

## 특집기사

# 건축물 지진피해 손실평가를 위한 역량 스펙트럼 산출 방법론

## Methodology of Capacity Spectrum Calculations for Structural Seismic Loss Evaluations



목 지 욱<sup>1)</sup>

Mauk, Ji Wook



전 새 미<sup>2)</sup>

Jun, Sae Mee



김 형 준<sup>3)\*</sup>

Kim, Hyung Joon

### 1. 머리말

2004년 인도네시아에서 발생한 수마트라 지진에 의해 약 28만명 이상의 사상자와 14만명 이상의 실종자 등 대규모 인명피해가 야기되었고, 2005년 파키스탄에서 발생한 지진에 의해 약 8만명 이상의 사상자와 6만명 이상의 부상자가 발생하였다. 이처럼 지진으로 인한 인명 및 국가적 재산의 손실 규모는 국가가 감당할 수 없을 정도로 큰 경우가 많아 국제적으로 국가차원의 대책 마련에 대한 요구가 급증하고 있다.

지진재해는 일반적으로 피해규모가 크고 피해지역이 광범위하여 우리나라와 같이 도시화, 산업화가 진행된 사회의 경우, 지진발생에 따라 경제적 마비현상과 장기간에 걸친 직·간접 국가적 손실을 유발할 가능성이 매우 높다. 뿐만 아니라 우리나라도 대규모 지진 발생에 대한 위협이 항상 존재한다고 볼 수 있다는 점에서 국가적 차원에서 이를 대비하고 피해를 최소화하기 위한 체계적 대응시스템의 요구가 절실하다.

이에 국내에서는 해외의 선진화된 재해대응시스템을 국산화하여 국민의 생명과 재산 및 건축물 등의 지진재해로 인한 피해를 최소화하고, 지진재해로 인한 인명·경제적

역시 최소화하기 위하여 지진재해대응시스템 연구개발을 지속해왔다.

지진재해대응시스템 구축을 위해서 요구되는 사안은 국내 건축물 유형을 분류하고 각 항목별 역량을 평가해야 한다. 그리고 이를 기반으로 하여 지진취약도함수를 개발함으로써 지진재해로 인한 손실을 평가하는 체계를 구축해야 한다. 본고에서는 지진재해대응시스템 구축에 요구되는 건축물 유형 분류법과 이에 대한 역량 스펙트럼을 산출하는 방법론에 대해 소개하고자 한다.

### 2. 국내 건축구조물 유형분류

국내 실정을 합리적으로 반영한 지진손실평가에 필요한 지진취약도함수를 개발하기 위해서는 국내 건축구조물의 유형이 분류가 선행되어야 한다. 이에 건축물의 구조, 재료, 형식 및 높이와 밀접한 관련이 있는 지진저항성능을 기준으로 그 유형을 구분하고, 내진설계 적용 여부, 적용 지진하중의 수준 및 건축물의 용도 역시 참고하여 국내 건축구조물 유형을 구체화한다.

#### 2.1 구조시스템에 따른 건축물 유형분류

국내 구조설계기준에서는 지진력 저항시스템을 6종의 대분류와 그 하위의 20종의 소분류로 구분한다. 이 중 구

1) 서울시립대학교, 건축공학과 석사과정

2) 서울시립대학교, 건축공학과 석사과정

3) 서울시립대학교, 건축공학과 부교수

\* E-mail : hyungjoonkim@uos.ac.kr

Table 1 국내 지진재해대응시스템의 대표건축물 유형

번호	분류
1	전통 목구조
2	서양식 목구조
3	철골모멘트골조
4	철골가새가 있는 철골모멘트골조
5	콘크리트전단벽이 있는 철골모멘트골조
6	철골철근콘크리트구조
7	콘크리트모멘트골조
8	무보강조적채움벽이 있는 콘크리트모멘트골조
9	콘크리트전단벽
10	콘크리트전단벽이 있는 콘크리트모멘트골조
11	필로티형 콘크리트전단벽
12	프리캐스트 콘크리트전단벽
13	콘크리트전단벽이 있는 프리캐스트모멘트골조
14	무보강조적전단벽

