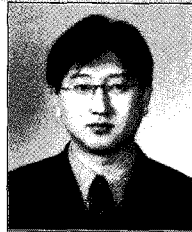


국내 저층구조물의 내진성능 평가법 소개

Introduction of Seismic Performance Evaluation Method on the Existing Low-rise Buildings



김 영 주*



안 태 상**



오 상 훈***



이 원 호****

* DRB동일 면진제진기술연구소 수석연구원

** DRB동일 면진제진기술연구소 소장

*** 부산대학교 건축학부 교수

**** 광운대학교 건축학부 교수

1. 서론

지난 3월 일본 동북부에서 발생한 규모 9.0의 대지진과 뉴질랜드 크라이스트처치에서 발생한 규모 6.3의 강진은 지진발생 증가 및 규모의 대형화로 엄청난 피해를 안겨 주었다. 또한, 백두산이 분화할 때에는 직접적 또는 간접적인 피해규모는 어마어마할 것이라는 조심스러운 관측도 나오고 있다. 한국도 더 이상 지진의 안전지대가 아니라는 인식과 함께 대책수립이 시급한 상황이다.

국내의 경우 내진설계가 되어있지 않은 건물들이 많은 점을 감안하면 특히 예상 발생 지진에 대하여 건물의 내진 안전성을 확보하기 위해서는 먼저 대상건물의 내진성능을 정확히 평가하는 것이 중요하다.

국외의 내진성능 평가기법의 현황을 살펴보면, 미국의 내진성능 평가방법은 ATC 14와 FEMA-310을 통하여 제시되고 있으며, 이 중 비선형 정적해석절차의 문제점을 개선하기 위한 연구결과를 반영한 FEMA 356, 440 및 ATC-55가 제안되어 있다. 이상에서 제안되고 있는 방법들은 기존 건물 또는 신축건물의 지진으로 인한 피해정도 예측을 목적으로 하고 있으며, 구조재료별로는 특별한 규정을 두지 않고 있다. 일본의 경우는 건물의 요구성능 수준을 만족시

키기 위하여 일본건축방재협회에서 내구 및 내진성능 향상 보수·보강시스템 및 시공매뉴얼을 개발하여 사용하고 있다. 일본의 내진성능 평가방법은 여러 구조형식 및 재료로 이루어진 건물을 하나의 기준에 전부 포함하고 있는 미국의 방법과는 달리 건물을 이루고 있는 각 구성 재료에 의해서 서로 다른 형태의 기준을 제시하고 있다는 특징이 있다. 따라서 일본의 내진성능 평가방법은 철근콘크리트 건물, 철골·철근콘크리트 건물, 철골조 건물, 목조 건물에 대하여 서로 다른 개념과 방법에 의해 성능평가방법이 따로 제정되어 있다. 이러한 형식의 내진기준은 각 구성 재료별 건물의 특징을 최대한 상세히 파악하여 내진진단을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 각 구조형식에 대해 서로 다른 형태와 방법에 의해 진단이 진행됨으로써, 내진진단법을 이해하기 어렵고 통일성이 결여되어 혼란을 가져올 우려가 있다.

국내에서 기존건축물의 내진성능 평가기법이 연구되기 시작한지 20여년이 흘렀고, 그동안 다양한 평가방법이 제안되었다. 그러나 제안된 평가방법은 미국이나 일본의 평가방법을 도입 및 수정하는 내용이 주가 되어 국내실정에 맞지 않는 부분도 많이 발견되었다. 따라서 국내에서 제안된 기존 건축물의 내진성능 평가기법, 지진피해 예측에 근거한 보강건축물의 합리적인 선정방법 및 이들 건축물에

적합한 내진보강 방법 등의 연구는 아직까지 초보적인 단계라고 할 수 있다. 국내의 내진기준은 신축 건축물들에 적합한 것으로, 내진기준이 정립되기 이전의 건축물들에 대한 평가방법이 여전히 부족한 상태이다.

본고에서는 기존 국내외의 내진성능 평가법을 간단히 살펴보고, 소방방재청에서 후원한 자연재해저감 기술개발사업 중 기존 저층건축물 내진성능 확보기술개발 과제에서 제안된 내진성능 평가법을 간단히 소개하고자 한다.

2. 기존의 내진성능 평가법 분석

2.1 국내의 내진성능 평가법 비교

미국, 일본 등에서 개발된 내진성능 평가법은 이미 다른 문헌을 통해 다수가 발표되었으므로 여기에서는 국내외의 내진성능 평가법을 간단히 요약하도록 한다.

미국에서는 동일한 철학 및 유사한 방법을 통해 모든 종류의 건축물의 내진평가를 수행하고 있다. 평가방법은 3단계로 이루어져 있으며, 1단계평가에서 잠재적 위험을 가진 건물을 선별하며, 이후 2단계에서 주로 선형해석에 의한 평가를 수행하며 3단계에서는 구조물이 비선형거동을 통해 붕괴기구 혹은 파괴모드를 포함한 정밀한 평가를 수행한다. 미국의 내진성능 평가는 성능기반 설계법에 기초하고 있어 명확한 목표성능 수준이 설정되어 있으며, 이에 따른 입력지진력과 이에 대한 구조물 전체 혹은 부재별 능력을 판단하므로 개념이 명확하나 절차가 다소 복잡하며 1단계평가에서도 간략하지만 구조해석이 필요하다는 점이 특징이다.

일본의 경우는 구조종별로 다른 개념에 의해 평가를 진행한다. 이러한 형식의 내진기준은 각 구성재료별 구조물의 특징을 최대한 상세히 파악하여 내진진단을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 전체적인 내진평가 방법을 이해하기 어렵고 통일성이 결여되어 혼란을 가져올 우려가

