

취약성 등고선을 이용한 비내진 2층 철골조 건축물에 대한 내진성능 평가와 보강

Seismic Performance Evaluation and Retrofit of a 2-Story Steel Building Using a Fragility Contour Method

신지욱¹⁾ · 이기학²⁾ · 정성훈³⁾

Shin, Jiuk · Lee, Kihak · Jeong, Seong-Hoon

국문 요약 >> 우리나라의 건축법 시행령에서는 3층 미만 그리고 연면적 1000m²미만의 건축물을 소규모 건축물로 정의하고 있으며 내진 설계 적용 대상 범위에서 제외하고 있다. 하지만 소규모 건축물에 거주하는 인구의 비율이 상당하다는 사실을 고려할 때, 소규모 건축물의 내진성능을 확보하는 것은 지진 재해 경감에 있어서 중요한 부분이라고 할 수 있다. 이 논문에서는 2층 철골 건물에 비좌굴 Knee가새를 적용한 예제 연구를 통해서 소규모 건물의 내진보강 전략에 대한 연구를 수행하였다. 확률론적 내진성능 목표를 바탕으로 가새의 상세를 결정하였고, 이를 위해서 다양한 구조적 특성에 대한 취약성 분석 결과를 즉시 구해서 비교할 수 있는 취약성 등고선을 이용하였다. 기존에 수행된 실험적, 해석적 연구결과를 바탕으로 75개의 BRKB모형을 개발하였으며, 이 중에서 예제 건축물에 대한 BRKB의 가장 효과적인 보강 방안은 취약성 곡선을 이용한 내진성능의 검증과 강재의 무게를 바탕으로 결정하였다. 본 연구를 통해서 취약성 등고선을 이용한 내진성능평가 방법이 확률론적 내진성능목표를 바탕으로 한 보강전략수립에 효율적으로 사용될 수 있는 것으로 나타났다.

주요어 소규모 건축물, 내진 보강전략, 취약성 등고선, 2층 철골조 건축물, 비좌굴 Knee 가새

ABSTRACT >> Based on the Korean Building Standard Law, a building less than 3-stories and 1000 m² in area is defined as a small-level building and, as a result, this type of building has been excluded from the requirement to comply with seismic design. In order to prevent the loss of life and property under earthquake loadings, the small-scale building should satisfy the seismic performance specified in the current code through a seismic retrofit. In this study, a seismic retrofit scheme of a Buckling-Restrained Knee Brace (BRKB) was developed for non-seismic 2-story steel buildings, including small-scale buildings, using a fragility contour method. In order to develop an effective retrofit scheme of the BRKB for the building, a total of 75 BRKB analytical models were used to achieve the desired performance levels and analyzed using the fragility contour method. The seismic performance of the retrofitted building was evaluated in terms of the weight of the developed BRKB systems. This study shows that the fragility contour method can be used for rapid evaluation and is an effective tool for structural engineers.

Key words Small-Level Building, Seismic retrofit Scheme, Fragility Contour Method, 2-story Steel Building, Buckling-Restrained Knee Brace (BRKB)

1. 서론

우리나라의 경우 건축법 시행령(대통령령 제22993호)의 제32조 제1항에 제시된 3층 이상 또는 건축물, 연면적이 1000m²이상인 건축물 등에 포함 되지 않는 건물을 소규모 건축물로 정의하고 있다. 이러한 소규모 건축물의 경우 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙(국토해양부령 제206호)에 따라 구조안전에 관한 기준을 적용하지만 지진에 대한 안전성은 고

¹⁾ 정회원·한국건설기술연구원, 전임연구원

²⁾ 정회원·세종대학교, 부교수

(교신저자: kihaklee@sejong.ac.kr)

³⁾ 정회원·인하대학교, 조교수

본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 12. 7 / 수정일 1차: 2012. 3. 19, 2차: 2012. 4. 9 / 게재확정일 : 2012. 4. 9)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

려하지 않고 있다. 미국의 경우 IBC2012⁽¹⁾(International Building Code, 2012)에서는 일부 항목을 제외한 모든 건축물에 대하여 내진설계를 의무화하고 있다. 또한, IBC2012에서 내진설계 예외대상인 건축물은 IRC2012⁽²⁾(International Residential Code, 2012)에 의해 내진 또는 구조설계를 하도록 명시하고 있다.

일본의 경우 1994년 고베지진에 의한 건물 피해 통계에 따르면 피해가 조사된 3861개의 건축물 중 약 52%가 과거의 내진기준으로 설계된 건축물이고 이 중 12%정도가 국내에서 정의하는 소규모 건축물에 포함된다. 새로운 내진기준의 성능에 만족하는 소규모 건축물의 피해는 과거기준이 적용된 소규모 건축물의 절반 이하에 지나지 않았다.⁽³⁾ 최근에 국토해양부에서 실시된 2005년에서 2009년까지 5년 동안 건축물의 허가건수에 대한 자료를 살펴보면 약 140만 동의 건물 중 약 93%가 내진설계의 적용 대상이 아닌 소규모 건축물인 것으로 나타났다. 이를 통해 국내의 방대한 양의 소규모 건축물이 지진에 대하여 무방비 상태로 노출되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 지진에 대한 심각한 피해를 사전에 방지하기 위해서 소규모 건축물에 대하여 현재 기준에서 정의하고 있는 최소한의 내진성능을 확보하는 것은 매우 중요하다.

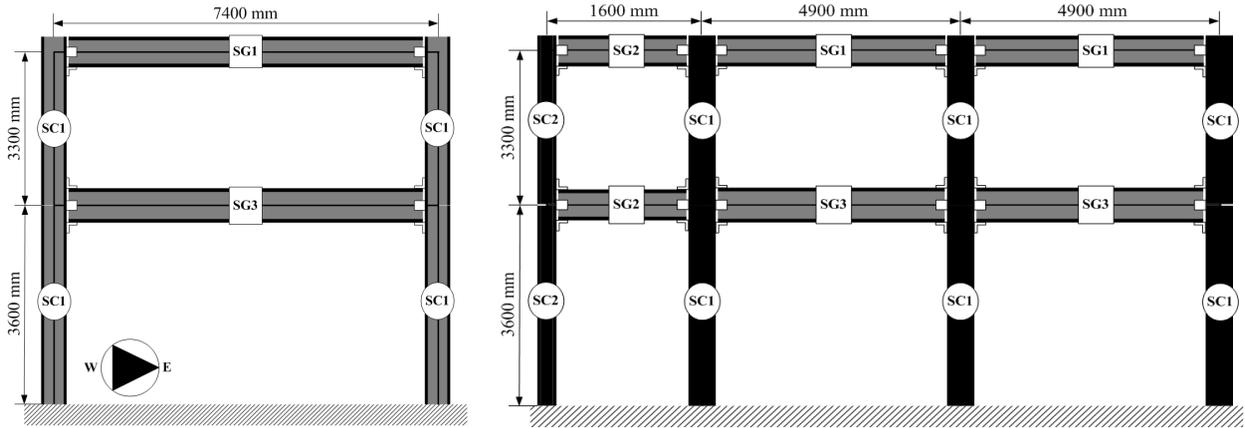
비내진 철골 건축물의 경우 내진성능향상을 위해서 다양한 보강법(전단벽 증설, FRP 보강 등)을 적용할 수 있으며 그 중 하나는 철골 가새의 보강을 고려할 수 있다. 그러나 일반 가새는 지진하중에 대한 좌굴 발생에 의해 매우 제한적인 성능을 보인다. 최근에 활발히 연구되고 있는 비좌굴 가새(Buckling-Restrained Brace, BRB)는 가새의 중심부(Core)를 외부보강재(Restrainer)를 통해서 압축하중에 대해서 좌굴이 발생하지 않기 때문에 인장과 압축하중에 대하여 안정적인 거동을 확보하여 효율적인 에너지소산이 가능한 장치이다.⁽⁴⁾ 그러나, 구조적 효율성과 경제성을 고려했을 때 일반적인 대각 BRB를 적용하는 것은 일부 경우에 있어서 효과적이지 못하다. 그 이유는 대각 BRB가새는 사용자의 동선과 시야를 가릴 수 있어 적용이 어려운 경우가 있으며 그 제작 비용이 비싸기 때문이다. 이러한 단점은 BRB의 개념이 도입된 Buckling-Restrained Knee Brace(BRKB)를 적용하여 해결할 수 있다.^{(5),(6)}

이전 연구⁽⁷⁾에서 실험과 유한요소(Finite Element Method, FEM)해석을 통해 BRB의 국부좌굴에 의한 파괴에 대한 연구가 수행되었다. 유한 요소법을 이용한 BRB의 거동은 실제 실험에서 나타난 국부좌굴 등을 반영할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 실무에서는 해석모델의 개발과 응용에 있어서 용이하고 빠른 계산결과를 가져다주기 때문에 거시적

(Macroscopic) 컴퓨터 해석프로그램을 이용한 BRB 모델링 방법이 많이 사용되고 있다. 이는 BRB의 거동을 구현하기 위해서 트러스 요소를 사용하고 좌굴에 대한 영향을 무시하는 방법을 적용한다. 이러한 요소를 구조물에 적용하면 구조물에 과도한 변형이 발생하여도 좌굴 없이 변형에 따라 무한한 에너지를 소산시키며 이는 구조물의 성능이나 평가에 부적절한 판단을 엔지니어에게 부여할 수 있다. 결과적으로 기존의 거시적 프로그램을 이용한 BRB모델을 이용한 구조물의 내진 성능 평가는 실제 성능보다 과대평가 될 수 있다. 따라서, 실제 BRB의 거동을 현실적으로 나타낼 수 있도록 간편하면서 합리적인 성능 예측이 가능한 BRB에 대한 컴퓨터 해석모델이 필요하다.

