

건축물 지진피해 손실평가 방법론

Evaluation Methodology of Structural Seismic Loss



신 동 현¹⁾

Shin, Dong Hyeon



이 승 원²⁾

Lee, Seung Won



김 형 준^{3)*}

Kim, Hyung Joon

1. 머리말

한반도 내 지진발생 빈도의 증가와 함께, 최근 들어 중국의 쓰촨성 지진과 같은 판내 지진의 발생 빈도가 점점 증가하고 있고, 강진지역인 일본 등의 지진 영향권에 위치하고 있다는 점에서 국내의 경우 지진발생으로 인한 건축물의 피해가 발생할 수 있는 개연성이 존재한다. 이러한 경향으로 볼 때 중·약진 지역으로 분류되는 우리나라 또한 지진 발생에 대한 대비가 필요할 것으로 보인다.

자연재해로 인한 피해 및 손실은 피해원인의 발생 가능성과 함께 손실 대상체의 위험도가 함께 평가되어야 한다. 피해원인의 발생 가능성이 낮게 평가되더라도 피해 대상체의 손실원에 대한 대비가 부족하면 확률적으로 예상 손실 정도는 증가할 수 있다. 즉, 손실 대상체의 위험도는 손실 원인에 대한 무감각으로 인한 대비 소홀과 함께 사회·경제적 환경이 가장 주요한 원인이라 할 수 있다.

이상과 같이 날로 증가하고 있는 한반도 내 지진위험도에 따라 발생 가능한 지진에 대한 적극적이며 효율적인 대응을 위하여 건축물의 정량적인 지진손실 평가에 대한 중요성은 증대되고 있다. 또한 국내외 다양한 연구를 통해서 지진에 대한 구조물의 손상확률을 나타내는 지진취약도

(Seismic fragility)를 작성하여 해당 구조물에 대한 내진 성능을 평가하는 방법과 사례에 대한 연구가 수행되고 있다.

이에 본고에서는 구조물에 예상되는 손실을 정량적으로 평가하고 효과적인 대책마련을 위해 적용될 수 있는 건축물 지진피해 손실평가 방법론에 대해 기술하고자 한다.

2. 건축물의 지진 취약도 함수

지진취약도 함수는 임의의 강도를 가진 지진에 대하여 구조물에 일정 손상 상태 이상의 손상이 발생할 확률을 나타내는 것으로서 수학적으로 다음의 식 (1)과 같이 특정지반운동에 의해 구조물에 발생하는 스펙트럼 변위, S_d 가 특정한 손상상태, d_s 에 도달하거나 넘을 조건부확률로 표현된다. 구조물의 손상단계는 부분손실 S, 부분손실 M, 반파, 전파의 4단계로 나뉜다.

$$P[d_s|S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{d_s}} \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,d_s}} \right) \right] \quad (1)$$

여기서 S_{d,d_s} 는 건물이 손상상태, d_s 의 임계치에 도달할 때의 스펙트럼 변위의 중앙값으로서, 건물의 높이에 손상상태, d_s 를 정의하는 층간변위비를 곱한 값으로 계산된다. β_{d_s} 는 구조적인 손상상태, d_s 의 총 변동성을 나타내는 자연로그의 표준편차, Φ 는 표준정규 누적분포함수를 나타낸

1) 서울시립대학교, 건축공학과 박사과정

2) 서울시립대학교, 건축공학과 석사과정

3) 서울시립대학교, 건축공학과 부교수

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

다. 스펙트럼 변위의 중앙값 $S_{d,ds}$ 과 총 변동성을 나타내는 대수표준편차 β_{ds} 는 각 건물형태 및 고려하는 손상상태에 따라 건물요소의 실험으로부터 얻어지는 성능자료, 지진경험자료, 전문가의 의견 및 판단 등을 종합하여 결정된다.

지진 취약도 함수는 대표 구조형식과 준공연도에 따른 구조물의 열화가능성을 고려하여 건축물군별 내진성능을 평가한다. 이를 바탕으로 건축물의 구조형식과 경과연수 및 지반의 종류를 고려하여 역량곡선과 요구곡선을 생성하고, 두 곡선의 교점으로부터 지진강도에 따른 성능점을 산정한다. 여기서, 성능점이라 함은 주어진 지진강도에 대하여 건축물의 예상 지붕층 변위이다. 해당 건축물의 성능점을 산정하기 위하여, 건축물의 성능곡선과 지진의 강도별 요구곡선이 필요하며, 성능곡선과 요구곡선의 교점이 성능점이 된다.

