

비좌굴가새의 보강 전과 후의 철골 특수모멘트저항골조 건물의 R계수 평가

Evaluation of Response Modification Factor of Steel Special Resisting Frame Building Before and After Retrofitted with Buckling Restrained Brace

신지욱¹⁾ · 이기학^{2)*} · 조영욱³⁾

Shin, Jiuk¹⁾ · Lee, Kihak^{2)*} · Jo, Yeong Wook³⁾

¹⁾한국건설기술연구원 공공건축연구본부, ²⁾세종대학교 건축공학과, ³⁾삼성물산 건설부문 주택사업부

¹⁾Building Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, ²⁾ Dept. of Architectural Engineering, Sejong University, ³⁾ Structural Team, Samsung C&T

/ A B S T R A C T /

This research presents that seismic performance of steel moment resisting frame building designed by past provision(UBC, Uniform Building Code) before and after retrofitted with BRB (Buckling-Restrained Brace) was evaluated using response modification factor (R-factor). In addition, the seismic performance of the retrofitted past building was compared with that specified in current provision. The past building considered two different connections: bilinear connection, which was used by structural engineer for building design, and brittle connection observed in past earthquakes. The nonlinear pushover analysis and time history analysis were performed for the analytical models considered in this study. The R-factor was calculated based on the analytical results. When comparing the R-factor of the current provision with the calculated R-factor, the results were different due to the hysteresis characteristics of the connection types. After retrofitted with BRBs, the past buildings with the bilinear connection were satisfied with the seismic performance of the current provision. However, the past buildings with the brittle connection was significantly different with the R-factor of the current provision.

Key words: Steel Special Moment Resisting Frame (SMRF), Response Modification Factor (R-Factor), Buckling-Restrained Brace (BRB), Past Provision (UBC), Current Provision (IBC2012)

1. 서론

1.1 연구 배경

현재의 내진설계에 대한 개념은 과거에 발생했던 지진에 의해 손상된 구조물의 현장조사 및 해석을 통해 발전되어왔다. 지진발생에 따른 인명 및 재산 피해등을 최소화시키기 위해서 새롭게 지어지는 건축물의 내진성능을 향상시키는 것도 중요하지만 기존 건축물들의 내진성능을 개선하기 위해서 다양한 보수 및 보강방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2].

Table 1은 1994년 일본에서 발생된 고베지진에 대한 구조물의 피해정도를 나타낸 것으로 과거에 지어진 건축물이 새롭게 제정된 내진기준으로

설계된 건축물보다 더 큰 피해를 입은 것을 볼 수 있다[1]. 이를 통해 건축물에 적합한 보강에 의해 내진설계가 고려되지 않은 구조물 또는 과거의 내진설계기준이 고려된 구조물의 내진성능향상이 필요함을 알 수 있다. 그러나, 우리나라의 건축구조기준[3]에서는 과거 건축물에 대하여 현재 기준에서 제시하는 내진성능에 만족시키기 위한 보강을 통한 성능 향상 수준의 기준 및 결정 방법 등을 언급하지 않고 있다. 이러한 기준 없이 건축물에 보강을 하는 것은 현재 기준에서 제시하는 성능수준에 미달되거나 과도한 보강이 될 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다.

반응수정계수(Response Modification Factor, 이하 R계수)는 내진설계를 수행할 때 적용하여 설계 밀면전단력을 낮추어 지진하중에 대하여 구조물이 항복이후에 비탄성 거동을 유도하기 위한 것이다. 현재 기준에서는 내진설계시 우수한 횡 저항능력을 보유한 건축물에 대하여 높은 R계수를 적용한다. 예를 들어 R계수가 3.5인 철골 보통 모멘트저항골조(Steel Ordinary Moment Resisting Frame, 이하 철골 OMRF)보다 지진에 대한

*Corresponding author: Lee, Kihak

E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr

(Received 25 April 2012; Accepted 3 December 2012)

Table 1. Damage level of building structures subjected to Kobe earthquake [1]

	1971		1981
Building structure	Non-seismic designed building	Past seismic code-designed building	New seismic code-designed building
Rate of damaged building (%)	About 70%	About 35%	About 15%
Damage level	Severe	Moderate	Light

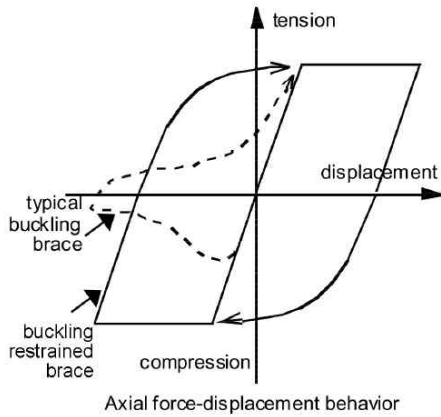


Fig. 1. Comparison on hysteresis behavior between typical brace and buckling-restrained brace [9]

저항 성능이 우수한 것으로 잘 알려져 있는 철골 특수모멘트저항골조(Steel Special Moment Resisting Frame, 이하 철골 SMRF)는 8의 R계수를 고려한다. 이와 같이, R계수는 구조물의 연성능력, 초과강도계수, 잉여도, 감쇠 특성 등을 반영한 종합 성능 지표이기 때문에 R계수 값의 비교를 통해 건축물의 성능을 상대적으로 파악하는데 사용할 수 있다[1,4]. 국내에서 기준에 수행된 연구는 R계수의 정성적이고 경험적인 결정 방법을 보완하기 위한 목적으로 실험과 해석을 통한 R계수에 대한 연구가 많이 수행되었다. 기존에 수행된 연구[3-7]를 간략히 살펴보면 R계수를 구조물의 통합적인 성능지표로 이용하여 건축물의 내진성능을 평가하였다. 또한, 이러한 정량적이고 과학적인 연구 결과를 바탕으로 기존의 구조시스템 또는 새로운 구조시스템에 대하여 적합한 R계수를 제시하는 연구가 주를 이루었다. 본 연구에서는 과거 기준으로 설계된 건축물의 보강 전/후의 R계수를 산정하여 내진성능을 파악하고, 보강 후의 건축물이 현재 기준에서 제시하는 내진성능에 만족하는지 평가하였다.

본 연구에서는 과거 기준으로 설계된 건축물의 내진성능을 향상시키기 위해서 비좌굴가새(Buckling-Restrained Brace, 이하 BRB)를 적용하였다. BRB는 강재로 구성된 중심 부재(Steel core)와 외부 보강재(Restrainer)로 구성된다. BRB의 중심 부재는 횡력에 저항하는 요소이며, 외부 보강재는 중심 부재에서 면외 또는 면내 좌굴이 발생하는 것을 방지하는 역할을 한다. Fig. 1은 일반 가새와 비좌굴 가새의 이력거동을 비교한 것이다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 BRB가새(Fig. 1의 buckling restrained brace)는 일반 가새(Fig. 1의 typical buckling brace)와 달리 지진 등과 같은 횡력이 작용했을 때 외부 보강재에 의해 중심부재의 좌굴이 발생하지 않기 때문에 압축력과 인장력에 대하여 동일한 거동을 한다. 이러한 이유로 일반가새와 비교했을 때 우수한 에너지소산능력을 갖는 것으로 알려져 있다[9].

