모델은 Multi-Linear Isotropic Hardening 모델이 사용되었다. 슬래브의 메탈릭은 구조적인 역할이 미미하므로 모델링에 포함되지 않았고 콘크리트 재료모델은 상세한 균열 거동을 위한 것이 아니므로 Drucker-Prager 모델로 하였다. 부분합성효과를 모델링하기 위해서 콘크리트를 나타내는 요소의 절점과 강재를 나타내는 요소의 절점간에 미끄러짐이 가능한 구속방정식을 사용하였다.

### 3.2 일본형식의 접합부 실험 및 수치해석 모델

일본형식 철골 모멘트 접합부의 실험에 대해서는 포항산업과학연구원에서 수행된 결과가 사용되었다(RIST, 2001). 총 10개의 시편들중 합성 철골 모멘트 접합부를 나타내는 S01, S04와 비합성 접합부를 나타내는 S02를 이용하여 수치해석을 수행하였다 (표 1).

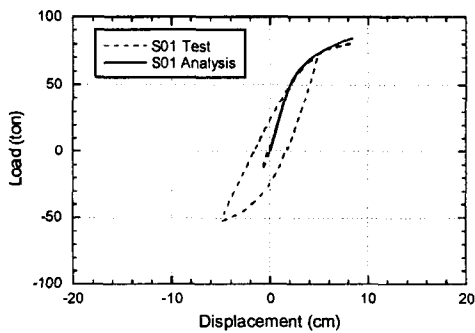


그림 4(a). S01의 하중 변위곡선

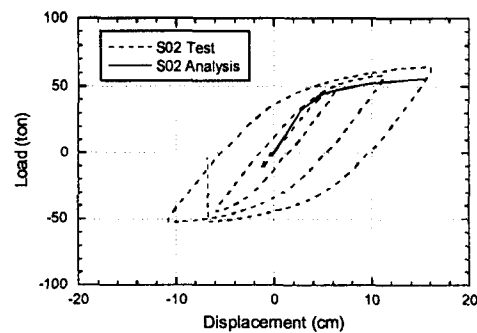


그림 4(b). S02의 하중 변위곡선

그림 2(b)는 S01의 수치모델과 개념적인 실험장치를 보여주고 있다. 시험체는 10층짜리 철골 빌딩의 하부의 철골 모멘트 접합부를 나타내도록 설계되었다. 23mm 두께를 가진 보의 플랜지가 25mm 두께의 다이어프램에 용접되었으며 스킵이 사용되었다. 슬래브의 효과를 고려하기 위해서 패널존은 극한하중하에서도 탄성상태로 남아있도록 설계되었다.

그림 4(a)와 4(b)는 S01과 S02의 시험결과를 보여주고 있다. 여기서 변위는 하중재하점에서 측보의 선단에서 측정된 것이다(이하 "보 선단 변위"). 슬래브의 합성효과로 인해 S01의 경우 S02보다 강도가 큰 것으로 나타났다. 그러나 연성에 있어서는 비합성 접합부인 S02가 S01에 비해서 더 많은 반복하중을 견딘 것을 알 수 있다. S04의 경우 S01과 유사한 거동을 보였으나 다만 조금 작은 극한 하중을 보였다

S01 시험체의 파괴는 효고현남부지진에서 일어난 파괴와 양상이 매우 유사한 것이다. 반복하중 하에서 반타원형 균열이 스캐럽과 보의 플랜지가 만나는 지점에서 시작하여 연성적으로 위험단면 크기까지 진전하다가 보의 하부 플랜지가 취성적으로 파단되었다. 시험체의 파괴에 대한 자세한 것은 참고문헌(RIST, 2001)을 참조하기 바란다.

수치해석모델은 DB2모델(그림 2(a))과 같은 방법으로 모델링되었다(그림 2(b)).

#### 4. 수치해석 결과 및 분석

##### 4.1 Rupture Index

서로 다른 형식의 철골 모멘트 접합부들간에 연성거동을 상대적으로 평가하기 위해서 Rupture Index(RI)를 이용하였다. RI의 정의는 다음과 같다.

$$RI = \frac{\epsilon_{ep} / \epsilon_y}{\exp(-1.5\sigma_h / \sigma_{mises})} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{ep}$ 는 유효소성변형률(effective plastic strain)이며  $(2\epsilon_y^p \epsilon_y^p / 3)^{0.5}$ 과 같이 정의된다.  $\epsilon_y$ 는 항복변형률(yield strain)이고,  $\sigma_h$ 는 hydrostatic stress이며,  $\sigma_{mises}$ 는 von Mises Stress이다. 식(1)의 분자는 PEEQ(Plastic Equivalent Strain) Index로 국부적인 변형 요구를 나타낸다. 식(1)의 분모에 있는  $\sigma_h / \sigma_{mises}$ 는 금속의 파단에 필요한 변형률(Rupture Strain)의 감소에 기여하는 삼축응력상태(Triaxial Stress State)를 나타낸 것이다(El-Tawil et al., 1998). 따라서, RI가 크게 되면 상대적으로 파괴에 이를 가능성이 높다고 판단할 수 있다(Mao et al., 2001).