지진하중에 대한 구조물의 응답을 예측하는 것은 여러 가지 불확실성이 수반된다. 이를 극복하기 위해서 지진하중의 세기와 구조물의 한계상태 확률에 대한 관계로 이루어진 확률론적 취약성 분석 방법이 이용되어 왔다. 이러한 취약성 분석은 신뢰성 있는 통계분석을 위해서 충분한 수의 구조물 응답 자료들을 사용하기 때문에 일반적으로 비선형 해석과정에서 상당한 시간과 노력이 요구된다.⁽⁸⁾ 이러한 이유로 확률론적 취약성 분석의 높은 신뢰성에도 불구하고 널리 적용되는데 큰 어려움이 있었다. 이러한 취약성 분석의 단점을 극복하기 위해서 최근의 연구⁽⁹⁾에서 취약성 등고선이 제안되었다. 취약성 등고선은 취약성 분석을 위해서 보수 또는 보강에 의해 구조물의 동적응답특성이 변할 때마다 비선형 동적해석을 반복해야하는 노력을 줄이기 위해 사전에 구축된 응답데이터베이스를 활용한다. 응답데이터베이스를 바탕으로 주어진 지진 시나리오에 대하여 현실적으로 가능한 모든 구조물의 주기와 강도비에 해당하는 취약성을 한눈에 파악할 수 있기 때문에 취약성 등고선은 구조물의 내진설계 및 내진보강의 목표를 내진성능수준에 따른 한계상태확률의 설정을 통해 신속하게 결정할 수 있다.^{(9),(10)}

본 연구의 목적은 내진 보강 전략수립에 용이한 취약성 등고선을 활용하여 비내진 2층 철골조 건축물에 대해 현재 기준에서 제시하는 내진성능에 만족할 수 있는 최적의 BRKB 보강시스템 설계안을 제시하는 것이다. 기존에 수행된 실험적, 해석적 연구를 바탕으로 BRKB의 성능에 영향을 미치는 주요 변수를 조사하여 이를 반영한 75개의 BRKB 모델을 개발하였다. 각 BRKB해석모델은 실제 실험에서 관찰된 국부좌굴에 의해 가새 파단이 발생할 수 있는 해석모델을 개발하여 실제 건축물에 보강되었을 때 거동을 최대한 정확하게 예측, 평가할 수 있도록 하였다. 총 75개의 해석모델을 각각 보강한 건축물에 적용하여 취약성 등고선을 통해



〈그림 1〉 비내진 2층 철골조 건물의 입면도

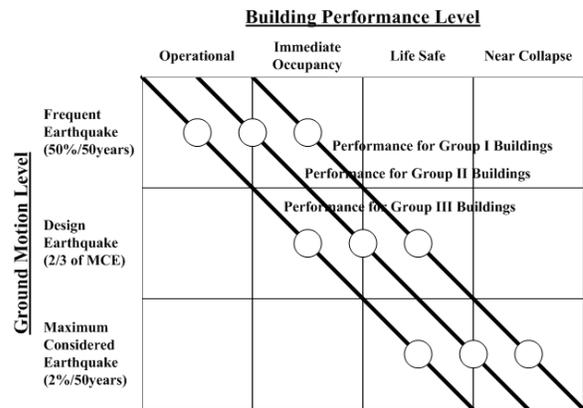
성능을 평가하여 예상되는 지진하중에 대한 손상방지 확률의 향상 수준을 조사하였다. 또한, 현 기준에서 제시하는 성능수준에 만족하는 BRKB시스템에 대하여 성능대비 무게의 비교를 통해 예제모델에 대한 최적의 BRKB구조 시스템을 제시하였다.

2. 2층 철골 건축물의 모델링 및 보강 전의 내진 성능

현재 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙에서 3층 이상 또는 연면적 1000m²이상의 건축물에 대해서만 내진설계가 수행되도록 제한하고 있다. 내진설계의 범위에 포함되지 않는 건축물은 중력하중에 대해서 설계된 점을 고려하고 또한 소규모 건축물(3층 미만 그리고 연면적 1000m²미만)이 전체 건축물에서 많은 수를 차지하는 것을 고려할 때 큰 규모의 지진하중에 대하여 막대한 경제적, 인명 손실이 발생 할 수 있다. 본 연구에서는 국내 기준에서 내진설계의 범위에 포함되지 않는 비내진 2층 철골조 건물을 예제 모델로 고려하였으며 비선형 구조 해석프로그램인 ZeusNL⁽¹¹⁾을 이용하여 모델링하였다. 그림 1은 근린 시설로 사용되는 2층 철골조 건축물의 입면도를 나타낸 것이며 각 부재에 대한 기호를 표시하였다. 표 1은 실제 건축물에 사용된 구조 부재의 크기를 나타낸 것이며 컴퓨터 해석 모델에 실제 구조 부재의 크기를 동일하게 적용하였다. 해석모델에 사용된 철골의 항복강도는 235MPa 그리고 변형 경화율(Strain Hardening Ratio)은 0.01로 가정한 이선형 탄소성 모델(Bilinear Elasto-plastic model)을 사용하였다. 해석 모델의 보-기둥 접합부는 강도/강성의 감소가 고려되지 않은 이선형 모델(Bilinear Model)을 적용하였으며 보와 기둥의 단부에서 소성힌지가 발생하도록 가정하여 모델링하였다. 건물에 사용된 1층과 2층의 고정 하중은 각각 5.58kN/m²과 4.96kN/m², 적재 하중은

〈표 1〉 비내진 2층 철골조 구조부재의 크기 (단위: mm)

표시	부재 크기	표시	부재 크기
SC1	H250×250×9×14	SG1	H350×175×10×15
SC2	H150×150×7×10	SG2	H300×150×10×15
		SG3	H300×300×6.5×9



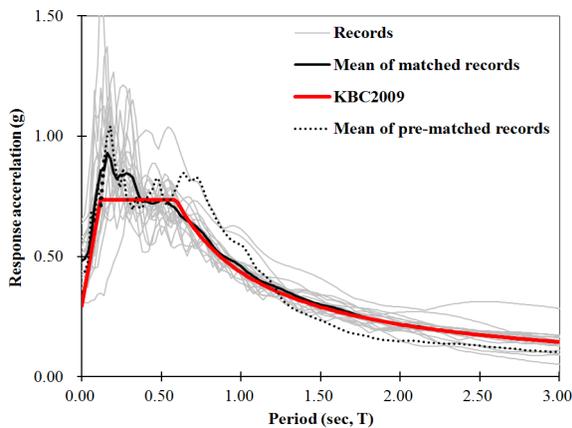
〈그림 2〉 2009 NEHRP⁽¹³⁾의 내진등급에 따른 건물의 기대성능

KBC2009⁽¹²⁾ (Korean Building Code, 2009)를 바탕으로 1층은 4.00kN/m² 그리고 지붕층은 1.00kN/m²으로 설정하였다.

그림 2에 나타난 것과 같이 2009 NEHRP⁽¹³⁾기준에서는 50%/50년, 최대 가능 지진(Maximum Considered Earthquake, MCE, 2%/50년 지진하중)의 2/3 그리고 2%/50년 지진하중에 대하여 3가지의 건물의 내진등급에 따른 목표성능을 제시하였다. 국내 내진설계 기준인 KBC2009에서도 그림 2에 제시된 목표성능 중 MCE의 2/3수준의 지진하중에 대하여 인명 보호 (Life Safety, LS)수준에 만족하도록 하고 있다. 따라서, 그림 2의 Group I 내진등급에 포함되는 그림 1의 비내진 2층 철골 건축물은 KBC2009와 2009 NEHRP를 살펴봤을 때 MCE의 2/3수준의 지진하중에 대하여 LS의 손

상수준에 포함되어야 한다. 본 연구에서는 FEMA 356(Federal Emergency Management Agency, 356)⁽¹⁴⁾에 제시된 건축물의 최대 층간변위비를 바탕으로 정의된 손상수준을 건축물의 목표 성능으로 결정하였다. FEMA 356에서는 철골조 모멘트골조에 대한 손상수준을 즉각 입주(Immediate Occupancy, IO), 인명 보호(Life Safety, LS) 그리고 붕괴 방지(Collapse Prevention, CP)를 각각 최대 층간변위 비 0.75%미만, 2.50%미만 그리고 5.00%미만으로 정의하고 있다.

그림 3은 KBC2009에 의해 작성된 탄성 스펙트럼과 본

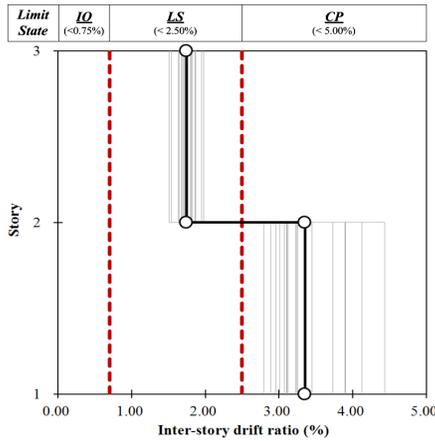


〈그림 3〉 KBC2009의 탄성 스펙트럼과 20개 지반운동의 스펙트럼

연구에서 비선형 시간이력해석을 수행할 때 사용된 20개의 지반운동에 대한 반응 스펙트럼을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Somerville(1997)⁽¹⁵⁾에 의해 개발된 미국 캘리포니아 주의 LA지역에 대한 50년 동안 50%의 초과확률을 갖는 지반운동을 SiesmoMatch 프로그램⁽¹⁶⁾을 이용하여 KBC2009의 탄성 스펙트럼에 상응하는 20개의 인공지진파를 비선형 시간이력해석에 적용하였다. 여기서, LA지역의 50%/50년의 초과확률을 갖는 지진하중을 선정한 이유는 응답스펙트럼의 평균값이 KBC2009의 탄성 스펙트럼과 크기 및 형상이 유사하기 때문이다. KBC2009의 탄성 스펙트럼을 산정하기 위해서 지진 구역 1에 해당되는 지역 계수(S)는 0.22, 지반은 단단한 토사 지반(S_D)으로 가정하였다. 이를 바탕으로 $3/2 \times S_{Ds}$ (단주기 설계 스펙트럼)과 $3/2 \times S_{D1}$ (1초 주기의 설계 스펙트럼가속도)는 각각 0.74 그리고 0.30으로 계산되었다. 여기서, S_{Ds}와 S_{D1}에 3/2를 곱한 것은 S_{Ds}와 S_{D1}의 계산식에 포함된 2/3의 감소계수를 적용하지 않기 위함이다. 이 감소계수는 내진설계시 구조물의 초과강도를 감안하여 지진하중을 낮추기 위해서 적용하는 것이기 때문에 내진성능의 평가에 사용하지 않는 것이 적합하다. 이에 대한 자세한 내용은 FEMA 355-F⁽¹⁷⁾와 Leyendecker 등(2000)⁽¹⁸⁾에 나타나있다. 표 2는 LA지역의 50%/50년 지반운동과 이 지반 가속도를 KBC2009의 탄성 스펙트럼에 상응시킨 20

