

# 접합부 회전능력에 기초한 철골모멘트골조의 반응수정계수 산정법

## Rational Evaluation of Seismic Response Modification Factor of Steel Moment Frame Based on Available Connection Rotation Capacity

이철호<sup>1)</sup> · 송진규<sup>2)</sup> · 김건우<sup>3)</sup>

Lee, Cheol-Ho · Song, Jin-Gyu · Kim, Geon-Woo

**국문 요약** >> 현행 내진설계에서 반응수정계수는 탄성 밀면전단력을 저감하여 설계하중 수준을 정의하기 위한 주요 계수로 사용되고 있다. 이제까지 반응수정계수는 공학자들의 경험적인 합의에 의하여 정성적으로 설계기준에 반영하고 있다. 구조시스템에서 반응수정계수와 접합부의 가용 회전능력은 매우 밀접한 관계가 있으며, 본 논문에서는 이러한 접합부의 회전능력과 비선형 푸쉬오버 해석에 기초하여 반응수정계수를 평가하는 방법을 제시하였다. 이를 검증하기 위하여 IBC 2000에 따라 설계된 RBS 골조를 대상으로 제안 방법을 적용하였다. 또한, 다양한 지진파에 대한 비선형 시간이력 해석을 병행하여 가용 회전능력에 의거하여 산정된 반응수정계수의 타당성을 평가한 결과, 본 제안방법에 따라 정의된 반응수정계수가 충분히 보수적임을 확인하였다.

**주요어** 반응수정계수, 철골모멘트 골조, RBS 접합부

**ABSTRACT** >> In current seismic design practice, the response modification factor (R-factor) is used as a key factor to reduce the elastic base shear demand to the design force level. As is well-known, the R-factor is a committee-consensus factor and, as such, highly qualitative and empirical. The relationship between the R-factor and the connection rotation capacity available in a particular structural system has remained a missing link. In this paper, a rational procedure to evaluate the R-factor is proposed. To this end, the relationship between the available connection rotation capacity and the R-factor is defined and quantified using nonlinear pushover analysis. An RBS steel frame designed according to IBC 2000 was used to illustrate and verify the proposed procedure. Nonlinear time history analysis results indicated that the R-factor definition proposed in this study is generally conservative from design perspective.

**Key words** response modification factor, steel moment frames, RBS connection

### 1. 서론

지금까지 개발된 내진설계기법은 크게 응력기반설계법, 변위기반설계법, 에너지기반설계법의 3가지로 분류할 수 있다. 이중 변위기반설계법은 변위를 기본설계변수로 택하는 합리성과 최근의 성능기반설계법과 직결되는 장점이 있다. 또한 에너지기반설계법은 구조물의 전 응답이력이 반영되는 에너지를 설계변수로 택한다는 측면에서 설계개념상의

탁월성이 인정된다. 그러나 이 두 가지 방법은 아직까지 실무설계 수준에서 활용될 수 있는 정도로 보편화되어 있지 않다. 역시 현행의 가장 대표적인 내진설계방법은 힘을 기본설계변수로 하는 반응수정계수법(R factor approach)이라 할 수 있다. 이 방법은 ATC 3-06(1978)<sup>(1)</sup>에 뿌리를 두고 있다. 물리적 의미가 불분명했던 이전의 UBC코드의 밀면전단력 산정식을 비탄성스펙트럼 이론이 반영된 합리적 형식으로 변환하는 과정에서 소위 반응수정계수가 도입되었다. 이 반응수정계수는 과거 UBC의 K factor에서 변환시킨 계수로서 그 근거가 원래부터 온전한 정량적/과학적 근거를 갖고 출발한 것이 아니어서 여러 가지로 논란의 대상이 된 바가 있다. 이 계수는 현실적으로 수용가능한 구조비용으로 지진력을 저감시키는 계수인 동시에 여러 구조종별 간의 상대적 내진성능을 반영하는 경험적 상대지표임은 잘

<sup>1)</sup> 정희원·서울대 건축학부 부교수, 공학박사

<sup>2)</sup> 정희원·전남대 건축학부 부교수, 공학박사  
(대표저자: jgsong@jnu.ac.kr)

<sup>3)</sup> 정희원·UC San Diego 객원연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 12. 14 / 심사종료일 : 2006. 9. 26)

알려진 사실이다. Uang(1991)<sup>(2)</sup>은 시스템초과강도와 시스템연성능력이 반응수정계수의 핵심요소임을 지적한 바가 있다.

모멘트골조의 시스템연성능력은 접합부의 가용한 회전능력(곧 중간변형능력)과 직결되므로 이를 토대로 시스템연성능력을 정의할 수 있다면 반응수정계수를 정량적으로 산정할 수가 있다. 본 연구에서는 RBS(reduced beam section) 접합부를 갖는 철골모멘트골조(이하 RBS골조)를 사례로 들어 접합부의 가용 회전능력에 기초한 반응수정계수의 정량적 산정방안을 제시하고자 한다.