조설계기준의 지진력 저항시스템에 가장 먼저 직접적으로 대응되는 대표적 유형은 Table 1에 제시된 3~5번, 7번, 9~10번, 14번 총 7종이다. 물론, 철근보강조적전단벽, 철골 강관전단벽, 역추형시스템 역시 직접적으로 대응된다. 그러나 국내 적용사례가 드물거나 건축물이 아닌 시설물에서 주로 적용되는 시스템이기에 국내 건축구조물 대표적 유형에서 제외된다.

한편 상기 최초 분류에 의한 7종에 포함되나, 내진성능 평가에 있어 별도로 고려해야할 중요사항이 있는 경우가 있다. 무보강조적채움벽이 적용된 철근콘크리트구조물과 필로티가 고려된 철근콘크리트구조물의 경우, 채움벽의 영향과 필로티의 영향으로 인해 별도의 시스템으로 분류할 필요가 있어 Table 1의 8번, 10번처럼 추가한다. 또한 구조설계기준에 명시되지 않는 기타 구조시스템 중 구조재료 또는 시공방법의 특성상 지진력 저항시스템으로 분류할 필요가 있는 시스템은 1~2번, 6번, 12~13번 총 5종이다.

구조설계기준에 기반하여 도출된 Table 1의 14종 유형은 높이 및 층수에 따라 세분화되어 취약도함수 도출을 위한 표본으로서 작용해야 한다. 이를 위해서는 시스템별 높이 및 층수를 범주화하고 개개의 층수별로 분류하는 것이 이상적이다. 그러나 일일이 취약도함수를 도출하기에는 시간과 비용적 한계가 존재한다. 따라서 미국 연방재난관리청에서 개발한 HAZUS방법론의 분류 방법과 같이 건물의 높이에 따라 저층, 중층, 고층으로 구분하는 것이 합리적이다.

이에 국내 건축물에 공통적으로 적용되는 건축법규 상의 층수 관련 규정 중, 승강기 설치 의무화(1973), 내진설계

의무화(1988), 스프링클러 설치 의무화(1990), 구조계산 의무화(1986)에 의하여 5층 이하, 6~15층, 16층 이상의 건축물을 각각 저층, 중층, 고층으로 분류한다. 여기서 7~10번에 해당하는 콘크리트구조는 국내 건설시장에서 비중이 크고 내진설계가 적용되지 않은 경우가 많아 저층에서 세분화될 필요가 있어 저층건물을 1~2층과 3~5층으로 세분화한다. 그리고 12~14번에 해당하는 콘크리트구조 및 조적조는 저층 및 중층이 대다수라는 점에서 12~13번은 6층 이상의 건물을 단일화하고 14번은 3층 이상의 건물을 단일화한다.

11번 필로티형 건물은 1층을 실외공간으로 사용하기에 1층 건물이 없고 저층인 경우 4~5층이 많기에 2~5층으로 단일화한다. 그리고 1~2번 목구조는 대부분 1~2층이므로 세부분류를 하지 않는다.

최종적으로 Table 1의 14종 유형은 1~2번이 각각 단일화되고 3~6번이 각각 3종, 7~10번이 각각 4종, 11~13번이 각각 3종 및 14번이 2종으로 세분화되므로, 국내 건축구조물 유형은 총 41개로 구분된다.

## 2.2 건축물의 내진설계기준별 분류

건축물의 내진성능은 구조형식 및 높이뿐만 아니라 내진설계의 적용여부 및 적용된 지진하중의 크기에 의해서도 큰 차이를 보인다. 이와 관련된 사례로는 HAZUS 방법론이 있는데, HAZUS 방법론에서는 내진설계기준별 분류를 High-Code, Moderate-Code, Low-Code, Pre-Code 4단계로 분류하고 있다.