〈표 2〉 본 연구에서 고려된 20개의 지반 가속도

지진기록	지진 정보	수정 전의 PGA(g)	수정 후의 PGA(g)	지속시간 (sec.)	전체스텝 (step)
R1	Coyote Lake(1979)	0.59	0.44	39.38	2686
R2	Coyote Lake(1979)	0.33	0.34	39.38	2686
R3	Imperial Valley(1979)	0.14	0.32	39.08	3909
R4	Imperial Valley(1979)	0.11	0.28	39.08	3909
R5	Kern(1952)	0.14	0.24	78.6	3931
R6	Kern(1952)	0.16	0.23	78.6	3931
R7	Landers(1992)	0.34	0.34	79.98	4000
R8	Landers(1992)	0.31	0.40	79.98	4000
R9	Morgan Hill(1984)	0.32	0.32	59.98	3000
R10	Morgan Hill(1984)	0.55	0.44	59.98	3000
R11	Parkfield Cholame 5W(1966)	0.78	0.36	43.92	2197
R12	Parkfield Cholame 5W(1966)	0.63	0.40	43.92	2197
R13	Parkfield Cholame 8W(1966)	0.69	0.40	26.14	1308
R14	Parkfield Cholame 8W(1966)	0.79	0.38	26.14	1308
R15	North Palm Springs(1986)	0.52	0.43	59.98	3000
R16	North Palm Springs(1986)	0.38	0.38	59.98	3000
R17	San Fernando(1971)	0.25	0.29	79.46	3974
R18	San Fernando(1971)	0.23	0.28	79.46	3974
R19	Whittier(1987)	0.77	0.38	39.98	2000
R20	Whittier(1987)	0.48	0.43	39.98	2000



〈그림 4〉 2층 철골조 건축물의 시간이력해석 결과

개 지반가속도의 정보를 나타낸 것이다.

보강 전의 구조물의 내진성능을 살펴보기 위해서 20개의 인공지진하중에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하였으며 그림 4는 20개 지진하중에 대한 2층 구조물의 변위요구와 그에 따른 평균값을 보여준다. 그림 4에 나타난 것과 같이 해석모델의 최대 층간변위비위 평균값은 3.58%로 1층에서 나타났으며 CP의 손상수준에 포함되는 것으로 조사되었다. 이는 2009 NEHRP와 KBC2009에서 언급하는 국내 건축물의 성능수준인 LS보다 높은 손상수준을 나타낸 것으로 적절한 보강방법을 통해 구조물의 내진성능 수준을 CP에서 LS로 개선되어야 한다. 이를 위한 보강전략은 다음 절에 자세히 언급되었다.

3. 비좌굴 가새에 대한 기존 연구

BRB에 대한 실험적 연구는 1980년 대 말에 일본에서 처음으로 문헌으로 정리되었으며 이를 바탕으로 그 이후에 많은 연구들이 수행되었다. BRB는 크게 횡 하중에 저항하는 가새의 중심부와 가새의 좌굴을 구속시키는 외부보강재로 구성되며 중심부와 외부보강재 사이에 일체성을 위해서 모르타르 등으로 충전시킨다. Watanabe 등(1988)⁽¹⁹⁾은 중심부의 단면적은 같지만 외부보강재의 크기를 다르게 고려하여 5개의 실험체에 대한 실험을 수행하였다. 이 실험을 통해 외부보강재가 충분한 좌굴 강도 ($P_c > P_y$, P_c = 외부보강재의 좌굴하중, P_y = 중심부의 항복하중)를 갖는다면 BRB의 중심부는 좌굴 없이 우수한 성능을 보이는 것으로 조사되었다. Sridhara (1990)⁽²⁰⁾등은 Core가 Sleeve의 내부에 일정한 간격으로 배치된 Sleeved 압축 부재(Sleeved Compression Member)의 개념을 제시했다. Sleeve가 BRB의 외부보강재와 마찬가지로 중심부의 좌굴을 지연시키는 역할을 하며 중

심부와 Sleeve를 일정 간격으로 배치하여 중심부와 Sleeve의 마찰을 최소화시켜서 중심부의 국부좌굴을 방지할 수 있음을 보여주었다. Prasad (1992)⁽²¹⁾는 Sleeved 압축 부재의 개념을 적용하여 압축 하중에 대한 실험을 수행하여 BRB의 거동을 나타냈다. 국내에서는 BRB의 무보강 길이 (Length of Unconfined Region)의 변화에 따른 실험적 그리고 해석적 연구^{(22),(23)}를 수행하였다. 전체 2500mm의 가새에 200mm와 300mm의 무보강 구간을 설정하여 실험을 하였으며 이후에 100mm에서 500mm까지 무보강 길이를 증가시키면서 FEM (Finite Element Method)해석을 수행하였다. 그 결과 가새 전체 길이에 대한 무보강 구간 길이가 32% 이상이 될 때 무보강 구간에서 좌굴이 발생하여 에너지소산능력이 급격히 감소하는 것으로 조사되었다.

최근에 수행된 연구중 Mehmet(2010)등⁽²⁴⁾은 채널 형상을 외부보강재로 고려한 BRB에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 중심부의 가로-세로 비(Aspect Ratio), 외부보강재의 P_c/P_y 그리고 두 개의 외부보강재를 접합하는 방법을 다르게 고려하여 12개의 실험체에 대하여 실험을 수행하였다. 이 실험을 통해 12개의 실험체는 AISC2005 Seismic Provisions⁽²⁵⁾에서 제시된 BRB의 요구사항을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 실험 결과를 바탕으로 채널 형상을 외부보강재로 적용했을 때 채널 형상과 중심부의 직접적인 접촉(Direct Contact)은 국부좌굴을 극대화시킬 수 있으며 이 사이의 마찰을 감소시키기 위해서 비부착 물질을 삽입해야 할 것을 제안하였다. 국내에서도 채널 형상을 외부보강재로 고려하여 중심부의 좌굴을 방지하는 개념을 도입한 비좌굴 Knee 가새 (Buckling-Restrained Knee Brace, BRKB)의 개발과 실험에 대한 연구가 수행되었다.⁽²⁶⁾ 이 연구에서는 BRKB의 횡 저항능력에 영향을 줄 수 있는 요소(중심부의 가로-세로 비, 채널 형상의 P_c/P_y 크기 그리고 단부의 가로-세로비)를 변수로 설정하여 5개의 BRKB 실험체의 Sub-Assemblage 실험이 수행되었다. 이 실험을 통해 중심부의 크기가 BRKB의 횡 저항능력에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었으며 외부보강재의 P_c/P_y 의 크기는 중심코어의 좌굴을 지연시키는 것으로 나타났다. 그러나, 단부의 크기는 BRKB의 거동에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 조사되었다. 기존에 수행된 BRB 또는 BRKB의 연구를 통해서 중심부의 단면적 크기 (가로-세로 비, Aspect ratio), 외부보강재의 P_c/P_y 그리고 가새의 무보강 길이는 가새의 횡 저항능력에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. Knee가새에 대한 다양한 연구 문헌을 살펴보면 1986년 Aristizabal-Ochoa⁽²⁷⁾가 지진에 저항하는 새로운 시스템으로써 KBF(Knee Braced

Frame)을 제안한 이래로 Knee가새가 적용된 건축물의 실험적, 해석적 연구가 다양하게 수행되었다. 대표적으로 Sam 등⁽⁵⁾은 KBF에 대한 Pseudo 동적 실험을 통해 Knee가새의 설치에 의해 건축물은 우수한 연성능력을 경제적으로 확보할 수 있음을 증명하였다. 또한, Suita 등⁽²⁸⁾은 BRKB가 설치된 보-기둥 접합부에 대한 실험을 실시하였으며 BRKB는 안정적인 에너지 소산 능력을 발휘하는 것으로 조사되었다.

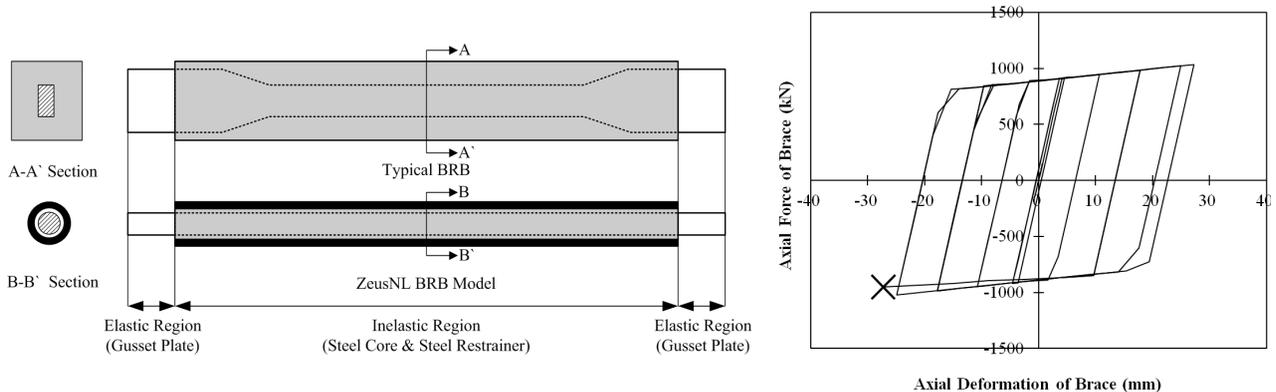
건축물의 내진 성능 향상을 고려했을 때 BRB등 건축물의 횡 강성에 큰 영향을 미칠수 있는 보강 방법을 적용하는 것이 일반적인 고층 또는 중층 건축물에 적합할 수 있다. 그러나, 본 연구에서 고려된 비내진 2층 철골조 건축물의 경우 BRB를 적용하는 것보다 BRKB를 보강하는 것이 효과적일 수 있다. 그 이유는 K형 또는 대각 BRB등과 비교했을 때 상부 보-기둥 접합부에 설치되기 때문에 BRKB의 제작비용이 저렴하고 사용자의 동선과 시야를 방해하지 않기 때문이다.^{(5),(27),(28)} 또한, 위에 언급한 Knee 가새의 적용에 대한 다양한 연구 문헌을 살펴봤을 때 그 내진 성능이 우수함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 비내진 2층 철골조 건축물에 대한 내진 보강 방법으로 BRKB를 고려하였다.