1.2 연구 목적

본 연구에서는 보강에 따른 기존 건축물의 내진성능을 판단하기 위해서 ATC-34(1995)[10]에서 제시된 R계수 산정방식을 적용하여 컴퓨터 해석 결과를 바탕으로 R계수를 계산하였다. 이 값을 바탕으로 현재 내진기준에 의해 설계된 건축물과 건축구조기준에서 제시하는 철골 SMRF의 R계수를 비교/평가하였다. 이는 보강을 통해 과거기준에 의해 설계된 구조물의 내진성능이 현재 내진기준에서 제시하고 있는 구조물의 성능에 만족하는지를 평가하기 위함이다. 또한, R계수가 기존 건축물의 보강수준을 결정할 수 있는 방법으로 활용할 수 있는지를 확인하기 위한 것이다. R계수를 산정하기 위해서 각 해석모델에 대하여 비선형 정적 pushover 해석과 비선형 시간이력해석이 수행되었다.

2. 반응수정계수 (Response Modification Factor)

R계수는 지진하중에 대하여 구조물을 설계할 때 구조물의 항복이후에 비탄성 거동을 유도하기 위해서 적용하는 것으로 다양한 시스템에 대하여 경험적 지식을 바탕으로 결정되었다. ATC-19 및 ATC-34[10]에서 R계수는 초과강도계수(이하 R_Q), 연성계수(이하 R_μ), 감쇠계수(이하 R_ξ) 그리고 잉여도계수(이하 R_γ)로 구성된다. 감쇠장치가 추가되지 않을 경우 R_ξ 는 1로 설정하고, 건물의 잉여도가 충분한 경우 R_γ 는 1로 설정한다. 이러한 조건 아래, 본 연구에서는 R계수를 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$R = R_\mu \times R_Q \tag{1}$$

R_Q 계수는 설계된 내력이 설계요구강도를 초과하는 정도를 나타낸 것이다. Fig. 2는 일반적인 구조물의 횡력 변위의 관계를 보여준다. 이를 바탕으로 구조물에 대한 R_Q 계수는 비선형 pushover 해석을 통해 얻어진 최대 밀면전단력(V_{max})을 기준에 의해 정의되는 설계 밀면전단력(V_{design})으로 나누어 계산한다. 또한, 구조물의 동적특성(고유주기, 감쇠 및 이력거동 등)과 지반운동에 의해 복합적으로 결정되는 함수인 R_μ 계수를 산정하기 위해서 시스템 전체의 비탄성 응답을 산정하는 변위연성요구(Displacement Ductility Demand, 이하 μ)를 적용하는 것이 적합하다. 이러한 이유로 μ 와 R_μ 계수의 관계식을 도출하기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되어왔다[11-13]. 여기서, μ 는 구조물의 항복변위에 대한 최대변위의 비로 정의된다. 본 연구에서는 기존에 Newmark와 Hall, Krawinkler와 Nassar 그리고 Miranda와 Bertero에 의해 제안된 R_μ 계수 산정방식을 고려하였다. 각 R_μ 계수 산정방식에 대한 자세한 내용은 다음 논문을 참고할 수 있다[11-13].

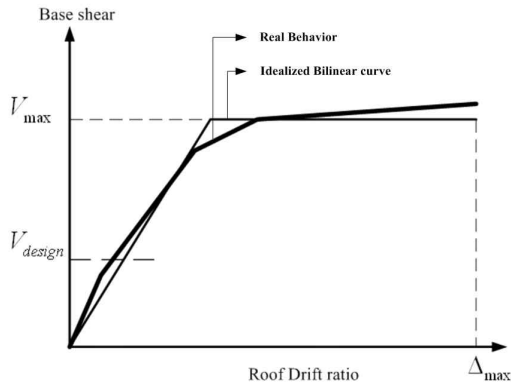


Fig. 2. Relations between base shear and roof drift ratio [5]

3. 해석 모델

본 연구에서는 과거 기준과 현재 기준으로 구분하여 각 기준에 적합한 철골 SMRF 건물을 설계하였다. 과거 기준은 과거에 널리 사용된 UBC (Uniform Building Code)[14-15]기준의 주요변화를 고려하여 UBC1973 (1958년-1973년), UBC1985(1973년-1985년) 그리고 UBC1994 (1985년 -1994년)기준을 사용하였으며 현재 기준은 IBC2012(International Building Code, 2012)[16]를 고려하였다.

3.1 현재 기준(IBC2012)과 과거 기준(UBC기준)의 비교

Fig. 3은 앞에 언급된 각 기준들에 대한 설계 밀면전단력계수(Seismic Coefficient, V/W)를 보여준다. 설계 밀면전단력계수 산정시 각 기준에 대하여 단단한 토사지반(Stiff Soil, S_D)과 현재 기준의 R계수에 해당하는 값을 고려하였다. 허용응력설계에 근거한 UBC기준은 내진설계 적용시 33% 증가시키는 것을 허용했기 때문에 비교를 위해서 UBC1994의 설계 스펙트럼에 1.33을 곱했다(Fig. 3의 UBC1994 x 1.33). UBC기준들은 각 기준의 설계 횡 변위의 제한이 다르게 고려되었기 때문에 설계 밀면전단력 계수에서 차이를 보였다. 또한, IBC2012기준은 고려된 지진위험수준이 UBC 기준(UBC1973, UBC1985 그리고 UBC1994)에 비해 상향되었기 때문

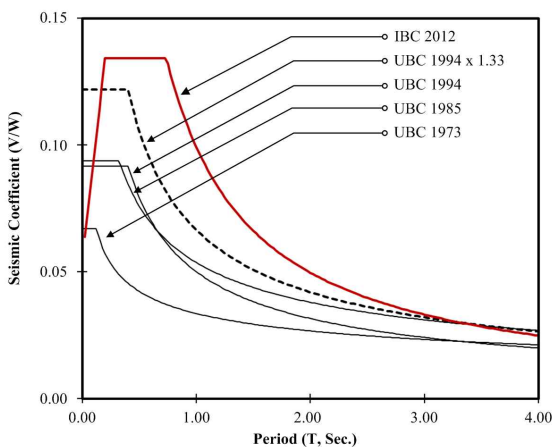


Fig. 3. Seismic coefficient of IBC2012 and UBC provisions [17]

에 과거 기준에 비해 큰 설계 밀면전단력 계수를 갖는 것으로 나타났다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 UBC1973의 설계 밀면전단력계수가 최소값으로 나타났으며 주기 3.30초 까지 IBC2012의 값이 최대값을 갖는 것으로 나타났다. 각 기준들에 대한 자세한 내용은 다음 논문을 참고할 수 있다 [14-17].

