

성능기초설계를 위한 차세대 내진설계의 방향  
**Towards New Generation of Seismic Design Methodologies for  
Performance-based Design**

홍성걸\*  
Hong, Sung-Gul

김남희\*\*  
Kim, Nam-Hee

장승필\*\*\*  
Chang, Sung-Pil

---

**ABSTRACT**

Performance-based design concepts require the next generation of codes. To implement the main concepts several design methodologies have been proposed. This paper reviews the framework of Korea Seismic Code and shows necessary modification for adoption of appropriate design methods. The selection of design earthquake levels with the introduction of risk factor is discussed for proper risk levels for all earthquake hazards. Displacement-based design, energy-based design, comprehensive design, and force-strength design methods are reviewed as one of possible next generation design methods. This paper proposes the direction of reconstruction for design earthquake levels with performance matrix, introduction of new design methods, and emphasis on non-structural components.

---

**1. 서론**

1995년 SEAOC의 vision 2000[1, 2]은 내진설계의 방향을 단순하게 인명안전수준을 보장하기보다는 지진피해 발생 후 정상운영과 복구비용 등을 고려한 다단계 성능을 제시하여 각기 다른 요구조건에 적합한 설계방법의 개발의 필요성을 제시하였다. 이러한 성능기초설계는 사실상 기존의 설계 방법에서는 극한상태와 사용성에 대한 검토를 이미 수행하고 있어 포괄적인 의미에서 한계상태설계법의 또 다른 이름이라고 볼 수 있다. 한편 기존의 내진설계의 개념에서도 대형 지진에 대해서는 인명과 건물의 붕괴에 대한 안전, 중진에 대해서는 한정된 소규모의 피해, 약진에 대해서는 전혀 피해가 없도록 하는 것을 내진설계의 주요 목적으로 간주하고 있으므로 성능기초설계법의 주요 개념과는 커다란 차이가 있는 것은 아니다. 차이점은 전통적인 내진설계방법에서는 단일의 지진하중에 대하여 강도, 연성 그리고 강성에 요구사항을 만족하도록 하는 반면에 제시된 성능기초설계법은 동일한 건물의 몇 개의 목표성능수준에 각기 다른 설계지진에 대한 검토가 필요하다. 또한

---

\* 서울대학교 건축학과, 조교수  
\*\* 서울대학교 환경시스템공학부, BK21 계약교수  
\*\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

새로운 성능기초설계법의 목적은 신뢰성이 높게 필요로 하는 성능수준의 목표를 합리적으로 설정하고 이를 만족하는 설계결과물을 만들고자 하는 것이다.

성능기초설계법의 다른 해석은 전통적인 내진설계개념을 체계화하여 설계와 품질관리의 신뢰성을 제고하는 것을 목적으로 한다. 현재의 내진설계는 단일의 지진하중에 대하여 일단 강도에 대한 요구조건을 만족하고 해당 지진하중로 인한 변형 및 변위를 계산하여 사용성을 검토하도록 한다. 대부분의 내진설계법에서는 구조물의 비탄성변형능력을 고려한 반응수정계수의 도입하여 등가정적하중에 근거하여 구조물에 작용하는 응력에 저항할 수 있는 단면 및 시스템을 검토한다. 붕괴방지수준에 대한 비탄성 범위의 거동과 기능수행범위에서 발휘하는 탄성범위의 거동은 구분하여 적절한 부재와 단면의 크기를 결정하여야 한다. 결국 성능기초설계법은 강도를 근거로 한 내진설계방법은 성능수준에 따라 적절한 수정 또는 다른 설계법을 요구하고 있다. 그러나 현재 우리나라는 소위 97년도 내진설계의 상위개념[3]을 제시한 후 각 시설물별 성능기초설계법의 주요 개념에 부응하는 적절한 내진설계방법을 시도를 기다리고 있는 실정이다. 새로운 설계법은 해당분야의 적절한 연구 결과의 축적이 필요하며 특히 현행기준에 개념 도입의 방법과 그 시기 등에 대한 청사진을 제시할 필요가 있다.

본 논문에서는 최근 제시되고 있는 차세대 내진설계방법과 성능기초에 따른 외국의 설계기준의 개정방향, 97년도 지진공학회에서 제안한 성능수준 매트릭스에 대한 보완사항을 언급하고 그 개선 방향을 논하기로 한다.