4. 비좌굴 Knee Brace의 해석적 연구

4.1 ZeusNL을 이용한 컴퓨터 모델링

본 절에서는 기존에 수행된 실험연구에서 나타난 BRKB의 횡 저항능력에 영향을 미칠 수 있는 주요 요소(중심부의 단면적, 외부보강재의 P/P_y 그리고 무보강 길이 비)를 고려할 수 있는 컴퓨터 해석 모델의 개발에 대하여 언급하였다. 주요 요소 중에서 무보강 길이는 가새의 탄성영역의 길이를 전체 가새의 길이로 나눈 것으로 본 논문에서는 탄성영역비(Ratio of Elastic Region)로 언급하였다. 실제 BRB실

험체는 가새에 변형이 증가할 때 중심부 및 외부보강재에서 국부좌굴이 발생함에 따라 파단이 발생된다. 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEM: Microscopic Computer Analysis)은 실제 실험에서 나타나는 국부좌굴에 대한 현상을 자세히 관찰 할 수 있다. 그러나 Drain2DX⁽²⁹⁾같은 거시적 컴퓨터 해석(Macroscopic Computer Analysis) 프로그램은 가새의 압축, 인장력 그리고 변형 경화율(Strain Hardening Ratio)을 입력하고 가새의 좌굴을 배제시킴으로써 간단하게 BRB의 거동을 나타낸다. 이러한 거시적 BRB모델을 적용한 건물은 지진하중에 의해 과도한 변형이 발생하여도 좌굴 없이 에너지를 무한히 소산시킨다. 이는 BRB를 보강한 이후에 건물의 성능이 실제 BRB가 보강된 구조물보다 과대 평가 될 수 있다. 본 연구에서는 실제 실험에서 나타난 국부좌굴의 현상을 반영하기 위해서 비선형 유한요소 컴퓨터 해석프로그램 중 하나인 ZeusNL을 이용하여 BRB 컴퓨터 모델을 개발하였다. 그림 5는 ZeusNL에 대한 BRB해석모델과 결과를 나타낸 것이다. 그림 5의 (a)에 제시된 BRB 해석 모델은 가새를 건물에 설치하기 위해 만들어진 무보강 영역(Non-retrofit Region: 거셋 플레이트)을 탄성 영역(Elastic Region)과 가새에 작용하는 에너지를 소산시키는 비탄성 영역(Inelastic Region: 외부보강재 & 중심부)으로 가정하였다. 중심부와 거셋 플레이트는 ZeusNL에 제시된 CSS(Circular Solid Section)로 모델링 하였고 외부보강재는 ZeusNL의 CHS(Circular Hollow Section)를 이용하였다. 또한, 본 연구에서는 그림 5의 (a)에 나타낸 것과 같이 외부보강재와 중심부사이에 일정한 간격(Gap)을 부여하였다. 이는 중심부와 외부보강재의 직접적인 접촉(Direct Contact)에 의해 발생하는 중심코어에서 발생한 마찰력이 외부 보강재에 전달되어 발생하는 국부좌굴을 방지하기 위함이다. 그림 5의 (b)는 ZeusNL의 BRKB해석모델의 힘-변위 이력거동을 나타낸



(a) ZeusNL을 이용한 BRKB의 컴퓨터 해석모델

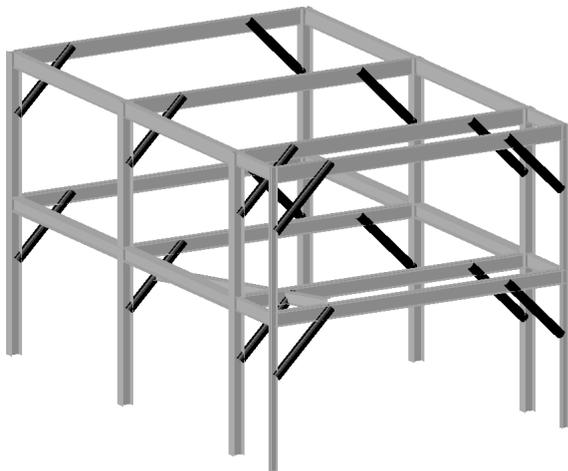
(b) BRKB해석모델에 대한 힘-변위 이력거동

〈그림 5〉 ZeusNL을 이용한 BRKB해석모델과 힘-변위 이력거동

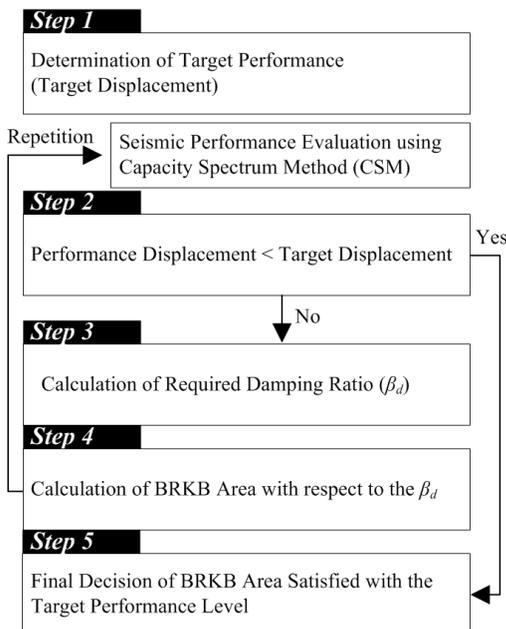
것이다. BRKB 해석모델의 재료적 성질은 SS400강재를 이용하였으며 중심부와 외부보강재의 P_u/P_y 는 5.0으로 모델링하였다. 그림 5의 (b)에 나타난 것과 같이 BRKB 해석모델은 국부좌굴이 발생한 이후에 강성이 다소 감소하는 것을 볼 수 있으며 가새의 변형이 증가하면서 파단이 발생하는 것으로 나타났다.

4.2 BRKB의 설계 및 적용

본 연구에서는 그림 6과 같이 예제모델(그림 1)을 16개의 BRKB를 이용하여 보강하였다. BRKB의 해석모델은 3절에서 언급한 BRKB의 횡 저항능력에 영향을 주는 중심부의 단면적의 크기, 외부보강재의 P_u/P_y 의 크기 그리고 탄성영역비를 다르게 적용하여 모델링하고 이를 각각 예제모델에 보

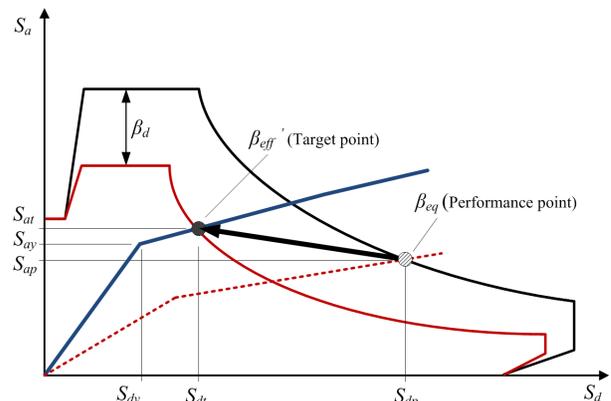


〈그림 6〉 16개의 BRKB가 보강된 예제모델



〈그림 7〉 BRKB의 단면적 산정 과정

강하였다. 기존에 수행된 연구를 기반으로 BRKB의 중심부의 단면적 크기를 미리 정한 목표 변위에 따라 산정하였다. Kim(2003) 등⁽⁶⁾은 기존의 설계방법으로 설계된 구조물에 대하여 내진성능 목표변위를 미리 결정하고 목표변위를 초과한 경우 추가적으로 요구되는 감쇠비에 따라 BRKB의 단면적을 산정하는 방식을 제시하였다. 이에 대한 간략한 설계과정은 그림 7에 제시되었고 본 연구에서는 이와 같은 방식으로 BRKB의 단면적을 결정하였다. 그림 7의 Step 1에 나타난 것과 같이 최초 BRKB를 설계할 때 목표 성능(Target Performance) 또는 목표 변위(Target Displacement)를 결정한다. Step 2에서는 BRKB보강 전의 건축물을 능력 스펙트럼 방법(Capacity Spectrum Method, CSM)을 이용하여 내진성능평가를 수행하여 성능점(Performance Point)을 산정한다. Pushover 곡선을 능력 곡선으로 변환하는 과정 및 성능점 산정 등과 관련된 CSM에 대한 자세한 내용은 ATC-40⁽³⁰⁾과 FEMA 273⁽³¹⁾에 자세히 언급되어 있다. CSM을 통해 산정된 보강전 건축물의 성능점과 Step 1에서 결정한 목표 변위를 비교하여 BRKB의 보강여부를 결정한다. 여기서, 보강전 건축물의 성능점이 목표변위보다 작은 경우 건축물에 보강이 필요 없지만 그 반대의 경우 Step 3부터 Step 4의 과정에 따라 BRKB의 단면적을 산정한다. Step 3에서는 BRKB에 대한 요구 감쇠비인 β_d 를 결정한다. 그림 8은 Step 3에 제시된 성능 목표를 만족시키기 위한 β_d 의 산정 방법을 간략하게 도식화한 것이다. β_d 를 산정하기 위해서 목표 성능에 대한 건물의 유효 감쇠비인 β_{eff}' 와 등가 감쇠비인 β_{eq} 를 계산한다. 여기서, β_{eff}' 는 목표 성능점에서 능력 스펙트럼과 요구 스펙트럼의 교차점으로 목표 성능에 대한 건축물의 전체 유효 감쇠비를 나타낸다(그림 8). β_{eq} 는 그림 8에 제시된 값을 바탕으로 식 (1)을 이용하여 산정하며 최초의 β_{eq} 는 보강 전의 건축물에 대한 등가 감쇠비를 나타낸다.