3.2 본 연구에서 고려된 해석모델과 지반운동

본 연구에서는 다른 접합부 모델의 이력거동과 비교했을 때 실제거동에 가장 근접한 거동을 나타내는 Krawinkler에 의해 개발된 비선형 패널존 (Panel-zone) 모델[17]을 적용하였다. 기존 패널존에 대한 가력 실험을 통해 기둥의 웹이 먼저 항복하고 기둥의 플랜지가 항복한 이후에 추가적인 강성과 강도를 제공하는 것으로 조사되었다. 이에 대한 이력거동을 묘사하기 위해서, 본 연구에서 고려된 패널존 해석 모델은 두 개의 회전스프링을 적용하여 삼선형 거동(Tri-linear behavior)을 하는 것으로 모델링하였다. 이에 대한 자세한 내용은 다음 논문을 참고할 수 있다[17].

Fig. 4의 (a)는 현재기준으로 설계된 철골 SMRF의 보-기둥 접합부로 고려된 RBS접합부의 이력거동을 보여준다. RBS(Reduced Beam Section)접합부는 접합부를 구성하는 보의 플랜지(Flange)부분을 반원형으로 잘라내어 그부분의 면적을 감소시켜서 의도적으로 약하게 만드는 것을 의미한다. 이는 구조물이 비탄성 거동을 할 때 발생할 수 있는 소성힌지 (Plastic hinge)가 과도한 응력이 집중될 수 있는 보-기둥 접합부로부터 떨어진 곳에서 형성시켜 연성거동을 가능하게 한다. 이러한 연성거동을 통해서 구조물의 변형이 증가함에 따라 플랜지에서 국부적인 좌굴이 발생하고 강도가 감소하는 특성을 갖게 된다[17]. Fig. 4의 (b)와 (c)는 과거기준에 의해 설계된 구조물의 접합부에 대한 이력거동을 보여준다. Fig. 4의 (b)는 과거 엔지니어들에 의해 널리 사용된 강도와 강성의 감소가 없는 이상적인 이선형 접합부(Bilinear connection)를 나타낸 것이다. Fig. 4의 (c)는 보-기둥 접합부에서 갑작스러운 취성적 파단을 보이는 접합부(취성적 접합부, Brittle connection)이다. 이러한 취성적 접합부는 과거 고베 지진 (Kobe, Japan, 1994)과 노스리지 지진(Northridge, U.S.A, 1997)이후에 특수모멘트골조의 접합부에서 관찰된 것으로, 접합부의 용접부에서 정 모멘트에 대한 반응시 하부 플랜지에서 심각한 핀칭(Pinching)현상이 발생하였기 때문에 나타났다. 취성적 접합부에 대한 실험 결과등의 자세한 내용은 다음 논문을 참고 할 수 있다[18].

Fig. 5는 기존 연구[19]의 실험에서 가장 우수한 에너지소산능력을 보인 채널 보강형 BRB시스템의 힘-변위에 대한 이력거동과 Drain-2DX [20,21]컴퓨터해석 프로그램을 이용하여 나타난 결과를 비교한 것이다. 기존 실험의 BRB의 외부보강재는 두 개의 채널형강을 볼트나 용접으로 연결하는 방식을 고려하여 중심 코어의 좌굴을 방지하였다. 이 BRB실험체는 SS400($F_y=235\text{MPa}$, $F_t=400\text{MPa}$)강재를 이용하여 제작하였다. 각 BRB의 구성요소 중 중심 코어는 900mm^2 ($60 \times 15\text{mm}$)의 단면적으로 높이-길이 비는 4.0으로 설계하였다. 또한, 중심코어의 좌굴을 방지하기 위한 목적으로 채널형강은 $125 \times 65 \times 6 \times 8\text{mm}$ 를 사용하여 좌굴 강도와 중심코어의 항복강도 비가 1.0을 초과할 수 있도록 하였다. 이 실험체의 설계에 대한 보다 자세한 설명은 다음 논문을 참고 할 수 있다 [19]. 본 연구에서는 채널형강에 대하여 추가로 모델링을 수행하지 않고, Drain-2DX의 좌굴을 비활성화시킨 트러스 요소를 사용하여 BRB의 중심 코어만을 고려하는 모델

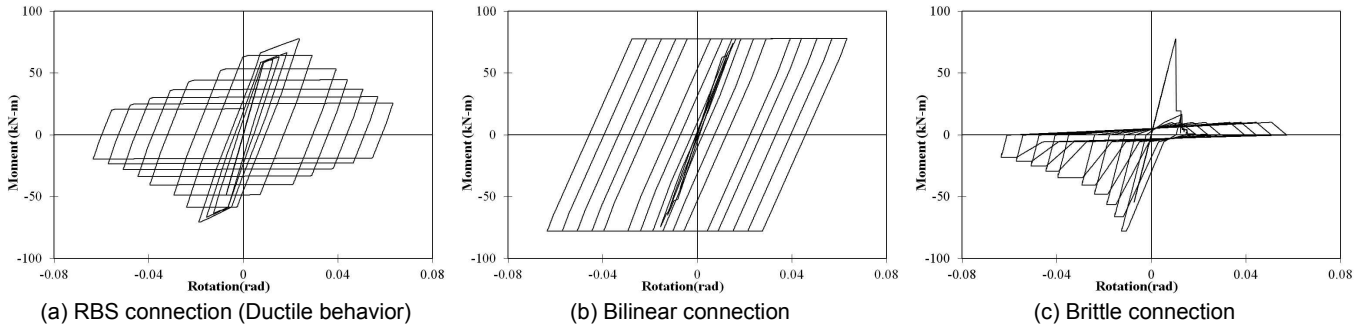


Fig. 4. Hysteresis behavior of beam-column connections used for building structures designed by IBC2012 and UBC provisions

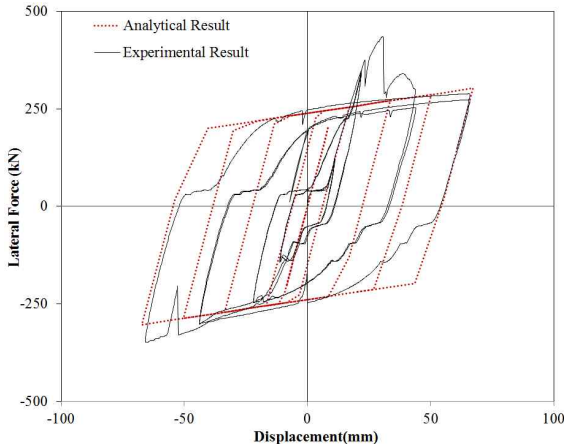
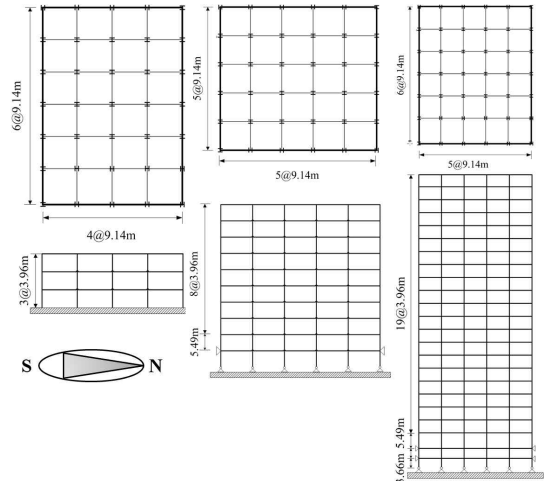


