

## 취약도 해석을 통한 빌딩구조물의 내진성능 비교 및 평가

### Fragility Analysis for Evaluation and Comparison of Seismic Performance of Building Structures

박주남<sup>1)</sup> · 최은수<sup>2)</sup>

Park, Joo-Nam · Choi, Eun-Soo

**국문 요약** >> 지진하중에 의한 구조물의 손상 및 피해는 지진에 의한 동적 하중을 고려한 구조물의 내진설계의 도입을 통하여 저감시킬 수 있으며, 이 때 내진설계 도입으로 인한 구조물의 내진성능 향상 및 그에 필요한 비용을 동시에 고려하여 내진설계 도입의 적합성을 검증해야 한다. 본 연구에서는 내진성능의 확률적 평가를 위해서 지진하중과 구조물 자체에 내재되어 있는 불확실성을 고려하여 빌딩구조물의 지진취약도를 작성하였으며 시뮬레이션의 효율성을 높이기 위한 Latin Hypercube 샘플링 기법을 도입하여 해석을 수행하였다. 내진설계 도입의 필요성 검증은 위해서는 구조물의 물리적 내진성능 이외에도 구조물의 사회적, 경제적 기능 및 가치에 대한 고려가 필요하며 이러한 요소를 고려한 의사결정해석 절차를 등가비용모델의 예를 들어 제시하였다.

**주요어** 내진성능평가, 지진취약도, 내진설계 적합성, 의사결정해석

**ABSTRACT** >> Potential damage and losses associated with structural systems caused by earthquake can be reduced by application of seismic design to the structures. Because the building cost required for seismic design is generally higher than the cost for non-seismic design, the application of seismic design must be justified considering both seismic performance and cost. This paper presents a risk-based framework for evaluation and comparison of seismic performance of structures such that necessary data can be supplied for decision making on seismic design. Seismic fragility curve is utilized for seismic risk assessment of structures, and the process for decision analysis on adaptation of seismic design is presented based on the equivalent cost model.

**Key words** seismic performance evaluation, seismic fragility, seismic design, decision analysis

## 1. 서론

지진하중에 의한 구조물의 손상 및 피해는 지진에 의한 동적 하중을 고려한 구조물의 내진설계의 도입을 통하여 저감시킬 수 있다. 이러한 구조물 내진설계는 일반적으로 먼저 목표 지진하중을 정량적으로 정의한 후 해당 구조물이 정의된 지진하중에 대하여 목표된 내진성능을 가질 수 있도록 수행되어진다. 그러나 이 때 고려하여야 할 지진하중은 일반적인 사용하중과는 달리 그 발생 빈도와 규모에 있어서 높은 불확실성을 내재하고 있으며 지진하중에 의한 구조물

의 거동 또한 구조물의 재질, 설계, 제작 등에서 불확실성을 내재하고 있기 때문에 결정론적으로 예측할 수 없으므로, 이에 따라 내진설계에서 목표한 지진수위 및 구조물의 내진성능에 대한 검증을 위해서는 확률적 접근법이 필요하다. 현재까지 지진에 대한 구조물의 확률적 성능평가에 대해서는 지진하중에 대한 구조물의 손상확률 또는 파괴확률을 나타내는 지진취약도를 작성하여 여러 형태의 구조물에 대한 지진위험도를 평가하는 여러 가지 기법 및 사례를 보여주는 많은 연구들이 있었으나<sup>1-4)</sup> 이러한 지진취약도를 이용한 구조물 간의 정량적 내진성능 비교 및 내진설계 도입의 필요성 검증, 그리고 이러한 지진취약도가 내진보수·보강의 의사결정 해석에 어떻게 활용되는지에 대한 절차 및 방법론을 제시한 연구는 아직 활발히 이루어지고 있지 않다.

본 연구에서는 지진하중과 구조물 자체에 내재되어 있는 불확실성을 고려하여 구조물의 지진 취약도를 작성한 후 작성된 취약도 해석을 통하여 구조물에 대한 내진설계 도입의

<sup>1)</sup> 정희원·한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사  
(대표저자: jnpark@krti.re.kr)

<sup>2)</sup> 정희원·홍익대학교 건설/도시공학부 조교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

적합성 검증 및 의사결정에 필요한 해석적 방법론을 미국 중진 지역의 지진하중을 고려하여 설계된 RC 구조물을 예를 들어 제시하고자 한다. 내진설계 반영 시와 미반영 시의 구조물 내진성능 비교 평가를 위하여 지진하중을 미고려한 경우와 고려한 경우 두 가지의 건물을 설계하여 모델링하였으며 각각의 건물에 대하여 지진 취약도를 작성하였다. 취약도 작성을 위한 지진강도 지수로는 최대지반가속도(PGA) 대신 구조물의 동적특성을 반영하기 위하여 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration,  $s_a$ )를 이용하였으며 구조물에 내재되어 있는 불확실성을 표현하기 위하여 구조물의 동적 특성에 영향을 주는 물성치를 확률 변수로 모델링하였고 해석에 필요한 전산시뮬레이션의 효율성을 높이기 위해 확률변수의 샘플 수를 줄일 수 있는 Latin Hypercube Sampling 기법<sup>(5)</sup>을 사용하였다. 작성된 지진취약도는 지진강도와 그 발생 확률과의 관계를 나타낸 지진함수와 결합하여 구조물이 일정기간 이내에 손상을 입을 손상확률분포를 구하는 방법을 소개한 후 그 결과를 이용하여 구조물의 내진설계 및 내진보강에 필요한 의사결정해석을 수행하는 절차를 제시하였다. 의사결정해석 절차의 제시에 있어서는 공학분야에서 가장 보편적으로 쓰이는 등가비용분석모델을 바탕으로 구조물의 보수, 보강 등에 쓰이는 구조적 비용뿐만 아니라 구조물의 사회적 기능을 고려한 기능상실에 대한 비용도 동시에 고려하는 접근법을 택하여 설명하였다.