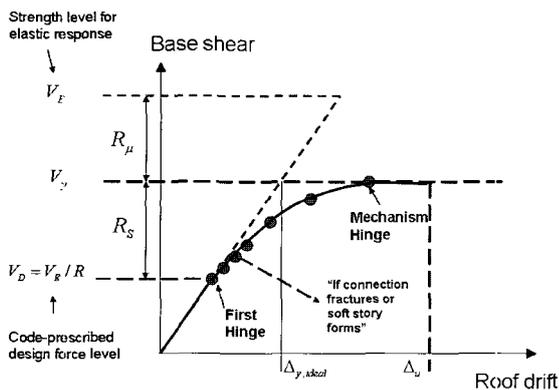
### 2. 반응수정계수의 근거

그림 1은 접합부의 회전능력이 양호하고 골조가 전체적으로 잘 설계된 모멘트골조에서 인정할 수 있는 반응수정계수의 2가지 구성요인, 즉 시스템초과강도 저감계수( $R_S$ )와 시스템연성도 저감계수( $R_\mu$ )를 보여준다(위 그림에서 설계과정에서 유입될 수 있는 설계초과강도는 없는 것으로 가정하였다). 아래 (1)식은 탄성응답을 보장하기 위한 밀면전단강도의 크기를 나타내는데, 일반건물의 경우 이 수준의 하중에 대해서는 경제적인 설계가 불가능하므로, (2)식의 반응수정계수( $R$ )로 저감된 외력에 대해 설계를 수행하게 된다.

$$V_E = (R_S \times R_\mu) \times V_D \tag{1}$$

$$R = R_S \times R_\mu \tag{2}$$

여기서 주목할 것은 접합부의 회전능력(곧 중간변형능력)이 충분할 때만 힘의 재분배를 통한 골조 전체의 메카니즘 현지의 형성이 가능하고 이후 시스템 레벨의 연성능력의 발휘를 기대할 수 있다는 점이다. 즉  $R_S$  및  $R_\mu$  모두 접합부의 소회전능력에 의존하므로 반응수정계수는 실험적으로 입증된 접합부 회전능력을 토대로 정의되어야 타당하다는 것



〈그림 1〉 반응수정계수의 구성요인

이 본 논문의 주안점이다. 중저층 골조의 경우 1차진동 모드가 지배적으로 시스템 연성계수( $\mu$ )는 가용한 비탄성변형의 한계값(그림 1의  $\Delta_\mu$ )를  $\Delta_y$ 로 나누어 근사적으로 산정할 수 있다. 다자유도인 다층골조에서 접합부 회전능력과  $\Delta_\mu$ 의 관계(곧 접합부 회전능력과 시스템 연성계수의 관계)를 해석적으로 유도하는 것은 거의 불가능하므로, 본 연구에서는 푸쉬오버해석(pushover analysis)을 활용하기로 한다. 푸쉬오버해석 결과의 일부로서 시스템항복강도( $V_y$ )가 알려지므로 시스템초과강도 저감계수( $R_S = V_y/V_D$ )는 쉽게 산정되는 물론이다. 시스템 연성계수( $\mu$ )가 알려지면 비탄성 스펙트럼과 관련된 경험식을 사용하여  $R_\mu$ 를 산정할 수 있다. 여러 연구자에 의해  $\mu$ - $R_\mu$ 관계를 규정하는 경험식이 제시되었지만 대동소이한 결과를 주므로 본 연구에서는 다음의 Fajfar(2000)<sup>(3)</sup>의 연구를 참조하기로 한다.

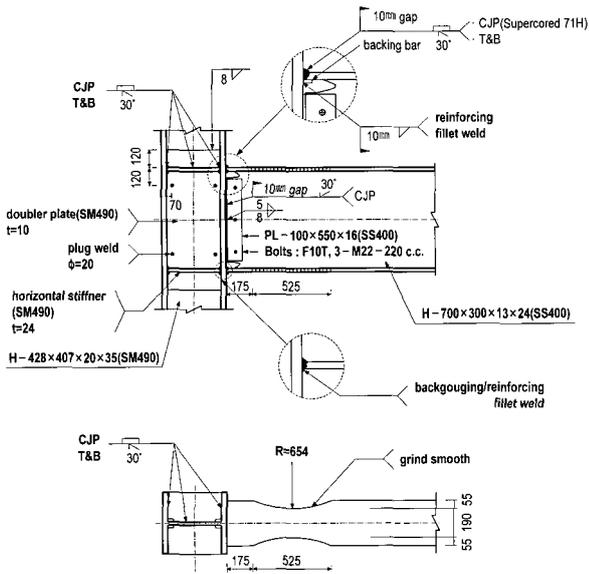
$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_C} + 1 \quad (T < T_C); \quad R_\mu = \mu \quad (T \geq T_C) \tag{3}$$

위식에서  $T_C$ 는 스펙트럼의 가속도영역과 속도영역을 구분하는 특성주기이다. 아주 특별한 경우가 아니면 대부분 골조의 기본진동주기는 속도영역에 속하므로 소위 최대변위일정설에 의한  $R_\mu = \mu$  관계를 따르게 될 것이다.