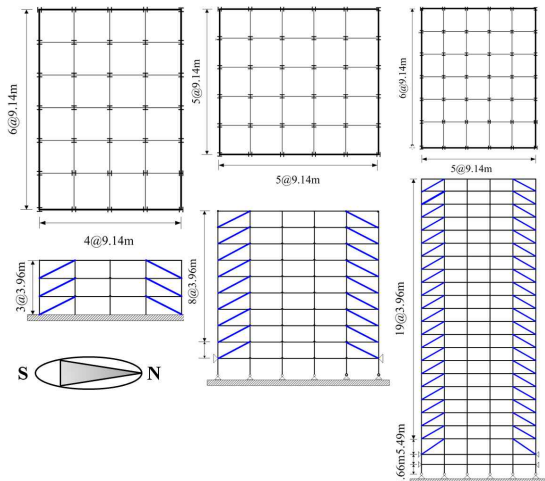
Fig. 5. Experimental[5] and analytical results of the BRB

링 방법으로 BRB의 이력거동을 묘사하였다. Drain-2DX로 모델링 된 BRB의 중심코어는 시편 테스트를 통해 나타난 항복 강도(268MPa)와 극한 강도(423MPa)를 적용하였다. 또한, 중심코어의 탄성계수(E)는 2.06×10^6 MPa 그리고 변형 경화율(Strain Hardening Ratio, SHR)은 0.02로 고려하였다. BRB의 중심 코어는 실험체와 동일한 단면적으로 모델링하였다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 각 하중 스텝에 대한 최대 압축 및 인장 강도는 실험 결과와 비교적 잘 부합하는 것으로 나타났다. 그러나, 실험시 발생된 슬립에 의해 가새의 축 변형이 해석 결과와 다소 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 또한, 실험시 외부 보강재로 사용된 채널 형강을 연결하는 볼트에서 전단 파괴가 발생(축 변형 약 30mm, Fig. 5의 실선 참고)하여 급격히 가새의 횡력이 감소하였다. 이러한 현상들(슬립 및 볼트의 전단 파괴)은 해석 결과에 반영되지 않았다. 이는 본 연구에서 BRB를 모델링할 때 앞에 언급한 것과 같이 중심 코어의 특성만을 고려했기 때문이다. BRB의 각 요소(중심 코어 및 외부 보강재 등)에 대하여 실제와 유사한 거동을 나타내기 위한 연구는 거시적 해석모델을 통해 수행중이다.

Fig. 6의 (a)는 LA지역에 대한 IBC2012로 설계된 3층, 9층 그리고 20층 철골 SMRF(이하 IBC2012 해석모델)와 BRB보강 전의 UBC기준으로 설계된 철골 SMRF(이하 UBC 해석모델, UBC1973 해석모델, UBC1985 해석모델, UBC1994 해석모델)의 평면도와 입면도를 보여준다. Fig. 6의 (b)는 BRB시스템이 보강된 평면도와 BRB시스템의 설치위치를 보여주 기 위한 입면도를 나타낸 것이다. 건물 경계부의 골조등은 횡력에 저항하는 철골 SMRF로 설계되었으며 Fig. 6의 평면도에 진한 선으로 표시하였



(a) Plan and elevation views of steel SMRF building structures before retrofitting with BRBs (IBC2012 and UBC analytical building models)



(b) Plan and elevation views of steel SMRF building structures after retrofitting with BRBs (UBC analytical model)

Fig. 6. Plan and elevation views of analytical building structures considered in this study

다. 모든 철골 SMRF들은 설계에 관련된 기둥의 축력, 강 기둥과 약 보의 구성비, 패널존의 전단강도 및 구조물의 P-delta 영향을 평가하는 안정성 계수등은 각 내진기준의 허용치 내에 존재하는 것으로 산정되었다. 해석모델에 대한 더 자세한 설명은 다음 논문을 참고 할 수 있다[22]. Fig. 7은 본

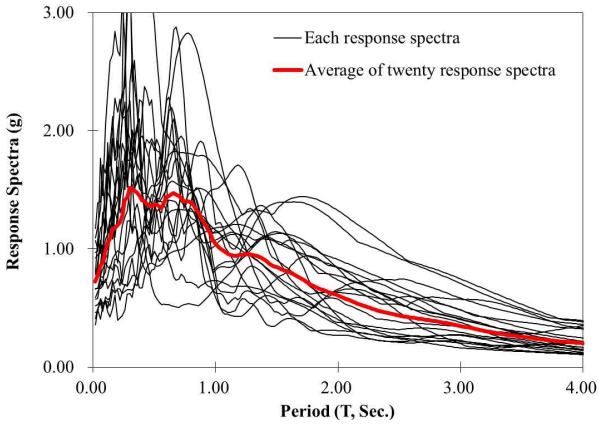


Fig. 7. Response spectra of the ground motions used in this study

연구에서 비선형 시간이력해석에 적용된 20개의 지반운동 가속도의 반응 스펙트럼과 이에 대한 평균값을 보여준다. 이 지반 운동 가속도는 Somerville (1997)[23]에 의해 제안된 미국 캘리포니아주의 LA지역에 대한 50년 동안 2%의 초과확률(재현주기 약 2400년)을 갖는다.

4. R계수의 산정 및 평가

4.1 R_{Ω} 계수의 평가

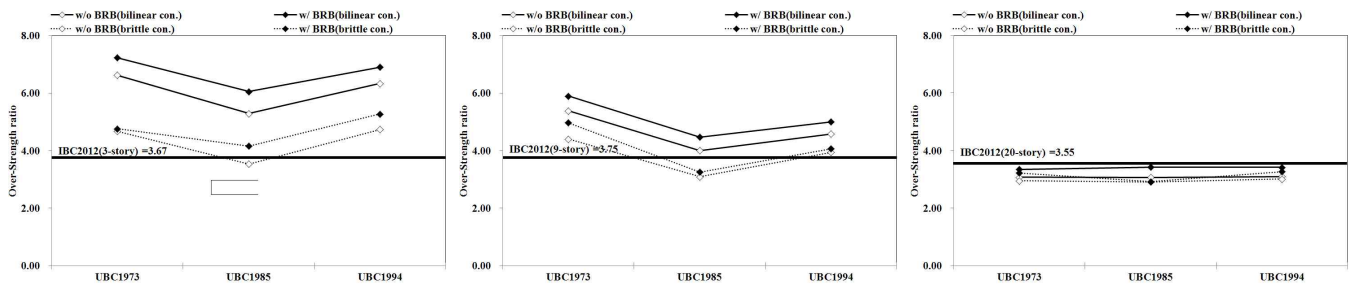
본 절에서는 비선형 정적 pushover 해석을 바탕으로 IBC2012와 BRB 보강 전/후의 UBC 해석모델의 R 계수의 핵심요소인 R_{Ω} 계수를 산정하여 비교하였다. Fig. 7은 본 연구에서 고려된 해석모델들의 R_{Ω} 계수를 나타낸 것이다. 여기서 이선형 접합부를 적용한 해석모델에 대한 R_{Ω} 계수를 산정할 때는 Fig. 2에 나타난 관계를 통해서 V_{max} 를 산정하였으며 항복이후 갑작스러운 파단을 보이는 취성적 접합부가 고려된 해석모델은 구조물이 항복했을 때의 밀면전단력을 V_{max} 로 고려하였다. Fig. 8의 실선은 이선형 접합부 모델을 적용한 R_{Ω} 계수이고 점선은 취성적 접합부를 고려했을 때의 R_{Ω} 계수이다. 또한, 비교를 위해서 IBC2012 해석모델에 대한 R_{Ω} 계수를 함께 나타냈다. 전체적으로 BRB보강 이후에 V_{max} 의 증가에 의해 R_{Ω} 계수가 증가하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 8의 (a)와 (b)에서 나타난 것과 같