2.1 건축물의 역량곡선

건축물의 내진성능은 역량곡선으로 정의되며 Fig. 1과 같이 건축물의 변위스펙트럼과 가속도스펙트럼의 관계곡선으로 나타내어진다. 이미 정한 하중 또는 변위 패턴(주로 지진에너지가 가장 많이 소산하는 건축물의 1차 모드)으로 가력하여 건축물의 밀면전단력과 지붕층 변위를 구하고 이를 바탕으로 변위스펙트럼과 가속도스펙트럼을 구하게 된다.

개별 건축물의 역량곡선은 Fig. 1(a)에서 주어진 것과 같이 비선형성이 매우 많은 복잡한 경향을 띠게 되는데, 대표 역량곡선을 수립하기 위하여 그림에서 점선으로 표시한 바와 같이 이상화과정을 거치게 된다. 이선형으로 이상

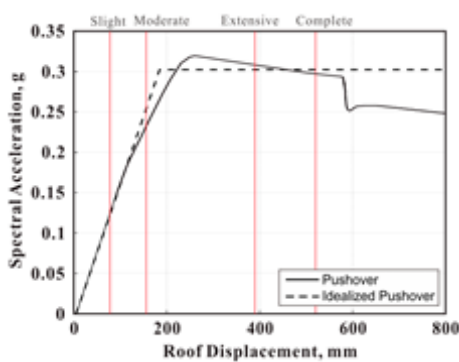
화된 역량곡선을 정의하기 위하여 현행 내진설계기준을 참고하여 초기 기울기와 항복점을 규정할 필요가 있다.

Fig. 1(b)와 같이 가속도스펙트럼-변위스펙트럼 관계곡선에서 초기 기울기는 대표 건축물에 대해 $4\pi^2/T^2$ 와 같다. 여기서 T 는 건축물의 지배주기이다. 현행 내진설계 기준에는 건축물의 높이와 구조형식에 따라 주기를 계산할 수 있는 경험식이 제시되어 있다. 구조해석을 통해 얻어진 역량스펙트럼의 탄성주기는 비구조재의 영향 등을 충분히 반영하지 못해서 실제 주기보다 길어질 수 있다. 따라서 여러 내진설계기준에서는 고유치해석 또는 기타 구조해석 결과를 이용하는 유사한 방법에 의해 산정된 진동주기가 실제 구조물의 진동주기보다 길어서 지진하중이 과소평가 되는 것을 막기 위한 규정들을 두고 있다. Fig. 2에 나타난 것처럼 주요 대표건축물의 역량곡선은 구조해석결과에 기반하여 이상화된 역량스펙트럼의 탄성주기가 약산주기의 1.4배 이상인 경우에 한하여 약산주기의 1.4배가 되도록 이상화된 역량스펙트럼의 항복 변위 스펙트럼을 저감하였다.

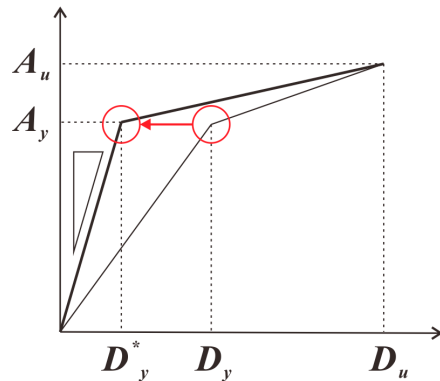
이선형 곡선에서 두 직선이 만나는 교점을 정의하기 위하여 건축물의 밀면전단강도(혹은 가속도스펙트럼)를 산정하여야 한다. 이는 현행 내진설계기준에서 제시하는 설계밀면전단력과 각 구조형식별 초과강도계수를 활용하여 두 직선이 만나는 교점을 정의할 수 있다. 또한 건축물의 내구연한, 구조물의 주기 및 밀면전단강도 저감을 고려하여 대표건축물의 역량곡선을 모두 정의할 수 있게 된다.

