

# 학교 건축물의 내진성능에 대한 연구 경향

## Research Trends for Seismic Performances of School Buildings



김 재 요 / 광운대 건축공학과 부교수  
 Kim, Jae-Yo / Associate Professor, Kwangju University  
 kimjyo@kw.ac.kr

### 1. 서론

학교 건축물은 주로 중저층 규모로서, 지진하중에 의해 구조적인 성능 및 설계가 지배되는 경우가 많으므로 지진에 대한 고려가 매우 중요하다. 특히, 학교 건축물은 재해 발생 시 대피 또는 피난시설로 사용되는 경우가 많으므로, 지진에 대한 충분한 성능을 발휘할 수 있도록 계획되어야 한다.

2008년 쓰촨성 대지진에서 학교 건축물의 붕괴에 따른 어린 학생들의 사상 피해가 컸던 사례를 통해 학교 건축물의 내진성능에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 국내에서는 1988년 내진설계가 도입된 이후, 1988년 6층을 시작으로 2000년 5층, 2005년도 3층 이상 건축물에 대한 내진설계 의무화를 법적으로 규정하였다. 그러나, 대부분의 학교 건축물들이 1988년 이전에 건설되어, 이들에 대한 내진성능이 불확실한 상황이다.

따라서, 최근 국내에서는 학교 건축물의 내진성능을 합리적으로 평가할 수 있는 평가 방법과 내진성능이 충분하지 않은 경우 적용할 수 있는 적절한 보강 방안에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 본 기사에서는 학교 건축물의 내진성능평가와 내진 보강에 대한 최근 연구 결과들을 제시함으로써, 학교 건축물의 내진성능에 대한 국내의 연구 경향을 분석하고자 한다.

### 2. 기존 학교 건축물의 내진성능평가

이상호·정태권(2006)은 일본의 내진성능 평가방법을 수정하여 철근콘크리트 건축물의 내진성능 평가방법을 제시

하였으며, 이를 이용하여 재난대피시설로 지정되어 있는 철근콘크리트조 학교 건축물들의 내진성능 보유정도를 파악하고 국내에 발생 예상되는 지진으로 인한 건축물의 피해를 예측하였다. 철근콘크리트 건축물의 내진성능 평가지표( $I_s$ )와 예상되는 지진력의 크기를 나타내는 내진성능 판단지표( $I_{so}$ )를 정의하고, 내진성능 판단지표에 대한 내진성능 평가지표의 비를 내진성능 평가지수( $I_s/I_{so}$ )로 정의함으로써, 내진성능 평가지수 값에 따라 지진가속도에 관계없이 지진 피해의 크기를 제시하였다. 내진성능 평가지표는 강도지표, 연성계수, 형상지표, 경년지표를 통해 각 층별로 산정되며, 내진성능 판단지표는 건축구조기준(KBC)에 따라 지역계수, 지반계수, 중요도계수 등을 적용하여 산정되었다. 이를 바탕으로, 각 층별 내진성능 평가지수가 계산되고, 심각/보통/경미/무피해의 4단계로 피해를 예

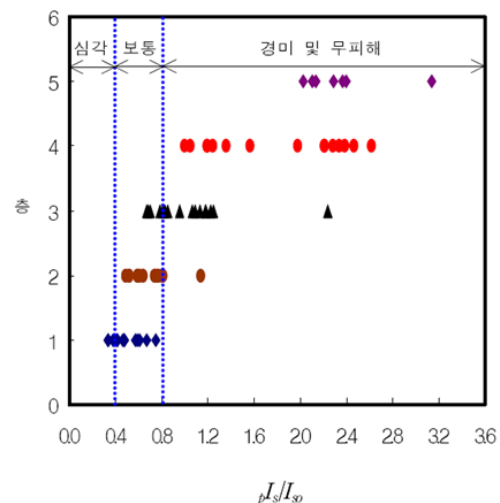


그림 1. RC조 학교 건축물의 층별 내진성능 평가지수 및 예측 피해 산정 결과 (이상호·정태권, 2006)