##### 4.2 미국형식의 접합부

수치해석결과와 실험결과를 비교해 보면 초기 강성은 거의 같은 값을 보이고 있으나 수치해석 결과에 비해서 실험결과가 좌측으로 약간 이동된 것으로 나타난 것을 알 수 있다(그림 3). 이는 Cijvan et al.(2001)에 따르면 초기 하중재하직후 실험체의 미끄러짐에 기인한 것으로 이를 제거했다면 수치해석결과와 매우 유사한 결과를 얻었을 것으로 판단된다.

그림 5은 DB2의 국부변형을 보여준다. 비교적 변형이 접합부 전체에 분포되어 있고 후에 언급할 일본형식의 접합부에 비해 스캐럽의 변형이 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다. 한편 기둥과 패널존의 변형은 일본형식의 접합부에 비해서 매우 큰 것을 알 수 있다. 상부 슬래브에 의한 보의 구속에 의한 변형의 집중은 현저히 나타나지 않는다.

그림 6은 RBS와 현치로 보강된 접합부에 대한 RI값의 분포를 보여주고 있다. RI값은 RBS 접합부의 경우 기둥 플랜지와 보 하부플랜지의 용접경계부(그림 2(a)의 A)에서 산정되었고, 현치로 보강된 접합부의 경우에는 위험단면이 되는 현치의 끝(그림 2(b)의 B)에서 산정되었다. RI값은 기

동 선단부의 변위에 대해서 나타내었다. 그림 6에서 나타나듯 같은 변위, 즉 같은 정도의 층간 변위에서 합성접합부와 비합성접합부간에 기둥-용접 경계부와 헌치의 끝에서 비슷한 RI값을 갖는 것을 볼 수 있으며 일본 형식의 접합부의 대응하는 RI값의 3%정도에 지나지 않는 작은 RI값을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 슬래브의 유무에 따라 취약부에서의 파단 가능성에 대해 약간의 차이는 있지만, 이것이 접합부의 연성 거동에 있어서 근본적인 차이를 가져오지는 않는다고 판단된다. 왜냐하면 슬래브의 존재에도 불구하고 특정지점으로 변형이 집중되지 않았기 때문이다.

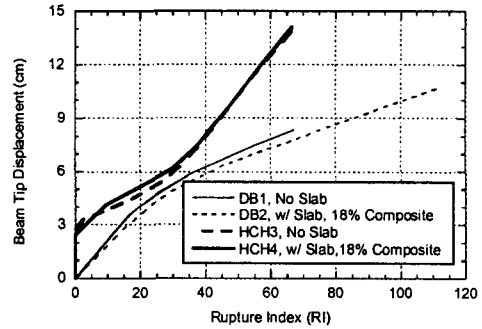
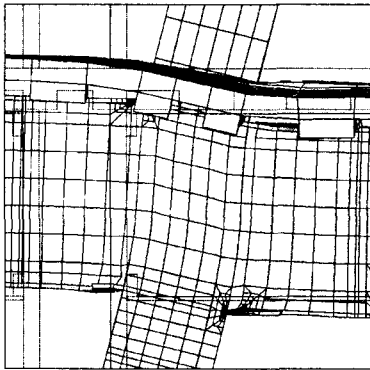


그림 5. DB2의 변형(기둥선단변위 8.6 cm, 10배확대) 그림 6. Rupture Index (US Connections)

#### 4.3 일본형식의 접합부

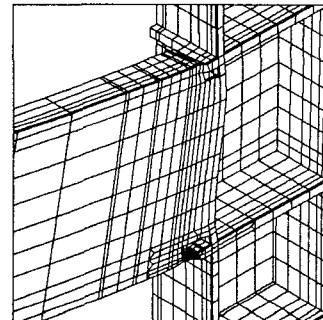
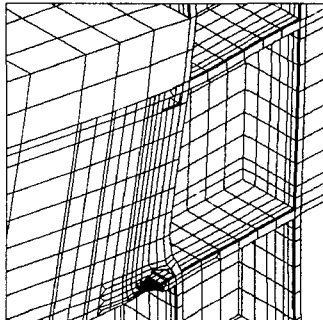


그림 7(a). S01(보선단변위 7.6cm, 10배확대) 그림 7(b) S02(보선단변위 7.7cm, 10배확대)