표 1 각국의 내진성능 평가방법 비교

구분	미국	일본	한국
평가방법	ASCE31-03(FEMA 310)	내진진단법(2001)	각종 평가방법 종합
요약	<p>3단계의 평가절차</p> <ul style="list-style-type: none"> Tier 1(Screening phase) <ul style="list-style-type: none"> 구조부재, 비구조부재의 상태검토 체크리스트 적절, 부적절 또는 해당사항 없음으로 평가 Tier 2(Evaluation phase) <ul style="list-style-type: none"> 선형정적해석(LSP) 또는 선형동적해석(LDP) 부적절 항목 및 건물에 대한 전체적인 재평가 Tier 3(Detailed evaluation phase) <ul style="list-style-type: none"> 능력스펙트럼법 및 변위계수법 등에 의한 비선형 정적해석(NSP) <p>2종류의 성능수준</p> <ul style="list-style-type: none"> MCE 2/3 지진에 대해 LS의 성능수준 검토 건물의 용도에 따라 IO 성능수준 추가검토 건물전체가 아닌 부재별 성능수준의 검토 명확한 목표성능수준에 의한 DCR 평가 	<p>3단계의 내진진단(RC조의 경우)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1차 진단법 <ul style="list-style-type: none"> 기둥 및 벽량에 의한 평가(기둥, 극단주, 벽 부재로 구분) 부재에 따른 평균전단응력도 및 인성치 사용 2차 진단법 <ul style="list-style-type: none"> 보를 강제로 가정하여 전단건물로 가정 부재를 휨기둥, 전단기둥, 극취성기둥, 휨벽, 전단벽 설계기준강도 사용 및 배근상태에 따른 전단 응력도 산정 3차 진단법 <ul style="list-style-type: none"> 보의 강도 및 벽의 회전까지 고려 <p>판정기준</p> <ul style="list-style-type: none"> I_s (구조내진지표) $\geq I_{so}$ (구조내진판정지표) 구조내진지표: $I_s = E_0 \times S_D \times T$ 구조내진지표 산정 시 보유성능기본지표는 강성과 연성에 관계된 것으로 결국 에너지 개념으로 구조성능을 판단 	<p>미국과 일본의 내진성능 평가방법 수정하여 평가</p> <ul style="list-style-type: none"> 미국의 평가방법(ASCE31-03, FEMA 350 등)을 중심으로 한 평가방법을 적용함 한국시설안전공단(2004, 2010년) 국내의 스펙트럼가속도에 적합한 성능수준을 산정하여 검토함 일본의 내진진단(내진진단기준/동해설, 2001)을 국내에 적합하게 수정하여 사용함 광운대, 초대형구조시스템연구센터 보고서(2001) RIST 등의 지침 연구(2002) 광운대, 한국시설안전공단(2008년 보고서) 전남대 이강석 교수(2009년 논문) 한국시설안전공단의 내진성능 평가방법 연구자들의 의함에 의하여 미국 → 일본 → 미국 평가방법으로 변경 되는 경향이 있음
문제점 분석	<ul style="list-style-type: none"> 결과가 수치화 되지 않음(적절/부적절로 평가) 구조종별 같은 평가방법으로 평가함(특성치 미반영) 평가항목 및 절차의 복잡성 강도(응력, 약층, 잉여력), 강성(층간변위, 연약층, 인접성), 형상, 노후화 등 끼움벽 또는 허리벽의 영향을 평가할 수 없음 목표성능(Demand)에 반응수정계수 사용 노후화 건물의 연성을 기대하는 것은 무리이므로 R값 사용은 불합리함 	<ul style="list-style-type: none"> 구조종별 또는 진단차수에 따른 자세한 평가로 상세한 평가가 가능하지만 너무 다양하여 평가가 용이하지 않음(그러나, 1차진단법은 절차가 간단하여 평가가 매우 용이함) 성능(I_s)과 요구(I_{so})가 명확한 목표성능에 기반을 두지 않고, 경험적인 수치로 되어 있음 단지 성능이 요구보다 크면 안전한 것으로 보고 내진성능 등급은 판단할 수 없음 조적벽체의 내력 및 강성을 평가할 규정이 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 미국과 일본의 내진성능평가방법의 단점을 같이 갖고 있음 미국과 일본의 평가방법의 개념이 서로 상이하여 국내의 평가방법에 대한 혼란이 있음 같은 기관에서 몇 년 주기로 발간한 내진성능 평가방법이 연구자들이 성향에 의하여 자주 변경되는 단점이 있음 일본과 미국의 구조형식이 다르므로 적용 시 국내 구조시스템에 적합한 값 사용해야 함

표 2 국내의 내진성능 평가에 관한 연구

연구 내용	연구자	년도
기존 건축물의 내진성능 평가기법	한양대, 현대건설기술연구소	1998
조적조 건축물에 대한 내진성능 평가기법	서울시립대, 지진방재연구소	2000
한국 철근콘크리트 건물의 내진진단법	광운대, 초대형구조시스템 연구센터(STRESS)	2001
조적조 건물의 내력도 평가	광운대	2002
구조 내진성능 평가에 관한 기술지침(안)	RIST, 동경대, 동경공업대, 광운대	2002
우리나라 중·저층 철근콘크리트 건축물의 지진피해예측 및 보수보강기법연구	고려대, 쌍용건설	2002
기존 건축물의 내진성능 평가 및 향상요령	한국시설안전공단	2004
국내실정에 맞는 취성파괴형 및 삼중수평저항 시스템건축물의 내진성능평가기법 개발	광운대, 한국시설안전공단	2008
저층 철근콘크리트 건물의 간이 내진성능 평가방법	전남대	2009
기존 건축물의 내진성능 평가 및 향상요령 보완·개정	한국시설안전공단	2011

있다. 또한 구조물의 능력(I_s)과 요구(I_{s0})가 명확한 이론에 근거하기 보다는 경험적인 수치를 사용하여 구조물의 내진성능을 평가하고 있는 측면이 있다. 하지만 1차진단법의 경우에는 사용이 간편하여 단시간에 평가가 가능하며, 그 결과도 수치화되어 내진성능의 비교가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

국내의 내진성능 평가기법은 미국과 일본의 내진성능 평가개념을 근본적으로 받아 들이면서 국내의 실정에 적합하도록 수정한 것으로 개념은 위의 미국과 일본의 내진성능 평가 기법의 개념과 같다. 기존의 내진성능 평가방법, 즉, 미국의 FEMA-310, 일본의 내진진단기준, 및 국내의 내진성능 평가방법을 통해 기본적인 기존 건축물 평가방법의 개념을 분석하여 문제점을 포함하여 표 1에 정리하였다.

2.2 국내의 내진성능 평가법 비교

국내의 내진성능 평가방법은 표 2에는 국내에서 수행된 내진성능 평가법에 관한 연구목록이다. 전술한 것과 같이 국내의 내진성능 평가방법은 미국이나 일본에 기반하고 있으며, 국내에 적합하게 수정·보완하여 제시되었다.

본 절에서는 국내의 내진성능 평가방법을 비교하는데 있어서 모든 연구결과를 직접적으로 비교하기 보다는 표 3과 같이 핵심이 되는 4개의 연구결과를 바탕으로 각 항목별로 특징을 요약하며 비교·분석하였다. 대상 평가방법은 “기존 건축물의 구조 내진성능 평가에 관한 기술지침(안), RIST 외, 2002”, “국내실정에 맞는 취성파괴형 및 삼중수평저항 시스템 건축물의 내진성능 평가기법 개발, 한국시설안전공단, 2008”, “저층 철근콘크리트 건물의 실용적인 간이 내진성능 평가방법 제안, 전남대 이강석 교수, 2009”, 및 “기존 건축물의 내진성능평가 요령의 개정보완, 한국시설안전공단, 2011” 등이다. 또한 평가항목으로는 평가방법 기반, 평가절차, 목표성능 수준 고려여부, 재료의 노후화 고려여부, 평가기준, 구조종별, 부재별 평가가능 여부, 평가방법의 복잡성, RC조 전단벽의 전단응력도, 및 무보강 조적조의 전단응력도 등이다.