이 취성적 접합부가 고려된 UBC1985 해석모델을 제외한 모든 건축물은 현재 기준의 R_{Ω} 계수에 비해 큰 값을 갖는 것으로 조사되었다. 이는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 3층 및 9층 건축물에 대한 V_{design} 의 값이 IBC2012보다 작기 때문에 나타난 결과이다. 20층 건축물의 경우 BRB가 보강 전/후의 UBC 해석모델의 R_{Ω} 계수는 과거 건축물에 비해 상대적으로 횡력이 우수한 IBC2012 해석모델보다 작은 값을 갖는 것으로 나타났다(Fig. 8의 (C)). Fig. 8을 통해 BRB보강 전/후의 R_{Ω} 계수를 비교했을 때 저층과 중층에 포함되는 3층과 9층 철골 SMRF 건축물은 20층 철골 SMRF 해석모델보다 BRB보강에 의한 R_{Ω} 계수의 값이 상대적으로 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 3층과 9층 해석모델이 20층 구조물에 비해 BRB보강에 의한 횡력의 증가 정도가 크기 때문이다. 또한, 취성적 접합부가 고려된 UBC 해석모델의 경우 이선형 접합부가 고려된 UBC 구조물과 비교했을 때 BRB에 대한 보강효과가 작은 것을 볼 수 있다. 이는 항복이후 접합부에서 갑작스러운 파단이 발생하는 취성적 접합부 모델이 적용된 해석모델의 V_{max} 는 이선형 접합부 모델이 고려된 구조물 보다 작기 때문이다.

4.2 R_{μ} 계수의 평가

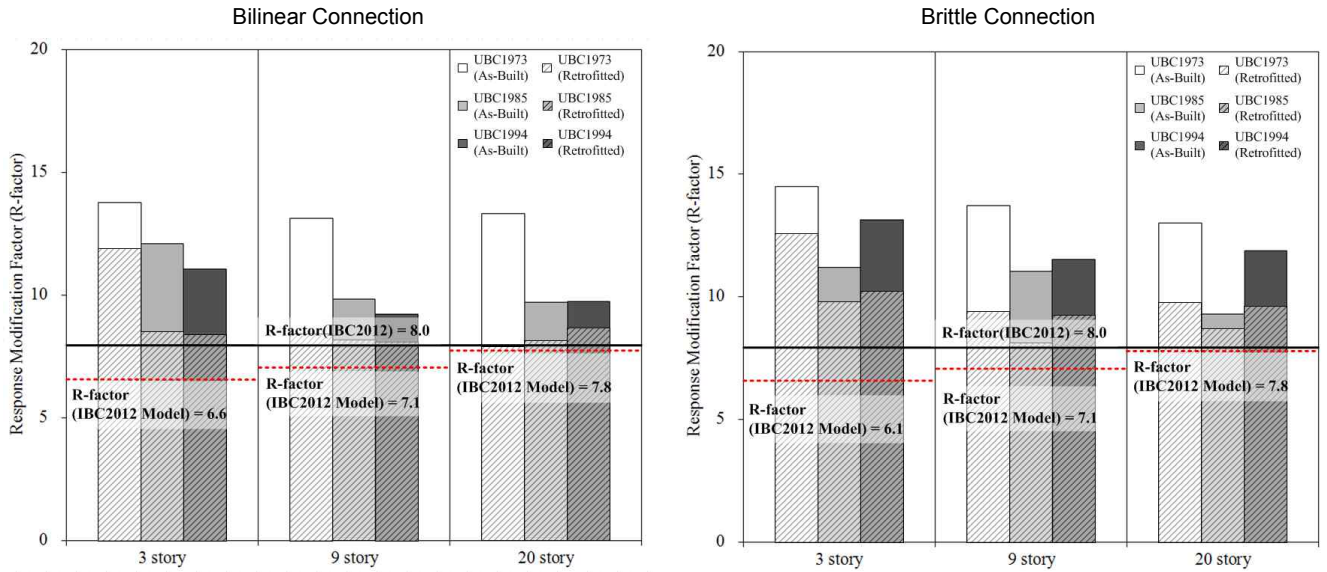
본 절에서는 앞에서 정리한 Newmark와 Hall, Krawinkler와 Nassar 그리고 Miranda 와 Bertero의 R_{μ} 계수의 산정방법을 각 해석모델에 고려하여 R 계수의 핵심요소인 R_{μ} 계수를 계산하고 비교하였다. IBC2012에서는 재현주기 약 2400년의 의 지진으로 정의된 최대예상지진을 바탕으로 개발된 지진위험도를 적용하고 있기 때문에 R_{μ} 계수의 산정시 μ 의 $\Delta_{max}(t)$ 는 LA지역에 대한 50년 동안 2%의 초과확률(재현주기 약 2400년)을 갖는 20개 지진파들의 최대 변위요구의 평균값을 고려하였다.

Table 2는 각 다자유도 시스템으로 구성된 해석모델에 대하여 Newmark와 Hall, Krawinkler와 Nassar 그리고 Miranda와 Bertero에 의해 제안된 방법을 이용하여 계산된 R_{μ} 계수를 정리한 것이다. 전체적으로 BRB보강 이후에 횡 강성 증가에 의한 변위요구가 감소함에 따라 R_{μ} 계수가 감소하는 것으로 나타났다. Table 2에 나타난 것과 같이 산정방식에 따라 R_{μ} 계수의 값은 약간의 차이를 갖지만 이선형 접합부가 고려된 3층 UBC 해석모델은 IBC2012 해석모델 보다 작은 값을 갖는 것으로 조사되었다. 이선형 접합부가 고려된 9층 건축물은 BRB보강에 의해 대체적으로