그림 7에서는 거의 같은 보 선단 변위하의 S01과 S02의 기둥의 전면에서 국부적인 변형이 비교되었다. 그림 7(a)에서 슬래브와 보의 상부플랜지는 상대적으로 작게 변형되었고 변형은 균열이 있을 가능성이 높은 보의 하부스캐럽에 집중된 것을 알 수 있다. 따라서 슬래브 때문에 접합부 상부의 구속이 증가해서 변형이 하부로 집중된 것으로 판단된다. 그림 7(b)를 보면, 이와는 반대로 보의 플랜지가 압축과 인장으로 각각 변형되고 보의 웨브도 변형된 것을 알 수 있다. 즉 변형이 상대적으로 고르게 분포한 것을 볼 수 있으며 결과적으로 보의 하부플랜지에 집중되었던 변형은 완화된 것을 알 수 있다. 주목할 점은 이 시험체의 경우 강한 패널존으로 인해서 극한하중상태에서도 패널존은 탄성상태에 있다는 것이다. 또한, 완전합성거동으로 인해서 보와 슬래브의 상대적인 변위가 발생하지 않았다. 따라서, 보 선단 변위를 만족시키기 위한 변형의 대부분이 보의 하부플랜지의 스캐럽부근에서 발생한 변형에 기인하는 것을 알 수 있다.

미국과 일본형식의 접합부의 거동의 차이중 주목할만한 것은 기둥 플랜지의 변형이다. 일본형식의 박스형 기둥의 경우 2개의 웨브가 양쪽 가장자리에 위치해서 플랜지의 중심에 있는 보의 웨브와 직접적으로 연결되어있지 못하다. 반면, 미국형식의 접합부의 경우 보의 웨브와 기둥의 웨브가 접합부의 중심에서 직접 연결되어있다. 이는 일본형식의 접합부의 파단이 보의 하부플랜지에서 일어나는 이유중에 하나가 된다고 판단된다.

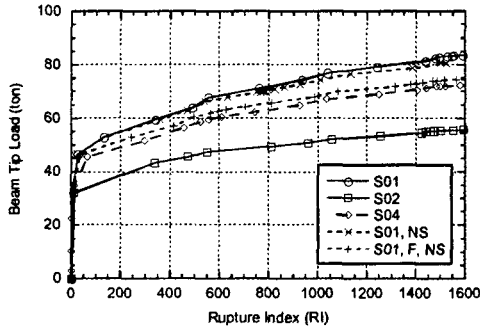


그림 8(a). 하중과 RI (스켈럽루트)

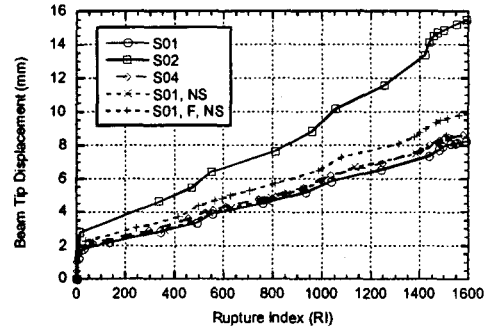


그림 8(b). 보 선단변위와 RI (스켈럽루트)

그림 8(a)에서 볼 수 있는 것처럼, 동일한 하중에서는 합성 접합부가 비합성 접합부에 비해서 낮은 파괴 가능성을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 합성효과로 인해 강도가 증가되어 그 만큼 파괴 가능성이 낮아진 것으로 판단된다. 그러나, 그림 8(b)는 같은 층간 변형의 경우 합성 접합부가 상대적으로 높은 파괴가능성이 있다는 것을 나타낸다. 이는 앞서 변형된 모습에서도 나타났듯이 슬래브의 구속에 의해서 보의 하부에 변형이 집중되어 나타난 결과이다. 반면 비합성 접합부의 경우 변형이 전체 접합부에 비교적 잘 분배되어 변형집중현상이 완화된 것이다.

한편, S01과 S04의 RI값을 비교하면 슬래브의 두께의 차이 (200mm와 130mm)에도 불구하고 RI값에서는 큰 차이를 보이지 않는다. 이로 미루어 슬래브의 두께의 실용적인 범위내의 차이에 의한 접합부 상부의 구속정도의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다.

#### 4.4 상대강도 효과

접합부의 변형은 주로 보와 기둥의 휨변형과 패널존의 전단변형에 기인한 것이다. 따라서 접합부의 연성은 이들의 변형량을 결정하는 상대적인 강도에 따라 결정되게 된다. 그러므로, 층간 변형에서 요구되는 접합부의 연성은 접합부를 구성하는 이들의 상대강도에 적절한 조절을 통해서 변형이 한 곳으로 집중되는 일 없이 성취될 수 있다.

