

건축물 내진능력 표현에 관한 고찰 및 제언

Considerations and Suggestions for Expressing of Seismic Capacity of Buildings

이철호¹⁾ · 박지훈^{2)*}

Lee, Cheol Ho¹⁾ · Park, Ji-Hun^{2)*}

¹⁾서울대학교 건축학과, ²⁾인천대학교 도시건축학부

¹⁾Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, ²⁾Division of Architecture and Urban Design, Incheon National University

/ A B S T R A C T /

In this paper, some popular intensity measures of earthquakes including magnitude, MMI, and PGA as well as their empirical relationships are briefly reviewed since they have been widely used without prudence by mass media, the public, and even the government when asking or expressing the seismic capacity of buildings. The basic concept of current seismic design is also presented in order to facilitate relevant discussions. It is emphasized that expressing the building seismic capacity simplistically in terms of seismological quantities or terminologies like magnitude and MMI is inherently irrational, may be misleading the stakeholders, and should be avoided. Alternative expressions, more rational and consistent with current seismic design philosophy and practice, are recommended.

Key words: Building, Seismic capacity, Magnitude, Modified Mercalli intensity, Peak ground acceleration, Seismic Performance

1. 서론

2016년 9월 12일에 발생한 경주지진은 리히터 규모 5.8로서 기상청 계측 이래 최대 규모의 지진으로서 비록 심각한 인명피해는 없었으나 다수의 국민들이 강한 진동을 감지하였을 뿐만 아니라 광범위한 지역에서 구조체 및 비구조체의 피해가 발생하였고, 특히 일부 건축물에서는 붕괴로 이어질 수도 있는 심각한 수준의 피해가 보고되기도 하였다. 그동안 해외의 강진 발생 시 언론보도를 통해 국내의 지진발생 가능성과 내진설계 현황이 간헐적으로 주목을 받기는 하였으나 경주 지진을 계기로 일반 국민의 재난 및 구조 안전에 대한 관심이 크게 고조되었다.

이런 상황에서 매스컴이나 대중의 일차 관심의 대상이 되는 것은 국내의 건물이나 각 시설물의 내진능력 또는 국내 내진설계 지진하중의 세기이다. 지진의 세기는 일단 규모(magnitude)로서 보고되고, 이를 기준으로 단답

을 요구하는 매스컴 또는 일반대중의 요청에 의한 것이 대부분이겠으나, 많은 전문가 사이에서도 건축물이나 여러 시설물에 대한 설계지진의 크기를 표현할 때 규모(M, magnitude)가 종종 사용된다. 그러나 이와 같은 표현방식은 구조공학계 측면에서 종종 부적절하게 사용되는 경우가 많다(가령 건축물은 $M=6.5$ 에 대해 내진설계 된다, 원전은 $M=7.0$ 에 대해 설계된다 등). $M=6.5$ 정도의 규모는 거의 남가주 강진대의 설계지진 규모 해당하는 것으로서 근래의 가장 대표적 남가주 피해지진인 1971년 San Fernando 지진($MW=6.6$), 1989년 Loma Prieta 지진($MW=6.9$), 1994년 Northridge 지진($MW=6.7$)에 육박하는 수준이다[1].

이와 같은 표현 방식은 중앙진대에 속하는 국내에 적합한 내진설계 수준을 실제 이상으로 과장하거나 과도하고 여러 관련 당사자(가령 건물주, 발주자, 공무원/정책입안자 등등) 사이에 혼선을 야기할 우려가 있는바, 전문가 집단의 합의에 바탕을 둔 일관되고 적합한 표현법을 모색할 필요가 있다. 본고에서는 내진능력의 단순화된 표시에 이용되는 주요 척도의 정의 및 적합성에 대해서 다시 한번 살펴보고, 국내 설계기준에서 채택하고 있는 지진 재해도의 정의와 내진성능 개념의 발전 현황을 토대로 건축물 내진능력 표현 방법의 합리적 대안을 제시하고자 한다.

*Corresponding author: Park, Ji-Hun

E-mail: jhpark606@inu.ac.kr

(Received November 7, 2016; Revised December 4, 2016; Accepted December 7, 2016)

2. 지진세기의 지표

2.1 규모

규모(M, Magnitude)는 진원에서 방출된 스트레인 에너지를 정량적으로 표시하는 지표이다. 가장 전통적인 것은 미국 남가주 지역의 지진세기를 정량화하기 위해 Richter가 도입한 국지규모(M_L , 리히터 규모)이다. 이 정의에 따를 때 방출에너지는 100 km 진앙거리에서 우드-앤더슨 지진계로 측정한 최대진폭(마이크로 미터 단위)의 상용로그값으로 주어지고 방출에너지와 규모의 관계는 식(1)에 의한 경험식이 사용된다. 리히터 규모 외에도 진원깊이나 지진규모에 따라 표면파규모 M_S , 실체파규모 M_B , 모멘트규모 M_W (1970년대 이후 USGS의 표준방식, 식(2)) 등 다양한 규모가 사용되고 있다[2]. 대한민국 기상청에서는 일본에서 개발된 진앙거리(R , km)와 지반운동의 최대수평성분(A , 남북/동서 방향 최대속도성분의 벡터합)을 이용하여 식(3)과 같이 규모를 결정한다[3].

$$\log(E) = 11.8 + 1.5M_S; E = 10^{11.8+1.5M_S} \text{ (ergs)} \quad (1)$$

$$M_W = (2/3)\log(M_0) - 10.7 \quad (2)$$

$$M = 1.73\log(R) + \log(A) - 0.83 \quad (3)$$

여기서 M_0 는 지진모멘트(seismic moment, dyne)이다. 위 식(1)에서 보듯이 규모 1단계 증가당 31.6배($10^{1.5} = 31.6$) 에너지 차이(가령 $M=7$ 과 5의 차이는 $10^3 = 1000$ 배)가 있다. 구조공학적 측면에서 중요한 경험적 사실은

$M=5.0$ 이하인 지진에서는 심각한 구조손상이 발생치 않는다는 것이다.

2.2 진도 (Intensity)

미국에서 개발된 MMI(Modified Mercalli Intensity)와 일본기상청(JMA)진도가 있으나 국내에선 MMI를 주로 사용한다. MMI의 경우 지진이 인간과 인공물에 가한 국지진동의 정성적 세기를 12 단계로 구분하여 등급을 매기는 것으로 역사지진 자료의 정량화에 중요하다. MMI = VII~IX 범위에 대해서 각각의 피해상황 및 대응 최대지반가속도(PGA, Peak Ground Acceleration) 범위를 정리하면 Table 1과 같다[4]. 대응 PGA 값은 견고한 지반을 전제로 한 것이고 지진의 발생 메커니즘에 따라 크게 변동하는 것으로 알려져 있다. MMI = VIII의 대응 PGA를 Wood and Neumann은 0.25~0.30 g의 범위로 제시하였는데, 이 후 Richter는 0.1~0.21 g를 제시하여 대응 PGA에 불확실성이 매우 큼을 알 수 있다.