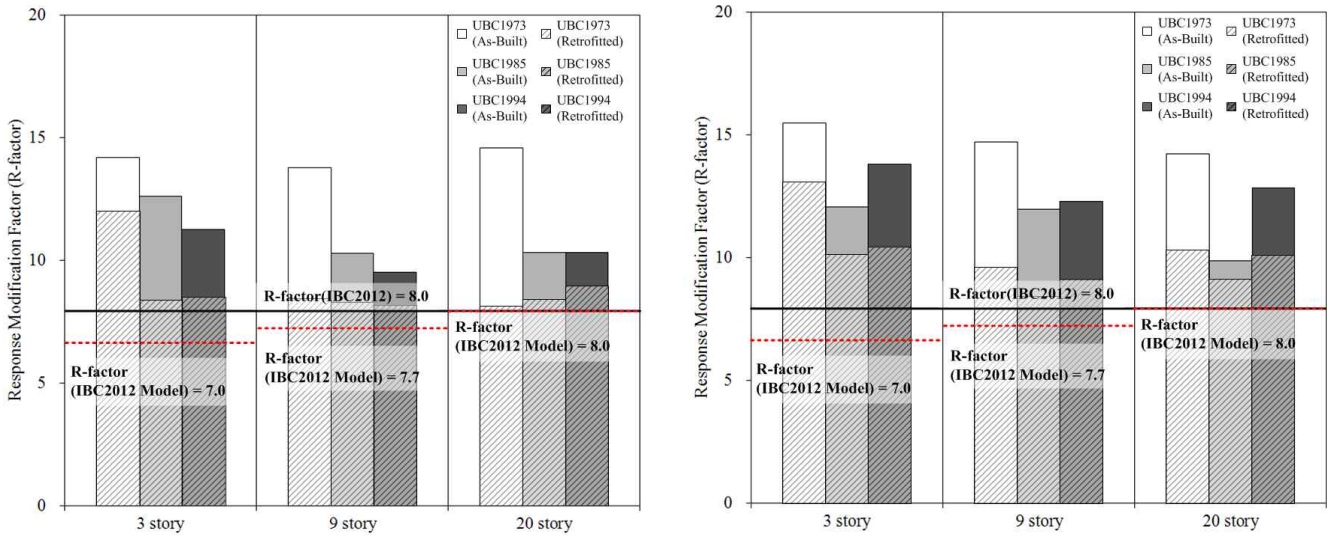


(a) Over-Strength ratio of 3-story buildings (b) Over-Strength ratio of 9-story buildings (c) Over-Strength ratio of 20-story buildings

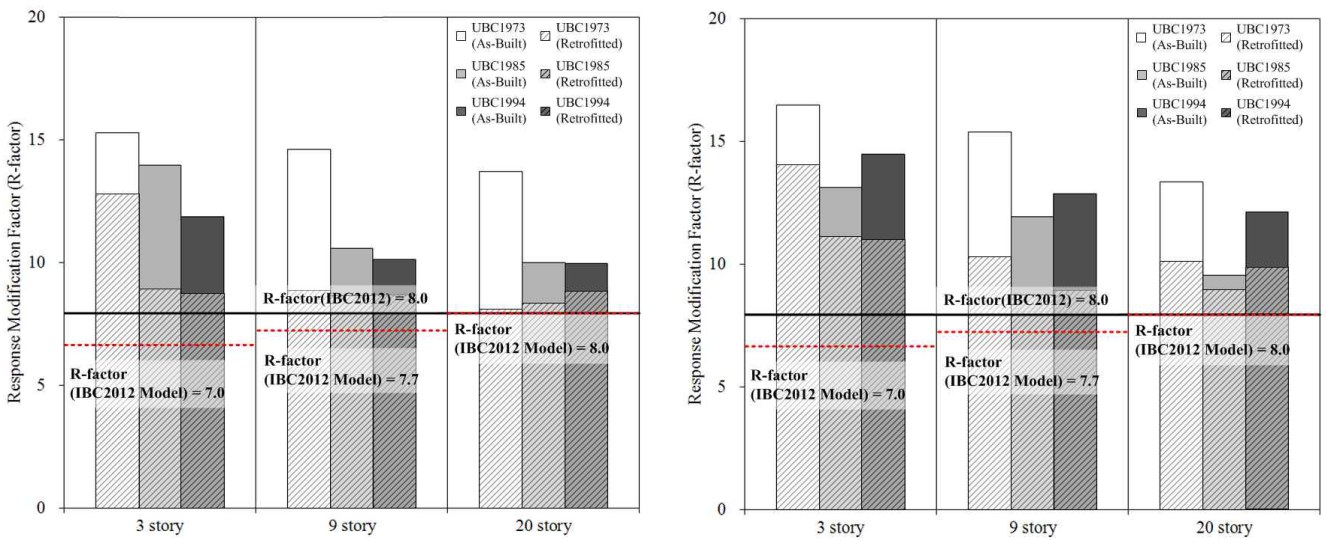
Fig. 8. Over-Strength ratio of analytical building structures considered in this study



(a) R-Factors of Newmark & Hall[11]



(b) R-Factors of Krawinkler & Nassar[12]



(c) R-Factors of Miranda & Bertero[13]

Fig. 9. Evaluation of R-Factors of analytical building structures before & after BRBs

Table 2. Ductility factor of analytical building structures considered in this study

Seismic code	Type of connection	Ductility factor[11–13]	3-story		9-story		20-story	
			w/o BRB	w/ BRB	w/o BRB	w/ BRB	w/o BRB	w/ BRB
IBC2012	Ductile connection	Newmark & Hall	1.8		1.9		2.2	
		Krawinkler & Nassar	1.8		1.9		2.3	
		Miranda & Bertero	1.8		1.9		2.2	
UBC1973	Bilinear connection	Newmark & Hall	2.1	1.7	2.4	1.4	4.3	2.4
		Krawinkler & Nassar	2.1	1.7	2.6	1.4	4.7	2.5
		Miranda & Bertero	2.3	1.8	2.7	1.5	4.5	2.4
	Brittle connection	Newmark & Hall	3.1	2.6	3.1	1.9	4.4	3.0
		Krawinkler & Nassar	3.3	2.8	3.3	2.0	4.8	3.2
		Miranda & Bertero	3.5	3.0	3.5	2.1	4.5	3.2
UBC1985	Bilinear connection	Newmark & Hall	2.3	1.4	2.7	1.5	3.2	2.4
		Krawinkler & Nassar	2.4	1.4	2.6	1.9	3.4	2.5
		Miranda & Bertero	2.6	1.5	2.6	2.0	3.3	2.5
	Brittle connection	Newmark & Hall	3.2	2.4	3.5	2.1	3.2	3.0
		Krawinkler & Nassar	3.4	2.5	3.9	2.6	3.4	3.2
		Miranda & Bertero	3.7	2.7	3.9	2.7	3.3	3.1
UBC1994	Bilinear connection	Newmark & Hall	1.7	1.2	2.0	1.6	3.1	2.5
		Krawinkler & Nassar	1.8	1.2	2.1	1.7	3.3	2.6
		Miranda & Bertero	1.9	1.3	2.2	1.8	3.2	2.6
	Brittle connection	Newmark & Hall	2.8	1.9	2.9	2.3	3.9	3.0
		Krawinkler & Nassar	2.9	2.0	3.1	2.4	4.3	3.1
		Miranda & Bertero	3.1	2.1	3.3	2.5	4.0	3.0

IBC2012 건축물보다 동등하거나 작은 값을 갖는 것으로 나타났으며, 20층 UBC해석모델의 R_{μ} 계수는 BRB를 보강하여도 IBC2012해석모델보다 미세하게 큰 결과(최대: 18%, 최소: 0.5%)를 보였다. 이를 통해 BRB 보강이 저층 건축물보다 고층 건축물에 미비한 영향을 주는 것으로 조사되었다. Table 2에서 취성적 접합부가 고려된 UBC해석모델은 BRB를 보강하여도 현재 기준으로 설계된 IBC2012건축물의 R_{μ} 계수보다 상당히 큰 것(최대: 68%, 최소: 11%)으로 나타났다. 이를 통해 취성적 접합부가 고려된 건축물은 이선형 접합부가 적용된 해석모델에 비해 BRB의 보강 효과가 미비한 것을 볼 수 있다. 이는 접합부에서 심각한 비탄성 변형에 의해 갑작스러운 강성 및 강도의 저하가 발생하여 BRB의 보강이 구조물의 거동에 큰 영향을 주지 못했기 때문이다.