## 2. 차세대 내진설계방법의 방향

성능기초설계에 대한 기초적인 논의가 시작된 후 소위 차세대 내진설계법의 개발[4]을 여러연구 집단에서 시도되고 있다. 대표적인 내진설계방법은 **Prestley** 와 **Mohle** 가 제안하여 비교적 체계화된 변위기초설계법과 **Housner** 와 **아기야마**의 주요한 공헌이 있는 에너지기초설계법[1]을 비롯한 포괄적인 내진설계법(**comprehensive design**) 그리고 일반 응력-강도설계법(**general force-strength design**), 약산 응력-강도설계법(**Simplified force-strength design**)과 내진규정제한설계법(**Prescriptive design**)을 들 수 있다[5].

전통적인 응력-강도설계법의 설계순서의 대표적인 등가정적설계법에 따르면 먼저 대략적인 구조물의 고유주기를 가정하고 다른 의미로 대략적인 강성을 가정하고 그에 따른 지진하중의 크기를 결정하여 이를 토대로 부재의 작용력을 토대로 단면을 설계한다. 반면 변위기초설계법[5]은 요구 변위량과 연성도를 초기값으로 가정하고 최종 결과 값으로 주기와 강도를 계산한다.

에너지기초설계법[1, 5]은 해당 구조물의 건설부지에서 지진에너지와 구조물이 견딜 수 있는 에너지를 수요와 공급의 측면의 관점으로 접근하여 지진격리시스템을 설치하여 수요 지진에너지를 감소시키거나 구조물의 소산에너지 또는 부재의 크기를 증가시켜 에너지 공급량을 증가시켜 에너지 개념을 이용하여 내진설계가 필요한 측면에 적절한 이론적인 측면을 제공한다.

성능기초설계개념의 실현을 위한 현행설계기준의 개발과 수정의 대표적인 예는 **SEAOC** 의 소위

Blue Book 에서 순차적으로 1995 년에 vision 2000[1]에 제시되고 있으며 그 중요한 내용을 요약하면 다음과 같다.

표 1 Blue Book 의 성능기초설계법의 도입계획[1]

년도	본문에 수록	부록에 수록	주요변화
1995		성능기준의 정의	처음소개
1997	현행 응력-강도설계법의 수정	a. 성능목표 매트릭스 b. 성능기초공학구조 c. 비구조체의 내진설계	
2000	a. 성능수준의 정의 b. 성능수준목표매트릭스 c. 성능기초공학구조 d. 비구조체의 내진설계	a. 서슬형설계방법 b. 응력-강도설계법 c. 성능수준검토	비구조체 강조 연구결과의 시 도
2003	a. 합의를 이룬 성능기초설계 b. 합의를 이룬 성능수준검토를 위한 해석방법	a. 변위기초설계법 b. 에너지기초설계법 c. 포괄적 설계법 d. 성능수준검토를 위한 기타 해석방법	본격적인 성능 기초설계법
2006	모든 설계법	모든 해석방법	

이상에서 살펴본 바와 같이 성능수준목표, 비구조체의 내진설계, 변위기초설계법, 에너지기초설계법, 포괄적설계법, 그리고 성능수준의 합격여부의 해석방법이 성능기초내진설계법의 중요한 관심사라고 볼 수 있다.

표 2 FEMA 273 주요내용과 우리나라 기준의 비교[6, 7]

	FEMA 273	97년 건교부-지진공학회
성능수준과 목표설정	-Collapse Prevention -Life Safety -Immediate Occupancy -Operational	-붕괴방지 수준 -기능수행수준
내진성능향상기법	-간략적인 방법 (등가정적해석법) -체계적인 방법	-ATC 및 일본의 연구결과 소개
해석, 평가, 설계 방법	탄성정적 (LSP) 탄성동적 (LDP) 비선형정적(NSP): Push Over	-등가정적설계법

	비선형동적 (NDP)	
구성요소의 거동의 정량적인 표현	부재의 요구연성도 소성힌지 회전각 층간변위	서술적으로 표현

### 3. 우리나라의 내진설계기준의 검토

우리나라의 성능기초내진설계법의 시도는 나름대로 국제적인 조류에 부합하는 것으로 공학발전에 여러모로 유익한 측면이 있다. 소비자의 요구에 따라 구체적이고 신뢰성이 높은 제품을 공급하여야 해당분야의 발전을 기대할 수 있다. 이와 같은 추세에 우리의 기준을 되돌아보고 문제점을 제시하여 보완 수정하여 국제적인 수준의 기술발달을 기대하고자 한다. 이상에서 검토한 우리나라의 상위개념의 내진설계기준은 지진하중의 결정, 위험도계수, 중요도 계수, 성능수준의 목표 등의 개념의 확립이 필요하다. 후속적으로 성능수준별 설계방법의 제시 및 적용, 구체적인 부재별 설계 절차 등이 성능기초의 본래의 취지에 적합한 방향으로 움직이고 있는지 살펴보고 재정비할 시점으로 보인다. 결과적으로 다음과 3 개 분야의 지속적인 연구와 실용화를 통해 본래의 성능기초설계법의 목적을 실현하리라 기대한다.