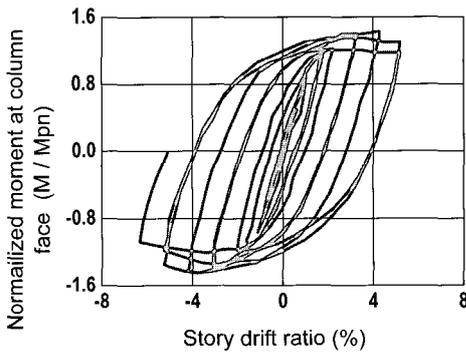
### 3. 사례연구를 위한 RBS 골조 설계

서두에서 언급한 바와 같이 RBS(reduced beam section) 접합부를 갖는 철골모멘트골조(이하 RBS골조)를 사례로 들어 접합부의 가용 회전능력에 기초한 반응수정계수의 정량적 산정방안을 전개하고자 한다(본 연구에서 제시하는 방안은 일반성이 있는 개념으로 RBS 골조에만 적용되는 것이 아님은 물론이다). 우선 RBS 접합부의 특성을 간략히 소개하고자 한다.

1994년 미국의 노스리지 및 1995년 일본의 고베 지진 당시, 보-기둥 용접 모멘트 접합부에서 조기 취성파괴가 발생하여 막대한 피해가 야기됨에 따라 이후 다양한 종류의 고연성 접합 상세가 제시되어 왔다. 이 가운데 RBS 접합부는 기둥 플랜지와 접합한 부분에서 약간 떨어진 위치의 보 플랜지 일부를 절취하여, 이 부분이 마치 “structural fuse”와 같이 기능하도록 한다(그림 2참조). 따라서 용접부의 취성파괴를 방지하고 뛰어난 연성능력을 확보하는 방안으로 이 접합부는 여러 연구<sup>(4-6)</sup>에 의해 수행된 실험대 실험을 통하여 뛰어난 연성 능력이 지속적으로 입증되었으며, 가장 대표적인 저비용/고연성 내진상세로 자리매김하고 있다. 그림 3



〈그림 2〉 RBS 접합부 전형적 상세(이철호 등 2002)

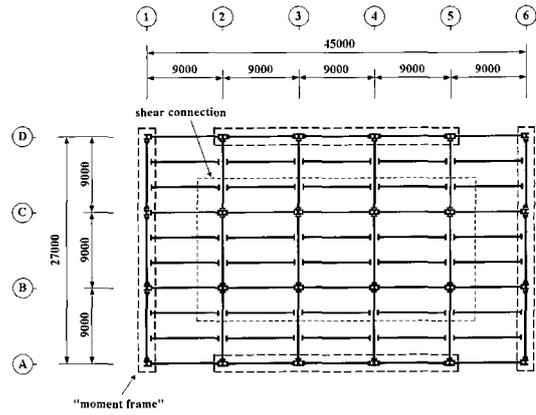


〈그림 3〉 접합부 실험결과(이철호 등 2002)

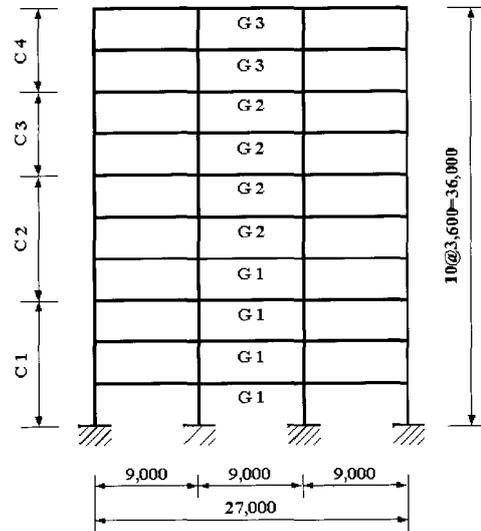
에서 보듯이 적절히 설계된 RBS 접합부는 적어도 4%의 이상의 층간변형능력(곧 4% 라디안의 접합부 회전능력)을 발휘한다. 즉 강구조내진기준에서 특수모멘트골조의 접합부에 요구하는 성능요건을 만족시키므로 가장 큰 값의 반응수정계수인  $R=8$ 을 허용하고 있다. 이하에서는 사례해석을 위한 RBS 골조의 설계과정을 약술한다.