## 2. 방법 및 절차

구조물의 내진성능 평가에 있어서 중요한 점은 지진하중의 강도에서부터 구조물의 응답 및 손상, 그리고 그로 인한 사회적, 경제적 손실 산정을 수행할 때 일관된 매개변수를 사용하여야 한다는 점이다. 본 연구에서는 지진하중의 강도는 구조물의 특성을 반영할 수 있는 스펙트럼 가속도( $s_a$ )를, 그리고 구조물의 손상지수로는 최대층간변위율(Maximum Inter-story Drift)을 이용하여 해석을 수행했으며, 자세한 절차는 다음과 같다.

## 2.1 손상지수 정의

지진하중에 대한 구조물의 손상 정도를 나타내는 척도인 손상지수에 대해서는 여러 가지 접근법을 이용한 연구가 수행되어져 왔다. 그 중에서 1980년대 중반에 제시된 Park/Ang/Wen의 손상지수(Damage Index)<sup>(6)</sup>는 지진하중에 의한 구조물의 변위와 반복하중에 의한 에너지 소산을 동시에 고려한 것으로 구조물의 지진 손상 산정에 널리 이용되어져 왔으나 지수의 산정을 위해서 실험이 동반되어야 하고 또한 그 값이 일정치 않은 이유로 최근에는 구조물의 손상지수로 최대층간변위율(maximum inter-story drift ratio)이 많이 이용되고 있다<sup>(7)</sup>.

손상지수는 구조물의 손상정도를 등급별로 나누어 각각의 등급에 따라 부여하는 것이 일반적인데, 표 1은 미국 FEMA (Federal Emergency Management Agency)에서 제시된 손상상태에 따른 구조물의 종류별 손상지수를 최대층간변위율로 나타낸 예를 보여주고 있다<sup>(8)</sup>. 본 논문에서도 FEMA의 정의를 따라 손상상태 및 손상지수를 이용하였다.

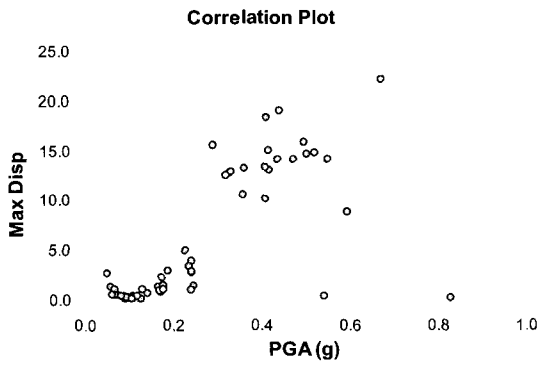
## 2.2 취약도의 작성

지진취약도는 발생 지진 강도에 따른 특정 구조물 또는 구조물 군(群)에 일정 손상상태 이상의 손상이 발생할 확률을 나타내는 도표이다. 이러한 지진취약도의 작성을 위해서는 지진 강도를 나타내는 지진강도 지수를 결정해야 하는데, 지난날에는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)가 널리 이용되어졌으며 교량 구조물의 경우에는 최근에도 PGA 지진강도 지수로써 이용되고 있으나<sup>(9)</sup>, 빌딩 구조물에 대한 최근 경향은 구조물의 고유주기 특성을 고려한 지진 응답 특성을 보여주는 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration,  $S_a$ )가 많이 쓰이고 있다. 실제로 빌딩 구조물의 지진하중에 대한 동적응답과의 상관성이  $S_a$ 가 PGA에 비해 상대적으로 높다는 연구결과가 제시된 바 있다<sup>(10)</sup>(그림 1 참조).