2.3 최대지반가속도

현재 구조물의 내진설계에 가장 널리 사용되는 지표는 지진이 유발한 PGA와 직간접적으로 연관된다. 지진에 의한 지반운동은 원래 확률과정(stochastic process)으로서 이에 의한 구조물의 손상은 진폭 외에도 강진동의 작용시간, 주파수성분 등에 의해서도 큰 영향을 받지만 현재의 응력기반내진설계(force-based seismic design) 체계에서는 국내 내진설계의 주요 하중변수를 PGA와 연관시켜 발전시켜 왔다. 이는 관성력의 일종인 지진하중을 결정하는 의사가속도응답스펙트럼이 이론적으로(감쇠가 작은 구조물의 경우에) 주기 0에서 PGA로 수렴하여 상호 연관성이 있기 때문이다. 보다 직접적인 이유로는 국내 지진재해지도가 도출되는 과정에서 PGA

Table 1. Modified Merkeley Intensity (MMI) [4]

MMI	Description by Wood and Neumann in 1931	Description of damage to masonry by Richter in 1956				Corresponding PGA (g)	
		A ¹⁾	B ²⁾	C ³⁾	D ⁴⁾	Wood and Neumann	Richter
VII	Everybody runs outdoors. Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken. Noticed by persons driving cars.	-	-	Some cracks	Damage including cracks	0.10~0.15	0.04~0.10
VIII	Damage slight in specially designed structures; considerable in ordinary substantial buildings with partial collapse; great in poorly built structures. Panel walls thrown out of frame structures. Fall of chimneys, factory stack, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned. Sand and mud ejected in small amounts. Changes in well water. Persons driving cars disturbed.	None	Some damage	Partial collapse	-	0.25~0.30	0.10-0.21
IX	Damage considerable in specially designed structures; well designed frame structures thrown out of plumb; great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations. Ground cracked conspicuously. Underground pipes broken.	-	Seriously damaged	Heavily damaged, sometimes with complete collapse	Destroyed	0.50~0.55	0.21-0.44

Masonry definitions used [5]

¹⁾ A: good workmanship, mortar, and design; reinforced, especially laterally; bound together by using steel, concrete etc; designed to resist lateral forces.

²⁾ B: good workmanship and mortar; reinforced but not designed in detail to resist lateral forces.

³⁾ C: ordinary workmanship and mortar, no extreme weaknesses like failing to tie in at corners but not reinforced or designed against horizontal forces.

⁴⁾ D: weak materials such as adobe, poor mortar, low standards of workmanship; weak horizontally.

에 대한 감쇠식을 사용한 것을 들 수 있다[6]. 그러나 PGA는 실제 건축물의 고유주기보다 현저히 짧은 단주기 성분에 대해서 민감하기 때문에 ATC-3-06[7] 이후로 미국의 설계스펙트럼은 0.1 ~ 0.5 sec 사이의 주기에 대한 스펙트럼가속도의 평균값을 2.5로 나눈 값인 EPA(Effective Peak Acceleration)와 1초 주기에서의 스펙트럼가속도에 기초한 EPV(Effective Peak Velocity)에 기반해서 작성되었으며, 최근에는 재해지도를 단주기와 1초 주기에서의 스펙트럼 가속도로 나타내는 방식으로 바뀌었다[8].

3. 국내의 지진재해도 개요

강진의 발생은 확률적으로 희박한 자연현상이므로(특히 중약진대의 경우) 지진재해도의 평가에는 장기간에 걸친 관측 자료를 분석해야 한다. 그러나 세계적으로도 1880년대에 지진계가 최초로 개발되어 계기지진자료는 120년 미만의 제한된 기간의 자료밖에 없는 실정이므로 역사지진(고지진) 자료의 포함은 필수적이다. 한반도의 경우 지진자료는 약 2,000년에 걸친 역사지진 자료와 1905년 이후의 계기지진 자료로 나눌 수 있다. 우리나라 역사지진과 관련된 연구는 20세기 초 일본 학자들이 삼국사기, 고려사, 조선왕조 실록 등 역사지진자료를 정리한 이래 국내의 연구자들[6, 9], [10-13]의 진도평가 및 지진재해도 산정과 관련된 여러 연구가 진행되었다. 여러 자료 가운데에서도 다른 역사기록에 비해 기록의 정확성이 상대적으로 더 높다고 인정되는 조선왕조실록의 사료를 포함한 약 600년의 자료가 가장 가중치가 큰 지진재해도 분석의 주 대상이 되고 있다[6].

Table 2는 역사지진의 피해기록과 진도평가의 일례를 보여주는 것으로

김정호 등[12]은 중종 13년 5월 15일(1518년 7월 2일)에 발생한 지진에 대해 MMI = VIII로 평가하였다. 역사지진의 진도평가 시 진도평가자의 지진 피해 사료해석의 입장에 따라 진도평가에 이견이 존재할 수 있다. 또한 중종 국지의 극대값이 그 지역의 대표값으로 채택되는 경향이 있어서 지진재해도가 보수적으로 평가될 우려가 있다는 지적도 존재한다[4].

Table 3은 한반도 및 그 주변부에서 발생한 지진발생 자료를 요약한 것으로서 15~18세기, 특히 16~17세기 지진활동이 매우 활발했음을 알 수 있다. 현 내진설계기준의 지진하중에 영향을 미치는 지진은 20세기 이후의 계기지진이 아니라 조선시대의 역사지진임을 알 수 있다. 이들 역사지진 자료의 공학적 정량화를 위한 지진재해도분석에는 진도평가에 더하여 많은 불확실성이 수반되는 식 (4)-(6)과 같은 경험식에 의한 변환이 불가피하다.

(진양진도-규모)

$$M = 1 + MMI \times (2/3) \quad [14] \quad (4)$$

(진양진도-PGA)

$$\log(PGA) = -0.5 + (1/3) MMI \quad [14] \quad (5)$$

$$\log(PGA) = 0.014 + 0.3 MMI \quad [15] \quad (6)$$

Fig. 1에서 보듯이 역사지진의 MMI 평가를 토대로 PGA를 예측하는 것이 불가피하지만, 상당한 불확실성이 수반됨을 부인할 수 없다[16]. 결과적으로 지진재해도 분석에는 지진규모(또는 진양진도)-거리 감쇠식, 잠재진

Table 2. Illustrative damage records of historical earthquakes and corresponding MMI's [12]

Date	Area	Recorded description
1518. 7. 2. (Jungjong 13. 5. 15)	Seoul	Strong earthquakes occurred three times at 4 o'clock. Sound was as loud as thunder. People and horses were frightened. Fences and fortress walls collapsed or fell apart
	Chungcheong-province	Sound like thunder was heard from the east. People could not stand stably. Fortress wall collapsed in many places successively.
1643. 7. 24. (Injo 21. 5. 30.)	Gyeongsang-province	Earthquake occurs at regions such as Daegu, Andong, Gimhae and Yeongduck in Gyeongsang-province so that many beacons and fortress walls collapsed.
1700. 4. 29. (Sukjong 26. 3. 11)	Gyeongsang-province	Earthquake occurred at 24 villages in Gyeongsang-province including Daegu. Fortress walls between Jinju and Sacheon collapsed and pedestrians fell down.
1727. 6. 20. (Yeongjo 3. 5. 2.)	Hamgyong-province	Earthquake occurred at 7 towns so that many houses and fortress walls collapsed.
1810. 2. 19. (Sunjo 10. 1. 16.)	Hamgyong-province	Earthquake occurred at Myeongcheon, Kyeongsung, Hoeryeong; houses severely shaken and fortress walls collapsed

Table 3. Number of earthquakes within and contiguous Korean peninsula for each century [6]