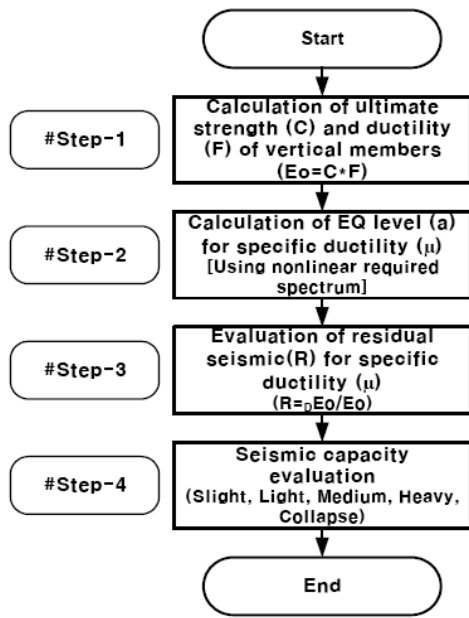


그림 2. 내진성능평가 프로세스 (이강석, 2011)

측하였다(그림 1).

이강석(2011)은 저층 철근콘크리트 건물의 비선형 요구 내력스펙트럼을 수식화하여 특정 연성률 별로 지진 입력 수준과 내진성능 잔존률을 산정하여 구조물의 지진손상도를 정량적으로 평가하는 내진성능평가법을 제안하였다. 비선형 동적해석이나 역량스펙트럼법 등의 상세 내진성능평가 방법을 수행하지 않고도 저층 철근콘크리트 건물의 지진손상 정도를 효율적이며 실용적으로 예측할 수 있는 내진성능 평가방법이다. 전체적인 내진성능평가 과정은 4단계로 구성된다(그림 2):

- ① 대상건물의 보유 수평내력 및 변형능력 산정
- ② 특정 연성률별 비선형 요구내력스펙트럼을 이용한

입력지진수준 산정

- ③ 특정 연성률별 내진성능저감계수를 고려한 잔존내진성능 평가
- ④ 지진손상도 예측

제안된 내진성능평가법을 내진설계가 수행되지 않은 철근콘크리트 학교 건축물에 적용하여, 상세한 부재수준의 비선형 동적해석 결과와 비교·분석함으로써, 타당성 및 적용가능성을 검증하였다.

박지훈 외 2인(2012)은 학교 건축물에서 나타나는 전형적인 조적조 채움벽 골조에 대한 내진성능평가법을 제시하였다. 조적조 채움벽의 내진 거동에 대한 기여도를 반영하기 위하여, 조적조 채움벽을 다양한 형식과 재료속성을 적용한 등가 스트럿 모델로 치환하여 골조의 내진성능을 평가하였다. 내진설계 미적용 학교건물을 조사하여 표준모델을 작성하고, 조적조 채움벽의 재료속성과 등가 스트럿의 강성 및 강도에 대한 산정식, 등가 스트럿의 하중-변위 관계 등을 제시하였다. 조적조 채움벽 등가 스트럿은 철근콘크리트 골조와 함께 비탄성 해석모델로 구성되며, MIDAS/GEN을 이용하여 ATC 40(1996)의 역량스펙트럼법에 의한 비탄성정적해석이 수행됨으로써 조적조 채움벽 골조의 내진성능이 평가되었다.

문기훈 외 3인(2012)은 조적조 비내력벽인 허리벽을 포함하는 RC 학교 건축물에 대한 내진성능평가 수행과정을 제시하였다. 내진성능평가를 위한 비선형 정적해석과 동적해석은 비선형구조해석 프로그램인 OpenSees를 이용하여 수행되었다. RC 골조의 보와 기둥 부재는 보-기둥 파이버 부재를 사용하여 모델링하였으며, 조적조 비내력벽은 등가 대각 스트럿 부재를 사용하여 모델링하였다(그림 3). 이 연구에서는 기존 학교 건축물의 내진성능평가를 위하여 ATC