4.3 R계수의 평가

본 절에서는 앞에서 산정된 R_{Ω} 계수와 R_{μ} 계수를 이용하여 R계수를 산정하였다. 산정된 R계수를 바탕으로 접합부가 다르게 적용된 BRB보강 후의 UBC건축물의 내진성능이 현재 기준에서 제시하는 내진성능에 만족하는지 평가하였다.

Fig. 9는 4.1과 4.2절을 바탕으로 산정된 BRB보강 전/후의 UBC건축물과 IBC건축물의 R계수 값을 제시하였으며 비교를 위해서 현재기준에서 제시하는 철골 SMRF에 대한 R계수 8을 함께 나타냈다. UBC건축물의 경우 이선형 접합부와 취성적 접합부로 나누어 제시하였고 Fig. 9의 (a)부터 (c)까지는 R_{μ} 계수의 관계식을 바탕으로 R계수를 계산하였다. Fig. 9에

나타난 것과 같이 전체적으로 BRB보강 이후에 R계수의 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 BRB보강에 의해 구조물의 강도와 강성이 증가했을 때 R_{Ω} 계수(강도 증가에 의한 최대 밀면전단력의 증가)보다 R_{μ} 계수(강성 증가에 의한 변위요구 감소)의 영향이 크기 때문이다. Fig. 9에 나타난 것과 같이 IBC2012 건축물은 3층과 9층 건축물의 R계수는 현재 내진기준의 SMRF의 R계수인 8에 비해 작은 것으로 조사되었다. 이를 통해 3층 그리고 9층 IBC건축물은 현재기준에서 제시하는 횡 저항능력에 비해 성능이 다소 과대평가된 것을 볼 수 있다. 이는 R계수를 결정할 때 경간 길이 또는 건축물의 높이에 대한 조건을 고려하지 않기 때문이다. 이와 같은 결과는 다음 논문에서도 찾아 볼 수 있다[4-8].

Fig. 9에서 IBC건축물과 BRB보강 후의 UBC건축물을 비교했을 때 이선형 접합부 또는 취성적 접합부가 고려된 UBC건축물은 IBC해석모델의 R계수에 크게 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 4.2절에서 산정한 3층과 9층 UBC건축물의 R_{Ω} 계수가 IBC건축물과 약 2배의 차이를 보이기 때문이다. BRB보강이후에 R_{Ω} 계수 산정시 보강효과를 고려하지 않았기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 본 논문에서 적용한 R_{Ω} 계수 산정방식은 BRB가 보강된 UBC건축물에 적용하게 되면 보강 후의 증가된 V_{max} 를 보강 전의 UBC건축물의 V_{design} 으로 나누기 때문에 R_{Ω} 계수가 건축물의 성능에 비해 과대평가될 수 있다. 따라서, 건축물을 보강할 때 R_{Ω} 계수에서 보강효과를 고려할 수 있는 보정계수를 도입하여 보다 정확한 R계수를 산정해야할 것으로 사료된다. 첫 번째 이유는 구조물의 종합적인 성능지표로써 활용되는 R계수를 이용하여 건축물의 내진성능을 정확하게 평가할

수 있기 때문이다. 두 번째 이유는 과대평가된 R계수를 설계시 적용했을 때, 본래 건물이 갖고 있는 성능보다 작은 V_{design} 으로 건물을 설계할 수 있기 때문이다. 반대의 경우, 건축물의 비탄성 거동을 고려하여 경제적인 설계를 위해서 도입된 R계수가 제 역할을 하지 못하고 설계지진하중에 대하여 보수적인 설계가 될 수 있기 때문이다.

Fig. 9를 통해 접합부의 유형(이선형 접합부/취성적 접합부)에 따른 R계수의 결과를 살펴봤을 때 BRB보강 이후에 3층 UBC1973건축물을 제외한 이선형 접합부가 고려된 UBC건축물은 현재 기준의 R계수 8과 유사한 것으로 나타났다. 이를 통해 BRB보강에 의해 이선형 접합부가 적용된 UBC건축물은 현재 기준에서 제시하는 SMRF의 내진성능에 근접하는 것을 볼 수 있다. BRB보강 이후에 취성적 접합부가 적용된 UBC건축물은 R_{μ} 계수의 관계식에 따라 차이가 있지만 현재 기준의 R계수보다 3층 UBC건축물은 18%-43%(평균: 29%), 9층 UBC건축물은 2%-34%(평균: 22%) 그리고 20층 건축물은 최소 8%에서 최대 24%의 차이(평균: 17%)를 보였다. 특히, 취성적 접합부가 고려된 9층 UBC1985해석모델은 다른 건축물에 비해 현재기준과 약 2%의 미세한 차이를 갖는 것으로 조사되었다. 이는 4.1절의 Fig. 8의 (b)에 나타난 것과 같이 9층 UBC1985의 R_{Ω} 계수가 보강 전과 후 모두 다른 해석모델에 비해 작은 값을 갖기 때문이다.

Fig. 9에서 접합부 유형에 따른 UBC건축물의 BRB보강 전/후를 비교 (BRB의 보강 효과)하면 접합부의 특성에 따라 보강효과가 크게 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이선형 접합부가 고려된 UBC건축물은 최소 15%에서 최대 78%(평균: 42%)의 보강효과를 보였으며 취성적 접합부가 적용된 UBC건축물의 보강효과는 최소 6%에서 최대 30%(평균: 20%)로 조사되었다. 이는 안정적인 거동을 갖는 이선형 접합부에 비해 항복이후에 급격히 강성 및 강도가 감소하는 취성적 접합부가 적용된 건축물에 BRB가 보강된 경우 건축물의 횡 저항 능력의 향상에 크게 기여하지 못했기 때문이다. 이를 통해 R계수를 이용하여 건축물의 보강 수준을 결정할 때 접합부의 이력거동 특성(핀칭 및 강소/강도의 감소)등을 충분히 고려해야 함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 BRB를 보강 전/후의 과거기준으로 설계된 철골 SMRF 건물과 현재기준으로 설계된 해석모델에 대하여 비선형 정적해석과 비선형 시간이력해석을 수행한 결과를 바탕으로 R계수를 산정하고 현재 내진 기준에서 제시하는 철골 SMRF의 R계수와 비교/평가 하였다. 여기서 나타난 결과는 다음과 같다.