그림 4 및 5는 10층 모멘트골조의 구조 평면도와 입면도로서 건물의 외곽부에만 모멘트골조를 배치하고 내부의 접합부는 전단접합이므로 용접 접합비용을 대폭 줄일 수 있는 구조시스템이다. 횡력에 대한 저항은 물론 내부 중력기둥의 안정성 역시 외곽부의 모멘트골조에 의해 전적으로 제공되도록 설계하였다. 편의상 캘리포니아 강진대를 가정하여 IBC 20007) 및 AISC-LRFD 19938)에 의거 다음의 하중 조건으로 설계하였다:

- ① 고정하중(층 바닥중량)  $5.00 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$   
(층 외벽중량)  $6.48 \text{ N/mm}^2$
- ② 활하중  $2.50 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$



〈그림 4〉 구조 평면도



〈그림 5〉 구조 입면도

③ 지진하중

- 지반계수 :  $S_B$
- 단주기 설계응답가속도( $S_{DB}$ ) : 1.0
- 장주기 설계응답가속도( $S_{D1}$ ) : 0.4
- 중요도계수( $I$ ) : 1.0
- 반응수정계수( $R$ ) : 8

④ 풍하중

- 설계 기본 풍속 : 85 mile/h
- 중요도계수 : 1.0
- 노풍도 : B
- 가스트 계수 : X방향 = 0.8372, Y방향 = 0.8259

설계는 1) 강성 및 강도설계, 그리고 2)연성설계의 2단계로 나누어 수행하였다. 1단계의 강성 및 강도설계라 함은 위의 하중조합에서 요구되는 강성 및 강도상의 요구조건이 만족되도록 부재를 선정하는 것을 의미한다. 2단계의 연성설계는 1단계의 설계결과에 RBS를 도입하여 연성접합부를 구축하고, 강한 기둥-약한 보 조건과 같은 내진설계상의 조건이 만족되도록 설계하는 것을 의미한다. 표 1은 강성 및

강도설계 결과를 요약한 것이다.

이하는 실험결과를 토대로 제시된<sup>9)</sup> 제 2단계의 연성설계 절차의 가운데 RBS 설계부분을 요약한 것이다.

RBS 접합부 치수  $a, b$ 는 각각 보춤의 25%와 75%를 택 하였다(그림 6 및 7 참조).

RBS부의 최소폭( $b_{RBS}$ )은 RBS부가 변형경화 상태에 도달했을 때(실험적으로 확인된 변형경화계수는 1.25) 기둥 외주면에 작용하는 모멘트의 크기가 보 전단면의 소성모멘트를 초과하지 않도록 절삭하면 접합부의 취성파괴를 방지

할 수 있음이 실험적으로 확인되었다. 이를 토대로  $b_{RBS}$ 를 산정하면, 아래 (4)식이 얻어진다. (4)식에 의한 산정결과를 표 2에 요약하였다.

$$b_{RBS} \leq \frac{0.80Z(L'/L_b) - t_w(d_b/2 - t_f)^2}{t_f(d_b - t_f)} \quad (4)$$

단,  $Z$ =보원단면의소성단면계수

$d_b$ =보의춤

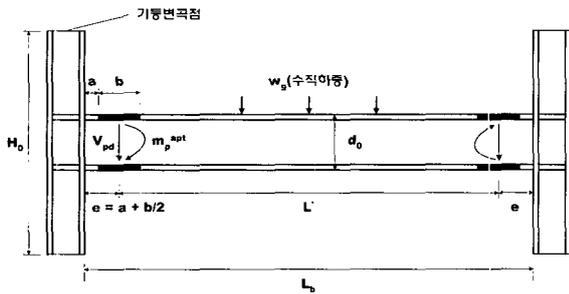
$t_f$ =보플랜지의두께

$t_w$ =보웨브의두께

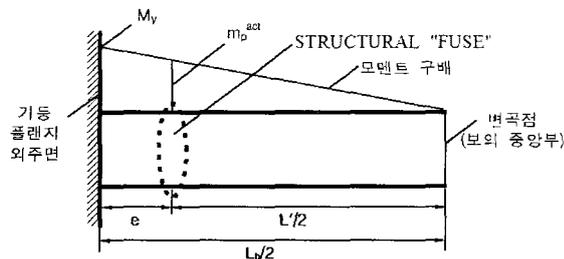
그리고 그림 8의 자유물체도를 토대로 강한 기둥-약한 보 조건이 만족됨을 확인하였다.

