

## 위험도 기반 내진 설계의 일반적인 프레임워크 General Framework for Risk-based Seismic Design

장승필\*                      오윤숙\*\*                      김남희\*\*\*  
Chang, Sung Pil      Oh, Youn Suk      Kim, Nam Hee

---

### ABSTRACT

This paper proposes the concept and the general framework of the risk-based seismic design. Because earthquakes and the behaviors of structures are very unpredictable, probabilistic seismic design methods have been proposed after deterministic design methods. Considering these changes, we can find that the important point of seismic design is not the structural behavior itself, but the consequence of structural behavior under possible earthquakes. Risk-based seismic design can tell these consequences under any earthquakes. In this paper, structural confidences are considered by using fragility curve, and risk is modeled by failure probability and consequence-property damage cost, casualty cost.

---

### 1. 서론

지진은 자연재해로서 피해의 범위가 광범위하며 예측이 어렵다는 특징이 있다. 따라서 지진재해는 어떤 특정단위의 기관에서 관심을 가지는 재해성격에서 벗어나 보다 체계적이고 조직적인 대응이 필요하다. 지진재해는 누구의 입장에서 볼 것인가에 따라 그 관심사가 달라질 것이므로 이에 대한 대응방법 및 대응의 정도도 달라질 것이다. 예를 들어 정부의 입장에서는 공공의 안전이 제일 큰 관심사일 것이고 특정한 시설물의 소유주에게는 투자여부와 보수비용 등이 문제가 될 것이다. 또한 임대차인에게는 지진으로 인해 자신의 생명이 어느 정도 위협을 받는가가 큰 관심사가 될 것이다. 따라서 내진설계는 일반 하중에 근거한 설계법과는 달리 다양한 정책결정에 도움을 줄 수 있도록 보다 정책적이고 일반적인 기준을 제시해주어야 한다.

그러나 기존 내진설계의 기본적인 개념은 구조물의 안정성과 사용성을 극대화하는 것에 주요 목적을 두고 있었다. 또한 내진코드에 명시된 설계규정들은 특정한 전문가 집단들에 의한 공학적 판단에 기초한 것으로 지진하중을 단일 매개변수로 취급하는 결정론적 내진설계가 일반적이었다.

---

\* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

\*\* 학생회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부, 석사과정

\*\*\* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부, BK계약 조교수

그러나 최근 내진설계 개념은 결정론적인 설계의 한계점을 극복하는 방향으로 바뀌고 있다. 이 연구에서는 구조물의 신뢰성을 지진강도에 따른 파괴확률로 제시하고 지진피해의 결과인 재산과 인명피해를 바탕으로 위험도에 기반 한 설계의 원형을 소개함으로써 기존의 내진설계방법을 보완할 수 있는 내진설계기준을 제시하고자 한다.

## 2. 기존의 내진설계법

구조물의 내진설계는 Force-based seismic design이나 Displacement-based seismic design과 같은 결정론적인 방법으로부터 시작하였다. Force-based seismic design하에서 구조물은 지진하중에 견디기 위해 일정한 강도를 확보하도록 요구되는데 이렇게 설계된 구조물은 일반적으로 과도한 탄성해석결과를 나타낸다. 이는 구조물의 비선형거동에 의한 에너지의 소산을 고려하지 않았기 때문에 나타나는 결과이며 따라서 구조물이 견뎌야 할 지진의 규모가 커질수록 경제적인 부담이 지나치게 커지는 문제가 있었다. 내진설계에 있어서의 이러한 경제적 부담을 해소하고자 구조물의 연성을 증가시키는 방법이 1970년대 후반부터 제안되기 시작하였는데 이것은 구조물의 비선형거동을 통해 진동에너지를 소산시키는 효과를 이용하는 방법이다. 구조물의 연성거동을 고려한 내진설계 방법은 여러 가지 관점에서 개발, 발전되어 왔으나 이 역시 최근에 발생한 Loma Prieta지진(1989), Northridge지진(1994), Kobe지진(1995) 등으로 엄청난 경제적 손실 경험하면서 종래의 결정론적인 내진설계에 대한 근본적인 원칙과 철학을 재고하지 않을 수 없게 되었다.

Northridge 지진이 발생한 후에 ATC와 SEAOC에서는 Vision2000을 구성하였으며 기존의 내진설계법의 대안으로 다단계 성능수준기반 내진설계법(multiple Performance-based Seismic Design: PBSD)을 최초로 제안하였다.