한편 국내에서도 1988년에 내진설계가 최초로 의무화된 이래로 내진설계와 관련하여 구조설계기준이 2000년, 2005년, 2009년에 개정되어 왔다. 또한 이러한 개정 과정에서 지진지역 분류 및 지역계수에 관한 내용이 변천해왔다는 점에서 국내 건축구조물을 Table 2와 같이 Moderate-Code (M.C.), Low-Code (L.C.), Pre-Code (P.C.) 3가지 유형으로 구분할 수 있다.

## 2.3 건축물의 용도별 분류

건축물의 지진피해는 구조형식에 따라 평가되지만, 지진피해 손실평가 시에는 건축물의 용도에 따라 그 결과가 달라지므로, 건축물 정의 시 건축물의 용도를 명확히 규정할 필요가 있다. 건축물의 용도는 “건축법 시행령 제 3조의4

Table 2 내진설계 수준의 분류 및 판정조건

수준	지역계수	판정조건						
M.C.	0.11,0.12	P.C.와 L.C.에 해당하지 않는 건축물						
L.C.	0.07,0.08	내진설계 적용대상으로 다음에 위치한 건축물						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>준공일자</th> <th>해당지역</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2000.5.22.~ 현재</td> <td>강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도</td> </tr> <tr> <td>1988.3.1.~ 2000.5.21.</td> <td>광주직할시, 강원도(화천군 제외), 전라북도 고창군, 전라남도(곡성군, 구례군, 광양군 제외), 경상북도 울진군, 제주도</td> </tr> </tbody> </table>	준공일자	해당지역	2000.5.22.~ 현재	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	1988.3.1.~ 2000.5.21.	광주직할시, 강원도(화천군 제외), 전라북도 고창군, 전라남도(곡성군, 구례군, 광양군 제외), 경상북도 울진군, 제주도
		준공일자	해당지역					
2000.5.22.~ 현재	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도							
1988.3.1.~ 2000.5.21.	광주직할시, 강원도(화천군 제외), 전라북도 고창군, 전라남도(곡성군, 구례군, 광양군 제외), 경상북도 울진군, 제주도							
내진설계가 적용되지 않은 건축물								
P.C.	미적용	내진설계가 적용되지 않은 건축물						

Table 3 대표건축물 용도별 분류

분 류	대표건축물의 용도
주거시설(8종)	단독주택, 다가구주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택, 여관, 호텔, 기숙사
상업시설(11종)	제1종근린생활시설, 백화점, 대형할인매장, 제2종근린생활시설(사무소), 일반업무시설, 병원, 운동시설, 집회장, 볼링장, 공연장, 제2종근린생활시설(운동시설)
산업시설(1종)	공장
농업시설(1종)	창고
종교시설(1종)	교회
정부시설(1종)	공공청사
교육시설(1종)	학교(유치원)

의 관련 별표 1"에 제시된 건축물의 용도와 한국감정원에서 공표한 "건물신축단가표(2014)"에 수록된 건축물의 용도를 비교·검토하여 주거시설, 상업시설, 산업시설, 농업시설, 종교시설, 정부시설 및 교육시설 총 7종으로 대분류된다. 그리고 이는 건축물대장의 용도분류와 건물신축단가표의 용도분류에 따라 Table 3과 같이 24종의 대표 용도로 세분화된다.

### 3. 대표건축물의 역량 스펙트럼

손실평가에 필요한 지진취약도함수는 2장에서 기술한 41종의 대표 구조형식에 따른 구분과 준공연도에 따른 구조물의 열화가능성 판단에 의해 건축물군별 내진성능 평가 결과를 기반으로 도출된다. 건축물의 내진성능은 다양한 방법으로 표현될 수 있으나, 시간적·비용적 한계를 극복하기 위하여 비교적 단순하면서도 건축물의 구조적 특성을 잘 반영하는 방법론에 의해 평가되어야 한다.