Century	V	VI	VII	VIII	IX	X	Total
1	1	0	0	0	4	0	12(5)
2	1	0	0	0	1	0	11(2)
3	3	0	0	0	0	0	10(3)
4	0	0	0	0	3	0	7(3)
5	0	0	0	1	1	0	7(2)
6	0	0	0	0	2	0	6(2)
7	0	0	0	0	1	0	14(1)
8	1	0	0	1	2	0	24(4)
9	1	0	0	0	0	0	9(1)
10	1	0	0	0	0	0	9(1)
11	1	7	4	0	2	0	31(14)
12	1	0	0	0	1	0	19(2)
13	8	0	2	0	2	0	42(12)
14	12	0	1	0	2	0	81(15)
15	57	51	15	4	1	0	243(128)
16	229	102	38	5	4	0	721(378)
17	94	54	40	9	4	1	359(202)
18	49	27	12	3	7	0	207(98)
19	1	0	0	0	1	0	60(2)
20	24	10	4	5	2	0	754(45)
Sum	484	251	116	28	40	1	2626(920)

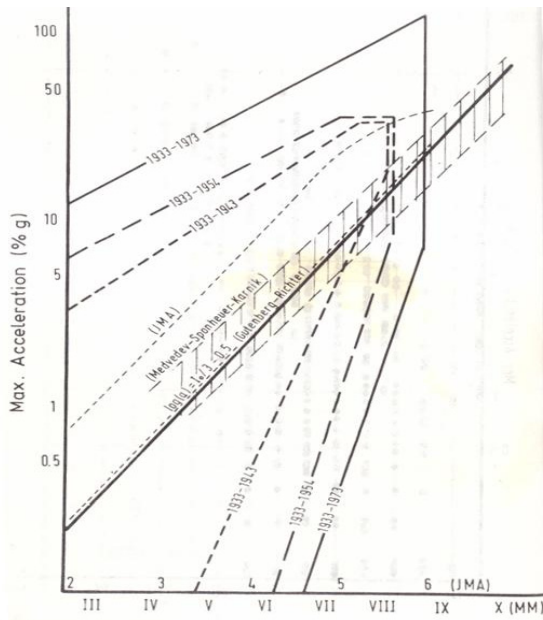


Fig. 1. Statistical variability inherent in MMI-PGA conversion equations [16]

원에서의 규모나 진도의 상한에 대한 판단 내지는 가정이 포함되게 된다. 따라서 지진학적 지진재해도분석 결과를 그대로 추수하기 보다는 내진설계를 위한 지진하중 및 설계스펙트럼의 결정에는 내진설계 및 구조물의 내진거동에 정통한 구조공학 전문가의 판단에 의한 필터링 내지는 조정이 필요한 것으로 인정되고 있다 (가령 내진설계에 다른 사회경제적 임팩트, 여타 다른 중약진대의 지진하중 수준 참고, 스펙트럼형상의 조정, 유효지반 가속도 개념의 도입 등). 또한 지진재해도 분석에 개입된 불확실성에 대한 확률론적 고려가 요구된다.

Fig. 2는 1000년 동안 초과확률 90%인 MMI 분포로서 지진발생을 푸와송 도래(Poisson arrival)로 가정하면 50년 동안 초과확률 10%인 MMI 분포와 등가로 볼 수 있으며, 1988년 최초로 제정된 건축물 내진기준의 지진구역 및 지진하중 설정의 근거가 되었다. 지진구역2는 광역에 걸쳐서 50년 동안 초과확률 10%인 MMI가 VII~VIII 정도로 평가되었음을 알 수 있다. 가령 (4)식을 적용하여 규모를 추정하면 $M = 5.6 \sim 6.3$ (평균 6.0) 정도가 되는데 이 변환식에 포함된 큰 변동성을 감안한다면 이 방식의 공학적 타당성 여부는 좀 더 논의가 필요할 것으로 생각된다. 참고로 김소구는 서기 1400년 이후의 580년 지진자료의 분석을 통해 역사지진의 최대규모를 $M = 6.7$ 로 추정할 바가 있다[12].

Fig. 3은 국가지진위험지도[17]에 제시된 재현주기 2400년에 해당되는 재해지도로서 비록 PGA이기는 하지만 건축구조기준[18]에서 최대고려지진의 유효지반가속도 계산에 활용할 수 있도록 규정하고 있다. 이 재해지도는 내진설계기준연구(II)[6]에서 수행된 지진재해도분석에 기초하여 역사지진의 진도평가 및 규모환산에 대한 재조정과, 추가적인 계기지진 자료를 반영한 것으로서 차이는 크지 않다. 참고로 내진설계기준연구(II)의 지진재해도 분석은 국내의 지진학자 8인의 각자 개별연구를 수행한 후 사용지진 목록, 지진파 감쇠 등과 관련된 여러 이견을 조정/통합하여 하나의 통일된 지진재해도를 제시하였다. 이는 현재까지 국내에서 제시된 지진재해지도

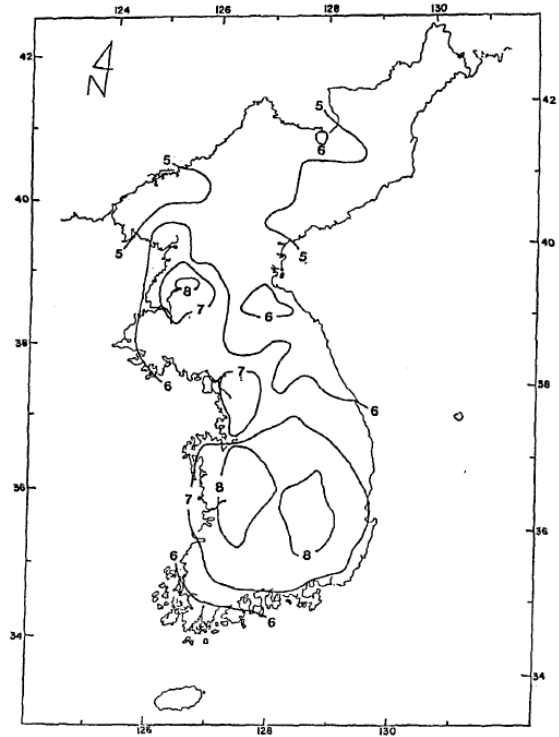


Fig. 2. Distribution of MMI having 90 % probability of exceedance within 1000 years [12]

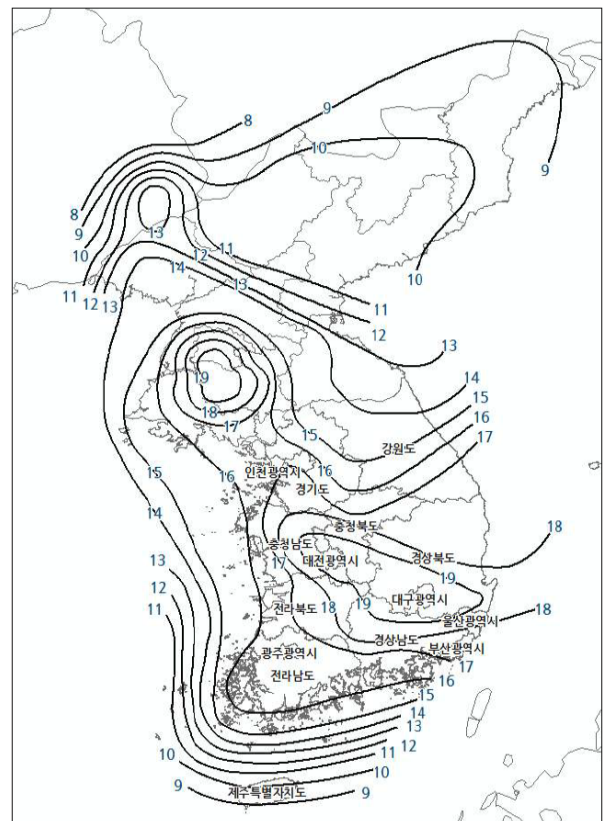


Fig. 3. Effective peak ground acceleration (%g) for 2400-year return period [17]