2.2 요구곡선

지진하중에 의하여 부가되는 요구수준은 일반적으로 건물의 주기에 대한 응답가속도의 형태로 표현된다. 요구곡

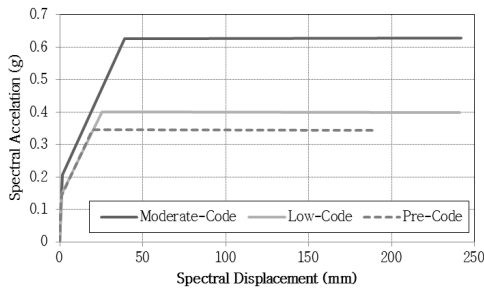


(a) 가속도스펙트럼-지붕층변위 관계

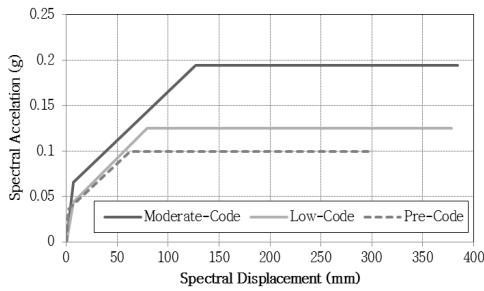


(b) 이상화된 건축물 역량곡선

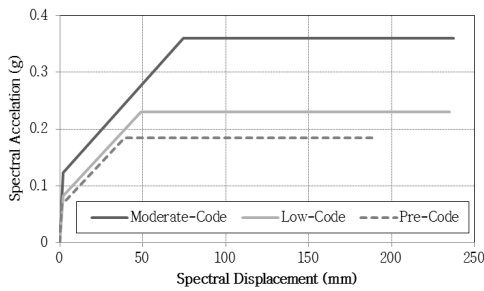
Fig. 1 건축물의 역량곡선



(a) 서양식 목구조



(b) 철골모멘트골조 (1~5층)



(c) 콘크리트모멘트골조(1~5층)

Fig. 2 주요 건축물의 역량곡선

선은 지진의 강도에 따라 달라지는 값으로, 최대지반가속도나 재현주기 등을 이용하여 다양하게 표현될 수 있다. 요구곡선 또한 역량곡선과 같은 포맷으로 작성되어야 두 곡선의 교점인 성능점을 산정할 수 있기 때문에 우선 재현주기나 최대지반가속도 등과 함께 Newmark가 제안한 식을 이용하여 가속도스펙트럼과 주기의 관계 곡선을 그릴 수 있다. 가속도스펙트럼과 변위스펙트럼의 관계는 식(2)와 같이 정의된다.

$$S_a = \frac{4\pi^2}{T^2} S_d \quad (2)$$

2.3 성능점 결정

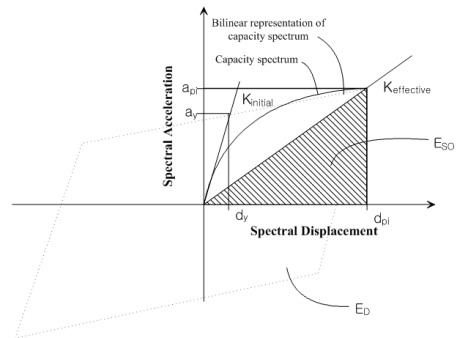
건축물의 성능곡선과 요구곡선이 교차하는 점을 성능점

이라 하며 구조물의 저항능력과 고려하는 지진하중의 요구수준이 일치하는 점을 말한다. 건축물의 성능스펙트럼의 탄성구간에서 지반고유스펙트럼과의 교점이 생성되는 경우 그점이 성능점이 되며 변위로 값이 구해지게 된다. 만약 성능스펙트럼의 소성구간에서 교점이 생성된다면 성능스펙트럼의 면적만큼 에너지 소산이 발생하는 것으로 판단하여 발생한 에너지만큼 건물의 추가 감쇠비(β_0)를 계산한다.

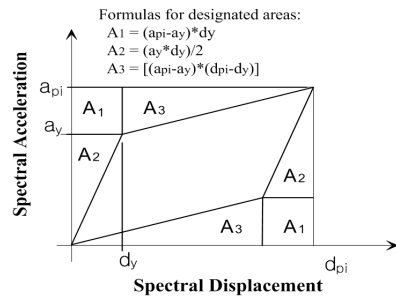
지진하중을 받는 철근콘크리트구조물의 경우 강성저하, 강도저감, 슬립 및 핀칭 등에 의하여 에너지 소산능력이 저하되므로 이상화된 이선형 모델로는 정확한 이력특성을 나타내지 못한다. 이러한 효과를 감쇠수정계수(damping modification factor, κ)를 사용하여 등가감쇠를 수정함으로써 고려한다. 수정된 등가감쇠를 유효감쇠계수(β_{eff})라고 하며 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\beta_{eff} = 0.05 + \kappa\beta_0 = 0.05 + \frac{0.637(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_i d_{pi}} \quad (3)$$