〈표 1〉 강성 및 강도설계에 의한 결과

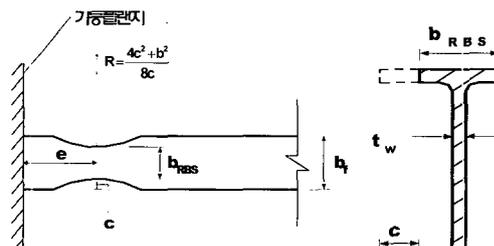
기둥			보		
A572-50			A36		
C1	W-14×605	1~3층	G1	W-21×166	1~4층
C2	W-14×500	4~6층		W-21×166	
	W-14×500	7~8층	G2	W-24×131	5~8층
C3	W-14×283	7~8층		W-24×131	
C4	W-14×193	9~10층	G3	W-18×119	9~10층



〈그림 6〉 RBS 접합부를 갖는 보 스펠



(a) RBS 부가 변형경화상태에 도달했을 때의 보의 휨모멘트 프로파일



(b) RBS 접합부의 주요 치수

〈그림 7〉 RBS 접합부의 지진에 의한 모멘트 프로파일 및 주요치수

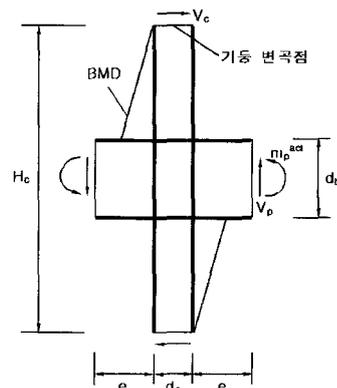
## 4. RBS 끝조의 반응수정계수 평가

### 4.1 구조 모델링 및 검증

3장에서 설계한 RBS 끝조의 반응수정계수 평가를 위한 푸쉬오버해석에는 DRAIN-2DX(Prakash 1993)<sup>(10)</sup>를 사용 하였다. 바닥 슬래브의 영향은 고려하지 않고 순수 철골 끝 조만을 모델링하였다. 지표면을 고정된 저면으로 처리하고 중력하중을 먼저 가한 후 횡력에 대한 푸쉬오버 해석을 수행하였다. 끝조 내부의 중력기둥은 횡하중에 대한 저항능력은 없는 것으로 무시하였다. 단, 횡변위의 증대에 따라 부과

〈표 2〉 RBS 접합부 설계정보

기둥			보		$b_{RBS}$ (mm)	$Z_{RBS}$ (mm) (소성단면계수)
A572-50			A36			
C1	W-14×605	G1	W-21×166	200	4,905,922	
	W-14×500		W-21×166	200		
C2	W-14×500	G2	W-24×131	200	4,174,903	
	W-14×283		W-24×131	200		
C4	W-14×193	G3	W-18×119	180	1,878,646	



〈그림 8〉 강한 기둥-약한 보 검토를 위한 자유물체도

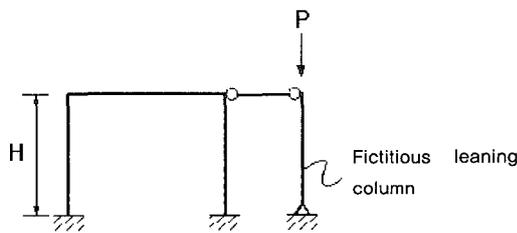
되는 중력기둥의 P-Δ 효과를 반영하기 위하여, 그림 9에서 보는 바와 같이 가상의 의지기둥(fictitious leaning column)을 설치하고 주두의 수평자유도를 골조의 수평자유도와 같도록 강체링크요소로 연결시킨 후, 고정하중과 25%의 활하중을 포함하는 중력하중을 가하여 해석하였다.

보와 기둥은 DRAIN-2DX의 보-기둥 요소(Element 2)로 모델링 하였으며, 보 및 기둥의 항복응력도 값으로는 예상 항복강도를 사용하였다. 보 및 기둥 부재의 변형 경화율은 2%로 가정하였고 부재의 단부에서는 100%의 단부강역(rigid-end offsets)을 고려하였다. 기둥의 항복강도 모델링에는 저항계수를 1로 하여 얻어지는 AISC-LRFD 1993의 축력-휨모멘트 상호작용곡선을 사용하였다. 보의 RBS부 또한 별도의 절점을 형성하여 적절히 모델링하였다. 모멘트접합부의 패널존은 Krawinkler(1978)<sup>(11)</sup>의 제안에 따라 반강절요소(Element 4)를 사용하여 모델링 하였다.

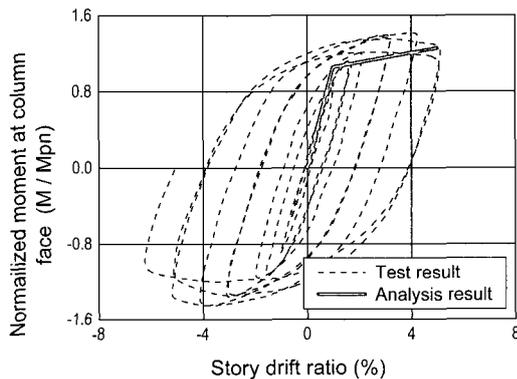
그림 10은 그림 2에 나타난 부분골조 시험체를 위의 방법에 따라 모델링한 후 DRAIN-2DX로 단조해석한 결과를 실험결과와 비교한 것으로서 대체로 만족스런 결과를 보여 주고 있다.