평가방법의 비교결과, 일본을 기반한 연구는 다수의 연구가 예비평가를 중심으로 다루었고, 미국을 기반한 연구는 3단계의 평가방법을 제시하였다. 3단계의 평가법의 경우에는 예비평가는 수기로 간단히 평가할 수 있지만, 상세평가의 경우에는 LSP, LDP 및 NSP 등 컴퓨터 해석프로그램을 통하여 평가가 가능하도록 되어 있다.

3. 제안된 내진성능 평가법 소개

본 연구에서 제안된 내진성능 평가법은 완전한 새로운 평가법의 개발이 아니라 기존의 내진성능 평가법에 관한 분석결과를 바탕으로 국내의 현실에 적합하게 수정·보완한 것이다. 따라서 본고에서는 평가법을 상세하게 기술하기 보다는 간단히 핵심사항만 요약하여 소개하고자 한다.

3.1 내진성능 평가절차

내진성능 평가절차는 그림 1과 같이 3단계로 이루어진다.

① 1단계 예비평가 : 예비평가에서는 간단한 자료 및 약산식을 사용하여 산정된 강도를 통해 내진성능을 보수적으로 평가한다. 예비평가에서 평가결과가 만족하지 못할 경우 내진성능에 문제가 있을 가능성이 높음을 의미하므로 상세평가를 통한 정밀한 평가를 권장한다.

② 2단계 상세평가 : 대상구조물의 보 및 슬래브는 매우 강하다고 가정하고 기둥 및 벽의 강도는 재료강도, 부재크기, 배근량으로 계산하지만, 소성변형능력(인성)은 기존의 반응수정계수에 의한 평가값의 절반수준임을 원칙으로 하여 평가하는 방법이다.

표 3 국내의 대표적인 내진성능 평가방법

구분	제목	기준 건축물의 구조 내진성능 평가에 관한 기술지침(안)	국내실정에 맞는 취성파괴형 및 삼중수평저항 시스템 건축물의 내진성능평가방법 개발	지층 철근콘크리트 건물의 실용적인 간이 내진성능 평가방법 제안	기존 건축물의 내진성능평가 요령의 개정보완
연구자	일시		광운대, 한국시설안전공단	전남대 이강석 교수	한국시설안전공단
	연구자	RIST, 동경대, 동경공업대, 광운대	광운대, 한국시설안전공단		
평가방법 기반	평가방법	일본 내진진단기준(2001)	RC조: 광운대, 초대형구조시스템 연구센터 보고서(2001) 조적조: RIST등의 기술지침(안) (2002)	일본 내진진단기준(2001)	예비평가: 한국, 일본, 미국자료 상세평가: 미국 FEMA 310, FEMA 356, FEMA 440
	평가절차	예비평가 (일본의 1차진단과 2차진단의 중간레벨)	예비평가 (일본의 1차진단과 2차진단의 중간레벨)	예비평가 (기동 및 벽량에 의한 강도평가)	예비평가: 기동/벽량에 의한 평가 1차 상세평가: LSP, LDP 기반 평가 2차 상세평가: NSP에 의한 평가
목표성능수준 고려여부	고려여부	고려하지 않음 (내진판정지표를 경험으로 산정)	고려하지 않음 (내진판정지표를 경험으로 산정)	고려하지 않음	성능수준고려(IO, LS, CP)
	재료의 노후화 고려여부	일본 내진진단기준에 따른 재료강도 고려 (현지 조사에 의한 재료강도의 하한값 또는 평균값 사용)	한국에서의 RC조 및 조적조 실험결과를 바탕으로 한 재료강도 고려 (현지 조사에 의한 재료강도의 하한값 또는 평균값 사용)	예비평가 시에는 재료강도가 아닌 응력과 기동/벽량에 의해 강도를 산정하므로 재료강도를 고려할 필요 없음	재료 보정계수, 강도감소계수 및 년도별 재료값(하한값, 평균값) 제시함
평가기준	평가기준	구조내진지표(I_s) 및 구조내진판정지표(I_{so})에 의한 평가 $I_s \geq I_{so}$	구조내진지표(I_s) 및 구조내진판정지표(I_{so})에 의한 평가 $I_s \geq I_{so}$	지진피해도별 요구성능(E_m) 및 요구성능판정지표(E_o)에 의한 평가 대소관계 결과에 따른 등급결정(12등급)	예비평가: DCR에 의한 평가 상세평가: 성능수준(IO, LS, CP)의 허용기준에 의한 평가
	구조종별	철근콘크리트조, 철골조, 조적조	철근콘크리트조, 철골조, 조적조	철근콘크리트조	철근콘크리트조, 철골조, 조적조, 철골철근콘크리트조
부재별 평가가능 여부	평가가능 여부	불가능	불가능	불가능	예비평가: 불가능 상세평가: 가능
	평가방법의 복잡성	내력평가식의 다소 복잡함 (일본 1차와 2차의 레벨)	내력평가식의 다소 복잡함 (일본 1차와 2차의 레벨)	간편함	1차 및 2차는 프로그램활용이 필수 부재별 성능수준 평가로 복잡
예비평가시 RC조 진단벽의 전단응력도 (MPa)	양측 기동 유	0.6	0.6	3	3
	한쪽 기동 유	0.2	0.2	2	2
	기동 무	0	0	1	1
예비평가시 무모강 조적조의 전단응력도 (MPa)	개구부 무	0.4	0.2	고려하지 않음 (RC조만 고려함)	0.2
	개구부 유	0.15	0.1		0.1

③ 3단계 정밀평가 : 상세평가: 대상구조물의 비선형 해석을 원칙으로 하며 부재의 연성도 및 변형능력을 고려하여 평가한다. 비선형 정적해석을 통해 성능점을 구하고 성능점에서 발생한 부재의 응력 및 변형을 개별 부재의 연성도 및 변형능력과 비교하여 검토한다. 성능점을 산정하기 위한 방법으로는 성능스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)과 변위계수법(Displacement Coefficient Method) 등을 사용할 수 있다.

상세평가를 위해서는 배근상태를 포함한 설계도서가 반드시 필요하며 내진성능 평가에서는 설계도서에 따라 시공되었다는 가정 하에 재료의 사용연수 및 재료상태에 따른 감소계수를 적용한다. 열악한 환경조건으로 재료의 열화가 특히 심할 것으로 예상되는 경우는 현장조사와 재료시험을 통해 이를 확인하여야 한다. 노후도 판단을 위한 현장조사와 재료시험방법은 정밀안전진단지침을 사용할 수 있다. 내진성능 평가 시에 빠른 시일 내에 보다 정밀한 평가를 위해서 1단계를 생략하고 2단계를 바로 실시하거나, 1단계 및 2단계를 생략하고 3단계를 바로 실시할 수 있다.

3.2 지진위험도 및 성능수준

내진성능 평가를 위한 지진하중과 지진위험도는 2009년 대한건축학회에서 제정한 ‘건축구조기준 및 해설’(이하 KBC2009)의 내용을 따른다. KBC2009에 따른 지진하중 즉, 2400년 재현주기 지진의 2/3수준의 지진 작용 시 KBC2009에 정의된 내진 특등급건물, 내진 1등급건물, 내진 2등급 건물은 각각 즉시거주, 인명안전, 붕괴방지의 성능을 발휘할 수 있어야 한다.

