

학교시설물 내진성능 평가 및 내진보강 가이드라인

Guideline on Seismic Evaluation and Upgrading of School Buildings



이 강 석 / 전남대 건축공학과 부교수
Lee, Kang-Seok / Associate Professor, Chonnam National University
kslnist@jnu.ac.kr



김 형 준 / 서울시립대 건축학부 조교수
Kim, Hyung-Joon / Assistant Professor, University of Seoul
hyungjoonkim@uos.ac.kr

1. 서론

2008년 중국 쓰촨성 대지진으로 인하여 학교건물이 붕괴에 따른 수 백명의 어린 학생이 한꺼번에 목숨을 잃으면서 국내에서 학교시설물에 대한 내진성능 평가와 내진보강에 대한 관심이 점차 고조되고 있는 실정이다. 국내의 건축물의 내진설계는 1988년부터 본격적으로 도입되었기 때문에 1988년 이전에 지어진 대부분의 건축물은 지진에 대해 충분한 내진성능을 발휘할 수 있는 지에 대한 확신을 할 수 없다. 1988년 이후 지어진 모든 학교건축물이 충분한 내진성능을 발휘할 수 있다는 가정을 하더라도 전체 학교시설물 중 1988년 이전에 지어진 약 86%에 해당하는 학교시설물의 내진성능에 대한 의문이 제기되고 있으며, 내진보강이 필요할 수 있다.

하지만, 그간 중·약진지역으로 간주된 우리나라는 건축물의 내진성능평가, 보강 및 설계에 대한 명확한 기준 또는 지침이 마련되어 있지 않다. 따라서 국내의 비내진 설계 학교건축물의 특성을 반영한 내진성능평가방법과 이에 따른 내진보강방법에 대한 기준 또는 지침의 개발이 시급하다. 이에 국내에서 수행된 기존 연구와 지진대응 선진국의 비내진 건축물의 내진성능평가 및 보강기술에 대한 문헌조사를 바탕으로 국내 학교건물의 특성을 고려한 내진성능평가 및 내진보강 가이드라인에 대한 교과부 지침(안)이 제시되어, 시·도 교육청 및 관계기관의 학교시설 내진보강사업에 유용한 자료로 사용되고 있다. 하지만, 교과부 지침(안)이 학교시설물의 목표 내진성능수준과 내진성능결정방법에 있어 KBC2009과 일부 부합하지 않는 측면이 있어 이에 대한 일부 개정안이 제시되었다. 본고는 “학교시설

내진성능 평가 및 내진보강 가이드라인 - 교과부 지침(안) -”에서 포함될 주요 개정내용에 대해 기술하고자 한다.

2. 학교시설물의 목표 내진성능 수준

학교시설물의 목표 내진성능 수준을 정함에 있어 지진 발생 시 학교시설물의 손상으로 인한 사회적 손실비용과 사회적 역할에 대한 논의가 필요하다. 학교시설물의 경우, 비교적 많은 학생들이 주간에 이용하는 시설이며, 특히 초등학교 건축물의 경우 성인에 비하여 신속한 대피능력이 떨어지는 어린 학생이 이용하는 구조물이라는 점에서 대규모 인명피해의 발생가능성이 일반 구조물에 비하여 현저히 높다. 뿐만 아니라 학교시설물의 경우 지진발생 후 지역사회의 임시 거주처로 활용되는 것이 일반적이므로 지진에 대한 충분한 저항력을 보유하여 구조물의 피해가 최소화될 수 있도록 보다 높은 수준의 내진성능을 보유하여야 한다.