Table 4. Seismic zone factors corresponding to 500 year return period [6]

Seismic zone	I	II
Zone factor, Z (g)	0.11	0.07

Table 5. Hazard coefficients [6]

Return period (year)	50	100	200	500	1000	2400
Hazard coefficient	0.40	0.57	0.73	1	1.4	2.0

가운데 지진학계의 합의를 가장 잘 반영한 것으로 볼 수 있고, 건축물 외에도 사회기반시설의 지진하중 설정의 근거로 활용되고 있다. Table 4 및 5에서 보듯이, 내진설계기준연구(II)에서는 성능기반내진설계를 염두에 두고 500년 재현주기 PGA를 기준으로 다른 재현주기에 대응하는 PGA는 위험도계수를 곱해서 산정토록 했으며, 국가지진위험지도에서도 동일한 표가 채택되었다. 여기서 위험도계수는 500년 재현주기 PGA에 대한 재현주기별 PGA의 상대크기를 규정하는 계수이다. 가령 지진구역1에서 2400년 재현주기 지진의 위험도계수는 2.0으로서 PGA는 $(0.11g) \times (2.0) = 0.22g$ 가 된다.

현행 건축구조기준[18]의 경우 설계스펙트럼가속도의 계산 시 내진설계기준연구(II)의 지진재해도분석 결과를 토대로한 2400년 재현주기 PGA(=0.22g)의 2/3를 적용하고 있으며, 지진구역I의 경우에 $(0.22g) \times (2/3) = 0.15g$ 이다. 이는 중앙진대의 경우 “infrequent but large earthquake”의 가능성을 고려하여 500년 재현주기 대신 2500년 재현주기 지진(MCE, Maximum Considered Earthquake))의 2/3를 설계지진(DBE, Design Basis Earthquake)으로 택하는 미국의 추세[8]를 반영한 것으로 볼 수 있다. 미국 중앙진대인 중동부에서 이 기준을 적용하여 지진하중이 대폭 상향되는 경우가 있다. 중앙진대에 따라서는 상대적으로 짧은 재현주기 동안(가령 500년) 발생하는 지진의 세기는 미미하지만 아주 긴 재현주기(가령 2500년)을 보면 대형지진이 발생할 수 있기 때문이다. 남가주의 경우 2500년 재현주기 지진의 위험도계수는 1.5이지만 미국 중동부 일부지역은 4~5에 이르는 경우도 존재한다고 한다.

결론적으로 국가지진위험지도 및 KBC에서 채택하고 있는 지진재해도는 제한된 지진 자료를 토대로 확률적 재해도 분석을 통해 만들어졌으며, 중앙진대의 지진재해도를 재현주기에 기초하여 보수적으로 반영하고 있다.

4. 건축물의 내진능력과 내진설계의 성능수준

최근 들어 발생한 해외의 강진 및 국내의 규모 5.0 이상 지진들(M 5.0 울산 동쪽 해역, M 5.8 경주 남남서쪽 8 km)로 인하여 정부기관 및 언론 등으로부터 국내 건축물이 보유하고 있는 내진능력에 대한 질문이 지속적으로 제기되고 있다. 이 질문은 풀어서 “(내진설계된) 국내 건축물이 어느 정도 세기의 지진에 대하여 버틸 수 있는가?”로 제시되곤 하며, 이는 제도화된 국내의 내진설계기준이 어느 정도 수준으로 지진에 대한 안전을 보장하고

있는지를 묻고 있기도 하다. 구조설계자의 입장에서 위의 질문에 대한 대답은 내진설계된 건물이 저항할 수 있는 지진의 세기만을 묻고 있어 적용된 지진하중을 답변으로 하면 될 듯도 하다. 하지만 지진하중을 내진설계 기준에 제시된 대로 답한다면 구조기술자가 아닌 일반인의 경우에 이를 이해하기 쉽지 않다. 뿐만 아니라 건물이 지진에 ‘버틴다’는 것이 어떤 정도 수준의 안전을 의미하는 것인지가 모호하여 간단히 답변하기 어렵다. 즉 지진이 와도 보수가 불필요한 수준인지 단지 인명이 손상되지 않는 수준인지, 건물이 붕괴하지 않는 수준인지 질문하는 사람마다 생각하는 바가 다를 수 있다. 위의 질문을 면밀히 살펴보면 지진위험도와 그에 상응하는 내진성능을 조합하여 답변해야 함을 쉽게 이해할 수 있으며, 이는 성능기반 내진설계의 성능목표를 구성하는 기본요소이다. 따라서 내진설계의 지진하중의 세기를 표현할 때 설계지진의 재현주기와 더불어 목표성능을 함께 언급하는 것이 가장 이상적인 방안이란 관점에서 논의를 전개하고자 하며, 국내 내진설계 기준에 도입되어 있는 성능기반 내진설계의 요소를 살펴보고자 한다.

한국지진공학회와 한국건설기술연구원은 내진설계기준연구(II)[6]을 통해 성능기반내진설계 개념에 기초한 상위개념기준의 정립을 시도한 바가 있다. 이 연구에서는 건축/토목 시설물의 분류와 내진등급설정, 성능목표설정, 지진하중수준의 표현방법의 통일성 부여, 내진성능확보를 위한 일반원칙 및 일반절차를 제시하고 이의 달성을 위한 구체적 사항은 하위 설계기술기준에 위임하는 방식을 택하였다. 당시의 연구의 결과가 법적 효력을 갖는 지위를 획득한 것은 아니지만 차세대 내진설계법인 성능기반내진설계 도입의 방향을 제시하였고 적어도, 이 연구에 의한 지진재해도는 건축/토목시설물의 지진하중설정의 근거로 활용되고 있다.

KBC 2016 등 현행의 국내의 건축물 내진기준은 규정중심의(prescriptive) 설계기준으로서 건물중요도에 따른 “내진등급”과 건설부지의 설계스펙트럼가속도에 따라 정해지는 “내진설계범주”에 따라 허용층간변위, 지진력 저항시스템, 건물높이, 구조해석법, 구조요소의 설계 등에 제한 등을 통해 간접적으로 차등적 성능수준을 부여하는 전이적 입장을 취하고 있다. 이러한 제한 조항들이 상당 부분 공학적 판단에 기초한 것으로서 객관적 근거가 충분히 제시되지 않아 내진기준의 기술적 투명성을 흐리게 하는 한계점도 갖고 있다.