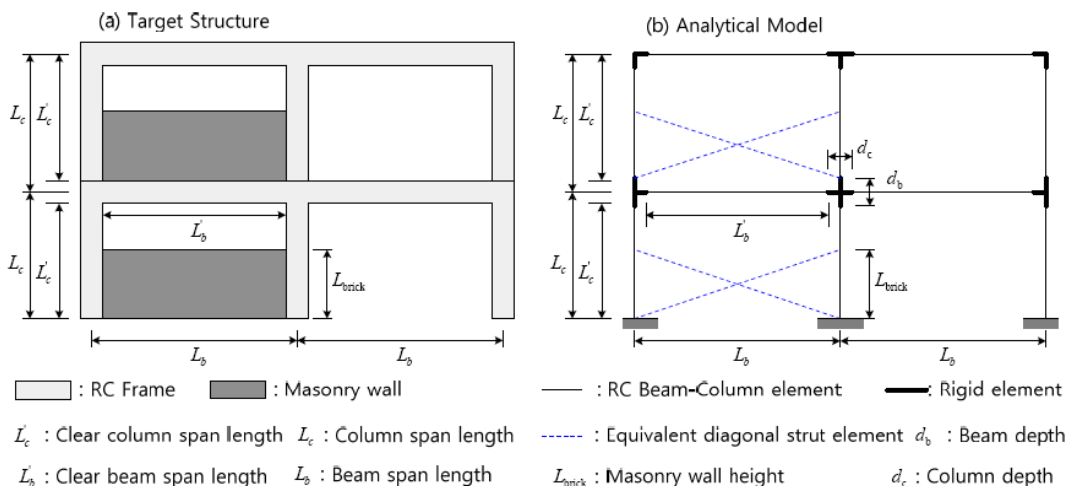


그림 3. 조적조 비내력벽을 가진 RC 학교 건축물의 해석 모델 (문기훈 외 3인, 2012)

63(2009)을 적용하였는데, ATC 63에서는 두 가지 목표를 적용하여 평가하고 있다. 최대지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)에 대하여 고려하는 구조물들이 포함된 성능그룹의 붕괴확률이 10% 이하이어야 한다는 것과 개별적인 구조물의 경우 붕괴확률이 20% 이하이어야 한다는 것이다. ATC 63에서 제시하는 수정된 붕괴여유비(Adjusted Collapse Margin Ratio, ACMR)를 계산하여 이 값이 허용하는 ACMR값(ACMR 10%와 ACMR 20%)과 비교함으로써 성능목표 달성 여부를 평가하였다.

### 3. 기존 학교 건축물의 내진성능 보강

송진규 외 4인(2010)은 내진설계되지 않은 기존 학교 건축물을 대상으로 내진성능을 평가하고, 건축물의 내진설계 기준에 적합하도록 보강하는 프로세스를 제시하였다. 내진 보강 여부 결정 및 내진보강 목표 설정을 위한 1·2차 내진 성능평가가 수행되었으며(그림 4), 댐퍼와 가새를 이용한 내진보강안이 적용되었다. 1차 내진성능평가는 NEHRP (BSSC, 1997)에서 제안하고 있는 건축물에 공통으로 요구되는 시스템 강도, 강성, 형상 등의 공통항목과 건축물의 구조 및 시스템에 따른 상세항목을 평가한다. 2차 내진성능평가에서는 비선형 평가방법 중 Fajfar(2000)가 성능에 기초한 새로운 내진 설계 절차로서 제안한 N2법을 적용하여 성능수준의 만족여부를 평가한다. 내진설계가 수행되지 않은

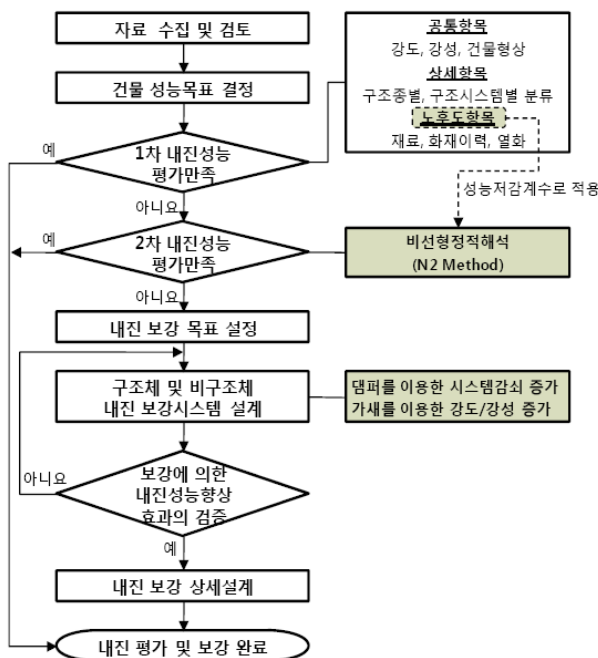


그림 4. 내진성능평가 및 내진보강 흐름도 (송진규 외 4인, 2010)