다단계 PBSD란 하나의 구조물이 4개의 재현주기 지진에 대해서 4개의 성능수준을 만족 시키도록 하는 내진설계법으로서 그림 1과같이 표현되며 이는 궁극적으로 인명과 재산피해의 최소화를 위해 하나의 구조물이 단일 성능수준을 만족시키는 것이 아니라 다단계 성능수준을 목표로 하도록 설계하는 내진설계법으로 요약 될 수 있다.

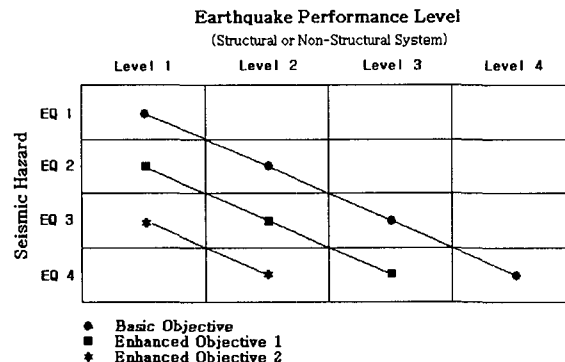


그림 1. 다단계 성능기반 내진 설계법

이와 같은 설계법의 변화에서 내진설계가 지향하고 있는 공통된 방향성을 찾아볼 수 있는데 그 방향성이란 내진설계에 있어서 중요한 것은 구조물 그 자체의 거동이 아니라 그로 인한 피해결과라는 것이다. 물론 구조물의 내진성능을 향상시키는 것이 최종적인 설계목적임에는 틀림없다. 그러나 지진으로 인하여 큰 피해를 겪을 때 마다 이에 대한 반성으로 기존 설계법에 문제를 제기하고 새로운 설계법이 제안되어 왔다는 것은 내진설계에 있어서 그 패러다임이 피해결과에 좌우된다는 것을 증명한다고 할 수 있다. 따라서 내진설계를 통해 구조물이 확보한 성능수준이 어떤 지진에 대하여 인명과 재산피해를 어느 수준까지 줄여줄 수 있는지를 제시할 수 있어야만 비로소 내진설계의 궁극적 목표에 보다 접근한 설계법이라 할 수 있을 것이다.

그렇다면 PBSD는 내진설계의 궁극적인 목표에 비추어 대안으로서 충분한가? 물론 PBSD는 가능성 있는 다양한 지진에 대하여 구조물이 어떻게 거동할 것인지 예상할 수 있다는 점에서 기존의 결정론적인 내진설계법의 한계점을 극복했음에 틀림없다. 그러나 내진설계 결과 조정되는 위험도는 어느 수준이며 그 효과는 어느 정도인지 여전히 명확하지 않다. 이점은 그 구조물이 사회 기반 시설물일 경우 더욱더 문제가 된다. 사회 기반 시설물은 손상 또는 파괴 시 그 규모와 파급효과가 넓다는 특징이 있으므로 어떤 지진하중에 대하여 구조물 자체의 성능수준이 무엇인지를 예측하는 것만으로는 지진에 적절히 대응한다고 볼 수 없다. 즉 여러 지반운동 강도와 구조물의 한계상태를 단순히 조합하는 설계법에서 한 단계 더 나아가 그 한계상태로 인한 파급효과와 피해규모를 제시해 줄 수 있어야만 내진 설계법으로서 보다 적극적인 대안이 될 수 있다.

### 3. 위험도 기반 내진설계 개념 소개

#### 3.1 위험도 정의

“What is the risk?” 라는 질문에 대하여 위험도평가(risk assessment) 분야에서는 일반적으로 risk triplet이라고 일컫는 3가지 질문으로 세분화시켜 정의하고 있다.

What can go wrong?  
 How likely is it?  
 What are the consequence?