성능기반내진설계는 단일 또는 다중의 지진재해도에 대해 구체적으로 규정된 다양한 내진성능수준의 제공을 목표로 한다. 이 경우에 지진재해도로 표현되는 설계지진의 세기는 재현주기(또는 50년 공칭 내구연한 동안

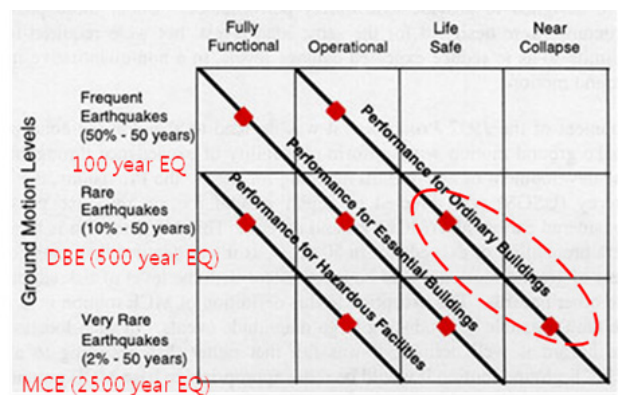


Fig. 4. Performance objectives proposed in Vision 2000 [19]

초과확률)로 표시하고 이에 대응되는 성능수준으로 표시하는 경우가 많다. 지진발생을 푸와송 도래(Poisson arrival)로 가정하면 50년 초과확률(p %) 과 평균재현주기(T years)의 관계는 간단히 식 (7)으로 계산할 수 있다.

$$T_{p\%/50years} = \frac{50}{\ln\left(\frac{100}{100-p}\right)} \quad (7)$$

성능기반내진설계는 여러 기술적/제도적 문제로 인해(특히 신축건물의 내진설계 실무에 있어서) 도입된 역사가 아직 오래되지 않았다. Fig. 4는 1995년도에 미국에서 제시된 Vision 2000[19]의 지진의 재현주기별 건축물 내진성능수준의 권장안이다. Table 6는 내진설계기준연구(II)에서 제시된 지진 재현주기별 내진성능수준과 건축물의 등급분류 예시이다. 이 분야

의 선주국가 가운데 하나인 미국에서는 Vision 2000[19] 공표 이후 기존구조물의 내진보강을 위한 설계에 성능기반접근법에 활용할 수 있는 기술표준인 ASCE/SEI 41-06[20]이 이미 제정된 바가 있다. 또한 신축건물의 경우에는 ASCE/SEI 7-10[21]에서 원칙만을 기술하는 수준으로 성능기반 설계가 도입되기 시작하였고, 이를 뒷받침하기 위해서 이후에 출간된 ASCE/SEI 41-13[22]은 기존건축물을 위한 규정이지만 신축건물을 대상으로 하는 내진성능 목표를 구체적으로 제시하고 있다. 또한 기존의 기준에서 커버하기 어려운 구조형식(가령 초고층건물)에 대해서는 신축의 경우에도 제3자 리뷰(third party/peer review)를 전제로 하는 설계지침이 개발되어 실무에 적용되고 있다[23, 24].

Fig. 5는 이들 문헌에서 제시하고 있는 일반건물(general/ordinary buildings)에 대한 재현주기별 표준성능수준을 보여주고 있다. 이 그림은 1960년대

Table 6. Seismic performance levels proposed in Seismic Code Research (II) [6]

Performance level / Return period (year)	Operational	Collapse prevention	
50	Seismic use group II ⁽³⁾		1) Seismic use group S - Broadcasting stations - Buildings and other structures (gas or oil tanks, etc.) sufficient quantities of highly toxic or explosive substances judged to be dangerous to the public if released. 2) Seismic use group I - Fire and police stations - General hospitals and health care facilities having surgery or emergency treatment facilities - Power-generating stations and other public utility facilities required to support seismic use group S facilities. - Emergency vehicle garages - Communication facilities - Assembly or exhibition facilities (theatre, gymnasiums, etc.) with gross floor area ≥ 5,000 m ² - Buildings for education - Jails and detention facilities - Sales facilities (department store, shopping mall, etc.) with gross floor area ≥ 10,000 m ² - Accommodations and apartments with 6 or more stories - Public buildings required to be functional before and after earthquakes 3) Seismic use group II - Buildings classified into neither seismic use group S nor 1
100	Seismic use group I ⁽²⁾		
200	Seismic use group S ⁽¹⁾		
500		Seismic use group II ⁽³⁾	
1000		Seismic use group I ⁽²⁾	
2400		Seismic use group S ⁽¹⁾	

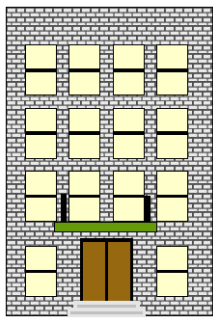
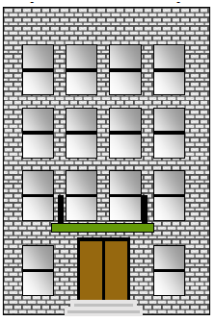
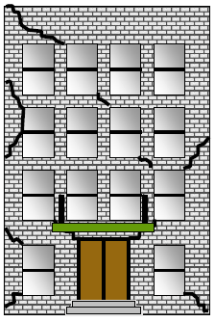
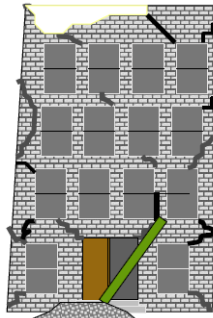
Illustration				
Performance level	Operational	Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention
Return period (year)	43 or 72	72 or 225	475 (or a period corresponding to 2/3 MCE)	2475 (MCE)
Probability of exceedance	50%/30 or 50%/50 years	50%/50 years	10%/50 years	2%/50 years

Fig. 5. Standard performance objectives for ordinary buildings normally assumed

SEAOC Blue Book에서 정성적으로 천명했던 희망 내진성능수준(즉, 약진에 대해서는 손상없이 저항하고, 중진에 대해서는 구조적 손상이 저항하되 약간의 비구조손상은 허용할 수 있으며, 건설부지에서 예상되는 최대 크기의 강진에 대해서는 구조적/비구조적 손상을 허용하지만 붕괴가 발생치 않아야 한다)을 약 50년이 지난 후 정량적 언어로 재표현한 것으로 이해할 수 있다.

참고로, KBC 2016에 도입된 성능기반내진설계 규정에서는 가장 일반적인 건축물인 내진 II등급 건물에 대해서 최소내진성능목표로서 설계지진(최대고려지진의 2/3)과 최대고려지진(2400년 재현주기)에 대해서 각각 인명안전(Life Safety), 붕괴방지(Collapse Prevention)의 성능수준을 제시하고 있으며[18], 이는 Fig. 5의 표준적 내진성능목표에 상응한다. 이는 1997년의 내진기준연구II에서 제시된 성능목표(Table 6 참고)보다 더욱 세분화된 성능구분일 뿐만 아니라 내진성능 확보의 측면에서 더 보수적인 입장을 취하고 있음을 보여준다.

5. 규모 및 진도에 의한 내진능력 표시의 문제점

5.1 규모로 내진능력 표기 시 문제점

규모가 지진의 세기를 나타내는 대표적인 척도이고, 일반인이 언론 등을 통해서 쉽게 접할 수 있기 때문에 이를 건축물의 내진능력 표시에 활용하는 방안이 제기되기도 한다. 규모는 1회의 지진에서 방출된 에너지의 총량을 나타내며, 에너지와 규모사이의 관계는 (1) 식과 같다. 그러나 이 중에서 개별 건축물에 유입되는 에너지의 양을 산출해 내는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 규모를 개별 건축물의 설계에 사용되는 물리량인 지반가속도로 변환할 필요가 있으나, 진원으로부터의 거리에 따라 지반가속도는 감소하므로 거리에 대한 정보가 반드시 필요하다.