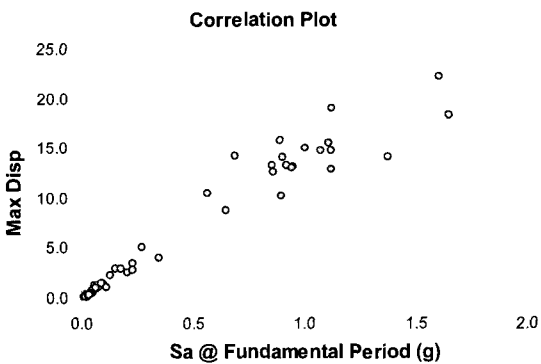
지진취약도에서 나타나는 지진강도와 구조물의 손상확률은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

〈표 1〉 콘크리트 프레임 구조물에 대한 Structural Performance Levels<sup>(8)</sup>

Damage Levels	Structural Performance Levels		
	Collapse Prevention	Life Safety	Immediate Occupancy
Damage Description	Extensive cracking and hinge formation in ductile elements. Limited cracking and/or splice failure in some nonductile columns. Severe damage in short columns.	Extensive damage to beams. Spalling of cover and shear cracking(<1/8" width) for ductile columns. Minor spalling in nonductile columns. Joint cracks <1/8" wide.	Minor hairline cracking. Limited yielding possible at a few locations. No crushing (strains below 0.003)
Drift Ratio	4%	2%	1%



(a) PGA와의 상관도

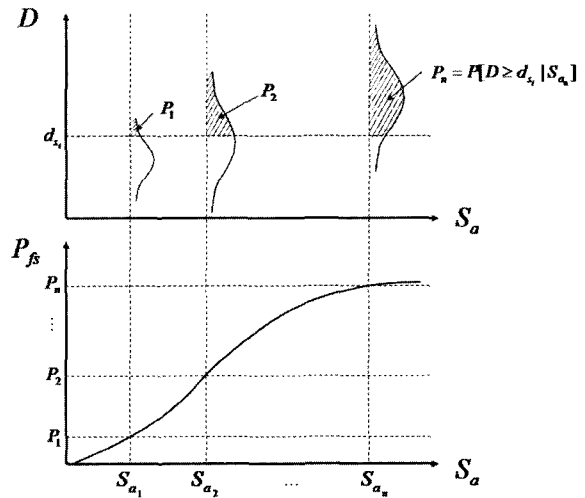


(b) Sa와의 상관도

〈그림 1〉 단일 자유도 시스템에 적용한 입력지진강도 지수와 동적응답과의 상관성 분석<sup>(10)</sup>

$$PF_{ij} = \text{PROB}\{D \geq C_i | EQ_j\} \quad (1)$$

여기서  $PF_{ij}$ 는 구조물이  $j$ 의 강도를 갖는 지진하중  $EQ_j$ 에 대하여  $i$ 의 손상정도 이상의 손상을 입을 확률이고,  $D$ 는 지진에 의한 구조물체의 하중효과,  $C_i$ 는  $i$  손상정도에 해당하는 구조물의 강도를 나타낸다. 본 논문의 경우  $D$ 와  $C_i$ 는 앞서 말한 대로 최대충간변위율로 표현된다. 그림 2는 이러한 지진취약도의 개념을 그림을 통해서 보여주고 있다. 여기서 스펙트럼 가속도( $S_a$ )로 표현된 일정 수준 강도를 가지는 지진 발생에 따른 구조물의 손상은 최대충간변위율로 나타내어지는 구조물 손상의 확률적 분포로써 나타내어지는데 이러한 확률분포는 구조물 자체에 내재되어 있는 불확실성과 해당 강도를 가지는 지진파의 불확실성을 동시에 고려하여 구할 수 있다. 이러한 확률분포도에서 구조물의 최대충간변위가  $i$  손상정도의 기준인  $d_{si}$  이상이 되는 확률을 구하고 그 값과 해당 수준의 지진강도와의 관계를 도표로 나타내면 해당 손상정도에 대한 구조물의 지진취약도를 얻을 수 있다. 이렇게 작성된 지진취약도는 통상 누적 대수정규 분포함수의 형식으로 다음과 같이 표현될 수 있다.



〈그림 2〉 Sa를 이용한 지진취약도의 개념도

$$F_R(s_a) = \Phi \left[ \frac{\ln(s_a/\hat{s}_a)}{\sigma_{\ln s_a}} \right] \quad (2)$$

여기서  $\hat{s}_a$ 는 일정 손상상태에 대한 스펙트럼 가속도의 분포를 대수정규분포함수로 나타냈을 때의 표준편차이다.

위 식 2와 그림 2에서 볼 수 있듯이 지진취약도에서 보여주는 구조물의 손상확률은 일정 지진강도에 대한 조건부 확률함수로 표현되는데 이는 지진취약도가 위치에 따른 지진의 특성과 관계없이 작성된다는 것을 의미한다. 만약 일정 지역에 위치한 구조물이 일정한 시간 내에 그 지역에서 발생 가능한 지진에 의해 겪을 수 있는 손상정도의 확률적 기대값을 구하고자 할 경우에는 지진취약도와 함께 해당 지역의 지진 발생을 확률적으로 보여주는 지진재해도함수(Seismic Hazard Function)를 동시에 고려해야 하는데, 이에 대한 설명은 다음 절에 제시되어 있다.