식에 사용된 기호의 정의는 Fig. 3에 제시되어 있으며, 감쇠수정계수는 Table 1에 제시되어 있다. 감쇠수정계수는 구조물의 이력특성에 따라 아래와 같이 세단계로 구분



(a) 이력거동에 의한 등가감쇠



(b) 소산되는 에너지량

Fig. 3 구조물의 이력거동에 의한 등가감쇠비(ATC-40, 1996)

Table 1 구조물 이력거동에 따른 감쇠수정계수

구분	β_0 (%)	감쇠수정계수 κ
Type A	≤ 16.25	1.0
	> 16.25	$1.13 - \frac{0.51(a_y d_{P_i} - d_y a_{P_i})}{a_{P_i} d_{P_i}}$
Type B	≤ 25	0.67 (=2/3)
	> 25	$0.845 - \frac{0.446(a_y d_{P_i} - d_y a_{P_i})}{a_{P_i} d_{P_i}}$
Type C	any value	0.33 (=1/3)

하여 적용한다.

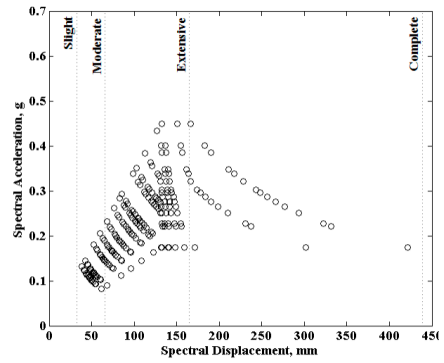
- 1) Type A : 주요한 수평하중 저항부재가 새롭게 설치된 건물
- 2) Type B : 수평하중 저항부재가 일부 새로 설치되거나 기존 부재와 혼재된 건물
- 3) Type C : 주요 수평부재가 수평하중에 저항할 수 없는 건물

성능점 생성은 크게 성능곡선과 요구곡선의 교점의 위치가 항복점 전후에 위치함에 따라 탄성구간과 비탄성구간으로 분류하고, 탄성구간에서 교점이 생성되는 경우로 곡선 접합을 사용하여 성능스펙트럼의 탄성구간과 지반고유스펙트럼의 가속도구간 식을 산정한다. 두 식의 차가 0이 되는 변위를 찾도록 방정식을 세워 성능점을 계산한다. 두 곡선의 교점이 비탄성 구간에서 생성되는 경우에는 추가감쇠를 고려하여 시행착오 방식을 적용하여 성능점을 찾는다. 이 때 가정한 성능점을 사용하여 구조물 이력특성을 변수로 하는 감쇠수정계수를 계산한다. 이를 바탕으로 유효감쇠계수를 산정하고 두 스펙트럼의 해를 찾는 방정식을 사용하여 나오는 값이 처음에 가정한 성능점 값과 같은지 확인한다. 이와 같은 작업을 가정한 성능점과 최종적으로 도출되는 성능점의 차이가 1% 이하가 되는 시점까지 반복 계산하여 성능점을 산정하게 된다.

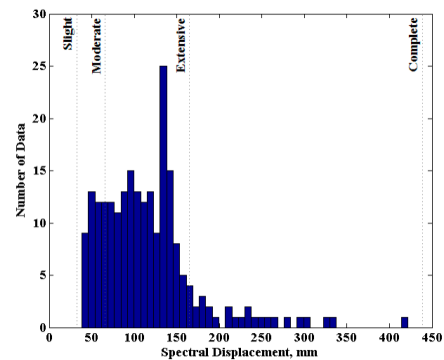
2.4 건축물의 손상상태별 피해확률 계산

건축물의 지진취약도는 지진으로 인한 건축물의 손상상태별 피해확률로 표현된다. Fig. 3은 건축물의 성능점으로부터 구한 손상상태별 피해확률의 예시이다. 지진으로 인한 건축물의 손상상태는 전술한 부분손실 S, 부분손실 M, 반파, 전파의 4단계로 나뉘며 다음과 같은 기준으로 정의한다.