첫번째로 지진하중의 결정을 위한 지진구역의 사용은 다소 관성적으로 종래의 내진설계법의 사용법에 맞춘 것으로 실용적인 면은 있으며 우리나라 국토면적에 비하여 복잡한 지진재해도의 사용은 비합리적이다. 그러나 이러한 지진세기에서 대지조건에 따른 조정단계는 비현실적인 측면이 많다. 이를 합리적으로 조정할 수 있는 포맷의 개정이 필요하다.

성능수준과 목표에 어떠한 방법과 검토를 통해 적절하게 지진하중이 설정되었는가에 대한 결과는 1997 년 보고서에 상술되어 있지만 최근 미국의 내진관련 보고서와 비교하면 지진하중의 단계에서 다른 면을 가지고 있어 이에 대한 보충적인 연구가 필요하다. 즉 FEMA 27[6]에서 제안한 기본적인 안전을 전제로 하여 Life Safety 에 대한 BSE-1 (basic safety earthquake 1)의 경우에는 재현주기 475 년을 Collapse Prevention 에 경우 BSE-2 (basic safety earthquake 2)의 경우에는 재현주기 2500 년으로 한다. BSE1 과 BSE2 에 대한 최대 지반가속도의 정보는 지도로 제공한다. 그러나 현재 최대지반가속도에 대한 정보만 주어지는 경우 500 년 재현주기의 지진 세기는 2500 년 지진세기의 2/3 으로 간주한다. 현재 IBC[8]는 이를 채용하여 500 년 재현주기의 지진하중을 중심으로 다른 재현주기의 설계 지진하중을 계산할 수 있는 다음식을 도입하였다.

$$\ln(S_i) = \ln(S_{i10/50}) + [\ln(S_{iBSE-2}) - \ln(S_{iBSE-1})][0.606 \ln(P_R) - 3.73]$$

여기서  $P_R = \frac{1}{1 - e^{0.02 \ln(-P_{E30})}}$  는 재현주기를 계산하는 식이다.

결국 2500 년 재현주기의 지진세기를 위험도계수를 이용하여 500 년 재현주기의 지진하중의 2 배

로 조정하였으나 이는 앞에서 언급한 1.5 의 수치보다 상당히 크다. 그러나 1997 년 설계기준당시 우리나라의 지진특성이 중-약진이라는 특성을 고려하여 그림 1)에서 보는 바와 같이 2400 년 재현 주기 지진하중의 경우 2.0 의 위험도계수는 이유가 있다. 또한 97 년도 보고서에도 이에 대한 설명이 여러 경우를 통해 언급하였다. 그러나 약진지역에서의 강도와 지진하중의 비를 검토하면 기능수행 수준의 지진하중에 대한 설계가 과다한 설계의 결과를 가지고 있으므로 적절한 예제를 통한 조정이 필요하다. 표 3 의 예제는 Pauley 와 Priestley[9]에 따르면 그림 1 의 지진하중크기 분포를 토대로 변위 연성도를 기능수행수준은 1 로, 생명안전 수준의 경우 4 를 붕괴방지수준은 8 로 가정하여 지진하중과 구조의 강도의 상대적인 비율을 구한 것이다.

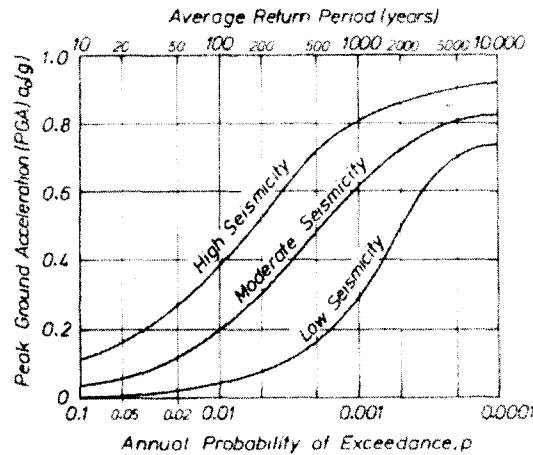


그림 1 PGA 와 재현주기의 관계 (참고문헌)

표 3 지진지역별 지진위험도와 시스템 강도의 비 (참고문헌)

Limit State	Annual Probability	Relative Resistance	Relative Risk			Risk/ Resistance		
			Hi	Mod	Low	Hi	Mod	Low
Serviceability	0.0200	0.125	0.30	0.15	0.03	2.50	1.20	0.25
Damage Control	0.0020	0.500	0.80	0.60	0.30	1.60	1.20	0.40
Survival	0.0002	1.000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

사실상 지금까지 사용하고 있는 중요도계수는 500 년 재현주기의 지진하중을 기준으로 삼고 다른 중요시설물의 지진피해영향을 고려한 공학적인 판단에 근거한 계수 였으나 성능기초내진 설계법에서는 이를 지진의 재현주기와 성능수준목표 매트릭스 틀에서 합리적인 해석을 가한 것으로 볼 수 있다.