규모와 거리, 지반가속도 사이의 관계를 나타내는 경험식을 감쇠식(attenuation equation)이라고 하며, 다음은 국내 지진재해지도 작성에 적용된 여러 감쇠식 중 하나의 감쇠식이다[6].

$$\ln a = 0.4854 + 1.2M - 0.8416 \ln R - 0.0061R \quad (8)$$

여기서 a , M 및 R 은 각각 지반가속도(cm/sec^2), 규모 및 진원거리(km)이며, $\ln a$ 의 표준편차는 0.8036이다. 식 (8)에 진원거리를 가정하고 설계기준에 상응하는 지반가속도를 대입하면 대응되는 규모를 계산할 수 있으며,

불확실성이 크기 때문에 표준편차가 제시되어 있다. KBC 2016[18]에서 채택하고 있는 최대고려지진(2400년 재현주기)의 유효지반가속도를 PGA로 보고 식 (8)을 토대로 이에 상응하는 규모를 산출하면 Table 7과 같다. 진원깊이는 10 km, 진앙거리는 10 km 및 23.5 km로 가정하였다. Table 7에서 볼 수 있듯이 내진 2등급 건물의 최대예상지진 지반가속도는 진앙거리 10 km 및 23.5 km에 대해서 각각 규모 6 및 6.5에 상응하여 상당한 차이를 보인다. 또한 (8) 식의 표준편차를 고려한다면 규모의 차이는 더 커지게 된다. 따라서 특정 진앙거리를 기준으로 규모로 표현되는 내진능력을 제시하는 경우에 항상 해당 거리에서만 지진이 발생하는 것이 아니므로 더 가까운 곳에서 지진발생 시에는 얼마나 피해가 더 커지는지, 그리고 가정된 진원깊이 및 진앙거리는 적절한 것인지에 대한 의문이 제기될 것임을 예상할 수 있다.

위에서 열거한 문제점에 대한 다른 실례를 들자면, Fig. 6은 1994년 Northridge 지진이 유발한 정성적/정량적 국지 진동세기의 분포도이다 [25]. $M_w = 6.7$ 인 이 지진에 의해 진앙거리, 파동전파경로, 국지지반조건 등에 의해 무수히 다양한 세기의 국지 지진동이 유발됨을 알 수 있다. 가령 PGA는 0.1 g 이하에서 1.0 g 이상, MMI 역시 I ~ X+에 이르기까지 매우 다양하게 분포한다. 규모가 진원에서의 에너지 방출량을 표시하는 숫자로서 광역에 걸친 지진의 데미지 포텐셜(damage potential)을 함축하는 지구

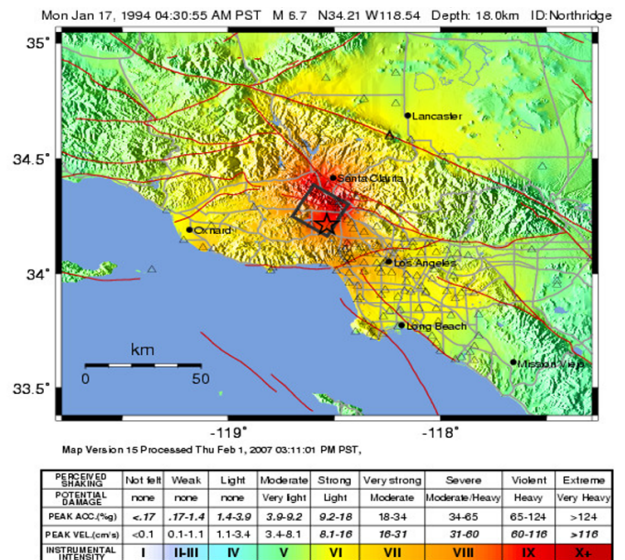


Fig. 6. Qualitative and quantitative shake map for the 1994 California Northridge earthquake [25]

Table 7. Conversion of design ground motion into magnitude based on Eq. (8)

Seismic zone	EPA of maximum credible earthquake (g)	Seismic use group	Importance factor I_E	EPA considering I_E (g)	Magnitude converted using attenuation Eq. (8)	
					$R = 10$ km	$R = 23.5$ km
1	0.22	2	1.0	0.22	M6.0	M6.5
		1	1.2	0.264	M6.2	M6.7
		S	1.5	0.33	M6.4	M6.8
2	0.14	2	1.0	0.14	M5.7	M6.1
		1	1.2	0.168	M5.8	M6.3
		S	1.5	0.21	M6.0	M6.5

물리학적/지진학적 지표임은 분명하나, 규모로서 내진설계의 하중 수준을 언급하는 것은 많은 무리가 따른다. 더구나 국내의 경우 지진재해도를 실질적으로 지배하는 지진은 소위 역사문헌상의 역사지진 내지는 고지진으로서 규모 정보가 직접적으로 존재하지 않는다. 역사서의 피해기록을 해석하여 MMI 등급을 매긴 후(이 과정에서 평가자의 주관성이 개입 가능) 다시 이를 경험식을 사용하여 규모로 정량화해야 하므로 이 과정에서 큰 불확실성의 개입이 불가피하다.

남가주와 일본 등의 강진대에서 내진설계를 위한 지진하중의 세기를 규모로 표시할 수 있다면, 충분한 통계자료에 의해 규모-재현주기(Magnitude-Return Period) 관계식이 존재하고 활성단층 또는 잠재진원 정보가 가용해서 특정지역의 지진위험도를 지배하는 특성규모(characteristic magnitude)를 규정할 수 있기 때문일 것으로 판단된다.

5.2 진도로 내진역량 표기 시 문제점

규모와는 달리 진도는 지진에 의한 진동의 세기를 사람의 감각, 주변 물체의 흔들림 또는 구조물에 발생한 피해를 이용해서 설명하는 척도로서 이 또한 건축물의 내진능력을 나타내는데 활용하기 위한 고려를 해볼 수 있다. 여기서는 진도의 정의 및 실제 지진세기와와의 상관성을 분석하여 진도를 통한 내진역량 표기의 적절성을 검토하고자 한다. 한반도 역사지진의 진도는 연구자들에 의해서 MMI로 표기해오고 있으며, 최대 MMI는 IX로 제시된 바 있다[6, 26]. Richter가 제시한 조적조 구조물의 피해에 관련된 기술 중에서 MMI VII~IX에 해당되는 것을 Table 1과 같이 요약할 수 있다[4]. Richter는 조적조 구조물의 등급을 A~D로 분류하고 있으며, 기술 내용을 볼 때 A급이 횡력을 고려하여 내진설계된 구조물에 해당된다[5]. Richter에 의해 수정된 MMI 계급에 따르면 내진설계된 조적조 구조물은 MMI VIII에 대해서 피해를 입지 않으나 MMI IX에 대해서는 기술내용이 없다. 다만, Wood and Neumann의 MMI 기술과 비교하면 A급 조적조 구조물은 “specially designed”에 가깝다고 볼 수 있고, 종합하면 내진설계된 구조물은 VIII에서는 피해가 거의 없고 IX에서는 상당한 피해를 입는 것으로 볼 수 있다.

문제는 위의 기술내용에는 건물의 층수 등 규모에 대한 고려가 없어서 저층건물과 고층건물에 대해서 구분 없이 동일한 내진능력을 가정한다는 것이다. 또한 현재 내진설계된 건물은 내진등급에 따라 중요도계수를 통해 1.5배까지 강화된 지진하중으로 설계를 하고 있으나 MMI 상의 건물분류는 이를 전혀 고려하고 있지 않다. 또한 1931년이나 1956년 당시에 현재와 같은 다양한 내진설계기술 및 공법이 쓰였다고 보기는 어려울 것이다. 결론적으로 MMI 척도는 현재의 건축물 내진설계 방법이 도입되기보다 매우 오래전인 1931년에 제안되고 1956년에 일부 수정된 것으로서 진도 정의만으로 판단할 때 현재의 내진설계 기술 및 체계 안에서 건축물 내진역량과의 상관관계를 명확히 정립하기가 어려운 척도라고 할 수 있다.