〈그림 8〉 BRKB의 요구 감쇠비의 계산 과정

$$\beta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2(S_{ay}S_{dp} - S_{dy}S_{ap})}{\pi S_{ap}S_{dp}} \quad (1)$$

Step 3의 과정에서 결정된 목표 성능에 대한 β_{eff}' 와 β_{eq} 의 값을 식 (2)에 적용하여 β_d 를 계산하였다.

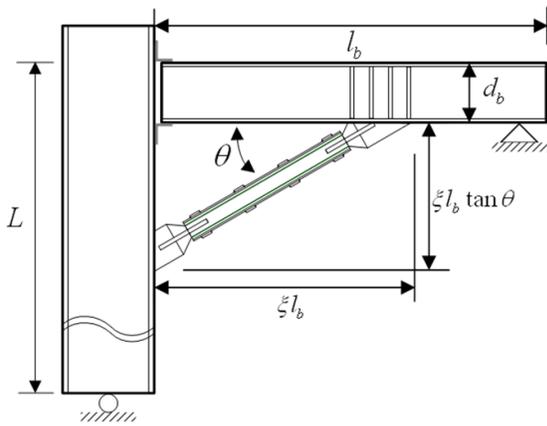
$$\beta_d = \beta_{eff}' - \beta_{eq} - \beta_i \quad (2)$$

여기서, β_i 는 구조물의 고유 감쇠비인 5.0%로 가정하였다.

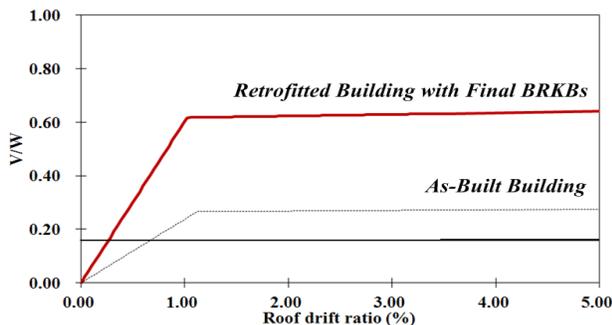
Step 3에서 결정된 β_d 를 바탕으로 식 (3)에 적용하여 Step 1에서 결정된 목표 성능에 도달하기 위해 필요한 BRKB의 단면적을 결정한다 (그림 7의 Step 4).

$$A_b = \frac{\left(\frac{2\pi^3 m}{T_{eff}} \beta_d \Delta_t \right)}{\left(\Delta_{by} \left(\frac{\Delta_t}{L} (A+B) - \frac{\xi l_b \Delta_{by}}{E_b \cos \theta} \right) - \frac{\pi (A+B) E_b}{2L} \beta_d \cos \theta \right)} \quad (3)$$

여기서, σ_{by} 는 가새의 항복응력이고 T_{eff} 는 구조물의 유효 주기 (Effective Period of the Structure), m 은 구조물의 질



<그림 9> BRKB가 보강된 구조물의 측면도



<그림 10> 최종 산정된 BRKB가 보강된 해석모델의 pushover 해석

량, Δ_t 는 목표 변위, Δ_{by} 는 가새의 항복변위 그리고 E_b 는 가새의 탄성계수를 나타낸다. 또한, 식 (3)에 제시된 $A = \xi l_b \sin \theta$, $B = d_b \cos \theta$ 이며 l_b , d_b , θ , ξ 는 각각 보의 길이/2, 보 두께, 보와 knee 가새가 이루는 각도 그리고 l_b 와 knee 가새의 수평길이 비로 그림 9에 자세히 제시되어있다.

그림 7의 Step 4까지 과정을 통해 산정된 BRKB를 보강했을 때 강성이 증가하여 능력 스펙트럼이 변하기 때문에 β_d 가 수렴할 때까지 Step 2부터 Step 4까지의 과정을 반복 계산한다. 그림 7의 과정에 따라 각 층의 질량과 강성을 고려하여 각 층에 필요한 BRKB의 단면적을 다르게 분포시키지만 본 연구에서는 고려된 예제 모델에 대한 각 층의 BRKB 단면적의 차이가 크지 않기 때문에 BRKB면적을 동일하게 적용하였다. 그림 10은 위에 언급한 방법을 통해 목표 층간 변위비 2.0%로 설계된 BRKB를 보강한 예제 모델과 보강 전의 예제 모델의 Pushover 해석결과를 보여준다. 그림 10에 나타난 것과 같이 BRKB보강 후에 건축물의 강성과 강도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, BRKB보강 전/후에 항복변위가 크게 변하지 않는 것으로 조사되었다. 그러나, BRKB의 보강에 의해 예제모델의 강성 및 강도가 크게 증가하였기 때문에 보강 전의 예제모델보다 더 큰 횡력이 작용했을 때 항복하는 것을 볼 수 있다.

위에 언급된 CSM을 이용한 BRKB설계과정을 바탕으로 본 연구에서는 목표 변위 172.5mm(2.5%), 138.0mm(2.0%), 86.3mm(1.25%), 69.0mm(1.00%) 그리고 51.8mm(0.75%)

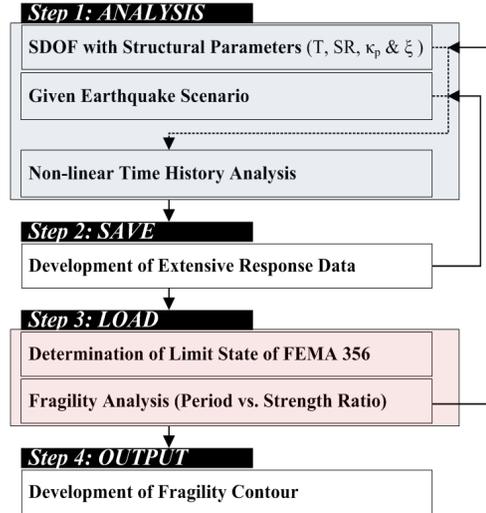
<표 3> ZeusNL BRKB해석모델의 부재 정보

BRKB 모델	중심부		외부보강재			거сет 플레이트 지름 (mm)
	목표 변위 비(%)	지름 (mm)	지름 (mm)	두께 (mm)	P_e/P_y	
# 1	2.5% (172.5mm)	16.3	76.3	22.0	5	16.25
# 2			90.3	29.0	10	
# 3			99.3	33.5	15	
# 4	2.0% (138.0mm)	45.3	127.3	33.0	5	45.28
# 5			151.3	45.0	10	
# 6			167.3	53.0	15	
# 7	1.25% (86.3mm)	66.4	168.0	37.5	5	66.4
# 8			198.0	52.5	10	
# 9			220.0	63.5	15	
# 10	1.0% (69.0mm)	113.4	207.4	38.0	5	113.4
# 11			243.4	56.0	10	
# 12			268.5	68.5	15	
# 13	0.75% (51.8mm)	216.4	304.4	35.0	5	216.4
# 14			348.4	57.0	10	
# 15			381.4	73.5	15	

〈표 4〉 ZeusNL BRKB해석모델의 무게 (단위: kg)

BRKB 모델	탄성영역비(Ratio of Elastic Region)				
	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32
# 1	29	42	48	52	53
# 2	42	61	71	76	78
# 3	51	75	87	93	96
# 4	90	124	141	150	154
# 5	127	179	205	218	224
# 6	154	221	254	270	278
# 7	155	208	235	248	255
# 8	215	298	340	360	371
# 9	265	373	427	454	468
# 10	281	351	386	403	412
# 11	369	484	541	569	584
# 12	439	588	663	701	719
# 13	716	819	871	896	909
# 14	873	1054	1145	1190	1213
# 15	1004	1251	1375	1436	1467

에 대한 5개의 중심부의 단면적을 고려하였다. 앞에 제시된 목표 변위는 예제모델을 LS의 한계상태(0.75%~2.5%) 내에서 거동시키기 위해서 결정한 것이다. 각 목표 변위에 부합하는 중심부의 단면적에 대한 외부보강재의 P_u/P_y 의 크기는 5, 10 그리고 15로 설정하였고 거셋 플레이트의 크기는 앞서 언급한 것과 같이 중심부의 단면적과 동일하게 고려하였다. 본 연구에서 고려된 BRKB해석모델의 자세한 정보는 표 3에 나타냈으며 모든 강재는 SS400을 사용하였고 탄성계수는 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 그리고 변형 경화율(Strain Hardening Ratio)은 0.01을 적용하였다. 또한, 무보강 길이의 변화에 대한 BRKB의 횡 저항능력의 차이를 반영하기 위해서 # 1 ~ # 15의 해석모델에 대하여 각각 탄성 영역 비 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 그리고 1/32를 고려하였다. 따라서, 총 75 (15×5)개의 BRKB해석모델을 모델링하였다. 표 4는 본 연구에서 고려된 75개의 BRKB해석모델에 대한 예상 무게(kg)를 계산하여 나타낸 것이다. 표 4에 제시된 BRKB의 무게는 그림 5의 (a)에 제시된 ZeusNL의 BRKB모델 형태를 바탕으로 SS400 강재의 비중(7.85kg/m^3)에 BRKB의 구성요소에 대한 단면적과 길이를 곱하여 산정하였다. 여기서, BRKB의 무게를 비교한 이유는 BRKB의 시공 및 인건비등이 같다고 가정했을 때 BRKB의 소요 비용은 무게에 비례하기 때문이다. 이를 통해 BRKB의 성능대비 무게(BRKB시스템의 효율성)를 조사하였다. 5장에서는 ZeusNL로 모델링된 75개의 해석모델을 각각 그림 6과 같이 보강된 예제모델에 대한 비선형 정적 Pushover해석을 수행하였다. 이에 대한 결과를



〈그림 11〉 취약성 등고선의 작성 시나리오

5장에서 제시한 방식으로 개발된 취약성 등고선에 적용하여 손상 확률의 향상 수준과 BRKB의 효율을 비교하여 예제모델에 대한 최적의 BRKB형태를 제시하였다.