성능수준을 기능수행수준과 붕괴방지수준의 2 개로 제시한 것은 종국적으로 3 개 이상의 성능수준의 매트릭스로 움직이는 타협점으로 볼 수 있으나 6 개의 지진하중의 설정은 세분화되어 이를

국제적인 추세의 4 개의 지진하중으로 바꾸는 것이 바람직하다.

둘째로 성능목표별 적합한 내진설계방법의 제시가 필요하며 구체적인 기준제정이 뒤따라야한다. 예를 들어 IBC[8]에서는 Seismic Use Group (내진등급)과 설계지진가속도 크기별로 다시 Seismic Design Category A, B, C, D 로 나누어 내진설계방법을 제시한다. 등가 정적설계법의 적용이 가능한 구조물의 조건을 구체적으로 제시하여 설계법의 신뢰성을 확보한다. 한편 현행설계기준에서의 가능한 적용방법은 기능수행수준의 경우 탄성범위내의 지진거동에 대한 문제이고, 붕괴방지수준의 경우에는 비탄성 범위이므로 허용응력설계법과 강도설계법 또는 LRFD 를 적용할 수 있다. 각각 다른 설계방법이라도 결국 단일의 설계 결과물을 결정하는데 다단계의 경우라도 가능한 단면과 상세에 큰 차이가 없도록 지진하중의 크기, 중요도계수, 그리고 하중조합에 대한 검토가 필요하다. 현재 시설물별 구체적인 내진설계의 개발과 방법의 개발을 서두르기 보다는 기본적인 변위기초설계법, 에너지기초설계법, 포괄적인 내진설계법의 개발을 추진하는 것이 필요하다. 성능기초설계법의 요체는 변위, 에너지 등 새로운 성능평가의 변수의 도입으로 종전의 응력산정의 한 방법에서 진일 보한 내진설계방법 개발을 서두려야 할 것으로 판단된다. 한편 종전의 응력-강도 설계법을 보완하여 사용할 수 있는 방안은 성능수준별 각기 다른 반응수정계수의 사용이다. 한 예로 현재 IBC 에 서 시도한 다양한 R 값의 시도[1, 10]이다. 이는 성능수준별 다른 값의 사용을 권장한 Vision 2000 의 하나의 예로 볼 수 있다.

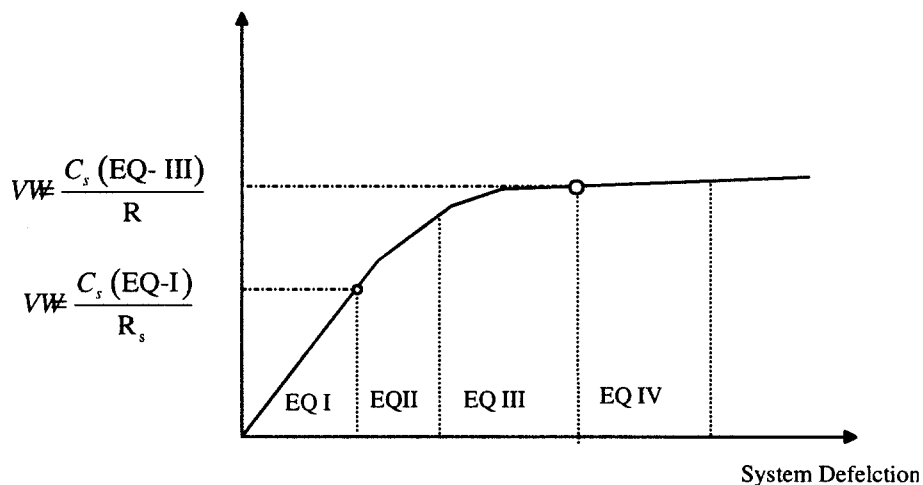


그림 2) Pushover 해석과 밀면 전단력의 관계

그림 2 에서 구조물의 pushover 해석결과를 통해 밀면전단력의 크기를 각각의 성능수준별로 지진하중과 반응수정계수를 이용하여 합리적인 설계가 이루어지는 방향을 살펴볼 수 있다. 붕괴방지 수준(EQ-III)은 구조물의 설계연성도( R )로서 탄성거동보다 저하된 밀면전단력과 변위를 예상하고 부재 작용력을 산정하여 설계한다. 그 다음 기능수행수준의 경우 탄성범위거동을 예상하여 다른 크