단, 3단계 정밀평가 단계에서는 지진규모, 즉, 최대고려 지진(2400년 지진수준), 설계수준의 지진(KBC2009 기반 2400년의 2/3 지진수준) 및 사용성 수준의 지진(KBC2009 지진의 2/3 수준)의 각 지진의 수준별로 상세하게 평가한다. 내진성능 평가는 대상 건축물이 이러한 목표성능을 확보하고 있는지를 평가하여야 한다.

표 4 내진성능 평가 시 목표 성능수준

KBC2009내진등급	1단계 예비평가/ 2단계 상세평가	3단계 정밀평가		
	설계수준지진 성능목표	지진의 재현주기별 성능목표		
		사용성수준 지진 (KBC2009의 2/3수준)	설계수준지진 (KBC2009 수준)	최대고려지진 (KBC2009의 3/2수준)
내진 2등급	붕괴방지	붕괴방지	조건부 판단	조건부 판단
내진 1등급	인명안전	고려하지 않음	인명안전	조건부 판단
내진특등급	즉시거주	고려하지 않음	고려하지 않음	즉시거주

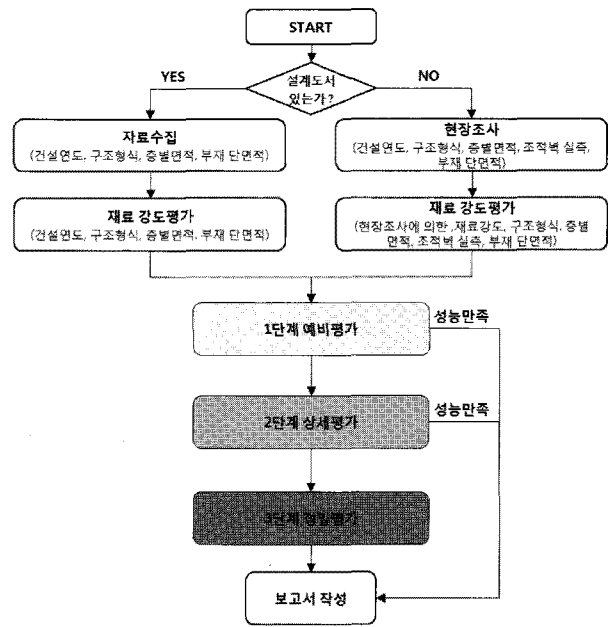


그림 1 내진성능 평가절차 흐름도

각 내진등급의 건축물에 요구되는 성능수준은 표 4와 같다.

3.3 1단계 예비평가

3.3.1 평가절차

내진성능 예비평가는 지진하중에 저항하는 수직부재의 재료강도와 단면치수로부터 개략적인 횡하중저항능력을 평가하고, 이를 지진하중에 의해 건물에 작용하는 밀면전단력과 비교하여 강도측면에서 내진성능을 안전측으로 평가한다. 수직부재가 전단파괴될 경우는 비선형 거동이 일어나지 않으므로 전단파괴하중을 그 부재의 횡하중저항능력으로 볼 수 있으며, 휨파괴되는 부재의 경우에는 비선형 거동에 의한 에너지 흡수능력을 고려하여 휨파괴강도에 적절한 계수를 곱한 값을 그 부재의 횡하중저항능력으로 본다. 전단파괴 부재와 휨파괴 부재가 공존하는 경우는 두 종류의 부재가 최대하중에 도달하는 시점이 다르므로 구조물

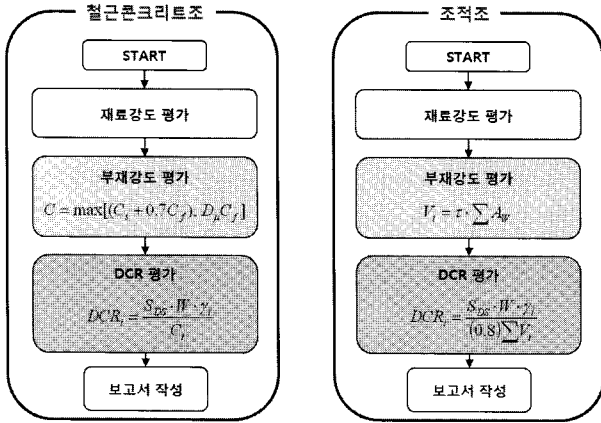


그림 2 1단계 예비평가 절차

의 횡하중저항능력을 두 값의 단순합으로 볼 수는 없으며, 휨과 전단거동의 상호작용을 고려한 간략식을 사용한다. 예비평가에서 평가결과가 성능목표를 만족하지 못할 경우 상세평가를 통한 정밀한 평가를 권장한다.

설계도서가 없을 경우 예비평가를 위해서는 현장조사를 통해 수직부재의 단면치수에 대한 조사가 필요하다. 재료 특성의 경우 건설연도에 따른 기본값을 사용할 수 있다. 설계도서가 있을 경우 설계도서에 근거한 단면치수 및 재료 특성을 사용할 수 있다.

전술한 바와 같이 본 예비평가는 한국시설안전공단에서 발간한 “기존 건축물의 내진성능 평가 및 향상요령 개정보완(2011)”을 기반으로 작성되었는데, 공단의 예비평가에서는 구조물에 조적채움벽이 존재할지라도 보수적인 평가를 위하여 평가를 배제하였다. 그러나 기존의 연구결과를 참조하면 조적벽이 골조사이에 존재하는 조적채움벽의 경우에는 구조물의 전단내력을 매우 상승시키는 결과를 초래하는 것을 알 수 있다.

그림 2는 1단계 예비평가 절차를 나타낸 것이다. 예비평가는 지진하중에 저항하는 수직부재의 재료강도와 단면치수로부터 개략적인 횡하중 저항능력을 구하고, 이를 지진하중에 의해 건물에 작용하는 밀면전단력과 비교하여 강도 측면에서 내진안전성을 평가하는 것이다.

그림 2에서 S_{DS} 는 KBC 2009에 따른 단주기설계스펙트럴 가속도, W 는 구조물의 총 중량($= \sum_{i=1}^n w_i \cdot A_i$), A_i 는 i 층 바닥면적의 합, γ_i 은 층전단력 분포계수 ($= \sum_{\ell=1}^n w_\ell h_\ell^k / \sum_{i=1}^n w_i h_i^k$), 그리고 $\sum V_i$ 는 전단저항력의 합($= v_{oi} \cdot A_{w_{oi}} + v_{ni} \cdot A_{w_{ni}}$)을 나타낸다.