5. 내진성능평가를 위한 취약성 등고선

5.1 취약성 등고선의 개념

내진성능평가를 수행하기 위해서 취약성 분석을 적용하는 것은 컴퓨터 해석시간에 상당한 시간과 계산이 요구된다. 이를 극복하기 위해서 사전에 구축된 응답 데이터베이스(Response Data Base)를 활용한 취약성 등고선(Fragility Contour)이 개발되었다. 그림 11은 본 연구에서 사용된 취약성 등고선의 개발 과정을 간략하게 나타낸 것이다. 그 과정을 간략하게 살펴보면 Step 1에서는 비선형 동적 응답에 영향을 미치는 주기(T), 강도비(Strength Ratio, SR), 항복 후 강성비(Ratio of Post-yielding Stiffness, α) 그리고 감쇠비(Damping Ratio, β)가 고려된 단자유도(Single Degree of Freedom, SDOF) 시스템을 주어진 지진 시나리오에 대하여 비선형 시간이력해석을 수행한다. 취약성 등고선을 개발하기 위해서 SDOF시스템을 사용한 이유는 형상이 규칙적이고 고차 모드의 영향을 적게 받는 구조물에 적용했을 때 그 응답의 예측이 정확하고 과정이 효율적이기 때문이다. 다자유도(Multi-Degree of Freedom, MDOF) 시스템을 단순화한 등가 단자유도 시스템에 대한 구조물의 응답을 예측하는 방법은 ATC-40과 FEMA 237과 같은 지진 설계 및 평가 지침서에 자세히 언급되어 있다. Step 1에서 주어진 지진시나리오에 해당되는 다양한 지진하중에 대하여 비선형 시간이력해석을 반복 수행하여 비선형 최대 응답들을

답데이터 베이스에 저장한다(그림 11의 Step 2). Step 2에 저장된 응답 데이터를 불러들여 그림 11의 Step 3의 취약성 분석을 수행한다. 본 연구에서는 취약성 분석을 위해 식 (4)에 제시된 방법을 이용하였다. 식 (4)는 특정한 한계상태(D_{LS})에 대한 확률밀도함수(Φ : Cumulative Distribution Function, CDF) 식을 나타낸 것으로 로그정규분포에 대한 누적확률을 계산하기 위해 사용한다. 이를 통해 구조물의 특정 한계상태에 대한 손상 확률을 계산할 수 있다.

$$F(D_{LS}) = \Phi\left(\frac{\ln D_{LS} - \lambda}{\beta_t}\right) = \int_0^{D_{LS}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_t y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln y - \lambda}{\beta_t}\right)^2\right] dy \quad (4)$$

여기서, λ 는 $\ln(D_{\max})$ 의 평균값을 나타내고 β_t 는 $\sqrt{\ln[1+(\sigma/m)^2]}$ 나타낸 것으로 주어진 지진 시나리오로부터 나타난 비선형 최대응답(D_{\max})의 표준편차(σ)와 평균값(m)을 이용하여 계산된다.

위에 언급한 방법으로 취약성 분석을 수행한 이후에 SDOF모델의 비선형 응답 특성 변수를 다르게 고려하여 Step 1에서 Step 3의 과정을 반복적으로 수행한다. 여기서 나타난 광범위

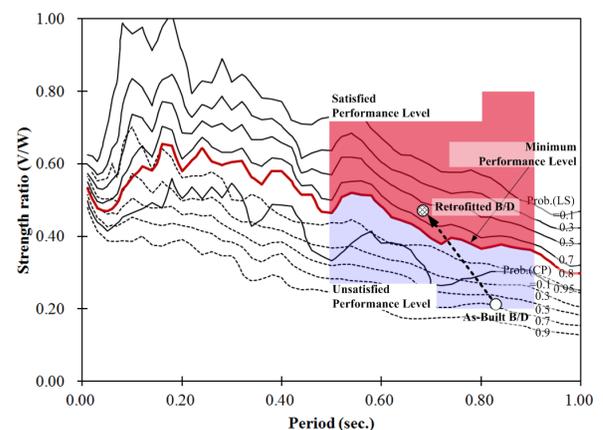
한 응답데이터를 바탕으로 내진성능평가를 효율적으로 수행할 수 있는 취약성 등고선을 최종적으로 작성한다(그림 11의 Step 4). 취약성 등고선에 대한 보다 더 자세한 언급은 다음 논문을 참고 할 수 있다.^{(9),(10)} 본 연구에서 작성된 취약성 등고선은 그림 1의 예제모델을 고려하여 감쇠비(β)는 5%, 항복후 강성비(α)는 0.02로 가정하였으며 비선형 응답 특성 변수로써 주기(T)와 강도비(SR)를 다르게 고려하였다. 고려된 주기는 83개(0.01초~0.83초, 0.01초 간격) 그리고 강도비는 143개(0.08~1.5, 0.01 간격)에 해당하는 14,422개의 SDOF모델을 고려하였다. 각 SDOF모델은 표 1에 제시한 20개의 지진하중 시나리오를 적용하여 총 288,840개에 대한 응답 데이터를 바탕으로 취약성 등고선을 개발하였다.

본 연구에서는 보수/보강에 의해 주어진 구조물의 특성이 변하는 것을 감안하여 현실적으로 가능한 모든 구조물의 주기와 강도에 대한 취약성 분석 결과를 추출하여 간단하게 구조물의 보강 전/후의 내진 성능을 평가 하였다. 다음 절에서는 본 절에서 개발된 취약성 등고선을 활용하여 본 연구에서 고려된 예제 모델의 BRKB에 대한 가장 효율적인 보강방법을 제시하였다.

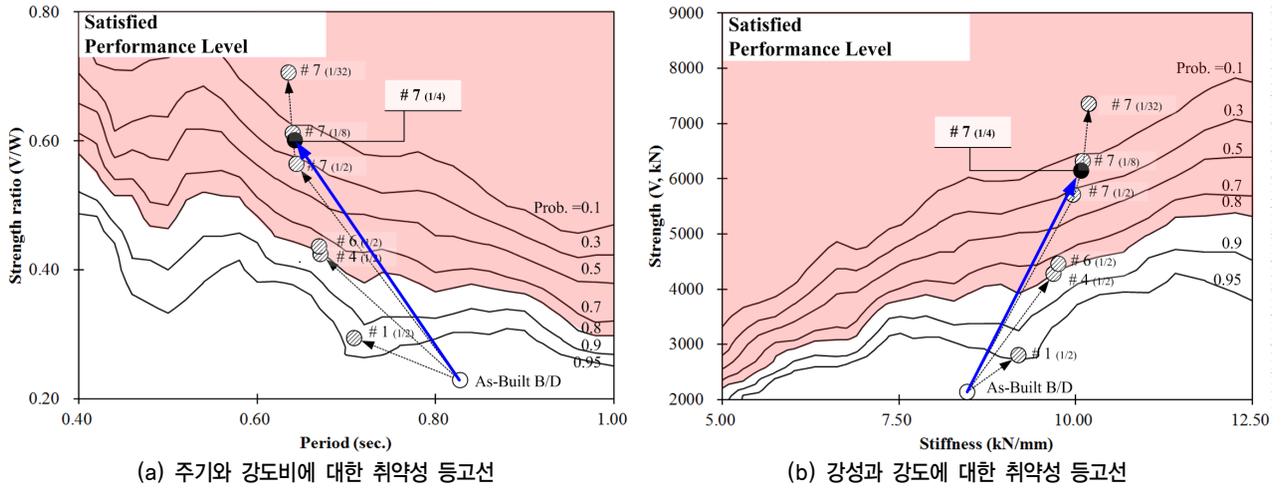
5.2 취약성 등고선의 적용

4.2절의 75개의 BRKB를 각각 그림 6과 같이 보강한 건축물에 대한 강도와 강성의 변화를 고려하여 5.1절에서 언급된 과정으로 개발된 취약성 등고선을 통한 한계상태에 대한 손상확률을 파악하여 내진성능을 평가하였다.^{(9),(10)} 여기서, 보강 전/후의 건축물의 하중-변위 관계를 파악하기 위해서 비선형 정적 Pushover해석을 실시하였다. 비선형 정적 Pushover해석을 통해 나타난 결과를 바탕으로 그림 12에 나타낸 것과 같이 보강 전의 예제 모델(As-Built B/D)은 0.83초의 주기와 0.21의 강도비로 나타났으며 해당 건물에 대한 LS와 CP의 한계상태의 손상확률은 각각 100% 그리고 약 70%로 나타났다. 2절에서 언급한 것과 같이 본 연구의 보강 목표는 CP의 성능 수준을 보인 보강 전의 해석모델을 BRKB의 보강을 통해 LS의 성능수준으로 개선하는 것이다. 그러나, 현재 보수/보강에 대한 지침서(FEMA 356)에서는 건축물의 한계 상태를 변위비로 파악하기 때문에 보강 이후 내진 성능 목표를 한계 상태에 대한 손상 확률로 판단하기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 그림 12와 같은 주기-강도비 취약성 등고선을 이용하여 한계 상태에 대한 손상확률을 바탕으로 보강 전략을 수립하였다. 손상 확률을 이용한 보강 전략을 수립하기 위해서 LS(그림 12의 실선)와 CP(그림 12의 점선)의 한계상태에 대한 취약성 등고선을 각각 작성하였다. 그림 12에서 CP에 대한 손상확률이 10% (0.1)과 30% (0.3)인 취약성 등고선과 LS에 대한 손상확률이 95% (0.95)인 취약성 등고선은 서로 겹치는 것을 볼 수 있다. LS와 CP의 취약성 등고선이 겹치는 LS의 취약성 등고선 (손상확률 = 95%) 보다 작은 LS의 손상확률인 80%에 대한 취약성 등고선을 최소 성능 수준으로 가정하였다. 또한, 그림 12에 나