4.2 푸쉬오버해석을 위한 횡력 패턴

푸쉬오버 해석 시에 고차모드의 효과를 고려하기 위하여 다양한 연구<sup>(12-14)</sup>들이 있다. 그 중에서 본 논문에서는 FEMA 273에서 제시하고 있는 고차모드의 영향이 반영된 횡하중 분배계수의 산정을 위한 방법을 실용적이며, 지진파에 대한 대



〈그림 9〉 P-Δ 효과의 반영모델

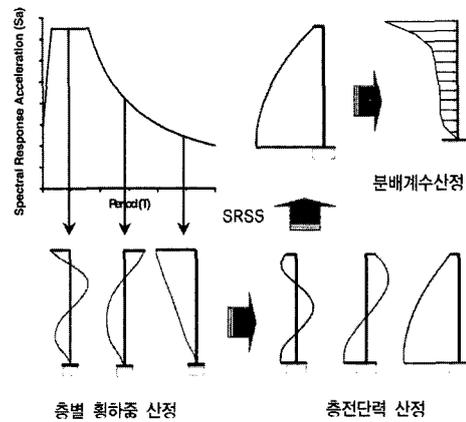


〈그림 10〉 실험결과와 해석결과 비교

표성을 확보하도록 본 연구자가 보완한 그림 11과 같은 방법<sup>(15)</sup>에 따라 예제 RBS 횡하중 분배계수를 구하였다. 고유치 해석을 통하여 3차 모드까지 주기를 산정한 결과, T<sub>1</sub> ~ T<sub>3</sub>의 값이 각각 2.71, 0.96 그리고 0.53초였다. 각 모드의 ϕ에 의해 횡하중 분배계수를 산정하면 다음 표 3과 같다.

4.3 예제건물의 반응수정계수 분석

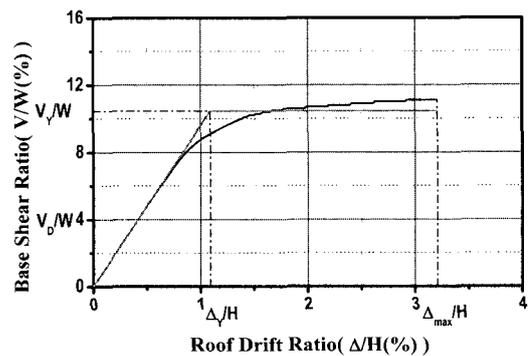
그림 12는 이상의 방법에 의해 10층 RBS 골조를 푸쉬오버 해석한 결과를 도시한 것이다. 이 그림에서 푸쉬오버해석의 중



〈그림 11〉 횡하중 분배계수 산정 방법

〈표 3〉 예제건물의 횡하중 분배계수

층	m	ϕ <sub>1</sub>	ϕ <sub>2</sub>	ϕ <sub>3</sub>	계수
10F	3.576	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
9F	3.338	0.9357	0.5708	-0.0400	0.4151
8F	3.338	0.8467	0.0699	-0.8249	0.1891
7F	3.338	0.7481	-0.3326	-0.8881	0.2791
6F	3.338	0.6351	-0.6127	-0.4184	0.2631
5F	3.338	0.5219	-0.7268	0.1924	0.1657
4F	3.338	0.4007	-0.7128	0.6872	0.1450
3F	3.338	0.2758	-0.5766	0.8552	0.2091
2F	3.338	0.1574	-0.3638	0.6688	0.2096
1F	3.338	0.0552	-0.1361	0.2828	0.0985



〈그림 12〉 예제건물의 푸쉬오버 곡선

료점은 물론 최대층간변위가 4% 라디안에 도달했을 경우에 대응된다. 푸쉬오버해석 결과 본 RBS 골조는 밀면전단력( $V_D$ )이  $3.643 \times 10^6 \text{N}$ , 최상층 변위( $\Delta_{\text{max}}$ )가  $1.155 \times 103 \text{mm}$ 일 때 7층에서 층간변위비 4%가 발생하였다.

표 4는 2장에서 논의한 반응수정계수를 산정하는 방법에 따라 얻어진 시스템초과강도 저감계수( $R_S$ )와 시스템연성도 저감계수( $R_\mu$ )를 정리한 것이다. 본 예제의 경우 시스템초과강도 저감계수 및 시스템연성도 저감계수는 각각 2.6과 2.9로서 반응수정계수( $R = R_S \times R_\mu$ )는 7.7로 계산되었다. 본 예제 건물의 경우 원래 설계에 사용된 값인  $R=8$ 과 아주 유사한 값을 보인다. 그러나 동일 반응수정계수를 사용해서 설계했다고 해도 골조의 층수나 설계조건에 따라 보수 반응수정계수의 값은 변동할 것이 자명하다.