이를 지진재해에 대입하여 정의한다면 “What can go wrong?”이라는 첫 번째 질문의 대답은 지진의 발생 빈도와 지진강도 시나리오의 형태가 된다. 두 번째 질문인 “How likely it is?”의 대답은 위험도의 정량적인 값이 되어야 하므로 지진이 발생할 확률과 구조적 신뢰성, 그리고 피해결과를 분석하는 과정이 뒷받침 되어야 할 것이다. 마지막 질문인 “What are the consequence?”는 첫 번째와 두 번째 질문의 조합으로 각 시나리오마다 하나씩의 대답이 나올 수 있다. 이를 산술적으로 모델링하면 식 (1) 과 같이 표현된다.

$$\text{Risk} = \sum_{i=1}^N \text{Consequence}_i \times P_{F_i} \quad (1)$$

이때  $i$ 는 구조물의 손상정도를 의미한다. HAZUS에서는 구조물의 손상단계를 Slight, Moderate, Extensive, Complete(S, M, E, C)로 구분하여 정의하고 있으며 이 연구에서도 이를 따른다.  $P_{Fi}$ 는 어떠한 지진이 발생했을 때 구조물이 손상정도  $i$ 를 초과할 확률이다. 이는 특정지진하중이 구조물에 가해졌음을 전제로 하는 조건부확률이므로 지진하중자체의 불확실성을 고려한다면 지진하중 자체의 발생확률분포를 곱하여 컨볼루션의 형태로 표현될 것이다.  $Consequence_i$ 는 구조물이 손상정도  $i$ 에 도달했을 때 예상되는 피해의 정도를 정량적으로 환산한 값이다. 지진하중에 대하여 각 손상상태에 따라 서로 다른 발생확률을 갖기 때문에 위험도는 각 손상상태에서의 합으로 정의된다.

### 3.2 일반적인 위험도 기반 내진설계의 프레임워크 제안

위험도 기반 내진설계의 기본적인 프레임워크는 그림 2와 같다.

첫 번째 단계의 시나리오설정은 누가 어떤 구조물을 대상으로 어떤 목적의 내진설계를 할 것인가를 결정하는 단계이다. 시나리오에 따라 설계에서 허용하는 위험도가 결정된다. 이 과정에서 제어하고자 하는 변수(예를 들어 구조물의 피해로 인한 직접적인 비용 또는 사상자수)가 반영되도록 산술적인 model을 정의하는 과정이 수행되어야 한다. 이때 시나리오에서 요구하는 바가 합리적으로 반영되도록 위험도 모델을 가정하는 것이 중요하다. 이 연구에서는 식 (1) 위험도 모델을 이용하였다.

두 번째 단계는 위험도 목표값(Risk target)을 결정하는 단계로서 시나리오에서 요구하고 있는 적절한 위험 수준을 결정하는 단계이다. 위험도 목표값이 결정되면 이를 만족시킬 수 있는 가능한 설계대안들이 제시될 수 있다. 구조물의 형식, 재료, 규모를 달리한 몇 개의 서로 다른 설계대안들을 제안하고 이들을 비교 평가하여 선택하는 과정을 통해 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있다. 그림 3은 3가지 구조물의 위험도를 보여주고 있다. 각각이 특정한 구조형식의 설계대안을 반영한 결과라고 했을 때 A, B, C 순서로 동일한 지진하중에서의 위험도가 크다. 만약 목표위험도가 그림 3에서 "\*" 점으로 정해진다면 C 구조물은 목표값과 일치하므로 조정이 필요 없으나 A, B 구조물은 a, b 만큼 위험도를 줄여줘야 한다. 목표위험도는 이처럼 특정한 값을 목표치로 할 수도 있고 각 손상정도에 따른 파괴 확률 값을 목표로 할 수도 있다. 시설물마다 손상정도에 따른 피해결과(consequence)는 이미 정해져 있으므로 위험도를 줄이기 위해서는 파괴확률을 낮춰야 한다. 파괴확률은 각 손상단계에서의 값이 서로 종속관계에 있으므로 손상정도에서의 파괴확률 값을 독립적으로 맞출 수는 없으며 구조물의 실제거동을 고려하여 전체적으로 적정수준까지 감소시키는 방법이 가능하다.

구조물의 위험도를 목표값으로 조정하는 것은 각각의 손상정도(Slight, Moderate, Extensive, Complete)를 나타내는 손상한계값(damage threshold)을 조정함으로써 이루어진다. 즉 세 번째 단계의 손상한계목표값(Target damage threshold)이란 위험도 목표값을 만족시키기 위해 구조물이 확보해야 하는 성능한계치를 의미한다. 이 연구에서는 이미 내진평가를 통해 얻어진 구조적 성능한계값에 가중치를 주어 취약도 곡선에 의한 파괴확률을 조정함으로써 위험도를 목표값에 접근시키는 방법을 제안한다.