일반 건축물의 내진설계 기준인 현행 KBC2009¹(Korean Building Code, 2009)과 어울리면서 앞서 언급한 바와 같이 보다 높은 수준의 내진성능을 발휘할 수 있도록 목표 내진성능 수준을 정하여야 한다. KBC2009이전의 기준에서는 국내 일반 건축물의 입력지진의 수준은 재현주기 약 500년(구조물의 생애주기를 50년으로 가정했을 때 10% 발생확률에 해당하는 지진강도)의 지진을 설계지진(Design Earthquake)으로 정한 반면, KBC2009에서는 재현주기 약 2400년(구조물의 생애주기를 50년으로 가정했을 때 2% 발생확률에 해당하는 지진강도)의 지진의 2/3에 해당하는 지진강도를 설계지진으로 정하고 있다. 기존의 지침(안)에

표 1. 목표내진성능

지진위험도	즉시거주(IO*)	인명안전(LS**)
2400년 재현주기의 2/3	A등급 (Enhanced)	B 등급 (기본 목표내진성능)

* IO: Immediate Occupancy
** LS: Life Safety

표 2. 학교시설물의 내진설계에 사용되는 중요도 계수

구분	중요도 계수
$A < 1500m^2$	1.2
$1500m^2 < A < 10000m^2$	$3/8500 \times (A - 1500) + 1.2$
$A < 10000m^2$	1.5

A = 연면적

서는 두 개의 설계지진에 대한 기준 즉, 500년 재현주기의 지진레벨과 2400년 재현주기의 지진레벨의 2/3수준을 동시에 사용하는 과도기적인 성격을 가지고 있었다. 이에 국내에서 건설되는 모든 건축물의 내진설계에 대한 기준으로 활용되는 KBC2009와 부합할 수 있도록 지침(안)의 개정이 필요하다. 따라서 개정안에서는 2400년 재현주기의 지진의 2/3에 해당하는 지진을 설계지진으로 인명안전수준 달성을 기본 목표내진성능(Basic Seismic Performance, B 등급)으로 정의한다. 기본 목표내진성능보다 높은 수준의 내진성능이 요구되는 구조물에 대해서는 설계지진에 대해 즉시거주(Immediate Occupancy)가 가능한 수준을 A등급(Enhanced Seismic Performance, ESP)으로 표 1과 같이 정의한다.

KBC2009에서 제시하고 있는 2400년 재현주기의 2/3에 해당하는 지진위험도는 지진구역에 따른 지역계수와 지반의 종류에 따라 지진파의 증폭여부를 결정하는 지반증폭계수를 곱하여 결정된다. 본 지침(안)에서는 KBC2009의 내용을 수정없이 사용하고 있다. 단 구조물의 중요도에 대한 계수는 KBC2009보다 학교시설물에 대한 내용을 상세히 담고 있는 표 2와 같은 교육과학기술부장관 고시의 “학교시설 내진설계기준”²⁾을 따르도록 규정하고 있다.

3. 구조체의 성능수준 및 범위의 정의

구조물의 성능수준은 지진에 의한 구조체의 손상정도에 따라 표 3과 같이 기능수행 성능수준(Operational level, OP), 즉시거주 성능수준(Immediate Occupancy level, IO), 지진피해 제어범위(Damage Control Range, DCR), 인명안전 성능수준(Life Safety level, LS), 제한적인 인명안전 범위(Limited Safety Range, LSR), 붕괴방지 성능수준(Collapse Prevention level, CP)의 6가지로 세분한다. FEMA 356³⁾에서는 이상의 6가지 성능수준에 대하여 구조