다음으로는 진도와 지진 세기와의 상관성을 실제 계측자료를 통해 검토한다. 미국 동부와 서부의 지진기록을 통합한 2000여 지진 자료를 토대로 도출된 MMI와 PGA의 관계를 나타내는 경험식은 다음과 같고 원 데이터의 회귀분석 결과는 Fig. 7과 같다[27].

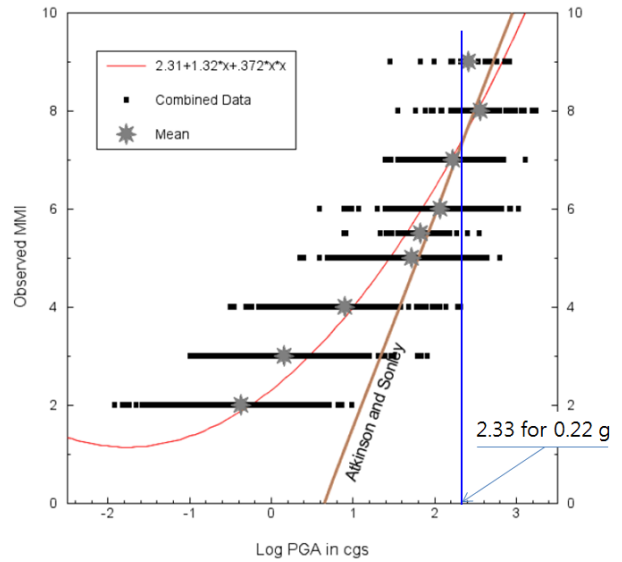


Fig. 7. High scatter of MMI-PGA relationship [27]

$$MMI = 2.315 + 1.319 \log_{10} a + 0.372 (\log_{10} a)^2 \quad (9)$$

여기서 a 는 지반가속도 (cm/sec^2)이다. 건축구조기준의 최대고려지진에 해당되는 $0.22g$ 를 대입하여 수식으로부터 얻어지는 MMI는 7.4이다. 이 경우 우선적으로 반올림하여 MMI를 VII로 볼 수 있었으나, 회귀식이 아닌 원본 데이터를 참조하는 경우에 $0.22g$ 에 대응하는 MMI는 V~IX로서 매우 폭이 넓은 것을 알 수 있다. 특히 회귀식의 기울기가 PGA가 증가할수록 커지기 때문에 설계하중이 커질수록 진도의 불확실성은 증가하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 설계에 적용된 최대지반가속도를 단순히 경험적인 환산식을 통해 MMI로 환산하는 것은 환산과정의 불확실성이 크고 MMI 자체도 구조물의 내진역량을 구별하는 척도로서 부적합하여 바람직하지 않다고 할 수 있다.

요약하자면, 진도는 지진 내습후 광역에 걸친 건물의 피해상태를 보고 정성적으로 지진의 세기를 측정하기 위해 1930~1960년대의 미국 시공관행을 바탕으로 만들어진 것에 불과하다. 역사지진의 공학적 정량화를 위해 불가피하게 역사 지진의 피해에 진도를 부과하고 지진의 규모나 가속도 등 세기를 대략 추정하기 위한 용도로 사용되는 것을, 건물의 내진능력을 표시하는 지표로 사용하는 것은 원천적으로 그 발상이 타당치 않다.

6. 내진능력 표시방법에 대한 제언

이상의 논의에 기초한다면 내진능력은 성능기반 내진설계에서와 같이 설계하중과 내진성능을 결부시켜서 한 쌍으로 제시하는 것이 정량적 표시와 정성적 기술을 모두 포함하여 가장 합리적인 대안이 될 것으로 판단된다. 그러나 문제는 국내외적으로 아직 성능기반 내진설계가 보편화되지 않았으므로 기존의 규정중심 설계기준에 따라 설계된 건축물의 내진능력이 명확히 규명되지 않은 상태라는 점이다. 따라서 이와 같은 조건에서는 건축물의 성능을 정확히 규정하는 것은 향후 연구를 통해 이뤄져야 할 부분으로 남겨놓고 현재 상태에서는 설계하중의 절대적 수준과 상대적인 차이를

통해서 내진능력을 표시하는 방법을 고려하는 것이 현실적으로 가능한 대안이다.

설계하중의 절대적 수준은 현행 내진설계기준이 활용하고 있는 지진재해도의 확률적 정의를 통해 표시할 수 있다. 국가지진위험지도[17]는 재현주기 2400, 1000, 500, 200, 100 및 50년에 대응하는 지진의PGA를 제시하고 있으며, KBC 2016[18]은 이 가운데 2400년 재현주기의PGA를 활용하여 설계하중을 정의하고 있다. 모든 지역에 동등한 초과확률을 갖는 지진하중을 정의하여 적용하고 있기 때문에 이를 확률적 관점에서의 절대적 설계하중 수준으로 볼 수 있다. 그러나 이와 같은 방식은 확률 자체가 물리적인 지진의 세기를 나타내지 못하기 때문에 일반인이 이를 체감할 수 없다는 단점이 있다.

이를 보완하기 위해서 지진하중을 규정하는데 이용된 지진기록의 세기를 활용하는 방안을 고려할 수 있다. 즉, 지진재해지도를 도출하는 과정에서 국내 역사지진 및 계기지진 기록을 모두 고려하였고, 여기에는 규모 6.5 내외의 지진들이 포함되어 있다(Table 8). 따라서 특정 규모를 기준으로 설계하지는 않았지만 과거 한반도 지진기록의 규모와 진앙지 위치를 토대로 발생빈도 및 진앙거리의 영향을 고려하여 모든 지역에 대하여 동등한 초과확률(2400년에 1회)을 갖는 지진하중을 정의하였고 여기에 사용된 지진기록에서 M6.5 수준까지의 지진이 반영되었다고 제시한다면, 간접적으로 규모와도 연계가 되어 일반인의 이해를 도울 수 있을 것이다.

다음으로는 건축물 간의 상대적인 내진능력 차이를 나타내기 위해서 아직 명확하지 않는 내진성능보다는 적용된 지진하중의PGA(또는EPA)를 공통된 지표로 사용하는 방식을 제안한다. 이 경우 내진등급이I 또는 특인 경우 중요도계수를 적용하여 차등화된PGA로 나타낼 수 있다. 이 방식은 내진등급에 따른 중요도계수의 차이 및 재해지도상의 지역간 차이를 나타낼 수 있다. 지역간의 차이에 대해서 내진설계의 불평등성을 제기할 소지도 있으나 이는 강진 발생지역과의 거리에 따른 것으로 설명할 수 있을 것이다. Fig. 3의 재해지도를 토대로 제안된 내진능력 표시방식의 예를 들어본다면 다음과 같다.