### 2.3 취약도를 이용한 구조물의 내진성능 평가 및 비교

지진취약도를 이용하면 주어진 지진강도에 대한 구조물의 내진성능을 확률적, 정량적으로 평가할 수 있다. 하지만 이 경우에 얻어지는 구조물 손상확률분포는 주어진 강도의 지진하중에 대한 조건부 확률분포로서, 일정 주기 이내에 구조물이 손상을 입을 전체적 확률을 나타낼 수는 없다. 일정 주기 이내의 구조물 손상확률분포를 구하기 위해서는 지진하중 자체의 발생확률을 나타내는 지진재해도함수(Seismic Hazard Function)와 취약도를 동시에 고려해야만 한다. 지진재해도함수는 지진강도와 그 강도에 해당하는 발생확률과의 관계를 나타낸 함수로, Cornell 등<sup>(2)</sup>에 따르면  $s_a$ 로 표현된 지진강도에 해당하는 연간초과확률 (일년 내에 해당 지진의 강도와 같거나 더 큰 강도의 지진이 발생할 확률)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(s_a) = P[S_a \geq s_a] = k_0 s_a^{-k} \tag{3}$$

여기서  $k_0$ 와  $k$ 는 지역의 특성에 따라 달리 정해지는 계수이며 이렇게 표현된 지진재해도함수에서부터 지진강도와 연간초과확률과의 관계는 대수평면 상에서 선형관계임을 알 수 있다(그림 3).

구조물의 연간손상확률은 취약도와 지진재해도함수를 동시에 고려하여 구할 수 있으며 구조물이 연간 일정 손상수준 이상의 손상을 입을 확률  $P_{PL}$ 은 다음과 같은 수식으로 표현된다<sup>(1)</sup>.

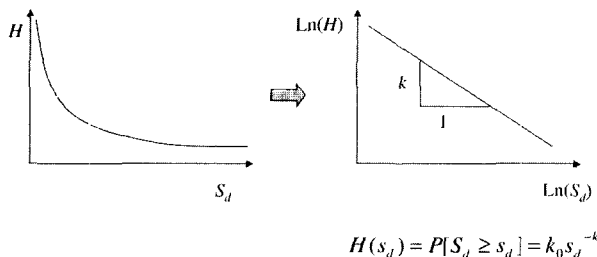
$$P_{PL} = H(s_a^{\hat{c}}) \exp\left[\frac{k^2}{2} \sigma_{\ln s_a}^2\right] \tag{4}$$

여기서  $s_a^{\hat{c}}$ 는 구조물의 지진하중에 대한 저항능력의 확률분포에서 얻어지는  $s_a$ 의 median 값이다.

위 식을 이용하면 일정 기간 내에 지진하중에 대하여 구조물이 입을 수 있는 손상확률분포를 구할 수 있다. 이렇게 산정된 구조물의 지진하중에 대한 손상확률분포는 해당 구조물 설계에 있어서 내진설계 도입의 필요성을 타진하는 의사결정해석에 필요한 입력 자료로 사용될 수 있다. 의사결정해석을 위한 의사결정모델은 여러 가지가 있지만 그 중에 등가비용모델은 그 적용이 복잡하지 않고 가장 널리 쓰이는 가치척도인 금전적 비용으로 모든 대체안에 대한 가치를 정량화할 수 있기 때문에 여러 공학 분야에서 널리 쓰이고 있다<sup>(11)</sup>. 등가비용모델에 의한 구조물의 지진피해 관련 비용은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$CT = CI + CR + CL + CF \tag{5}$$

여기서  $CT$ 는 구조물과 관련된 총 비용,  $CI$ 는 초기비용(구조물 건설 등),  $CR$ 은 지진이 발생했을 경우 손상된 구조물의 보수에 사용되는 비용,  $CL$ 은 구조물과 관련된 인명손실에 관한 비용,  $CF$ 는 구조물의 기능상실에 관련한 비용이다. 이 식을 이용하여 두 가지 이상의 대체안이 있을 때 각각의 대체안에 대한 총 비용을 산정하고 그 기댓값이 최소



〈그림 3〉  $S_a$ 와 초과확률과의 관계를 나타낸 일반적 지진재해도 함수형상

가 되는 대체안을 선정하면 된다. 여기서  $CR$ ,  $CL$ ,  $CF$ 는 구조물의 지진하중에 대한 손상과 밀접한 관계가 있는 손실항목이므로 확률적으로 산정된 구조물의 손상치와 이들 손실사이의 관계설정을 정확히 할 필요가 있다. 일반적으로 구조물의 지진에 대한 손실 발생의 확률값은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

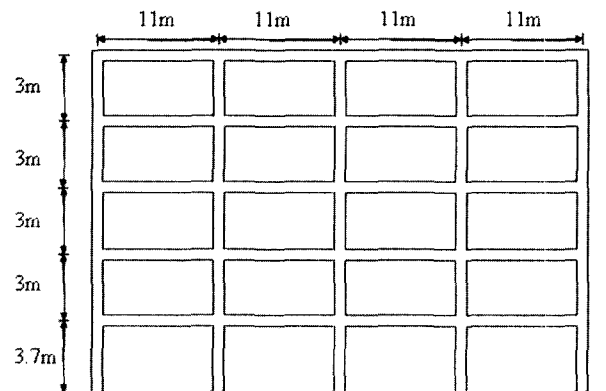
$$P(L) = \sum_c \sum_d \sum_r P(L=D=d) \cdot P(D=R=r) \cdot P(R=E=e) \cdot P(E=c) \tag{6}$$

여기서  $L$ 은  $CR$ ,  $CL$ ,  $CF$  등의 지진관련 손실을,  $D$ 는 구조물의 손상을,  $R$ 은 구조물의 지진하중에 의한 응답을, 그리고  $E$ 는 지진하중의 강도를 나타낸다. 지진하중에 의한 구조물의 응답 및 손상치 평가는 취약도 해석을 통해서 할 수 있으며 이렇게 확률적으로 평가된 구조물의 손상치에서 지진관련 손실을 산정할 수 있다. 구조물 손상치와 사회적, 경제적 손실 사이의 관계에 대한 연구는 여러 문헌에서 찾아볼 수 있다<sup>(9,12)</sup>.