표 3. 구조체의 손상정도에 따른 성능수준

성능수준	지진피해정도	성능수준에 대한 정의
OP	경미	구조물 피해의 최소수준을 나타낸다. 기능수행 수준을 만족하는 기존 학교건물은 지진이 발생한 경우 구조시스템에 무시할만한 손상이 발생한 경우이다. 또한 구조체는 지진 피해를 입기 전의 강도와 강성을 거의 보유하고 있으며, 기능수행수준을 만족하는 학교건물은 지진 발생동안의 인명안전에 대한 위험은 무시한다.
IO	소규모	지진후 구조물의 피해는 소규모이며, 중력, 지진력저항시스템은 지진 저의 강성과 강도를 보유하고 있다. 구조부재의 손상으로 인하여 피해를 입을 가능성은 매우 낮으며, 손상부재에 대한 보수가 필요하지만 즉시거주를 위해 반드시 필요하지는 않다.
DCR	IO와 LS의 중간	즉시거주 성능수준과 인명안전 성능수준의 연속성을 고려한 성능범위로서, 내진보수 및 보강을 최소화 할 수 있는 범위이다.
LS	중규모	구조부재에 상당한 피해가 발생하여 원래의 횡강성과 강도를 손실한 경우이지만 붕괴에 대해서는 여전히 여력을 보유하고 있다. 구조물의 영구적인 변형을 보이며, 지진력저항시스템의 몇몇 요소에서 중분한 균열, 파단, 항복, 그리고 좌굴을 보일 수 있으나, 구조부재의 손상으로 인명손실의 위험은 낮다. 구조부재의 보수는 가능하지만 경제적이지 않을 수 있다. 당장 무너지지는 않으나 거주를 위해서는 내진보수와 보강이 요구된다.
LSR	LS와 CP의 중간	LS와 CP의 중간수준
CP	대규모	구조물의 심각한 피해를 입은 상태로 구부적 혹은 전체적으로 붕괴의 가능성이 있다. 지진력저항시스템에 상당한 강도 및 강성의 저하가 있으며 횡방향 영구변형이 있다. 그러나 중력하중저항시스템은 여전히 하중을 지지할 수 있다. 구조부재의 박락등으로 인명피해가 생길 수 있으며, 일반적인 보수보강 후에도 거주에 안전하지 않을 수 있다. 여진으로 인해 붕괴가 발생할 수 있다.

물의 종류에 따라 층간변위라는 물리적 값으로 구분하고 있으나, 본 지침(안)에서는 개별구조물의 특성에 따라 층간변위각의 편차가 클 수 있다는 점에서 각 부재별 극한강도 및 연성능력을 토대로 성능수준을 평가하고 이를 통해 구조물 전체의 내진성능수준을 판정하도록 한다.

학교시설물이 표 3에서 제시하고 있는 어떤 성능수준을 만족하는지에 대해서는 예비평가 결과와 상세평가 결과에 따라 달라진다. 내진성능 예비평가는 지진위험도에 따라 수직부재(기둥, 벽체 및 끼움조적조)의 재료강도와 단면치수에 의해서 약산적으로 계산되는 구조체의 극한강도에 의해서 수행되는 것으로 원칙으로 한다. 다만, 수직부재의 극한강도 및 파괴모드의 정확성을 높이기 위한 목적으로 수직부재의 극한강도 정산식에 의해서 구조체의 극한강도를 계산하여 예비평가를 실시할 수 있다. 그리고 내진성능 예비평가에서는 장변/단변 방향에 대해서 층별로 독립적으로 수행하는 것을 원칙으로 한다. 내진성능 예비평가 결과(SES)는 기준 값에 대한 극한강도를 이용한 계산값의

표 4. 내진성능 예비평가와 등급과의 관계(개정 전·후 비교)

성능 수준	내진성능평가 점수(SES)	내진성능 등급		
		개정 전		개정 후
		500년 재현주기	2400년 재현주기 2/3	2400년 재현주기 2/3
OP	SES ≥ 120	A	A	A
	110 ≤ SES < 120			
	100 ≤ SES < 110			
IO	SES ≥ 120			
	110 ≤ SES < 120			
	100 ≤ SES < 110			
DCR	SES ≥ 120	B	B	
LS	110 ≤ SES < 120	C		
	100 ≤ SES < 110	D		
LSR	90 ≤ SES < 100		B	C
CP	70 ≤ SES < 90	E	C	D
C	50 ≤ SES < 70		D	E
	0 ≤ SES < 50		E	

표 5. 내진성능 상세평가와 등급과의 관계(개정 전·후 비교)

성능 수준	내진성능평가 점수(RSC)	내진성능 등급		
		개정 전		개정 후
		500년 재현주기	2400년 재현주기 2/3	2400년 재현주기 2/3
OP	RSC ≥ 95	A	A	A
IO	80 ≤ RSC < 95			
DCR	70 ≤ RSC < 80			
LS	60 ≤ RSC < 70	C	B	
LSR	50 ≤ RSC < 60	D		
CP	20 ≤ RSC < 50	E	C	D
C	10 ≤ RSC < 20		D	E
	0 ≤ RSC < 10		E	

백분율로 표시된다. 내진성능 예비평가 결과와 내진등급과의 관계에 대한 개정 전·후에 대해서 아래 표 4에 정리하였다.