3.3.2 성능수준의 판정

성능수준의 판정지표는 기본적으로 Demand/Capacity의

표 5 철근콘크리트조의 성능수준 판정을 위한 DCR 기준

DCR의 범위	성능수준
$DCR \leq 0.5$	즉시거주
$0.5 < DCR \leq 0.75$	인명안전
$0.75 < DCR \leq 1.0$	붕괴방지
$1.0 < DCR$	붕괴

표 6 조적조 성능수준 판정을 위한 DCR 기준

DCR 범위	성능수준
$DCR \leq 0.25$	즉시거주
$0.25 < DCR \leq 0.75$	인명안전
$0.75 < DCR \leq 1.0$	붕괴방지
$1.0 < DCR$	붕괴

비(DCR)에 의한다. 예비평가에서는 전단력의 저항여부를 중심으로 평가하므로 Demand는 평가기준 지진하중에 의한 층전단력, Capacity는 연직부재의 전단저항능력의 합이다. 성능수준 판정을 위한 DCR의 범위는 공단의 결과를 그대로 따르는 것으로 하였다.

조적조의 등급산정은 표 6에 의한다.

3.4 2단계 상세평가

3.4.1 평가절차

2단계 상세평가는 기존 건축물의 구조성능에 관한 내진 진단을 되도록 짧은 시간 내에 보다 정확하게 수행할 수 있도록 하는 것을 목표로 하였으며, 구조내진지표 I_s 에 의해 연속량(수치)로 나타냄과 동시에, 그 결과를 판정할 때 이용되는 것이다. 2단계 상세평가의 절차는 그림 3에 나타났다. 상세평가의 핵심이 되는 구조내진지표, 즉, I_s (Seismic Index of Structure)는 구조체의 내진성능을 나타내는 지표로, 대상이 되는 철근콘크리트조 건축물 및 조적조 건축물에 대해서 평가하고 있으며, 수평력에 대한 건물의 극한강도 혹은 인성이 클수록 이 지표의 값은 크게 된다.

가장 기본적인 구조체 부분의 내진성능은 식 (1)와 같이 정의되는 구조내진지표(I_s)의 값으로 나타낸다.

$$I_s = E_0 \times S_D \times T \tag{1}$$

여기서, E_0 : 보유성능기본지표($C \times T$), C : 강도지표, F : 인성지표, S_D : 형상지표, T : 경년지표

이 가운데에서 보유성능기본지표(E_0)가 가장 기본적인 내진성능을 나타내는 지표로서 건물이 보유하는 내력을 전단력계수의 형식으로 나타내는 강도지표(C)와 변형능력을

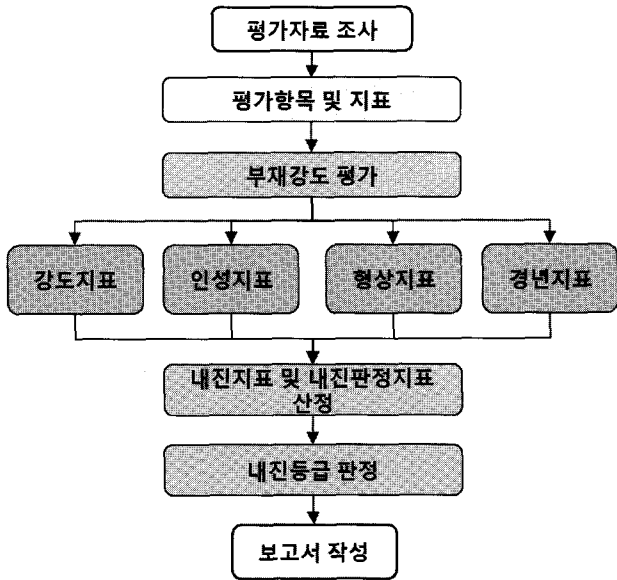


그림 3 2단계 상세평가 절차

나타내는 강도지표(I)의 곱으로 산정한다. 이것은 건물이 지진을 받았을 때 안전하기 위해서는 벽이 많은 건물에서는 인성이 작기 때문에 상당한 강도가 필요하고, 또한 벽체가 적은 건물(라멘구조)에서는 강도의 여유가 적기 때문에 인성이 있는 구조여야만 한다는 것을 고려한 것으로서, 벽체가 많은 건물과 라멘구조의 건물에 공통의 내진성능의 척도를 설정하기 위한 목적으로 정한 것이다, 그리고 형상지표(S_D) 및 경년지표(T)는 각각 구조물의 정형성, 건설 후의 연수에 따라 보유성능 기본지표(E_0)를 보정하는 1.0을 기준치로 한 계수이다.

2단계 상세평가법은 2002년 RIST를 주축으로 하여 발간한 구조 내진성능 평가에 관한 기술지침(안) 기반으로 작성되었다. 이 지침안은 일본의 내진진단기준의 1차평가법과 2차평가법의 중간단계 수준으로 수직부재의 철근을 고려한 상세한 평가방법에 근거를 두고 있다. 그러나 일본의 내진진단기준과 마찬가지로 구조물의 내진성능이 만족하거나 불만족하는 등의 단순판단만 할 수 있고, 내진성능 등급을 결정할 수 없는 단점이 있었다.

따라서 본 2단계 상세평가법에서는 기존의 지침(안)에서 구조내진판정지표(내진성능요구도)와 구조내진지표(실제 구조물이 내진성능)의 비, 즉, DCR(요구/성능)을 통하여 각각 콘크리트조와 조적조의 내진성능 등급을 결정할 수 있도록 하였다.

3.4.2 성능수준 판정

내진성능 평가절차에 따라 층별로 구조내진지표를 산정한 후 이를 토대로 성능수준을 결정한다. 성능수준의 판정

표 7 γ 계수값

구조시스템	γ 계수
철근콘크리트조	$1.5 \leq \gamma \leq 2.0$
조적조	$1.0 \leq \gamma \leq 1.5$

표 8 철근콘크리트조의 성능수준 판정

DCR의 범위	성능수준
$DCR < 0.5$	즉시거주 IO
$0.5 < DCR < 0.85$	인명안전 LS
$0.85 < DCR < 1.0$	붕괴방지 CP
$1.0 < DCR$	붕괴

표 9 조적조의 성능수준 판정

DCR의 범위	성능수준
$DCR < 0.25$	즉시거주 IO
$0.25 < DCR < 0.85$	인명안전 LS
$0.85 < DCR < 1.0$	붕괴방지 CP
$1.0 < DCR$	붕괴

은 KBC2009지진에 대해서 판정지표인 I_{SO} 를 산정한 후 판정기준에 의해 결정한다. 내진성능 판정지표는 다음 식으로 산정한다.

$$I_{SO} = \frac{S_{DS} \times I_E}{\gamma} \quad (2)$$

위 식에서 SDS는 단주기 스펙트랄가속도, IE는 중요도 계수, γ 는 연성을 고려한 계수이다. 내진성능 판정지표의 경우 밀면전단력 계수의 형태로 표현되므로 기준에 의하면 반응수정계수를 고려하여야 하나, 기준에 노후화된 철근콘크리트조나 조적조의 경우 현 기준에 제시된 반응수정계수 만큼 연성을 발휘할 수 없다고 판정되므로 표 7과 같이 γ 계수를 제시하였고 최종 값은 전문가의 판단에 의해 사용할 수 있다.