따라서 변위스펙트럼과 가속도스펙트럼의 관계곡선에 의해 정의되는 역량스펙트럼을 활용하는 역량스펙트럼법(CSM)에 의하여 건축물군별 내진성능을 평가한다는 것은

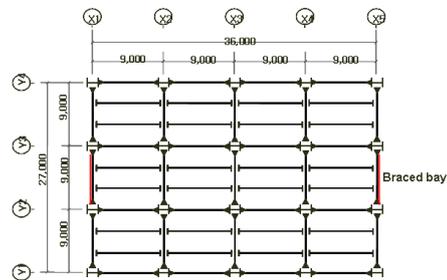
합리적이다. 역량 스펙트럼법은 1차 모드 패턴으로 가력하여 얻은 밀면전단력과 지붕층 변위 관계곡선을 통해 산정한 곡선을 단순화하여 내진성능을 평가하는 방법이며, 지진피해 평가에 필요한 손상도를 도출하는 근거로서 활용할 수 있다.

#### 3.1 내진설계기준 및 표본건물 선정

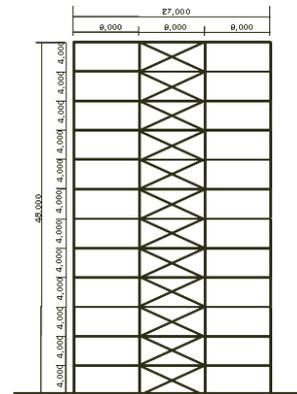
건축물 유형별 역량 스펙트럼을 산출하기 위해서는 비선형 정적해석 수행을 위한 각 유형별로 Table 2에 제시된 내진설계기준 분류에 따른 표본건축물군이 선정되어야 한다. 즉, 해당 유형에 대해 시기별로 구분하여 표본건축물을 선정하고 해석을 수행해야 한다. 뿐만 아니라, 해석 시에는 행정정보시스템에서 얻는 구조형식, 층수, 준공년도, 건축물의 형상, 사용한 구조재료, 시공방법 등 역시 고려하는 것이 가장 이상적이다.

하지만, 모든 건축물을 정밀 평가한다는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 구조해석의 범위를 한정하기 위해 대표적인 내진설계기준을 선정하고 이에 대한 실제건물의 표본 건물 선정 또는 표준적인 표본 건물 설계를 수행한다.

Fig. 1은 KBC2000을 기준으로 한 4번 유형인 철골가



(a) 해석 표본 구조물의 평면도 예시



(b) 해석 표본 건물의 입면도 예시

Fig. 1 4번 유형 표본 건물의 평면도 및 입면도 예시

Table 4 대표 역량 스펙트럼 산출 결과

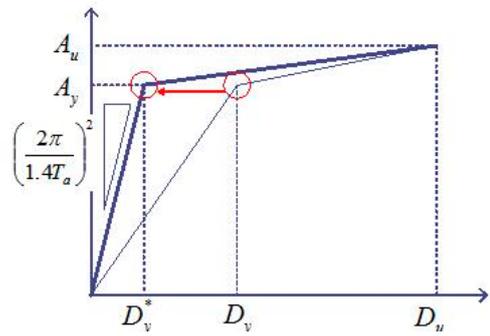
수준	층수	스펙트럼 가속도(g)		스펙트럼 변위(mm)	
		$A_y$	$A_u$	$D_y$	$D_u$
M.C.	3층	0.078	0.213	18.0	108
	12층	0.058	0.148	23.0	112.1
	20층	0.078	0.146	232	855.0
L.C.	3층	0.061	0.129	13.4	107
	12층	0.058	0.148	23.0	112.1
	20층	0.078	0.146	232	855.0
P.C.	3층	0.061	0.129	13.4	107
	12층	0.058	0.148	23.0	112.1
	20층	0.078	0.146	232	855.0