〈그림 12〉 취약성 등고선을 이용한 2층 철골조 건축물의 BRKB를 이용한 보강 전략



〈그림 13〉 취약성 등고선을 이용한 최적의 BRKB 산정 과정

〈표 5〉 취약성 등고선을 이용한 BRKB보강 이후의 LS한계상태에 대한 손상확률 (%)

BRKB 모델	목표 변위비 (%)	탄성영역 비 (Elastic Region/Inelastic Region)									
		1/2	성능	1/4	성능	1/8	성능	1/16	성능	1/32	성능
# 1	2.5% (172.5mm)	94	NG	92	NG	92	NG	91	NG	91	NG
# 2		93	NG	93	NG	91	NG	91	NG	90	NG
# 3		93	NG	92	NG	90	NG	89	NG	86	NG
# 4	2.0% (138mm)	80	OK	79	OK	73	OK	51	OK	49	OK
# 5		78	OK	73	OK	68	OK	49	OK	31	OK
# 6		73	OK	70	OK	62	OK	31	OK	26	OK
# 7	1.25% (86.3mm)	34	OK	24	OK	21	OK	0	ER	0	ER
# 8		30	OK	23	OK	20	OK	0	ER	0	ER
# 9		27	OK	20	OK	0	ER	0	ER	0	ER
# 10	1.0% (69.0mm)	0	ER	0	ER	0	ER	0	ER	0	ER
# 11		0	ER	0	ER	0	ER	0	ER	0	ER
# 12		0	ER	0	ER	0	ER	0	ER	0	ER
# 13	0.75% (51.8mm)	0	ER	0	ER	0	ER	0	ER	0	ER
# 14		0	ER	0	ER	0	ER	0	ER	0	ER
# 15		0	ER	0	ER	0	ER	0	ER	0	ER

NG: 최소 성능 수준 미달
 OK: 최소 성능 수준 만족
 ER(Excessive Retrofit): 과다 보강

타낸 것과 같이 최소 성능 수준보다 작은 손상 확률을 갖는 취약성 등고선은 만족하는 성능 수준(Satisfied Performance Level) 그리고 최소 성능 수준보다 높은 손상 확률을 갖는 취약성 등고선은 만족하지 않는 성능수준(Unsatisfied Performance Level)으로 정의하였다. 앞에 언급한 가정을 바탕으로 LS에 대한 취약성 등고선만으로 LS의 한계상태에 만족하는 가장 효과적인 보강 방법을 제시하였다.

그림 13은 BRKB에 대한 가장 효율적인 보강 방법을 결정하기 위한 LS의 취약성 등고선을 나타낸 것이다. 그림 13은 보강 이후의 건축물의 주기와 강도비를 고려하여 일부만을 나타냈다. 그림 13의 (a)는 주기와 강도비로 나타낸 취약

성 등고선이며 그림 13의 (b)는 건물의 강성과 강도의 변화를 한눈에 파악하기 위해 그림 13의 (a)를 강성과 강도로 치환하여 나타낸 것이다. 75개의 BRKB를 각각 보강한 예제 모델의 비선형 정적 해석결과를 바탕으로 그림 13의 취약성 등고선을 이용하여 LS의 손상확률을 계산하였다. 각 BRKB 해석모델에 대한 LS의 손상확률은 표 5에 나타냈으며 그림 13에는 주요 결과들만 표시하였다. 그림 13에서 탄성영역비가 1/2인 #4에 해당하는 BRKB는 # 4_(1/2)로 표시했다. 표 5와 그림 13을 함께 살펴보면 # 1 ~ # 3의 BRKB (15개)는 앞에서 가정한 최소 성능 수준에 만족하지 못하는 것으로 나타났으며 # 4 ~ # 15까지는 앞에서 가정한 만족하는

성능수준(Satisfied Performance Level)으로 조사되었다. # 4에서 # 15까지 BRKB중 # 10 ~ # 15 BRKB (30개)와 # 7_(1/16) ~ # 7_(1/32) BRKB (2개), # 8_(1/16) ~ # 8_(1/32) BRKB (2개) 그리고 # 9_(1/8) ~ # 9_(1/32) BRKB (3개)를 보강한 건축물은 LS에서 0%의 손상확률을 갖는 것으로 나타났다. 손상확률이 LS의 취약성 등고선에서 0%인 것은 예제모델이 보강에 의해 IO수준에 만족하는 성능을 갖는 것이다. 본래 예제모델의 성능 목표 수준이 LS라는 것을 감안하면 LS의 손상확률이 0%가 나타나는 37개의 BRKB 모델은 효과적인 보강이 아닌 과도하게 보강된 것으로 볼 수 있다. 따라서, 취약성 등고선을 이용하여 총 75개의 BRKB가 각각 보강된 예제모델의 내진성능을 평가했을 때 15개의 BRKB는 앞에서 가정한 최소 성능수준에 만족하지 못하는 것으로 조사되었으며 37개의 BRKB모델은 과도한 보강이 된 것으로 나타났다.

본 연구에서 고려한 BRKB의 설계 변수들을 비교하기 위해서 그림 13의 (a)와 (b)에 주요 BRKB의 설계변수에 대한 결과를 점으로 표시했다. 그림 13의 (a)와 (b)에서 # 1_(1/2), # 4_(1/2) 그리고 # 7_(1/2) BRKB는 중심코어의 면적이 증가했을 때 나타난 손상 확률의 감소를 보여주며 # 4_(1/2)와 # 6_(1/2) BRKB는 P_u/P_y 의 변화에 따른 손상확률의 향상 수준을 보여준다.

또한, # 7_(1/2), # 7_(1/8) 그리고 # 7_(1/32) BRKB는 탄성영역비의 감소에 따른 손상확률의 차이를 파악하기 위해 표시하였다. 먼저, 중심코어의 단면적의 증가에 따른 손상 확률의 차이를 살펴보면 # 1_(1/2) BRKB (목표 변위비 = 2.5%)로 보강된 건축물에 비해 # 4_(1/2) BRKB (목표 변위비 = 2.0%) 그리고 # 7_(1/2) BRKB (목표 변위비 = 1.25%)를 적용한 건축물은 각각 약 13% 그리고 60%의 손상확률이 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 단면의 크기가 증가하여 BRKB의 강성과 강도가 크게 증가했기 때문에 나타난 결과이다.

탄성 영역비를 감소시켰을 때 나타난 결과의 경우 그림 13의 # 7_(1/2) BRKB에 비해 # 7_(1/32) BRKB는 20%이상 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 탄성 영역비가 감소함에 따라 비탄성 거동을 하는 중심부와 외부보강재의 길이가 길어져서 에너지를 효과적으로 소산시킬 수 있기 때문에 나타난 결과이다. 특히, 표 5를 통해 탄성 영역비가 1/8에서 1/32까지의 손상확률의 변화는 1/2에서 1/4까지의 손상확률 보다 상대적으로 큰 폭으로 손상 확률이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 BRKB의 탄성영역비는 1/8에서 1/32사이의 값으로 결정하는 것이 효과적인 것을 알 수 있다. 그림 13의 (a)와 (b)에 나타난 것과 같이 P_u/P_y 의 크기는 다른 변수에 비해

〈표 6〉 LS성능목표를 만족하는 BRKB의 효율성 평가(성능대비 BRKB의 무게, %/kg)

BRKB 모델	목표 변위비 (%)	탄성영역 비 (Elastic Region/Inelastic Region)				
		1/2	1/4	1/8	1/16	1/32
# 4	2.0% (138mm)	0.22	0.17	0.20	0.33	0.33
# 5		0.17	0.15	0.16	0.24	0.31
# 6		0.17	0.14	0.15	0.26	0.27
# 7	1.25% (86.3mm)	0.36	0.37	0.34	ER	ER
# 8		0.33	0.26	0.24	ER	ER
# 9		0.27	0.21	ER	ER	ER

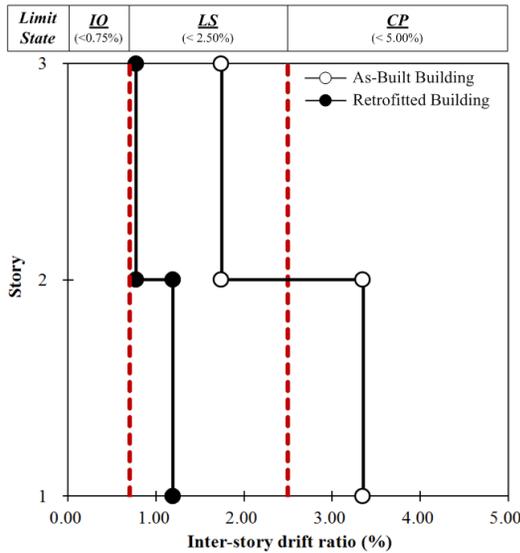
ER(Excessive Retrofit): 과다 보강

성능 향상 정도가 미비한 것으로 나타났다 (최대 7% 감소).

총 75개의 BRKB중 최소 성능수준에 만족하지 못하거나 과도한 보강이 된 BRKB해석모델을 제외한 23개의 BRKB (75개 - 15개 - 37개)에 대하여 성능 대비 BRKB의 무게를 비교하여 BRKB시스템의 효율성을 조사하였다. 표 6은 23개의 BRKB시스템의 효율성(성능 대비 BRKB의 무게)을 나타낸 것이다.

표 6에 나타난 BRKB의 효율성은 보강 전 예제모델의 LS에 대한 손상확률인 100%에서 보강 이후 나타난 손상확률을 빼고 그 값을 BRKB의 무게로 나누어 계산하였다. 표 6을 살펴보면 BRKB시스템의 효율성이 0.30이상인 BRKB는 7개로 나타났다. # 4의 BRKB는 표 6에 나타난 것과 같이 1/8에서 1/32까지 탄성영역비의 감소에 의해 효율성이 높아지는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 탄성영역비의 감소에 의한 BRKB의 무게 증가에 비해 성능 향상 수준이 높은 것을 볼 수 있다. 그러나, P_u/P_y 의 크기 증가는 BRKB의 무게가 크게 증가하는 것에 비해 성능 향상 수준이 미비하기 때문에 효율성이 낮은 것으로 조사되었다. 총 75개의 BRKB중 성능수준에 만족하면서 가장 높은 효율성을 보여준 모델은 0.37의 효율성을 갖는 # 7_(1/4) BRKB로 조사되었다. # 7_(1/4) BRKB의 보강 전의 건축물에 대한 강성과 강도의 변화는 그림 13의 (b)를 통해 파악할 수 있다. 그림 13의 (b)에 나타난 것과 같이 # 7_(1/4) BRKB를 보강하는 것은 비내진 2층 철골조 건축물의 강성과 강도보다 각각 1.93 kN/mm 그리고 약 3950 kN이 향상되는 것을 볼 수 있다. 이는 보강 전의 건축물에 비해 강성은 1.92배 그리고 강도는 2.8배가 증가한 값이다. BRKB의 성능 향상 수준과 효율을 비교했을 때 본 연구에서 고려된 75개의 BRKB해석모델 중 예제모델에 대한 가장 효과적인 보강 모델은 # 7_(1/4) BRKB로 조사되었다.