**5. 제안한 방안의 타당성 검증**

본 논문의 RBS 골조의 경우  $R = R_S \times R_\mu = 7.7$ 이므로  $V_{D'} (= 1.392 \times 10^6 \text{N})$ 의 7.7배에 달하는 등가 선형 밀면전단강도(equivalent linear base shear strength)를 갖는 것으로 생각할 수 있다(그림 1의  $V_E$ 의 정의 참조). 달리 말하면  $V_D (= 1.392 \times 10^6 \text{N})$ 에 7.7배한 크기( $1.072 \times 10^7 \text{N}$ )의 밀면전단력을 유발하는 지진하중에 대해 비선형 동적해석을 수행했을 때 얻어진 층간변위비의 최대치가 RBS 접합부에서 발휘 가능한 4% 라디안을 넘지 않는다면 본 연구에서 제시한 반응수정계수의 정의는 보수적인 측면에 있음이 확인되는 것이다. 물론 지진하중에 대한 비선형 동적응답은 입력지진동의 디테일에 따라 상당히 변할 수 있으므로 다수 개의 입력지진동을 사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 표 5에 정리한 10개의 지진가속도기록을 사용하여 비선형동적해석을 수행하였다. 즉  $T = 2.71 \text{초}$ (RBS 골조의 1차진동 주기)에서 스펙트럼 가속도값이  $V_E = 1.072 \times 10^7 \text{N}$  되도록 표 5의 각 가속도기록을 조정하여 비선형동적해석을 수행하였다. 그림 13은 해석결과를 요약한 것이다. 우선 층간변위비의 최대값의 크

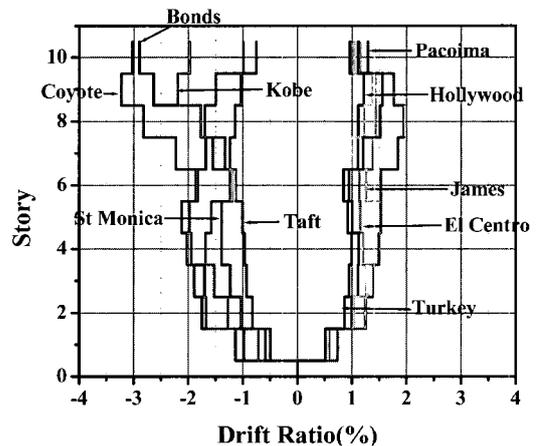
〈표 4〉 예제건물의 R 산정결과

$V_D (\times 10^6 \text{N})$	1.392
$V_Y (\times 10^6 \text{N})$	3.643
$R_S$	2.6
$\Delta_Y (\times 103 \text{mm})$	0.393
$\Delta_{\text{max}} (\times 103 \text{mm})$	1.155
$R_\mu$	2.9
$R = R_S \times R_\mu$	7.7

기, 발생위치 등이 입력지진에 따라 상당히 변동함을 알 수 있다. 어느 입력지진도 4% 라디안 이상의 층간변위비를 유발하지 않는다. Coyote 기록과 Bonds 기록의 경우가 가장 큰 값은 3% 라디안에 육박하는 층간변위비를 유발할 뿐이다. 물론 본 연구에서 사용한 12개의 지진기록이 충분한 개수는 아니지만 본 연구에서 제안한 접합부 층간변형능력에 기반한 반응수정계수 평가법의 보수성을 잘 보여주는 결과라 판단된다.

〈표 5〉 비선형 동적해석을 위한 입력지진 정보

이벤트 명	성분(°)	지반조건	pga(g)	STATION
Bonds (Bonds Corner CA, US, 1979)	230	Alluvium	0.778	USGS 5054
Coyote (Coyotelake CA, US, 1979)	230	silty clay over sand stone	0.429	CSMIP57217
El Centro (El Centro CA, US, 1940)	270	Alluvium; more than 300m	0.357	USGS 0117
Hollywood (Kim County CA, US, 1952)	180	Alluvium; 130m	0.059	USGS 0135
James (El Centro CA, US, 1979)	310	Alluvium; more than 300m	0.595	USGS 0952
Kobe (Kobe, Japan, 1995)	90	-	0.599	JMA
Pacoima (San Fernando CA, US, 1971)	164	Highly jointed Diorite Gneiss	1.170	CSMIP 24207
St Monica (Northridge CA, US, 1994)	90	Alluvium	0.882	CSMIP 24538
Taft (Taft, CA, US, 1952)	21	Alluvium	0.156	USGS 1095
Turkey (Duzce, Turkey, 1999)	90	-	0.356	IRIGM 498