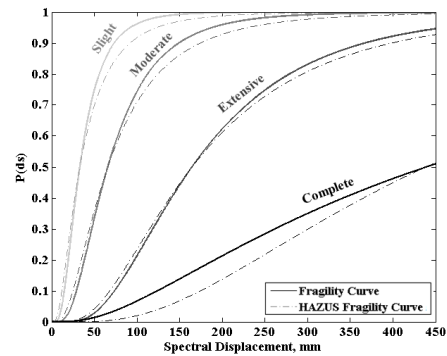
- 1) 부분손실 S : 항복점의 70%수준에 해당되는 스펙트럼 변위로서 곡선형 역량스펙트럼의 경우에는 이를



(a) 성능점의 분포



(b) 피해수준 검출



(c) 손상상태별 피해확률

Fig. 4 건축물의 지진으로 인한 손상상태별 피해확률 산정

- 이선형으로 이상화했을 때의 항복점을 기준으로 한다.
 - 부분손실 M : 항복점에 해당되는 스펙트럼 변위로서 곡선형 역량스펙트럼의 경우에는 이를 이선형으로 이상화했을 때의 항복점을 기준으로 한다.
 - 반파 : Moderate 수준과 Complete수준의 손상도 기준 스펙트럼 변위를 1:3으로 분할하는 점의 스펙트럼 변위를 기준으로 한다.
 - 전파 : 최대강도의 80% 수준으로 강도가 저하되는 점의 스펙트럼 변위를 기준으로 한다.
- 지진취약도 분석법(Seismic fragility analysis)에 의거

하여, 앞서 언급한 성능점을 산정하여 구조물의 취약도를 평가한다. 지진취약도로 정의된 건축물의 손상상태별 피해 확률은 지진강도에 따른 구조물의 응답에 대해 특정한 손상을 초과할 확률이다. 건축물의 취약도를 도출하기 위해서는 라틴방격추출을 바탕으로 한 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 적용하여 대수표준편차를 산정해야한다. 건축물의 역량스펙트럼과 각 지반강도별 요구스펙트럼의 발생 확률이 같도록 각 15개씩 샘플을 채취하여 그 교점인 성능점이 각 손상상태 한계치(손상도 기준)를 초과할 확률을 계산하여 $CONV[\beta_C, \beta_D]$ 를 추정한다. 이 때, 각 PGA별 성능점의 로그누적분포로부터 취약도함수는 다음 식으로부터 도출된다.

$$P(loss) = \int_0^{\infty} P(ds|S_d)\lambda(S_d)dS_d \quad (4)$$

여기서, $P(ds|S_d)$ 은 역량스펙트럼법으로 도출한 성능점의 스펙트럼 변위, S_d 를 초과하는 손상 지표의 발생 확률으로써 구조물의 지진취약도이다. $\lambda(S_d)$ 는 요구곡선에 의한 지진위험도이다. 따라서 손상도 기준, $S_{d,ds}$ 와 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 산정한 대수표준편차, β_{ds} 로부터 구조물의 지진취약도를 작성한 후, 요구 곡선의 변위스펙트럼으로 표현되는 지진강도의 범위에 대하여 취약도를 적분하면 Fig. 3(c)와 같은 지진취약도함수를 구할 수 있다.

3. 건축물의 연간 지진손실 산정 방법

건축물의 피해확률은 지진취약도 함수로부터 계산되는데, 지진취약도는 단순히 주어진 지진강도에 대한 건축물의 내진성능을 확률적으로 평가한 것이기 때문에 일정 기간 동안 건축물의 손상확률에 대해서는 나타낼 수 없다. 따라서 한번의 지진에 의함이 아닌 일정기간 내에 예상되는 모든 지진에 의한 건축물의 피해와 손실을 예측하려면 지진취약도와 지진위험도를 동시에 고려해야 한다. 지진위험도는 지진강도와 해당 지진강도의 연간 초과발생확률의 관계이다. 지진강도를 몇 개의 구간으로 나누어 각 구간에서의 확률 차이로부터 특정 지진이 발생할 연간 확률을 계산할 수 있다. 이렇게 구한 연간 확률은 해당 구간의 모든 지진강도의 발생 확률을 대표하는 값이다. 이상의 과정으로 정의된 연간 지진발생 확률과 특정 지진강도에서 평균 지진손실을 곱하고, 각 지진강도의 구간별로 구한 값을 모

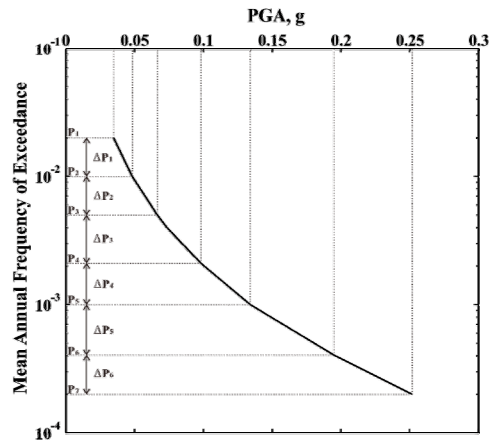


Fig. 5 서울시 지진위험도 곡선

두 합하면 대상 지역에서의 예상되는 모든 지진에 의한 연간 손실이 된다.