### 3. RC 구조물에서의 적용

#### 3.1 대상 구조물

앞서 기술한 바와 같이 본 연구에서는 내진설계를 미반영한 구조물(구조물 A)과 내진설계를 반영한 구조물(구조물 B)을 같은 형태로 각각 설계하여 두 구조물의 내진성능의 평가 및 비교를 수행하고자 한다. 구조물은 5층 4베이 형태의 철근콘크리트 모멘트 프레임 구조물로서(그림 4 참조) 먼저 내진설계 미반영 구조물인 구조물 A의 설계를 위하여 ACI 318<sup>(13)</sup>에서 정의된 하중조건(지진하중 제외)을 고려하였다. 구조물의 자중 이외에 478.8Pa(10psf)의 사하중을 가정하였으며 1층에서 4층까지는 7181Pa(150psf), 그리고 옥상에는 1197Pa(25psf)의 활하중을 가정하였다. 구조물의

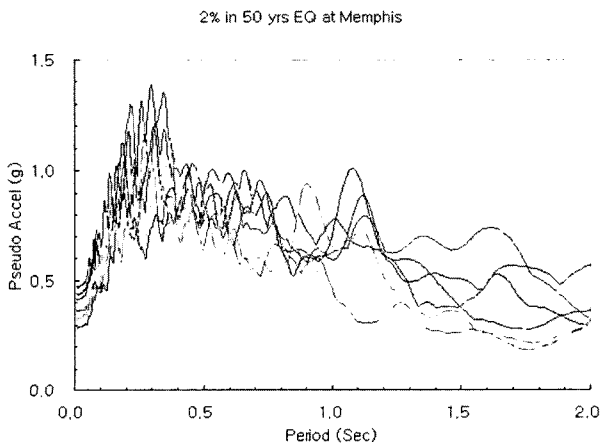


〈그림 4〉 대상 RC 구조물의 정면도 및 치수

비틀림(torsion) 효과는 본 연구에서는 고려하지 않았으며 구조물은 2D로 모델링하였다. 내진설계 구조물인 구조물 B 을 위해서는 IBC 2000<sup>(14)</sup>에서 정의된 지진하중 고려절차를 따라서 미국 중진지역인 Tennessee 주의 Memphis 시 지역에 해당하는 지진하중조건에 맞추어 구조물을 설계하여 내진성능평가를 수행하였으며, 동적응답을 측정하기 위한 구조해석 프로그램으로는 DRAIN-2DX를 사용하였다<sup>(15)</sup>.

### 3.2 입력 지진 고려

지진 해석을 위해서는 실제로 일어난 지진파를 입력 지진으로 이용하는 것이 정확한 해석을 위해서 가장 이상적이겠지만 실제로 지진의 발생은 드물고 또한 발생한 지진 강도 역시 해석에 필요한 강도 영역을 모두 커버하지 못하며 발생한 지진의 기록이 수치화되어 있는 경우 또한 한정되어 있기 때문에 대부분의 지진해석의 경우 지역의 지반 특성을 분석하여 생성된 모의지진파를 이용한다. Wen과 Wu<sup>(16)</sup>는 미국 중진지역의 내진해석을 위해서 Carbondale, Memphis, St. Louis 등 3개 지역의 지진특성을 분석하여 일련의 모의 지진파를 생성하였다. 지진파는 각 지역마다 50년에 2%와 10% 두 단계의 초과확률(Probability of Exceedance)에 해당되도록 생성되었으며 각각의 경우마다 10개씩의 지진파를 생성하여 일정 강도를 갖는 지진의 불확실성을 고려할 수 있도록 하였다. 여기서 초과확률이란 일정 시간 내에 정해진 강도와 같거나 또는 더 큰 지진이 일어날 수 있는 확률을 가리킨다. 본 연구에서는 이 중 Memphis에 해당하는 50년 초과확률 2%인 지진파를 입력지진으로 이용하였다. 그림 5는 Memphis 지진파 중 50년 초과확률 2%의 지진파 10개에 대한 응답스펙트럼을 나타내며, 그림 6은 10개의 지진파 중 4개 샘플 지진파의 지진파형을 보여준다.