내진성능 상세평가는 원칙적으로 보의 강도는 충분히 강하다는 가정하에 건물이 가지는 보유성능(극한강도와 극한변형을 이용한 비선형 이력거동)을 간략하게 계산하여, 그 결과를 비선형요구내력스펙트럼을 이용하여 나타난 평가용 최대 지진가속도 수준까지 순차적으로 지진손상을 추정하여 학교시설물의 내진성능을 평가한다. 보유성능은 수직부재의 배근상세 등을 이용하여 계산되는 부재의 극한강도 및 극한연성률(연성지표)에 근거하여 계산하며, 상세평가에서는 극단주 등의 국부적인 파괴부재, 휨파괴형 부재 및 전단파괴형 부재의 영향이 고려된다.^{4, 5} 또한, 본 지침에 의한 내진성능 상세평가에서는 장변/단변 방향에 대해서 층별로 독립적으로 수행하는 것을 원칙으로 한다. 내진성능 상세평가 결과(RSC)는 기준 값에 대한 계산값

의 백분율로 표시된다. 내진성능 상세평가 결과와 내진등급과의 관계에 대한 개정 전·후에 대해서 아래 표 5에 정리하였다. 표 5에서 제시한 5개(A, B, C, D, E)등급은 FEMA 356³, 일본진단법⁶, 한국시설안전기술공단 내진성능평가 요령⁷에 따라 결정되었다.

내진성능 예비/상세 평가와 내진성능등급과의 관계에 대한 개정 전·후를 비교해 보면, 500년 재현주기와 2400년 재현주기의 2/3 두 개의 지진위험도에 대해 각각 내진성능등급을 제시하던 개정 전과 달리 개정 후 지침에서는 KBC2009와 같이 2400년 재현주기의 2/3로 통일되었으며, 경미한 피해와 소규모 피해가 예상되는 구조물에 대해 모두 A등급을 부여하여 현행 내진설계기준과의 일관성을 유지할 수 있도록 한 것이 개정내용의 주요 골자이다.

4. 내진성능평가에 의한 내진성능 판정법

표 4와 5로부터 학교시설물의 내진등급이 결정되면 이에 따른 조치가 필요하다. 이에 대한 내용을 표 6에 정리하였다. A등급의 내진성능을 보유하고 있는 것으로 학교시설물은 구조적인 문제점이 거의 없는 최상의 상태로 설계지진에 대하여 구조부재의 피해는 무시할 만하며, 비구조재의 손상은 발생할 수 있으나 거주에 안전한 수준으로 매우 간단한 보수를 통해 기능 수행이 가능하므로 일상적인 유지관리만 요구된다.

B등급에 해당하는 학교시설물은 목표수준에 따라 내진보강여부를 결정해야 하는 수준으로 목표수준에 부합하는 지진강도에 대하여 휨강성과 강도를 손실할 수 있으나 붕괴에 대해서는 여전히 여력을 보유하고 있으며, 영구변형이 발생할 수 있지만, 인명손실과 연결될 확률이 지극히 낮은 수준이다. 따라서 간략한 보수에 의해서 기능 수행이 가능지만, 장기적 측면에서 볼 때 내진보강계획을 수립하는 것이 바람직하다.

예비평가에서 C, D, E등급의 학교시설물은 반드시 상세평가를 실시하여야 하며, 상세평가에서 C등급을 받은 학교시설물은 지진발생 시 구조부재의 중규모 정도의 피해가 예상되는 구조물로서, 대부분 강도와 강성저하가 크게 일어나지만 수직하중저항시스템에 저항력을 보유하고 있어 붕괴는 발생하지 않는 수준이다. 하지만 여진에 의해 붕괴가 발생할 수도 있기 때문에 거주에 적합한 수준으로 보기는 힘들다. 따라서 내진보강설계에 의해서 내진보강을 실시하여 목표내진성능을 확보하는 노력이 요구된다.