새가 있는 철골모멘트골조의 해석 표본건물 평면도 및 입면도를 예시이다. 이는 Table 4에 제시된 바와 같은 M.C., L.C.에 대한 6가지 표본건물 유형과 P.C.에 대한 3가지 표본건물 유형으로 구성되어 있다. M.C.와 L.C.에 대한 표본건물 유형은 각각 지반계수 0.11과 0.07을 적용되었으며, P.C.에 대한 표본건물 유형은 “건축물의 구조기준 등에 관한 규칙(1982, 1988, 1992, 1996)”을 참조하여 설계되었다. 또한 각 표본건물 유형별로 여러 표본들이 형성하고, 일반성 확보를 위해 이를 평균화하여 대표 역량 스펙트럼을 결정한다.

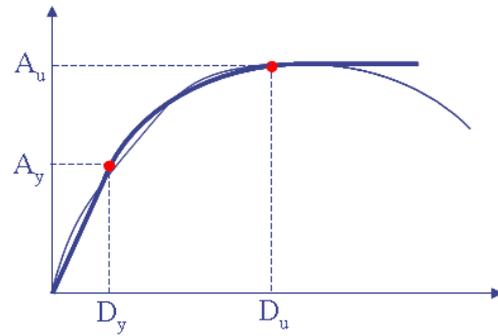
### 3.2 비선형 해석에 의한 역량 스펙트럼 산출

대표건축물들의 역량 스펙트럼을 산출하기 위해서는 각 건축구조물의 해석모델을 수립하고 이를 해석하기 위한 해석 프로그램 및 해석 알고리즘을 선정해야 한다. Fig. 1에 소개된 철골가새가 있는 철골모멘트골조 예시는 Drain-2DX를 통해 해석모델이 수립되고 1차 모드 패턴에 따라 비선형 정적 해석이 수행되었다. 압축가새의 복잡한 이력거동은 Drain-2DX에서 제공하는 5번 요소인 개선된 물리적 가새모형(Refined Physical Brace Model, RPBМ)을 통해 구현되었으며 부재에 사용된 재료강도는 공칭강도와 예상강도의 차이를 고려한 초과계수가 고려되었다.

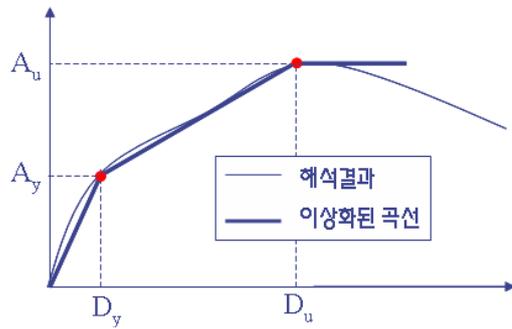
역량 스펙트럼법을 적용하는 것을 전제로 하는 건축물 유형별 지진피해 산정방법은 각 유형별 성능점을 손상도 기준치와 비교하여 피해율을 산정한다. 이 때 손상도 기준치 결정을 위해 비선형 정적 해석을 통해 얻은 역량 스펙트럼을 적용한다면, 이 스펙트럼의 복잡성에 기인하여 성능점이 수립하지 않는 산술적 오류가 발생하는 문제점이 있다. 따라서 해석을 통해 얻은 역량 스펙트럼은 단순한



(a) 역량 스펙트럼의 주기 보정 개념



(b) 곡선형 역량 스펙트럼 이상화



(c) 삼선형 역량 스펙트럼 이상화

Fig. 2 역량 스펙트럼 이상화 및 보정 개념도

형태로 이상화하여 보다 일반성을 갖도록 해야 한다.

이와 더불어 보다 일반성을 갖기 위해서는 구조해석을 통해 얻어진 탄성주기를 보정하여 비구조재의 영향 등을 충분히 반영해야 한다. 따라서 Fig. 2(a)와 같이 이상화된 역량 스펙트럼의 주기가 1.4배 이상인 경우에 한하여 구조 설계기준에서 제시하는 약산주기의 1.4배가 되도록 이상화 역량 스펙트럼에 대한 보정이 후행된다.