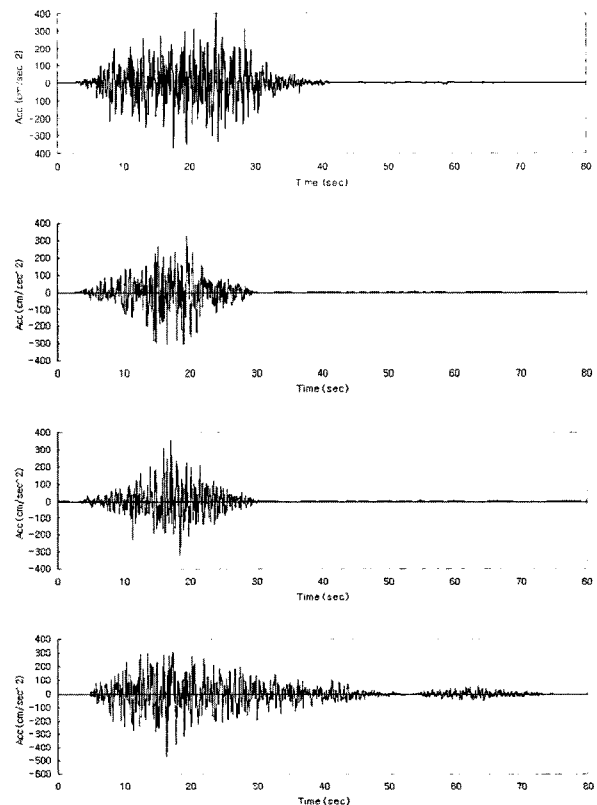


〈그림 5〉 10개 지진파에 대한 응답스펙트럼

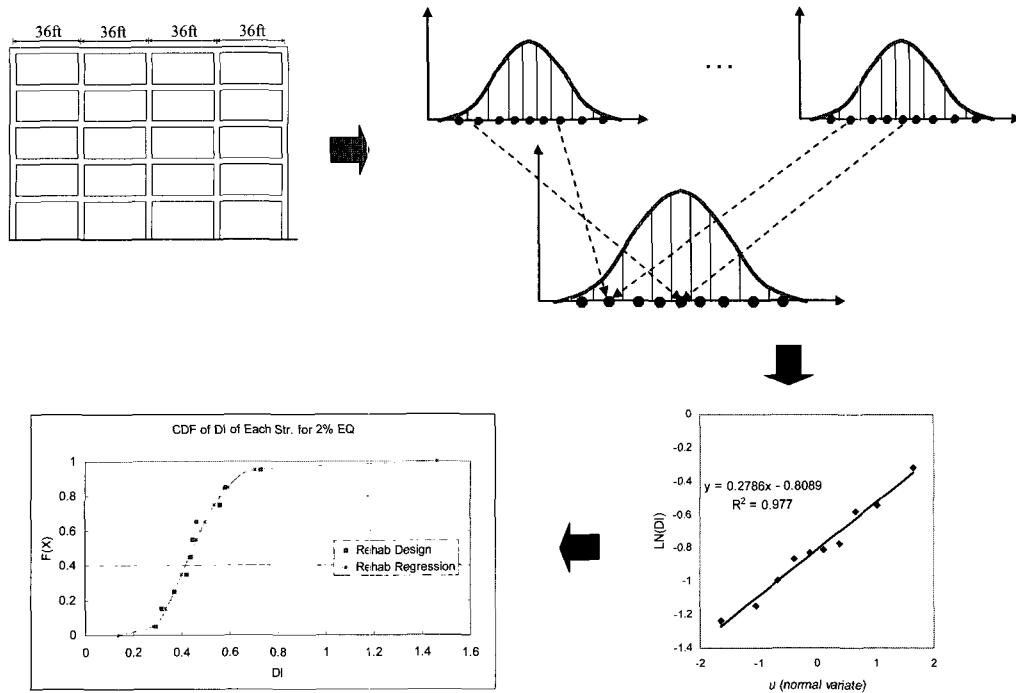
### 3.3 모델링 및 시뮬레이션

구조물 자체에 내재된 불확실성의 모델링을 위하여 콘크리트의 압축강도, 철근의 항복강도, 그리고 댐핑계수를 확률변수로 고려하였다. 지진취약도 작성에 관한 여러 가지 연구결과를 이용하여<sup>(17,18)</sup> 콘크리트의 압축강도는 그 평균값이 공칭강도의 1.14배, 변동계수 0.14의 정규분포를 따르며, 철근의 항복강도는 평균값이 공칭강도의 1.05배, 변동계수 0.11의 대수정규분포를 따르는 것으로 정의하였다. 댐핑계수는 최소값 0.25, 최대값 0.75의 균등확률분포를 따른다고 가정하였다.

지진하중에 대한 구조물의 손상확률분포를 구하기 위해서 일반적으로 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo Simulation, MCS)<sup>(19)</sup>에 의한 확률분포 산정을 하는 접근법이 많이 쓰이지만, 이 방법은 많은 수의 샘플을 필요로 한다는 단점이 있다. 하나의 샘플에 해당되는 구조물의 지진응답 산정을 위해서는 구조해석을 수행하여야 하므로, 많은 수의 샘플에 대해 구조해석을 수행하는데 필요한 시간의 절감을 위하여 Latin Hypercube Sampling(LHS) 기법<sup>(5)</sup>을 이용하여 시뮬레이션에 필요한 샘플의 수를 저감하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 각각의 확률변수의 확률분포를 10개로 균등분할 후 각각의 분할영역에서 한 개 씩의 샘플을 추출하여 임의