준공이 30년 이상이 지난 철근콘크리트조의 3층 학교 건축물을 대상으로, 내진성능평가를 통해 내진 보강 목표를 설정하고, 내진보강 방안 및 적용 효과를 분석하여 제시하였다. 내진보강 방안으로는 댐퍼를 이용하여 시스템의 감쇠를 증진시키는 방법과 철골 가새를 설치하여 건물의 강도와 강성을 증가시키는 방법을 적용하였다. 사용 지진(50년 25% 재현주기)에서의 즉시거주수준 유지 및 최대 지진(50년 5% 재현주기)에서의 붕괴방지수준 유지라는 두 가지 성능목표를 만족할 수 있도록 비선형 정적해석을 통해 보강 위치와 수량 등을 결정하였다.

황지훈 외 3인(2012)은 1975년에 건설된 철근콘크리트조의 3층 학교 건축물을 대상으로 비선형 정적해석을 실시한 후 부족한 내진성능 보강을 위해 제진시스템을 적용하는 과정을 제시하였다. 마찰댐퍼를 이용한 보강 방안이 적용되었으며, 성능스펙트럼법과 비선형 시간이력해석을 통해 보강효과가 검증되었다.

윤길호 외 3인(2012)은 현장타설 끼움 전단벽과 철골 가새를 활용한 기존 학교 건축물의 내진보강 방법을 제시하였다. 일본의 내진진단기준을 적용하여 1980년대 건설된 학교 건축물에 대한 내진성능을 평가하였으며, 대상 건물이 소요 내진성능을 확보하지 못할 경우 지진발생시 취약한 건축물로 판정하고 층별 소요 전단력을 산정하여 보강방안을 수립하였다. 비선형 정적해석을 통해 구조적으로 취약한 부재 및 위치를 검토하여 보강 위치를 결정하였으며, 보강 후의 건축물에 대한 재평가를 실시하여 보강 전/후의 내진성능 변화를 평가하였다. 이 연구에서는 학교 건축물의 지진하중에 대한 강도 증진에 유효하고 비교적 시공이 간편한 현장타설 끼움 전단벽(그림 5)과 철골 가새(그림 6)를 증설하는 내진보강공법을 적용하였다. 기존 골조 사이에 벽을 증설하는 방법은 소량의 벽을 보강하는 것만으로도 건물의 수평내력에 대한 상당한 보강효과를 기대할 수 있는 경제적인 보강 방법이다. 철골 가새를 설치하는 공법은 기존 골조 내에 철골 가새를 설치하여 건물의 내진성능을 개선시키는 방법으로서, 기둥과 보에 앵커볼트를 설치하고 접합부에 무수축 모르타르를 충전하여

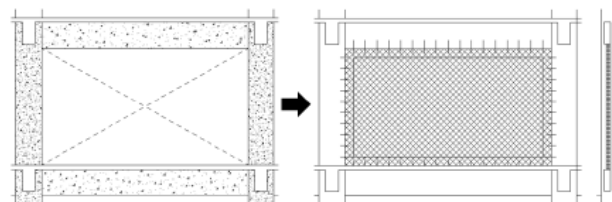


그림 5. 현장타설 끼움 전단벽의 증설 (윤길호 외 3인, 2012)

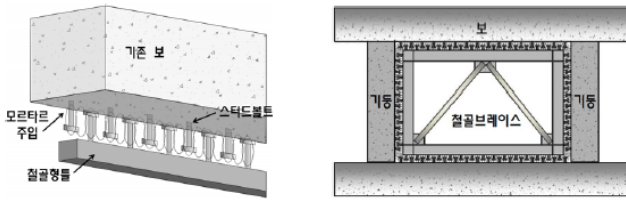


그림 6. 철골 브레이스의 증설 (윤길호 외 3인, 2012)

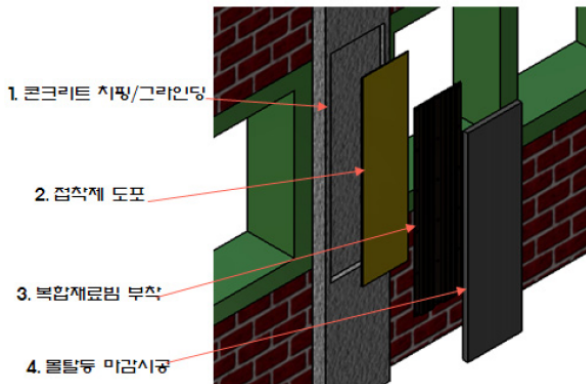


그림 7. 기둥 내진보강공법 개념도 (박춘욱 외 3인, 2013)

접합함으로써 기존 골조와 철골 가새가 긴밀히 접합되어 수평력을 원활하게 전달할 수 있어야 한다(그림 6).