연간 지진손실을 계산함에 있어, 우선 다양한 강도의 지진에 대한 건축물의 손실을 계산해야 한다. 많은 수의 지진 강도를 고려할수록 정확한 값을 예측할 수 있으므로 가장 이상적이지만 계산시간이 오래 걸린다는 단점이 존재한다. 이에 FEMA(2012)에서는 4~8개의 지진강도를 사용하는 것을 권장하고 있다. 일반적으로 연간 지진손실 평가에서는 8개의 재현주기별(50, 100, 200, 250, 500, 1000, 2400, 4800년) 지진강도를 사용하며, 지진강도를 8개의 구간으로 나누어 각 구간에서의 확률차이를 계산하여 각 구간의 지진강도가 발생할 연간 지진발생 확률을 산정한다.

Fig. 4에서는 서울시에 발생가능한 재현주기별 지진이 고려된 지진위험도 곡선을 나타내고 있다. 그림에서 제시되는 바와 같이 각 재현주기별 PGA 값에 따라 곡선을 7개의 간격으로 구분하여 연간 지진발생 초과확률을 구하고 구간별 대푯값인 연간 지진발생확률을 구한다. 다음으로 앞서 구한 지진취약도 곡선으로부터 해당 재현주기의 지진이 발생했을 때의 지진손실을 구하며, 구체적으로 지진손실은 지진으로 인한 손실비용, 보수비용, 건축물 잔해, 업무복구기간, 기타손실의 경제적 피해손실과 인명피해 이재민등의 사회적 지진손실로 구분하여 산출된다. 여기서 각 재현주기 구간별 손실은 각 지진손실의 산술평균으로 산정한다. 이상의 내용을 정리하면 Table 2에 정리된 식과 같이 지진발생확률을 계산할 수 있으며 최종적으로 연간 평균 지진손실은 연간발생확률과 평균 손실비용의 곱의 고려한 재현주기에 대한 총합으로 구할 수 있게 된다.

Table 2 가상 지진에 대한 연간 손실 산정식

n	재현주기(년)	연간 초과확률	연간 발생확률	손실	평균 손실	연간 손실
1	50	P_1	$P_1 - P_2$	L_1	$(L_1 + L_2)/2$	$AL_1 = (P_1 - P_2) \times (L_1 + L_2)/2$
2	100	P_2	$P_2 - P_3$	L_2	$(L_2 + L_3)/2$	$AL_2 = (P_2 - P_3) \times (L_2 + L_3)/2$
3	200	P_3	$P_3 - P_4$	L_3	$(L_3 + L_4)/2$	$AL_3 = (P_3 - P_4) \times (L_3 + L_4)/2$
4	500	P_4	$P_4 - P_5$	L_4	$(L_4 + L_5)/2$	$AL_4 = (P_4 - P_5) \times (L_4 + L_5)/2$
5	1000	P_5	$P_5 - P_6$	L_5	$(L_5 + L_6)/2$	$AL_5 = (P_5 - P_6) \times (L_5 + L_6)/2$
6	2400	P_6	$P_6 - P_7$	L_6	$(L_6 + L_7)/2$	$AL_6 = (P_6 - P_7) \times (L_6 + L_7)/2$
7	4800	P_7	P_7	L_7	L_7	$AL_7 = P_7 \times L_7$
						$\sum(AL_i)$

4. 맺음말

본 고에서는 지진발생 빈도 및 지진 발생의 불확실성 증대에 관한 국제적 추세와 인구·주요산업시설이 집중된 대규모 도시인 국내 특성을 고려하여 지진에 대한 효율적인 대응방안으로서 건축물의 정량적인 지진피해 손실 평가 방법론을 기술하였다. 이를 통하여 향후 국내 주요지역에

대한 지진피해 손실 평가를 진행함에 있어 이해를 돕고 적용성 향상에 도움이 되고자 하였다.

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