구조물의 성능수준 판정을 위한 DCR 기준은 다음 식으로 산정한다. 철근콘크리트조 및 조적조의 성능수준판정 근거는 표 8 및 표 9에 각각 나타내었다.

$$DCR = \frac{Demand}{Capacity} = \frac{I_{SO}}{I_S} = \frac{S_{DS} \times I_E}{\gamma \times E_0 \times S_D \times T} \quad (3)$$

3.5 3단계 정밀평가

3.5.1 평가절차

3단계 정밀평가는 비선형 정적해석을 통하여 성능점을

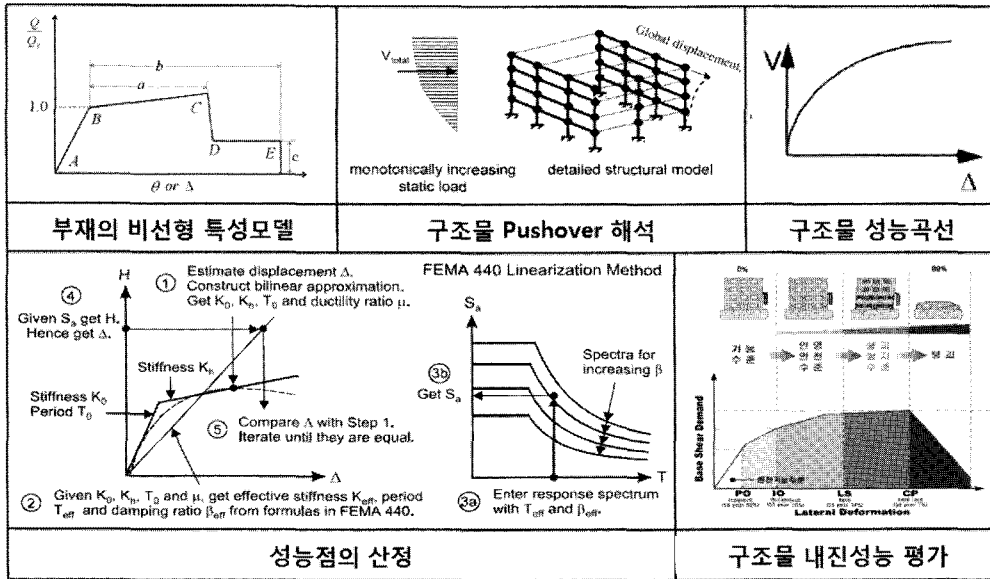


그림 4 3단계 정밀평가 절차

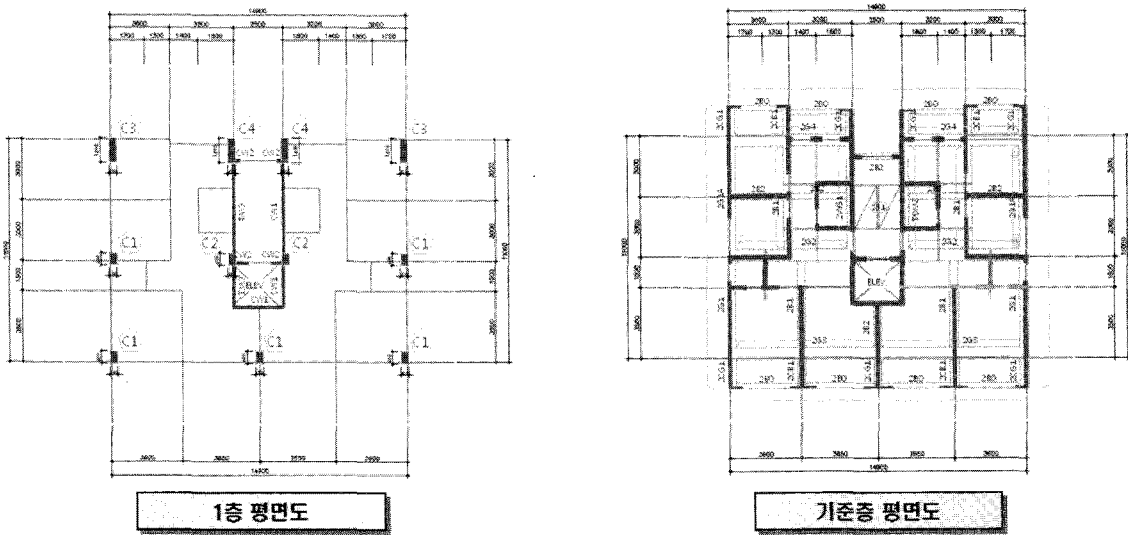


그림 5 대상 철근콘크리트 구조물

산출하여 구조물의 성능을 평가하여 대상 건축물의 내진성능을 정확히 평가하고 평가기준 지진에 의하여 발생할 수 있는 피해의 정도를 최대한 정밀히 예측하는데 그 목적이 있다.

비선형 정적해석절차는 성능스펙트럼(ATC-40)에 의한 방법과 변위계수법(FEMA-356) 방법으로 구분되며, 이 두 방법의 문제점을 개선하여 정확성을 향상시킨 FEMA-440에 의한 수정된 선형화방법 및 수정된 변위계수법이 있다. FEMA 356 방법은 탄성으로 가정된 단자유계 구조모델의 응답을 경험에 의존하는 몇 가지 인수로 변경함으로써 비선형 거동을 예측하는 변위변경절차(변위계수법)를 사용한다. 또 다른 방법인 ATC-40 방법에서 사용하는 능력스펙트

럼법은 등가선형방법의 형태를 갖는다. 이 방법은 등가선형의 단자유도계 응답 평가를 연성비의 함수를 이용하는 경험적인 유효주기와 감쇠의 관계를 이용한다. 비선형 정적해석 절차는 성능점을 정의하는 법에 따라서 다양한 해석방법이 사용된다.

본 3단계 정밀평가법은 미국의 내진성능 평가 및 내진보강을 위해 사용하는 비선형 정적해석을 기반으로 하여 작성되었고, 한국시설안전공단에서 발간한 “기존 건축물의 내진성능 평가 및 향상요령 개정보완(2011)”도 마찬가지로 같은 기반의 성능평가법을 작성하여 제안하고 있다.

한국시설안전공단의 내진성능 평가법은 기존의 미국평

가법과는 다르게 각 부재별로 성능수준(IO, LS, CP)을 판정 한 후에 각 층별로 부재의 전체에서 연직하중분담율이 80% 이상이 되는 개소가 되는 경우에 성능등급이 결정되어 지는 방법을 사용하고 있다. 그러나 본 3단계 정밀평가에서는 구조물 전체의 성능을 한꺼번에 평가하는 미국의 방법을 따르고 있다. 이는 구조물의 내진성능은 부재별 성능수준에 의해 결정되기 보다는 시스템의 특성에 의해 그 결과가 달라지므로 부재의 성능수준에 따른 평가는 정확하지 않은 평가결과를 나타낼 수 있다고 판단된다.