“현행 건축구조기준에 의할 때, 울산과 제주의 건축물은 각각의2400년 재현주기PGA인0.18g 및 0.10g를 기본으로 설계되며, 2400년 재현주기 및 1000년 재현주기의 드문 지진에 대해서 각각 붕괴방지 및 인명안전 수준의 성능이 기대된다. 두 지역의 설계지반가속도는 모두 최대 규모 6.5까지의 역사 및 계기지진 기록을 고려하여 도출되었다. 실제 지진 발생 시

는 건물과 진앙거리의 차이 등에 따라 차등화된 내진능력을 보일 수 있다.”

7. 결 어

- 1) 이상에서 논의에서 보듯이, 여러 이해/관련 당사자(가령 건물주, 발주자, 공무원/정책입안자 등등) 사이에 혼선을 야기할 우려가 있는 규모나 진도를 통한 설계지진하중의 세기 표현 방식은 지양할 필요가 있다. 만일 단일 규모나 진도로서 설계지진하중의 세기를 소통코자 한다면, 설계지진의 재해도를 지배하는 특성 규모(characteristic magnitude)를 합당하게 산정한 후 사용해야 할 것이다.
- 2) 설계지진하중의 세기는, 설계지진의 재현주기와 더불어 이에 대응되는 성능수준을 하나의 쌍으로 표현하는 것이 가장 합리적 방안으로 판단된다. 지진하중의 세기로서 재현주기를 사용할 경우 지역간의 지진위험도의 상대적 차이와 상관없이 동등한 기반에서의 비교가 가능하기 때문이고, 또한 설계지진의 세기를 알고자 하는 이면에는 안전도 또는 성능수준을 알고자 하는 의도가 함께하기 때문이다.
- 3) 현행 내진설계기준을 준수하면 일반건물의 경우 설계지진에 대해 인명 안전 성능수준이 기대하고 있다. 그러나 현행 건축물 내진기준에서는 설계된 건축구조물의 성능수준의 확인을 요구하지 않기 때문에 실제로 있어 그 성능은 미지로 남게 된다. 재현주기별 성능수준을 좀 더 신뢰도 높게 언급할 수 있기 위해서는 현행KBC2016의 하중기준 및 기술기준(가령 콘크리트/강구조 내진설계기준)을 준수하여 건축되는 표준 건축구조물(archetype building structures)의 성능평가 내지는 지진취약도 연구가 선행되어야 함은 물론이다.
- 4) 성능수준을 언급할 정보가 부재한 상황에서는, 재현주기 및 이에 대응되는PGA(또는EPA)를 기준으로 내진설계의 지진하중을 언급하는 것이 합리적이다. 가령KBC 2016의 건축물 지진하중에 따를 때, “국내 건축물 내진설계의 기본PGA는 0.15g(2400년 재현주기 지진세기의2/3)로서 1000년 재현주기의 지진에 대해 설계된다”라고 언급할 수 있을 것이다. 부가적으로 그와 같은PGA는 한반도 및 인근에서 발생한 규모 6.5 내외의 역사지진 및 계기지진의 영향을 모두 반영하고 있으며, 강진 발생 지역과의 거리를 고려하여 차등화된PGA가 적용되고 있음을 부연한다면 규모와 연계된 이해를 도울 수 있을 것이다. 만일 특정 개별건물이 저항할 수 있는 지진의 세기 내지는 좀 더 정확한 내진성능을 알고자 한다면, 내진 전문가에 의한 내진성능평가 작업이 수행되어야 함은 물론이다.

Table 8. Strong earthquake records (M >6) considered in constructing seismic hazard map of Korea [6]

	6.0 ≤ M < 6.5	M ≥ 6.5
Instrumental earthquakes	1943, M6.0 (Pohang) 1963, M6.3 (East sea) M6.3 (East sea) 1991, M6.0 (Kitakyushu)	1944, M6.75 (Sea at Pyeonganbukdo) 1952, M6.5 (Vicinity of Pyeongyang)
Historical earthquakes	10 events with MMI = IX in 89, 100, 304 (2 events), 502, 510, 779, 1455, 1518, and 1643 [M 6.25 per the conversion formula M = 1.75 + 0.5*MMI]	N/A
Total number of earthquakes	14	2

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비지원(16AUDP-B066083-04)에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Lee CH, 2011 Great Earthquake in Eastern Japan and Direction of Seismic Design of Korea: Expression of Seismic Design Load

- Intensity, Special Workshop prepared by Earthquake Engineering Society of Korea; Construction Society Building, Seoul; (in Korean). c2011.
2. Kanamori H, The energy release in great earthquakes. *Journal of geophysical research*, 1977;82(20):2981-2987.
 3. Kim DG, *Structural Dynamics*. Gumiseogwan; c2005.
 4. Bolt BA, *Earthquakes: A Primer*. W. H. Freeman and Co.; c1978.
 5. Richter CF, *Elementary Seismology*. W. H. Freeman and Co.; c1958.
 6. Ministry of Construction and Transportation, *Seismic Code Research (II)*. c1997.
 7. Applied Technology Council, *Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings*. ATC-3-06 (NBS SP-510). U,S Government Printing Office, Washington, DC; c1978.
 8. Building Seismic Safety Council, *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. Washington, D.C: BSSC; c1997.
 9. Jeong BI, A Study on the Historical Earthquakes in Koresa. *Journal of Geological Society of Korea*, 1981;17(4):257-268.
 10. Yang SJ, Jeon MS, *Seismic hazard distribution of Korea (I)*. Korea Institute of Energy and Resources, Investigation and Research Report, 1981:209-230.
 11. Kim SG, On the distribution of peak ground acceleration, *Magazine of Korean Society of Civil Engineergs*, 1982;30(1):9-15.
 12. Kim JH, Yang SJ, Jeon MS, Jeong BH, Study on statistical distribution of seismic hazard and slight earthquake motion. Korea Institute of Energy and Resources, Investigation and Research Report, 1983:239-292.
 13. Ministry of Construction, *Research on the earthquake-resistant structure and disaster-prevention standard of buildings*. 1987.
 14. Gutenberg B, Richter CF, Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper). *Bulletin of the seismological society of America*, 1956;46(2):105-145.
 15. Trifunac MD, Brady AG, On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1975;65(1):139-162.
 16. Ambraseys NN, *Engineering Seismology and Earthquake Engineering: Notes on Engineering Seismology*. Noordhoff International Publishing; c1974.
 17. NEMA, *National Seismic Hazard Map*. National Emergency Management Agency; c2013.
 18. Architectural Institute of Korea, *Korean Building Code 2016*. Architectural Institute of Korea; c2016.
 19. SEAOC Vision 2000 Committee, *VISION 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings*. SEAOC; c1995.
 20. ASCE, *Seismic Rehabilitation Standards Committee, et al, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*. ASCE/SEI 41-06. Reston, VA; American Society of Civil Engineers; c2007.
 21. ASCE, *Minimum design loads for buildings and other structures*. ASCE/SEI 7-05. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; c2005.
 22. ASCE, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. ASCE standard ASCE/SEI 41-13. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, c2013.
 23. Tall Buildings Initiative, *Guidelines for performance-based seismic design of tall buildings*. Pacific Earthquake Engineering Research Center; c2010.
 24. LA TBSDC, *An alternative procedure for seismic analysis and design of tall buildings located in the los angeles region*. Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council; c2015.
 25. U,S, Geological Survey [Internet]. Available from: <https://www.usgs.gov/>.
 26. KMA, *Historical earthquake records in Korea (2~1904)*. Korea Meteorological Administration; c2012.
 27. Atkinson GM, Kaka SI, Relationships between felt intensity and instrumental ground motion in the central United States and California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007;97(2):497-510.