- 1) R계수 산정의 핵심요소인 R_{Ω} 계수와 R_{μ} 계수를 살펴보면 BRB보강에 의해 횡 저항능력이 증가하기 때문에 R_{Ω} 계수는 증가하는 것으로 나타났고 횡 강성의 증가에 의해 R_{μ} 계수는 감소하는 것으로 조사되었다. 전체적으로 R_{μ} 계수의 영향이 R_{Ω} 계수보다 크기 때문에 BRB보강에 의해 R계수의 값이 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 본 연구에서 제시된 해석모델과 현재 내진설계 기준의 철골 SMRF에 대한 R계수를 비교했을 때 이선형 접합부가 고려된 UBC해석모델은 3

층 UBC1973을 제외하고 현재 기준에 제시된 R계수(=8)에 근접하는 것으로 나타났다. 이를 통해 이선형 접합부가 고려된 UBC해석모델은 BRB보강에 의해 현재 기준에서 요구하는 내진성능에 대체로 만족하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 취성적 접합부가 고려된 UBC건축물은 일부 건축물을 제외하고 현재 기준에서 제시하는 내진성능과 큰 차이를 보이는 것으로 조사되었다. 이는 접합부의 이력 특성에 따라 BRB의 보강효과에서 차이를 보이기 때문이다.

- 3) 현재 기준에 의해 설계된 철골 SMRF 건축물의 R계수는 BRB가 보강된 UBC건축물에 비해 상당히 작은 것으로 나타났다. 특히, 3층과 9층 UBC건축물의 R계수는 IBC2012해석모델과 상당한 차이를 갖는 것으로 조사되었다. 이는 3층과 9층 UBC건축물의 R_{Ω} 계수 산정시 BRB에 대한 보강효과를 고려하지 않았기 때문에 과대평가되어 나타난 결과로 사료된다. 또한, 3층과 9층 IBC2012해석모델에 대한 R계수는 현재 기준의 R계수(=8)보다 작은 것으로 조사되었는데 이는 R계수를 결정할 때 건축물의 경간 길이 및 높이에 대하여 고려하지 않았기 때문이다.
- 4) R계수는 구조물의 성능을 결정하는 다양한 요소를 고려하기 때문에 기존 건축물이 현재 기준에서 제시하는 성능 수준에 만족시키기 위한 보강수준을 결정할 수 있는 상대지표로 적용할 수 있다. 그러나, 이러한 목적으로 R계수를 활용하기 위해 보다 정확한 R계수 산정 및 결정을 위한 다음과 같은 노력이 요구된다. 첫 번째, 현재 R계수는 이전 연구 [4-8]에서 나타난 것과 같이 건축물의 규모 및 높이에 대한 조건을 반영해야 한다. 두 번째, 건축물에 대한 보강효과는 접합부의 유형에 따라 달라질 수 있기 때문에 접합부에서 나타날 수 있는 핀칭 현상 및 강소/강도의 감소에 대하여 고려해야 한다. 세 번째, 보강에 의해 R_{Ω} 계수 (V_{max}/V_{design})가 과대 평가되는 것을 방지하기 위해서 보강 이후에 V_{design} 을 증가시킬 수 있는 보정계수에 대한 도입이 필요할 것으로 사료된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0028552 & 2011-0010384).

/ REFERENCES /

1. Ministry of Science and Technology. Grading of a Seismic Performance and Development of Seismic Strengthening Design Methods for Remodeling of Deteriorated Apartment Houses. 2004.
2. Sarno LD, Elnashai AS. Bracing Systems for Seismic Retrofitting of Steel Frames. Journal of Constructional Steel Research. 2009. 65(2):452-465.
3. Architectural Institute of Korea. Korea Building Code - KBC 2009, 2009.
4. Han SW, Oh YH, Lee LH. Investigation on Response Modification Factor of RC Structural Walls in Apartment Buildings. Journal of the Korea Concrete Institute 2001;13(6):544-552.
5. Kim J., Nam K. Response Modification Factors of Inverted V-type

- Ordinary Concentrically Braced Frames. Journal of Earthquake Engineering Society of Korea. 2004;8(3):53-61.
6. Kim J., Park JH. Response Modification Factors of Buckling-Restrained Braced Frames. Journal of the Architectural Institute of Korea. 2005;21(9):19-25.
 7. Lee JH, Jeon Y, Kim J. Response Modification Factors of Rectangular Staggered Wall System Buildings. Journal of the Architectural Institute of Korea. 2011;27(7):77-84.
 8. Yoon JB, Lee CH, Choi JW, Song JG. Estimation of R-factor and Seismic Performance for RC IMRFs using N2 Method. Journal of Earthquake Engineering Society of Korea. 2002;6(6):33-39.
 9. Black C, Makris N, Aiken I. Component testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling Restrained Unbonded Braces, Report No. PEER-2002/08: PEERC, University of California at Berkeley, California. 2002.
 10. ATC. A Critical Review of Current Approaches to Earthquake-Resistant Design. ATC Report-34, CA. 1995.
 11. Newmark NM, Hall WJ. Earthquake Spectra and Design. EERI Monograph Series, EERI, Oakland, CA. 1982.
 12. Nassar A, Krawinkler K. Seismic Demands for SDOF and MDOF. Dept. of Civil Engineering Stanford University. 1991.
 13. Miranda E, Bertero VV. Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake Resistant Design. Earthquake Spectra, EERI. 1994;10(2):357-379.
 14. ICBO. Uniform Building Code. International Conference of Building Officials, Whittier, CA. 1997.
 15. ICBO. Structural Engineering Design Provisions. Uniform Building Code, Vol. 2, International Conference of Building Officials, 1997.
 16. ICC, International Building Code (IBC). International code council, INC. 2012.
 17. Lee K, Foutch DA. Performance Prediction and Evaluation of Steel Special Moment Frames for Seismic Loads. SAC Background Report No. SAC/BD-00/25, 2000.
 18. Venti M, Engelhardt MD. Brief Report of Steel Moment Connection Test. Specimen DBBW (Dog Bone-Bolted Web). Internal SAC phase 2 report. 1999.
 19. Kim J, Park JH, Lee K, Lee J. Seismic performance of Buckling Restrained Braces Using Steel Plates and Channel Sections. Journal of the Architectural Institute of Korea. 2007;23(10):19-26.
 20. Prakash V, Powell GH, Campbell S. Drain-2DX: Element description and user guide. Univ. of California, Berkeley, CA. 1993.
 21. Shi S, Foutch DA. Connection element (type 10) for Drain-2DX. Civil Eng. Report. Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, IL. 1997.
 22. Shin J, Lee K, Jeong SH. Seismic Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frame with Various Hysteresis Connection Models. Journal of the Architectural Institute of Korea. 2009;25(11):19-27.
 23. Somerville P, Smith N, Puntamurthula S, Sun J. Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project. SAC Background Document SAC/BD-97/04, SAC Joint Venture, Richmond, CA. 1997.