네 번째 단계는 각 대안들을 비교하여 합리적인 대안을 선택하는 과정으로 공학자의 판단과 정

책결정자의 경제성분석이 뒷받침되어야 한다.

다섯 번째, 여섯 번째 단계는 손상한계목표값을 확보하기 위한 내진설계과정이다. 예를 들어 PGA(Peak Ground Acceleration)값으로 위험도를 조정해 본 결과 0.05g가 가벼운 손상(Slight damage)의 한계값으로 조정되었다면 설계자는 최소한 0.05g이상에서 가벼운 손상이 발생하도록 구조물을 설계해야 할 것이다. 이 연구에서는 구조물의 한계상태를 PGA변수로 정의하였으며 지진하중의 크기 역시 PGA로 나타내었다. 이 경우 손상한계목표값이 설계의 입력값으로 반영될 때는 demand spectrum 형태로 제시되는 것이 이상적이라고 생각된다. 그러나 손상의 한계값을 정의하는 변수는 목적에 따라 다양해 질수 있다. 예를 들어 구조물의 손상이 drift에 민감하다면 drift ratio가 쓰일 수 있으며 마찬가지로 손상지수 등도 손상을 나타내는 변수로 쓰일 수 있다. 이 경우 손상한계목표값은 이들 변수가 되며 구체적인 설계단계의 입력값은 demand spectrum이 아니라 연성도 등의 값이 될 수 있다. 이를 위한 자세한 설계방법은 기본적인 프레임워크가 마련된 후 향후 더욱더 많이 연구되어야 할 부분이다.