〈그림 6〉 50년 초과확률 2%의 지진파 샘플 (Memphis시 지역)



〈그림 7〉 구조물의 손상확률분포 작성을 위한 Latin Hypercube Sampling 기법의 개요

〈표 2〉 10개 지진파에 대한 산정 비율

	T1(sec)	Sa Factors									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
구조물 A	1.693	2.075	4.203	3.681	2.847	1.454	1.767	4.806	3.532	4.792	3.134
구조물 B	0.782	1.183	1.761	1.167	1.736	1.350	1.374	1.515	1.414	1.555	1.636

로 조합하였다. 이렇게 만들어진 10개의 샘플조합에 10개의 지진파를 하나씩 대응시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

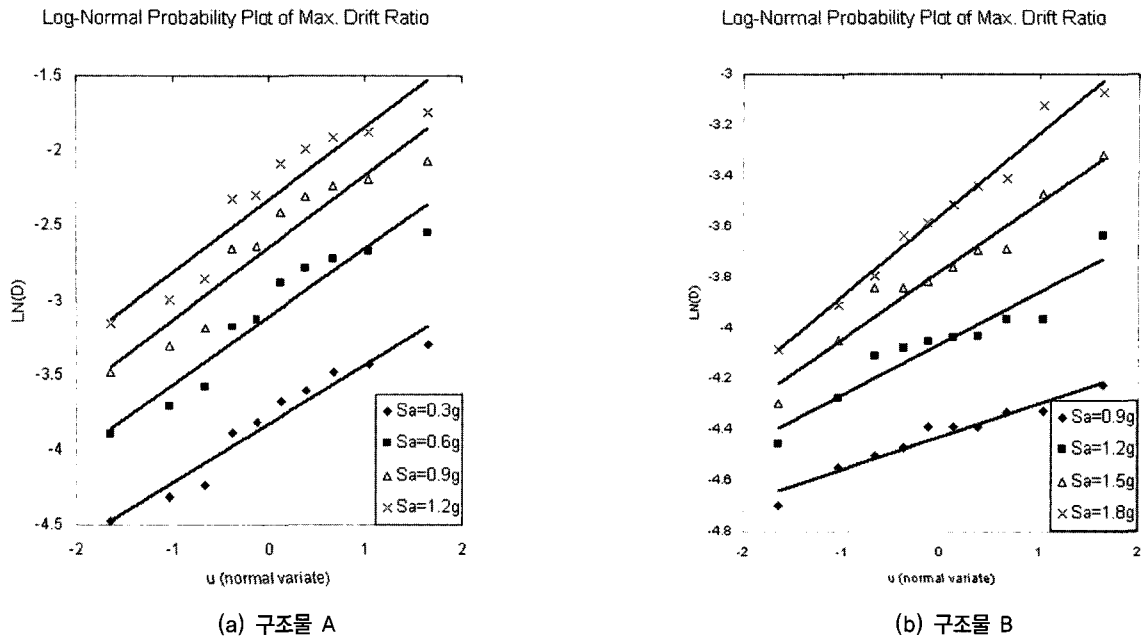
앞서 말했듯이, 본 연구에서는 주어진 지진하중에 대한 구조물의 손상정도를 나타내는 응답지수로 최대층간변위율을 이용하였다. 선정된 10개의 지진파는 A, B 각 구조물에 대하여 1차 고유주기에 해당하는 스펙트럼가속도를 구한 후 취약도 작성을 위해 취약도의 x축에 해당하는 스펙트럼가속도와 일치하도록 전체 지진파의 크기에 일정 비율을 곱하여 사용하였다(비율 산정은 표 2 참조). 스펙트럼가속도는 0.1g에서 3.0g까지 0.1g씩 증가하며 각각의 스펙트럼가속도에 해당하는 구조물의 손상확률분포를 구하였다. 산정된 손상확률분포를 기존확률분포함수를 이용하여 수학적으로 묘사하기 위해 적합한 확률분포함수를 찾은 결과 대수정규분포(lognormal probability distribution)함수를 이용하였을 때 가장 높은 일치성을 보였다. 그림 8은 시뮬레이션의 결과로 얻어진 확률분포를 대수정규분포함수로 표현하기 위해 몇 가지 대표 Sa 레벨에 대하여 구조물 손상분포를 대수정규확률 그래프에 그린 것이며, 표 3은 그 결과 산정된 대수평균값과 대수표준편차를 보여준다. 여기서 구조물 A에 대한 손

상확률분포의 경우 지진레벨이 Sa=1.6g 이상의 값에 대해서는 표 3의 세 가지 기준의 손상상태 이상의 손상을 입을 확률이 모두 1.0에 가까워지므로(그림 9 참조) 기입을 하지 않았다.

이상의 결과를 바탕으로 Immediate Occupancy, Life Safety, Collapse Prevention 등 3단계의 손상상태에 대하여 표 1에 나타난 것과 같은 기준 최대층간변위율 이상의 손상이 일어날 확률을 구하여 취약도를 작성하였다. 주어진 지진하중에 대해 각 구조물이 기준 최대층간변위율 이상의 손상이 일어날 확률은 표 4와 같으며, 이를 바탕으로 작성된 각 구조물의 취약도는 그림 9와 같다.