3.5.2 성능수준 판정

일반적으로 건축물에 대한 내진성능수준의 판정은 건축주의 요구, 지진재해에 의해 예상되는 손실, 경제성 및 허용 가능한 위험도 등을 고려하여 설계전문가에 의해 결정되며,

예상 성능 수준 및 지진재해 수준의 조합으로 정의된다.

그러나 본 3단계 정밀평가절차에서는 앞서 기술한 비선형 정적해석에 의한 결과를 바탕으로 하여 지진수준별로 각각 붕괴방지, 인명안전 및 즉시거주 수준을 제시한다. 내진특등급의 경우는 건물의 중요도를 고려하여 2400년 재현 주기의 최대고려지진에서도 즉시거주의 성능을 갖도록 하였고, 내진1등급의 경우에는 KBC2009 설계수준의 지진규모에서 인명안전의 목표를 달성하도록 하였다.

4. 제진댐퍼 적용사례

4.1 철근콘크리트 구조물

대상 철근콘크리트 건물은 5층의 다세대 주택으로서

표 10 3단계 정밀평가의 내진성능수준 판정기준

KBC2009의 내진등급	지진의 재현주기별 성능목표		
	사용성수준 지진 (KBC2009의 2/3 수준)	설계수준지진 (KBC2009 수준)	최대고려지진 (2400년 수준)
내진 2등급	붕괴방지	조건부 판단	조건부 판단
내진 1등급	고려하지 않음	인명안전	조건부 판단
내진특등급	고려하지 않음	고려하지 않음	즉시거주

1단계 예비평가

층	방향	Demand	Capacity	DCR	성능수준
1층	x방향	5155 kN	3744 kN	1.38	붕괴
	y방향	5155 kN	9252 kN	0.56	인명안전
2층	x방향	3126 kN	3090 kN	1.01	붕괴
	y방향	3126 kN	10449 kN	0.30	즉시거주
3층	x방향	1787 kN	3090 kN	0.58	인명안전
	y방향	1787 kN	10449 kN	0.17	즉시거주
4층	x방향	820 kN	3090 kN	0.27	즉시거주
	y방향	820 kN	10449 kN	0.08	즉시거주
5층	x방향	209 kN	3090 kN	0.07	즉시거주
	y방향	209 kN	10449 kN	0.02	즉시거주

2단계 상세평가

진단방향		X방향		판정 지표		I _{SS} =0.4			성능등급
층	C	F	파괴형식	E ₀	S _p	T	I ₂		
5	2.87	1.0	w	2.87	0.9	1.0	2.59	0.1510	
		1.0	BC						
		1.0	SC						
4	1.60	1.0	w	1.60	0.9	1.0	1.44	0.2610	
		1.0	BC						
		1.0	SC						
3	1.20	1.0	w	1.20	0.9	1.0	1.08	0.3710	
		1.0	BC						
		1.0	SC						
2	1.04	1.0	w	1.04	0.9	1.0	0.93	0.4310	
		1.0	BC						
		1.0	SC						
1	0.40	1.0	w	0.40	0.9	1.0	0.36	1.11 붕괴	
		1.0	BC						
		1.0	SC						

진단방향		Y방향		판정 지표		I _{SS} =0.4			성능등급
층	C	F	파괴형식	E ₀	S _p	T	I ₂		
5	6.11	1.0	w	6.11	0.9	1.0	5.50	0.0710	
		1.0	BC						
		1.0	SC						
4	3.39	1.0	w	3.39	0.9	1.0	3.05	0.1310	
		1.0	BC						
		1.0	SC						
3	2.55	1.0	w	2.55	0.9	1.0	2.29	0.1710	
		1.0	BC						
		1.0	SC						
2	2.20	1.0	w	2.20	0.9	1.0	1.98	0.2010	
		1.0	BC						
		1.0	SC						
1	0.94	1.0	w	0.94	0.72	1.0	0.67	0.5915	
		1.0	BC						
		1.0	SC						