표 2는 수치해석에서 사용된 모델들의 상대강도를 보이고 있다. 이에 따르면 S01과S02간에는 합성효과로 인해 S01이 상대적으로 약한 패널존을 가지고 있는 것으로 나타났다. 그러나 두 경우 모두 실험에서도 나타났듯이 S01과 S02은 강한 기둥과 패널존을 가지고 있어 보가 소성변형을 보이는 극한하중시에도 기둥과 패널존은 탄성한계내에 있게 된다. 한편, 미국형식의 접합부를 보면 강한 기둥과 약한 패널존을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이것은 하중이 증가하면서 기둥보다 패널존이 먼저 항복을 하면서 접합부를 구성하는 각 부분의 강성비가 변하여 결과적으로 변위의 분포가 바뀌는 것을 의미한다. 즉, 상당한 정도의 보나 기둥의 선단 변위가 패널존의 전단변형에 기

인한 것을 의미한다. 미국과 일본 형식의 접합부간의 슬래브의 효과가 서로 다른 이유도 상대강도와 변형도로 설명된다. 즉, 미국 형식의 접합부의 경우 패널존의 큰 변형으로 층간 변위에 의한 연성을 만족하기 위해서 보의 변형이 담당하게 되는 부담이 줄게 된다. 따라서 슬래브의 보 상부 플랜지의 구속효과가 최소화하게 된다. 반면, 일본 형식의 접합부의 경우, 보의 변형을 제외한 다른 부분의 변형이 설계관행에 의해서 차단되어 보의 변형이 전체 변위의 대부분을 부담할 만큼 크게 되어 슬래브로 인한 구속효과가 현저하게 나타나게 된다.

## 5. 결론

미국형식의 접합부는 보, 기둥 및 패널존 사이의 상대강도의 적절한 분포로 인해서 접합부의 변형이 보에 집중되지 않고 비교적 고르게 분포되었다. 따라서 슬래브의 구속효과로 보 하단부에 변형이 집중하여 접합부의 연성을 감소시키는 현상은 현저히 완화되었다. 반면, 일본형식의 접합부는 보에 비해서 매우 강한 기둥과 패널존이 거의 변형하지 않고 선단 변위의 대부분을 보의 변형에 의존하였다. 또한, 슬래브에 의한 보 상부의 구속은 보에서의 대부분의 변형을 보의 하부 플랜지에 집중시켰다. 이 현상은 결과적으로 보의 제작사에서 생긴 스키텔 부근의 잠재적인 균열과 결합하여 이 부근의 연성적인 균열의 전파에 이은 파단의 원인이 되었다. 즉, 상대강도가 적절히 배분되지 않은 경우, 슬래브의 합성효과로 인해 극한강도는 증가하지만 구속효과로 인한 변형집중으로 같은 층간 변위에서 합성 접합부가 비합성 접합부에 비해서 훨씬 큰 파단 가능성을 갖는다.

결과적으로, 철골 모멘트 접합부의 연성거동에 대한 슬래브의 부정적인 영향을 확인하였고 접합부를 구성하는 기둥, 보 그리고 패널존의 상대강성을 적절히 조정함으로써 이의 부정적인 효과를 완화할 수 있는 것도 확인하였다.

## 참고문헌

1. Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Recommended seismic design criteria for new steel moment buildings." Rep. No. FEMA 350, Washington, DC., 2000
2. Joh, C., and Chen, W. F., "Fracture strength of welded flange-bolted web connections." J. of Str. Eng., ASCE, Vol. 125, No. 5, 1999, pp. 565-571.
3. Nakashima, M., Suita, K., Morisako, K., and Maruoka, Y., "Test of welded beam-column subassemblies I: Global Behavior." J. of Str. Eng., ASCE, Vol. 124, No. 11, 1998, pp. 1236-1244.
4. Civjan, S. A., Engelhardt, M. D., and Gross, J. L., "Slab effects in SMRF retrofit connection tests." J. of Str. Eng., ASCE, Vol. 127, No. 3, 2001, pp. 230-237.
5. ANSYS 5.6 user's manual, ANSYS, Inc., Southpointe 275 Technology Drive, Canonsburg, PA. 1994
6. Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST), "Earthquake resistance capacity evaluation of steel structural frame considering composite beam effect.", Rep. No. 2000H002, Kyungkido, Korea, 2001
7. Mao, C., Ricles, J., Lu, L. W., and Fisher, J., "Effect of local details on ductility of welded moment connections." J. of Str. Eng., ASCE, Vol. 127, No. 9, 2001, pp. 1036-1044.