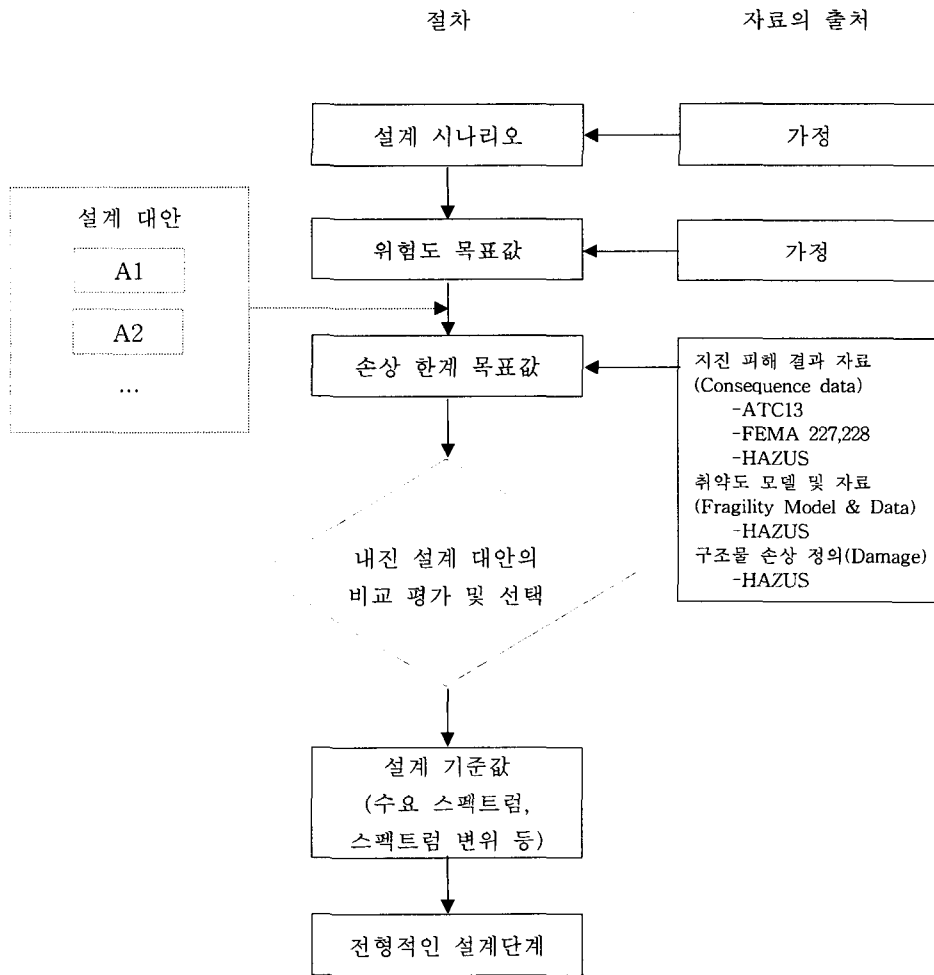


그림 2. 위험도기반 내진설계 프레임워크

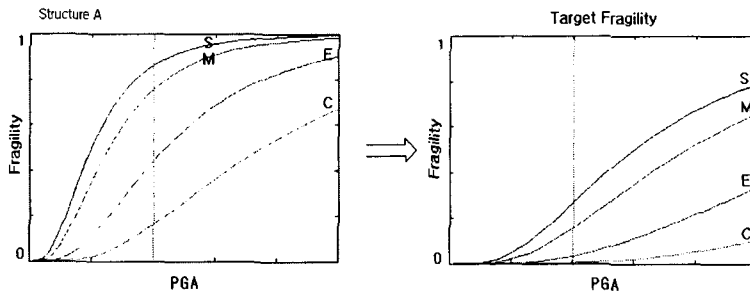
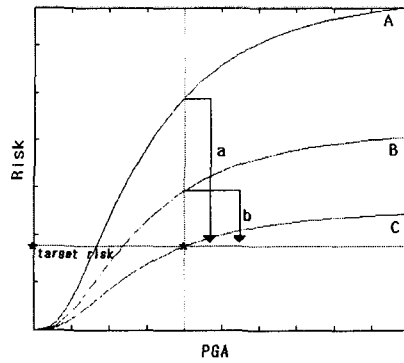


그림 3. 위험도 조정 과정

#### 4. 결론

위험도에 기반 한 내진설계는 토목 건축물의 내진설계개념으로는 아직 생소하나 원자력건축물의 경우 이미 오래 전부터 내진설계에 확률론적 위험도개념을 도입해왔다. 특히, 미국과 일본을 비롯한 대부분의 원자력 보유국에서는 원자력발전소의 건설 및 가동을 위한 인허가 요건에 확률론적 위험도 평가(probabilistic risk assessment: PRA)를 의무조항으로 채택하고 있다.

건축물의 경우 역시 지진재해로 인한 위험도를 확률론적 방법을 이용하여 예측하기 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있으며 공학 전반에 걸쳐 지진으로 인한 위험도 제어를 목적으로 한 연구가 진행 중이다. 그 대표적인 예로 MAE(Mid-America Earthquake Center)의“Consequence-Based Engineering Framework“ 개발에 관한 연구를 꼽을 수 있다.

그동안 위험도가 성능평가분야에서 중요한 평가의 기준 값으로 사용되어 온 것은 위험도 값이 재해를 예측하고 방재계획을 수립하기 위한 열쇠를 제공해 줄 수 있기 때문이다. 그렇다면 위험도를 설계단계에서 제어 할 수 있다면 어떤 효과가 있을까? 이 질문에 대한 답은 바로 위험도 기반 내진설계의 목적이자 필요성으로 귀결될 것이다. 위험도 기반 내진설계법이 확립되었을 경우 예상되는 긍정적인 성과는 다음과 같다.

- 정책결정자와 공학자간의 역할분담 가능.
- 다양한 설계의도를 목표위험도(target risk)를 조정함으로써 보다 쉽게 반영할 수 있다.
- 방재계획 수립 목적에 적극 활용가능.
- 중요도가 다른 시설물간의 균형 잡힌 설계가능
- 가능한 설계 대안들 간의 비교평가를 통한 합리적인 선택가능
- PBSDB방법의 장점 유지

## 5.참고문헌

1. FEMA, "HAZUS Technical manual vol. I ", FEMA, 1997.
2. FEMA, "HAZUS Technical manual vol.III", FEMA, 1997.
3. Asadour H. Hadjian, "A General Framework for Risk-Consistent Seismic Design",  
Earthquake Engineering Structure Dynamics, Vol.31, 2002, pp.601-626.
4. Robert P. Kennedy, "Risk-Based Seismic Design Criteria", Nuclear Engineering and Design  
Vol.192, 1999, pp.117-135.
5. Structural Engineers Association of California, "Recommended Lateral Force Requirements  
and Commentary", 1999, pp.361-390.