박춘욱 외 3인(2013)은 내진설계되지 않은 학교 건축물의 기둥에 대하여 복합소재를 이용한 내진보강공법을 제시하고, 실험을 통해 보강 성능을 검증·분석하였다. 내진설계가 반영되지 않은 기둥은 횡하중에 대한 저항능력이 크지 않기 때문에 지진 발생 시 휨과괴 혹은 전단과괴가 발생할 가능성이 크다. 특히, 전단과괴는 기둥의 취성과괴이므로, 적절한 전단 보강을 통해 연성과괴인 휨과괴로 유도할 수 있어야 한다. 이 연구에서는 알루미늄 중공단면과 유리섬유복합체로 구성된 부착형 보강재를 이용한 보강방안을 제시하였으며(그림 7), 기둥 실험체에 대하여 축하중과 횡하중을 동시에 가력하는 실험을 수행하여 전단능력과 에너지 소산능력을 분석함으로써 기둥에 대한 내진보강 효과를 비교·분석하였다.

#### 4. 결론

현재 학교 건축물의 대부분이 내진설계가 적용되지 않아 지진 발생 시 큰 피해가 우려되며, 유사시 대피시설로 활용될 수 있으므로 충분한 내진성능이 요구된다. 이를 위해, 기존 학교 건축물에 대하여 내진성능을 평가하여 내진보강 필요 여부를 판정하고, 내진보강이 필요한 경우 보강수준과 범위를 결정하여 적절한 보강방법을 적용하기 위

한 다양한 국내 연구들이 진행되어 왔다. 약산석을 이용한 간략 내진성능평가 및 비선형 정적해석 또는 동적해석을 이용한 상세 내진성능평가 프로세스가 제시되며, 구조 성능과 효율성을 갖춘 다양한 내진보강 방안의 제안 및 실험/해석을 통한 성능 분석 등의 연구가 진행되고 있다.

#### 참고문헌

1. 문기훈·전용률, 이상석, 한상환, 조적조 비내력벽을 가진 기존 학교 구조물의 내진 성능 평가, 한국지진공학회지, 16(6), pp.37-46, 2012.
2. 박지훈·전성하·강경수, 등가 스트럿 모델을 이용한 조적조 채움벽 골조의 내진성능평가, 한국지진공학회 논문집, 16(1), pp.47-59, 2012.
3. 박춘욱·이형주·주치홍·홍원화, 복합소재를 이용한 교육시설의 기둥 내진보강공법에 관한 연구, 한국교육시설학회논문집, 20(1), pp.45-52, 2013.
4. 송진규·황재승·김건우·송호범·이재혁, 노후도를 고려한 학교건물의 내진성능평가 및 내진보강에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 26(8), pp.3-10, 2010.
5. 윤길호·김성호·김용철·윤현도, 현장타설 끼움 전단벽 및 철골가새를 활용한 기존 학교 건물의 내진보강, 한국교육시설학회논문집, 19(4), pp.21-28, 2012.
6. 이강석, 비선형요구내력스펙트럼을 이용한 저층 R/C 건물의 내진성능 평가법, 구조물진단학회지, 15(3), pp.106-115, 2011.
7. 이상호·정태권, 국내 철근콘크리트조 학교건축물의 내진성능평가 및 피해율 예측에 관한 연구, 대한건축학회논문구조계, 22(9), pp.67-74, 2006.
8. 황지훈·장정현·양경석·최재혁, 기존 학교 건축물의 내진성능평가 및 보강방안 제안, 한국교육시설학회논문집, 19(4), pp.29-38, 2012.
9. Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC 40, 1996.
10. Applied Technology Council, Quantification of Building Seismic Performance Factors, ATC 63, 2009.
11. BSSC (Building Seismic Safety Council), NERHP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building, FEMA 273, 1997.
12. Fajfar, P., A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design, Earthquake Spectra, 16(3), pp.573-592, 2000.