상세평가에서 D등급의 학교시설물은 일부 수직하중저항

표 6. 내진성능평가의 의한 학교시설물의 내진성능 판정법

내진등급	성능 수준	예비평가	상세평가	조치
A등급	IO 이하	OK		일상적인 유지관리
B등급	DCR	목표수준에 따라 상세평가 실시 여부 결정	목표수준에 따라 내진보강 여부 결정	목표성능이 인명안전인 경우: 간략한 보수나 보강에 의해 기능수행 목표성능이 즉시거주인 경우: 목표성능에 준하여 내진보수/보강에 의해 기능수행
	LS			
C등급	LSR	상세평가 실시	보강	내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
D등급	CP			
E등급	C		보강/철거 판단	경제성분석에 의해 전체 구조의 성능개량이나 철거를 판단하고, 성능개량 판정 시에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 전면적으로 개량하여 내진성능을 향상

시스템의 저항력이 상실되어 부분적인 붕괴가 발생할 수 있는 수준의 구조물로 내진보강설계에 의해서 목표내진성능을 확보할 수 있도록 조치하여야 한다.

마지막으로 E등급의 학교시설물은 지진에 의해 연직하중저항능력을 상실하여 전면적인 붕괴가 발생할 확률이 지극히 높은 구조물로 경제성 분석을 통해 전체구조의 내진성능개량을 실시하거나 철거를 고려하여야 한다.

5. 결론

본 고에서는 국내에서 수행된 기존연구와 지진대응 선진국의 비내진 건축물의 내진성능평가 및 보강기술에 대한 문헌조사를 바탕으로 국내 학교건물의 특성을 고려한 내진성능평가 및 내진보강 가이드라인에 대한 교과부 지침(안)에 대한 개정 방향에 대해 기술하였다. 개정 방향의 주요 골자는 국내에서 지어지는 모든 건축물의 구조성능에 대한 기준을 제시하고 있는 KBC2009와의 일관성을 유지하는 것으로, 지진위험도에 대한 기준을 2400년 재현주기에 해당하는 지진의 2/3 레벨로 설계지진을 통일하는 것이다. 이에 따라 목표내진성능수준의 재정립이 요구되며, 내진성능수준과 내진판정 기준의 개정안을 제시하였다. 기존의 안에 비하여 내진성능 A등급의 범위가 확대된 반면, 내진성능 E등급의 범위는 축소되는 등 국내 지진환경에 대한 보다 실질적인 고려가 반영되었다.

하지만, 내진성능수준을 결정함에 있어 아직까지 많은 정보가 미국과 일본 등의 내진설계 선진국의 내용을 많이

채용하고 있어, 국내에서 사용되고는 비내진 설계 구조부재의 실제적인 이력거동을 내진성능평가와 내진보강에 완벽하게 반영되었다고 보기 힘들다. 따라서 이에 대한 보다 체계적인 연구개발이 필요하며, 장기적인 투자가 요구된다 하겠다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 건축구조설계기준(KBC2009), 2009
2. 한국교육환경연구원, 학교시설 개축 및 내진성능 판정을 위한 가이드라인, 사단법인 교육과학기술부, 2008
3. FEMA, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", FEMA 356, Washington D.C, USA, 2000
4. 이강석, "전단 및 휨과괴형 부재가 혼합된 저층 철근콘크리트 건물의 간이 내진성능 평가법 제안" 대한건축학회논문집 구조계, Vol. 18, No. 11, pp. 35~46, 2002.
5. 이강석, "비선형요구내력스펙트럼을 이용한 저층 RC건물의 내진성능 평가법 제안" 한국구조물진단학회 논문집, Vol. 15, No. 3, pp. 1~10, 2011
6. 일본건축방재협회, 기존건축물의 피해도 분류기준과 복구 지침, 삼영사, 동경, 2001
7. 건설교통부, 기존건축물의 내진성능 평가 요령, 한국시설안전기술공단, 2010