Fig. 2에는 해석을 통해 얻은 곡선형 또는 삼선형 역량 스펙트럼을 이상화하는 개념이 제시되어 있다. Fig. 2(b)는 항복점과 극한점 사이를 타원 호를 이용하여 연결하는 방법이며 Fig. 2(c)는 그 사이를 선형으로 연결하는 방법이다. 이러한 이상화 개념은 역량곡선의 형태에 따라 선택

Table 5 손상도 기준 정의

구분	내용
Slight	향복점 70%수준에 해당되는 스펙트럼 변위로서 곡선형 역량 스펙트럼의 경우 이를 이선형으로 이상화했을 때 향복점을 기준으로 함.
Moderate	향복점에 해당되는 스펙트럼변위로서 곡선형 역량스펙트럼의 경우에는 이를 이선형으로 이상화했을 때의 향복점을 기준으로 함.
Extensive	Moderate 수준과 Complete 수준의 손상도 기준 스펙트럼변위를 1:3으로 분할하는 점의 스펙트럼변위를 기준으로 함.
Complete	최대강도의 80% 수준으로 강도가 저하되는 점의 스펙트럼변위를 기준으로 함.

적으로 적용되며, 이상화된 역량곡선은 해석주기와 기준상 약산주기와의 비교를 통해 보정여부를 결정하고 난 뒤, 이를 손상도 기준치 결정에 활용된다.

#### 4. 역량 스펙트럼 기반 손상도 기준 도출

지진재해로 인한 건축물의 손상상태 정의 및 손상도 기준은 인명피해, 재산피해, 건물의 기능수행 수준을 평가하는데 적합한 형태를 가져야 한다. 구조해석 후 이상화하고 보정하는 과정을 거쳐 얻은 각 표본건물의 개별 표본에 대한 역량 스펙트럼은 평균화 과정을 통해 Table 4와 같이 대표 역량 스펙트럼을 형성하는데 활용된다. 그리고 이는 손상상태를 Slight, moderate, extensive, complete damage 총 4가지로 분류하는 HAZUS 방법론의 평가 기준 분류체계를 Table 5와 같은 정의에 의해 수정하여 적용한다. Table 6은 이와 같은 과정을 통하여 산정된 Fig. 1의 예시에 대한 결과이다. 대표건축물군에 대해 이와 같은 모든 작업을 수행하여 대표 역량 스펙트럼과 손상도 기준을 수립함으로써 지진피해 손실 평가에 활용하기 위한 기반이

Table 6 대표 역량 스펙트럼 기반 손상도 기준 도출

수준	층수	손상도 기준			
		Slight	Moderate	Extensive	Complete
M.C.	3층	12.6	18	52	154
	12층	16.1	23	66	195
	20층	162	232	387	850
L.C.	3층	9.4	13.4	44	136
	12층	16.1	23	66	195
	20층	162	232	387	850
P.C.	3층	9.4	13.4	44	136
	12층	16.1	23	66	195
	20층	162	232	387	850

마련된다.

#### 5. 맺음말

본고에서는 고도의 산업화를 이룩한 대규모 도시가 집중적으로 발달된 국내의 지진재해로 인한 피해·손실을 경감시키는 건축물 지진피해 손실 평가에 기반이 되는 역량 스펙트럼 산출 방법론에 대해 기술하였다. 또한 역량 스펙트럼 산출 후 이를 지진피해 손실 평가에 활용하기 위한 손상도 기준 수립 과정도 제시하였다. 이를 통하여 지진피해 손실 평가를 위한 기반이 마련되며, 이를 이해·활용함으로써 향후 고도화된 지진피해 손실 평가를 수행하여 지진재해에 대한 경감 정책 수립에 기여하기를 기대한다.

담당 편집위원: 양원직  
(광운대학교 환경대학원 조교수)  
wjyang@kw.ac.kr