3단계 정밀평가

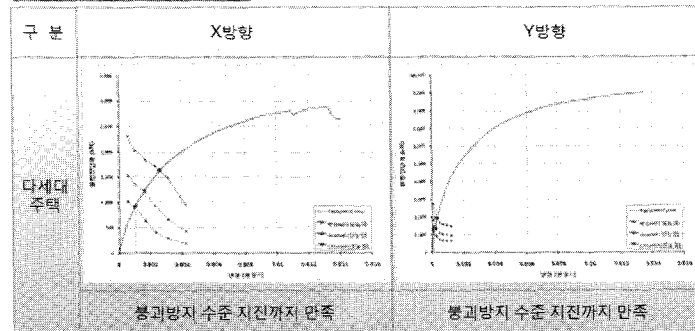


그림 6 평가 결과

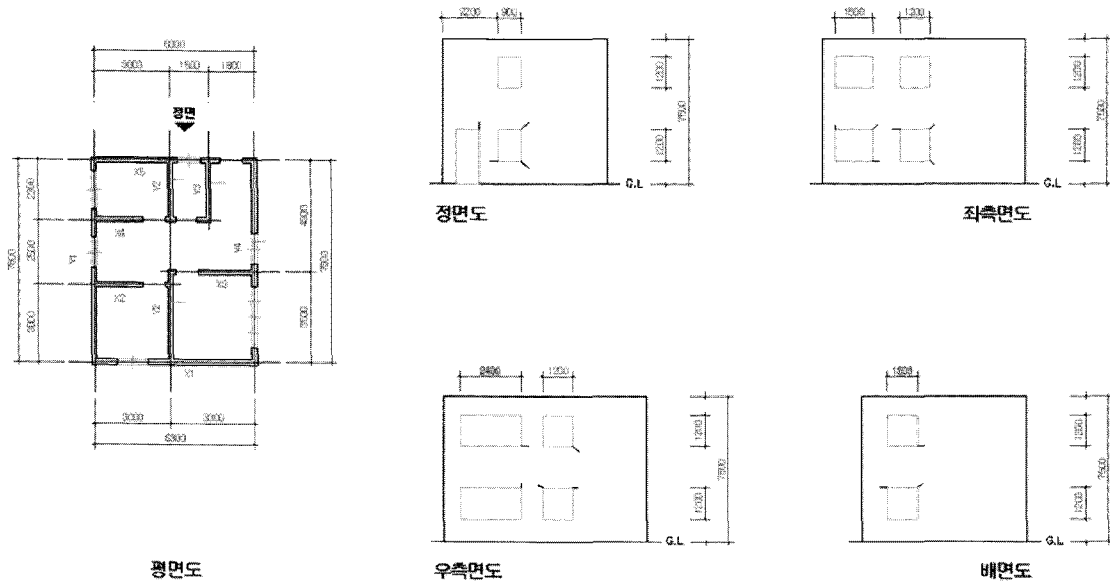


그림 7 대상 조적조 건축물

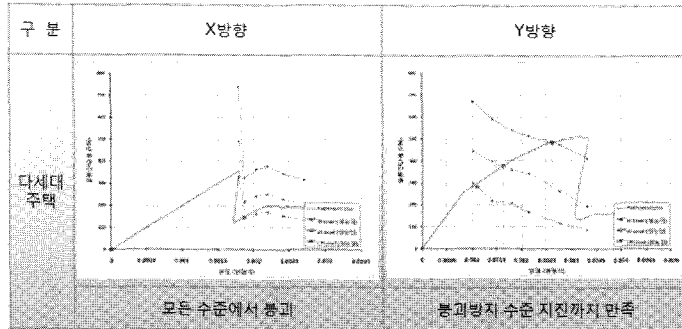
1단계 예비평가

		Demand	Capacity	DCR	성능수준
1층	x 방향	447 kN	260 kN	1.72	붕괴
	y 방향	447 kN	319 kN	1.40	붕괴
2층	x 방향	112 kN	145 kN	0.77	인명안전
	y 방향	112 kN	160 kN	0.70	인명안전

2단계 상세평가

진단방향	X방향		관정 지표	ISO=0.516				성능등급
층	C	F	파괴 형식	E_o	S_D	T	I_s	I_w/I_s
3			bw					
			BC					
			SC					
2	1.53	0.8	bw	1.23	1.0	1.0	1.23	0.42 LS
		1.0	BC					
		1.0	SC					
1	0.54	0.8	bw	0.43	1.0	1.0	0.43	1.19 붕괴
		1.0	BC					
		1.0	SC					

3단계 정밀평가



진단방향	Y방향		관정 지표	ISO=0.516				성능등급
층	C	F	파괴 형식	E_o	S_D	T	I_s	I_w/I_s
3			bw					
			BC					
			SC					
2	1.76	0.8	bw	1.41	1.0	1.0	1.41	0.37 LS
		1.0	BC					
		1.0	SC					
1	0.71	0.8	bw	0.57	1.0	1.0	0.57	0.91 CP
		1.0	BC					
		1.0	SC					

그림 8 평가결과

2000년 이전에 지어진 건물이다. 건물의 평면형상은 그림 5와 같고, 평가결과의 요약은 그림 6에 나타났다.

각 단계별 평가결과를 요약하면, 1단계 예비평가와 2단계 상세평가의 경우 X방향 1층에서 붕괴의 성능수준을 보였고, Y 방향으로서는 인명안전(Life Safety; LS)의 성능수준을 나타냈다. 그러나 3단계 정밀평가는 각 층별이 아닌 건

물 전체의 성능곡선 및 성능점에 의해서 평가되는데, 평가 결과 붕괴방지(Collapse Prevention; CP) 수준의 지진으로부터도 성능이 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 평가법의 초기단계는 매우 보수적으로 내진성능을 평가하지만 단계가 올라갈수록 복잡하지만 조금 더 합리적으로 평가되기 때문이라고 판단된다. 이러한 건물의 내진보강 실

시여부는 건축구조 전문가들의 판단이 필요하다고 할 수 있다.

4.2 조적조 건축물

대상 조적조 건물은 2층 규모의 일반 조적조 주택의 전형적인 예이다. 건물은 1977년 이전에 준공되었고 과거 국내저층 주거의 다수를 차지하고 있어 내진안전성의 검증이 무엇보다 절실한 사례라고 할 수 있다.

평가결과를 살펴보면, 1단계 예비평가의 경우에는 1층의 X, Y 방향 모두 붕괴의 성능수준을 보였고, 2단계 상세평가의 경우에도 1층의 X방향은 붕괴의 수준이, Y방향은 붕괴방지수준의 성능을 나타냈다. 마찬가지로, 3단계 정밀평가의 경우에도 X방향으로는 붕괴의 성능수준결과를 보였고, Y방향으로는 붕괴방지 수준까지 만족하는 결과를 나타냈지만, 성능점을 살펴보면 연성능력의 측면이 불안전해 보인다고 할 수 있다. 이러한 결과는 비록 하나의 평가결과이지만 국내 조적조 저층 주거건물의 경우에는 내진성능 평가를 시급히 실시하여 보강여부를 판단해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론


본고는 소방방재청의 “저층건축물 내진성능확보 기술개발”의 연구결과로서 제안된 내진성능 평가법에 대해 간단히 요약하여 소개하였다. 앞에서 살펴본 바와 같이, 국내에 제시된 대부분의 내진성능 평가법은 미국이나 일본의 평가법을 기반으로 작성되었으며, 평가법 개발자에 의해 각각 다른 방법이 제시되어 실무적으로 적용할 때 혼란이 가중된 것은 사실이다.

따라서 본 과제에서는 기존의 국내외 내진성능 평가법을 자세히 분석하였고, 그 결과를 바탕으로 기존의 내진성능 평가법을 보완하여 보다 국내 환경에 적합한 평가법을 제안하였다. 평가사례에서 보듯이 국내의 저층 철근콘크리트 건물과 조적조 건물은 내진성능이 완벽하게 확보하고 있지

않다는 것을 알 수 있다.

이제 한국도 지진안전지대가 아니라는 많은 발표들을 꼭 주지하지 않더라도 국민의 생명과 재산을 보호하는 내진성능 평가법의 활용은 시급하다고 할 수 있고, 정책적으로도 빠른 시일 내에 국내 저층건축물의 적절한 내진보강 방안이 추진되어야 할 것으로 판단된다. 아무쪼록 제안된 평가법의 활용이 증대되기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. 현대건설기술연구소, 한양대학교, “기존건축물의 내진성능 평가기법”, 1998
2. 이원호 외, “한국 철근콘크리트 건물의 내진진단법 개발에 관한 연구”, 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터 (STRESS) 보고서, 2001
3. 서울시립대학교, 지진방재연구소, “조적조 건축물에 대한 내진성능 평가 기법”, 2001
4. 포항산업과학연구원, 동경대학교, 동경공업대학교, 광운대학교, “구조 내진성능 평가에 관한 기술지침(안)”, 2002
5. 건설교통부, 한국건설기술연구원, 고려대학교, “우리나라 중·저층 철근콘크리트 건축물의 지진피해 예측 및 보수 보강법 연구”, 2002
6. 한국시설안전공단, “기존 건축물의 내진성능 평가 및 향상요령”, 2004
7. 한국시설안전공단, “국내실정에 맞는 취성파괴형 및 삼중수평저항시스템 건축물의 내진성능 평가기법 개발”, 2008
8. 이강석 외, “저층 철근콘크리트 건물의 실용적인 간이 내진성능 평가법 제안 및 적용가능성 검증”, 대한건축학회 구조계논문집, 제25권 9호, 2009
9. 한국시설안전공단, “기존 건축물이 내진성능 평가 요령의 개정보완”, 2011. 7 

[담당 : 김명한, 편집위원]