〈그림 13〉 각 지진별 최대 층간변위비

## 6. 결론

본 논문에서는 접합부의 회전능력에 기초하여 RBS 골조의 유효한 반응수정계수를 산정하였다. 반응수정계수의 산정은 이론적 고찰에 의하여 시스템 초과당도 저감계수( $R_s$ )와 시스템 연성도 저감계수( $R_\mu$ )를 이용하였다. RBS 접합부의 최대 변형성능은 실험결과를 적용하였으며 반응수정계수의 평가를 위한 시스템 성능은 고차모드의 영향과 P- $\Delta$  효과를 반영한 푸쉬오버 해석을 통하여 평가하였다. 이에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

1. 강구조 내진구준의 특수모멘트골조의 접합부에 요구되는 성능 요건인 층간변형능력 4%를 푸쉬오버 해석의 종료점으로 정하였다. 그 결과 얻어진 시스템 초과당도 저감계수와 시스템 연성도 저감계수는 각각 2.6과 2.9로서 RBS골조의 반응수정계수는 7.7로 설계시에 사용된 특수모멘트골조에 부여되어있는 8과 거의 동일한 수준의 값을 나타내었다.
2. 본 예제의 반응수정계수가 7.7로 산정되었으므로  $V_D$ 의 7.7배에 해당하는 등가 선형 밀면전단강도를 갖는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 다양한 지진을 무작위로 선정하고 이와 같은 크기의 밀면전단력을 유발하도록 지진을 스케일링하여 비선형 동적해석을 수행하여 제안한 방법의 타당성을 검증 하였다. 그 결과 RBS 접합부에서 발휘 가능한 4%의 층간변위비에 대하여 선택된 10개의 지진 모두 보수적인 결과를 나타내었다.
3. 본 논문은 RBS 골조의 유효 반응수정계수를 정량적으로 산정하고, 지진하중에 대한 비선형 동적해석을 통하여 결과의 유효성을 검증하였다. 따라서 본 논문에서 사용한 구조시스템에 대한 제한된 결과이며, RBS 골조의 반응수정계수를 합리적으로 정의하기 위해서는 다양한 유형의 내진성능평가를 통한 자료축적 및 보완연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발 사업(C105A1010001-05A0501-00110)과 2005년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(지방연구중심대학 육성사업/바이오하우징연구사업단)을 받아 수행된 연구임.

## 참고 문헌

1. ATC, "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings," *ATC 3-06*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1978.
2. Chia-Ming Uang, "Establishing R and Cd Factors for Building Seismic Provisions" *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol 117, No. 1, 1996, pp. 19-28.
3. Peter Fajfar, "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design," *MEERI*, 2000, pp. 573-592.
4. Chen, S.J., Yeh, C.H., and Chu, J.M., "Ductile steel beam-to-column connections for seismic resistance." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 122 No. 11, 1996, pp. 1292-1299.
5. 이철호, 전상우, 김진호, "RBS 철골모멘트접합부의 내진거동 평가를 위한 반복재하 실험대 실험", 한국강구조학회 논문집, 제14권 4호, 2002년 8월, pp. 557-566.
6. Engelhardt, M.D., Winneberger, T., Zekany, A.J., Potyraj, T.J., "Experimental Investigations of Dogbone Moment Connections." *Engineering Journal*, 35(4), AISC, Fourth Quarter, 1998, pp. 128-139.
7. IBC 2000, *International Building Code*, International code council, INC. 2000.
8. AISC, *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois. 1993.
9. 이철호 등, "고성능 내진용접 철골모멘트 접합부 개발 RIST, 강구조연구소/현대건설기술 연구소 공동연구보고서", 2002.
10. 윤정배, 이철호, 최정욱, 송진규, "N2 Method를 이용한 RC 중간모멘트 연성골조의 반응수정계수 및 내진성능평가", 한국 지진공학회논문집, 제6권 6호, 2002년 12월, pp. 33-39.
11. Prakesh, V. and Powell, G.H., *DRAIN 2DX User Guide*, University of California, Berkeley, California, 1993.
12. Krawinkler, H., "Shear in Beam-Column Joints in Seismic Design of Frames," *Engineering Journal*, v15, n3, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, 1978.
13. Chopra AK, Goel R, "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation," *PEER 2001/03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 2001.
14. 이동근, 최원호, 안지희, "건축구조물의 비선형 지진응답 평가를 위한 개선된 지진하중 분배방법", 한국지진공학회 논문집, 제5권 제2호, 2001년 4월, pp. 33-47.
15. FEMA, *NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, 1997.
16. 김건우, 송진규, "고차모드 영향이 반영된 Pushover 해석을 위한 횡하중 분배계수 제안", 한국지진공학회 춘계학술발표대회 논문집, 제9권 1호, 2005년 3월, pp. 236-242.