그림 14는 본 연구에서 예제 모델에 대한 최적의 보강 모



〈그림 14〉 # 7_(1/4) BRKB를 보강 전/후의 층간변위 비

델로 나타난 # 7_(1/4) BRKB를 예제모델에 보강하고 표 1의 20개의 지진하중에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하여 나타난 층간 변위비를 제시한 것이다. 비교를 위해서 보강 전의 예제모델의 층간 변위비를 함께 나타냈다. 그림 14에 나타난 것과 같이 BRKB보강 이후 약 65%정도 최대 층간 변위비가 감소하는 것으로 조사되었으며 # 7의 BRKB의 목표 층간 변위비인 1.25%보다 작은 1.20%의 최대 층간 변위비를 갖는 것으로 나타났다. 또한, # 7_(1/4) BRKB가 보강된 해석모델은 KBC2009와 IBC2012에서 정의하는 목표 성능수준인 LS수준에 만족하는 내진 성능을 갖는 것으로 조사되었다.

6. 결론

본 연구에서는 기존의 BRB에 대한 실험과 해석 연구를 바탕으로 선정된 주요 변수를 고려하여 총 75개의 BRKB 해석모델을 개발하였다. 각각 개발된 BRKB해석모델의 보강을 통해 현재 내진기준에서 제시하는 LS의 성능수준에 만족시키기 위해서 CP의 성능수준을 갖는 2층 철골조 건축물의 내진성능을 취약성 등고선을 이용하여 평가하였다. BRKB가 보강된 예제모델의 내진성능을 비교/분석하여 예제모델에 대한 최적의 BRKB보강 시스템 설계안을 제시하였다. 본 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 사전에 수행된 실험과 해석 결과를 바탕으로 설정된 BRKB의 변수에 대한 결과를 비교하면 중심부의 단면적이 가장 우수한 성능향상 수준과 성능 대비 효율을 보였

다. 본 연구에서 제한적으로 탄성영역비가 1/8에서 1/32 내로 감소시킨 것은 BRKB의 성능 대비 효율을 크게 증가시키는 것으로 나타났다. 그러나, 앞에 언급된 변수와 비교했을 때 P_x/P_y 의 증가는 성능 향상에 대한 기여도가 가장 낮은 것으로 나타났다.

2. 취약성 등고선을 이용하여 본 연구에서 고려된 비내진 2층 철골조 건축물의 최적 보강방법은 # 7_(1/4) BRKB모델로 조사되었다. 예제 모델에 대한 최적 보강 방법을 결정한 과정을 간략하게 요약하면 본 연구에서 정의한 최소 성능수준(LS의 손상확률이 80%)에 포함되는 보강방법은 총 75개의 BRKB해석모델 중 60개이며 과도 보강(Excessive Retrofit)으로 조사된 37개의 BRKB를 제외한 23개의 BRKB보강 시스템이 LS의 목표 성능 수준에 만족한다. 23개의 BRKB에 대하여 성능 대비 효율성(표 6)을 비교했을 때 가장 높은 효율성을 갖는 보강 모델은 # 7_(1/4) BRKB임을 알 수 있다.
3. 최적의 보강 형태로 조사된 # 7_(1/4) BRKB를 보강된 예제모델에 대한 비선형 시간이력해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. MCE의 2/3수준인 지진하중에 대하여 붕괴방지(Collapse Prevention, CP)수준의 내진 성능을 보인 비내진 2층 철골조 건축물은 최적의 BRKB를 보강한 이후에 인명보호(Life Safety, LS) 수준의 내진성능을 갖는 것으로 나타났다. 이를 통해 최적의 BRKB를 보강하여 주어진 지진하중에 대한 KBC 2009와 2009 NEHRP에서 제시하는 내진성능에 만족하는 결과를 얻을 수 있는 것으로 조사되었다.
4. 기존의 연구^{(9),(10)}에서 나타난 것과 같이 본 연구에서 고려된 예제모델의 적용을 통해서 신뢰성 기반 내진 성능 평가와 내진 보강에 취약성 등고선이 매우 효과적임을 보여주었다. 보다 효과적인 취약성 등고선의 적용을 위해서 재료별 응답 특성, 수평 및 수직 비정형성 등 다양한 변수를 추가적으로 고려할 수 있는 취약성 등고선의 개발에 대한 연구가 추후에 수행되어야 한다. 또한, 목표 성능에 대한 경제성 측면을 반영할 수 있는 연구가 추후에 반드시 고려되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2009-0086384 & 2011-0010384).

참고 문헌

1. ICC, International Building Code (IBC), International code council, INC, 2012.
2. ICC, International Residential Code (IRC), International code council, INC, 2012.
3. Horie, K., Maki, N., Kohiyama, M., Lu, H., Tanaka, S., Hashitera, S., Shigehawa, K., and Hayashi, H., Process of Housing Damage Assessment: The 1995 Hanshin-Awaji Earthquake Disaster Case, *Natural hazards*, Vol. 29, No. 3, 341-370, 2003.
4. Black, C., Makris, N., and 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.
5. Sam, M., Balendra, T., and Liaw, C., "Earthquake-resistant steel frames with energy dissipating knee elements," *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 5, 334-343, 1995.
6. Kim, J., and Seo, Y., "Seismic design of steel structures with buckling-restrained knee braces," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, No. 12, 1477-1497, 2003.
7. Takeuchi, T., Hajjar, J. F., Matsui, R., Nishimoto, K., and Aiken, I.D., "Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, No. 2, 139-149, 2010.
8. Wen, Y.K., Ellingwood, B.R., and Bracci, J., Vulnerability function framework for consequence-based engineering, *MAE Report 04-04*, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.
9. Jeong, S.H., and Elnashai, A.S., "Probabilistic fragility analysis parameterized by fundamental response quantities," *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 6, 1238-1251, 2007.
10. 정성훈, 이기학, 이도형, "지진 취약성 등급선을 이용한 내진성능 평가 방법" 한국지진공학회 논문집 제15권 제3호, 65-72, 2011.
11. Elnashai, A.S., Papanikolaou, V., and Lee, D. ZeusNL - A Program for Inelastic Dynamic Analysis of Structures, MAE Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 2001.
12. 대한건축학회, 건축구조설계기준 - KBC 2009, 2009.
13. FEMA, NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, *Report No. FEMA P-750*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2010.
14. FEMA, Pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, *Report No. FEMA 356*, Federal Emergency Management Agency, Washington(DC), 2000.
15. Somerville, P., Smith, N., Puntamurthula, S., and 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, Sacramento, California, 1997.
16. SeismoSoft. SeismoMatch - A computer program for adjusting earthquake accelerograms to match a specific target response spectrum, <http://www.seissoft.com>, 2010.
17. FEMA, State-of-the-art report on performance prediction and evaluation of moment-resisting steel frame structures, *Report No. FEMA 355f*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C, 2000.
18. Leyendecker, E.V., Hunt, R.J., Frankel, A.D., and Rukstales, K.S., "Development of maximum considered earthquake ground motion maps," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 1, 21-40, 2000.
19. Watanabe, A., Hitomoi, Y., Saeki, E., Wada, A., and Fujimoto, M., "Properties of braced encased in buckling-restrained concrete and steel tube," *Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo/Kyoto, Japan, 4, 719-724, 1988.
20. Sridhara, B.N., "Sleeved column-as a basis compression member," *Proceedings, 4th International conference on steel structures & space frames*, Singapore. 181-188, 1990.
21. Prasad, B., "Experimental investigation of sleeved column," *Proceedings, 33rd Structural Dynamics and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Dallas, 1992.
22. Ju, Y.K., Kim, M.H., Kim, J., and Kim, S.D., "Component tests of buckling-restrained braces with unconstrained length," *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 2, 507-516, 2009.
23. 박대진, 주영규, 김명환, 김도현, 김상대, "비좌굴 가새의 무보강 길이에 따른 이력거동 평가," 대한건축학회논문집, 제22권 제12호, 37-46, 2006.
24. Mehmet, E., Cem, T., "An Experimental Study on Steel-Encased Buckling-Restrained Brace Hysteretic Dampers," *Earthquake Engng Struct. Dyn.* Vol. 39, No. 5, 561-581, 2010.
25. AISC, *Seismic Provision for Structural Steel Building*. American Inst. of Steel construction, Inc., Chicago, 2005.
26. 이진, 이기학, 이한선, 김희철, 이영학, "채널 형강을 이용한 비좌굴 Knee Bracing System의 내진성능에 대한 실험적 연구," 한국강구조학회 논문집, 제21권 제1호, 71-81, 2009.
27. Aristizabal-Ochoa, J.D., "Disposable knee bracing: improvement in seismic design of steel frames," *Journal of Structural engineering*, Vol. 112, No. 7, 1544-1552, 1986.
28. Suita, K., Inoue, K., Koetaka, Y., Ando, M., and Byakuno, Y., "Full-scale test on weld-free building structure with knee brace dampers," *International conference on behaviour of steel structures in seismic areas*, Stessa 2006, 2006, 533-540.
29. Prakash, V., Powell, G.H., and Campbell, S., "Drain-2DX, Element description and user guide", Univ. of California, Berkeley, CA, 1993.
30. ATC, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, *Report No. ATC-40*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
31. FEMA, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Report No. FEMA-273* Washington, DC, 1997.