기의 설계지진(EQ-I)을 통해 적절한 크기의 밀면전단력을 산정하여 그로 인한 변위한 비구조체 등의 기능에 장애가 일어나지 않아야 한다. 문제는 이러한 과정을 통해 구조시스템과 부재의 크기는 동일한 것으로 각각의 경우 구조시스템과 부재, 단면의 변화가 작아야 한다. 혹자는 붕괴방지수준에 만족하는 경우 기능수행수준을 자동적으로 만족한다고 주장할 수 있으나 현재의 설계방법으로는 보장할 수 없는 일이다. 예를 들어 모든 경우는 동일한 수치로 고정하고 구조물에 작용하는 설계 밀면전단력을 비교하기로 하자.  $R=1$  를 기능수행수준에 기존의 기준의  $R$  을 붕괴방지수준에 설정하고 97년도 설계지진에 적용하는 경우 밀면전단력의 크기가 그림 2)에서와 같은 순서를 가지지 못한다. 이는 완성된 성능기초설계법으로 옮겨가는 도중에 수정된 응력-강도설계법을 유지한다면 지진하중의 등급과 반응수정계수의 조정작업을 필요로 함을 의미한다.

세 번째로 비구조체에 대한 내진설계는 성능기초설계법의 주요한 관심사이다. 비구조체에 대한 내진평가방법으로 risk management 등의 기법을 도입하여 특등급 구조물인 병원, 통신시설 등에 적용한다. 전체 시스템의 내진위험도를 검토하기 위해서 시스템의 분석과 Fault-tree 의 기법을 도입하여 예를 들어 해당시설물의 기능정지시 back-up 시스템의 작동여부와 기능정지로 야기되는 과급효과 등을 고려한 설계 및 내진성능평가기법의 도입과 개발이 필요하다.

#### 4. 내진설계방법개발의 제안

우리나라의 내진설계의 상위개념은 지진하중에 대한 사항과 각 시설물별 성능수준과 목표를 제시하고 있다. 이러한 시도는 국제적인 조류에 적합한 시도로 평가되나 다음과 같은 해결점을 남겨 놓고있어 국제적인 기준의 기본 개념에 부응하기 위하여 추가적인 기준의 보완 과 후속적인 연구를 필요로 한다.

- 1) 설계지진하중의 등급과 반응수정계수의 적용의 합리적인 조정으로 성능수준별 uniform risk 가 유지되도록 한다.
- 2) 현행설계방법을 보완하여 성능기초설계개념을 실현하거나 다른 설계방법의 개발을 서두른다. 변위설계법과 에너지기초 설계법의 다양한 적용의 예제를 통해 국내 지진환경에 적합한 설계기술을 제안 개발한다.
- 3) 비구조체의 내진성능을 보장할 수 있는 설계방법을 연구하여 추후 중요시설물의 종합적인 재해대책으로 확장한다.

더불어 급속한 외국기술의 소개에 맞추어 적절한 우리말의 번역과 사용에 가능한 공감대를 이루도록 하는 것도 중요한 일이다. 이 논문에서 사용한 성능기초, 변위기초, 에너지기초 대신 성능기반, 변위기반 등으로 사용할 수 있으며 그 밖에 중요한 여러 지진관련 용어의 고급스러운 선택을 통해 기술의 전달과 발전에 기여하는 것이 중요하다.

참고문헌

1. SEAOC (1995), "Performance Based Seismic Engineering of Buildings,"
2. SEAOC (1995), "Vision 2000,"
3. 건설교통부, 한국지진공학회, (1997) "내진설계연구 II,"
4. Fajfar, P., Krawinkler, H. (1997), "Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes,"  
Balkema
5. SEAOC (1999), "Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, " 7<sup>th</sup> Ed. SEA
6. ATC (1997), "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building, " FEMA-273, Building Seismic  
Safety Council
7. ATC (1997), "NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Building, " FEMA-  
274, Building Seismic Safety Council, 1997
8. International Code Council (2000), "International Building Code,"
9. Pauley, T. and Priestley, M.J.N., (1992) "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings,  
" John Wiley & Sons Inc.
10. ATC-34 (1995), "A Critical Review of Current Approaches to Earthquake-Resistant Design,"