### 3.4 내진성능의 비교

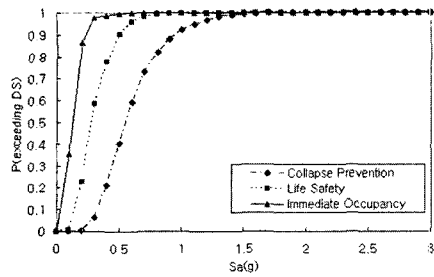
작성된 지진취약도를 대수정규분포함수로 나타내기 위하여 대수분포함수 그래프로 나타냈을 때 결과는 그림 10과 같다. 여기서 각 데이터의 추세선을 선형으로 그렸을 때, 추정되는 대수분포함수의 대수평균( $\mu_{ln,D}$ )과 대수표준편차( $\sigma_{ln,D}$ )는 추세선의 Y절편과 기울기에서 각각 구할 수 있다. 이와 같



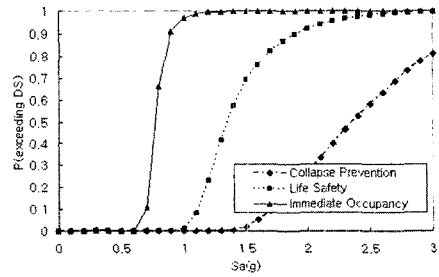
〈그림 8〉 대수정규확률그래프로 나타난 구조물의 손상분포

〈표 3〉 입력지진하중 레벨에 따른 구조물의 응답 확률분포 계수

Sa	구조물 A		구조물 B	
	$\tilde{m}_D$	$\sigma_{\ln D}$	$\tilde{m}_D$	$\sigma_{\ln D}$
0.1g	0.0088	0.3372	0.0017	0.2030
0.2g	0.0151	0.3731	0.0034	0.1979
0.3g	0.0218	0.3944	0.0046	0.1276
0.4g	0.0281	0.4426	0.0055	0.1196
0.5g	0.0359	0.4511	0.0065	0.1272
0.6g	0.0446	0.4587	0.0076	0.0901
0.7g	0.0534	0.4691	0.0089	0.0911
0.8g	0.0620	0.4802	0.0104	0.0918
0.9g	0.0708	0.4875	0.0119	0.1306
1.0g	0.0796	0.4899	0.0137	0.1645
1.1g	0.0888	0.4884	0.0154	0.1868
1.2g	0.0979	0.4863	0.0172	0.2034
1.3g	0.1073	0.4808	0.0190	0.2268
1.4g	0.1166	0.4746	0.0209	0.2509
1.5g	0.1259	0.4693	0.0229	0.2699
1.6g	0.1358	0.4669	0.0246	0.2954
1.7g	-	-	0.0266	0.3096
1.8g	-	-	0.0285	0.3217
1.9g	-	-	0.0305	0.3335
2.0g	-	-	0.0324	0.343
2.1g	-	-	0.0344	0.3518
2.2g	-	-	0.0366	0.3571
2.3g	-	-	0.0387	0.3623
2.4g	-	-	0.0408	0.3676
2.5g	-	-	0.0403	0.3703
2.6g	-	-	0.0454	0.3702
2.7g	-	-	0.0477	0.3683
2.8g	-	-	0.0501	0.3651
2.9g	-	-	0.0526	0.3620
3.0g	-	-	0.0550	0.3607



(a) 구조물 A

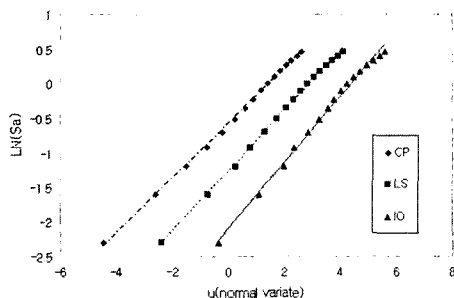


(b) 구조물 B

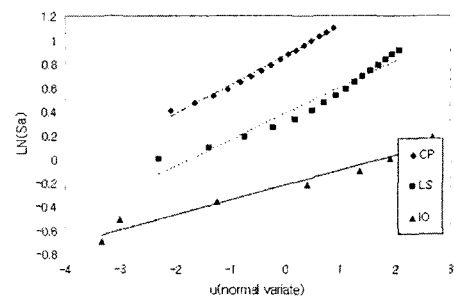
〈그림 9〉 구조물 A, B의 지진취약도

〈표 4〉 입력지진하중 레벨에 따른 구조물의 초과손상확률

Sa	손상정도 별 초과손상확률					
	구조물 A			구조물 B		
	Collapse Prevention	Life Safety	Immediate Occupancy	Collapse Prevention	Life Safety	Immediate Occupancy
0.1g	0.0000	0.0077	0.3561	0.0000	0.0000	0.0000
0.2g	0.0046	0.2276	0.8667	0.0000	0.0000	0.0000
0.3g	0.0622	0.5873	0.9760	0.0000	0.0000	0.0000
0.4g	0.2127	0.7791	0.9902	0.0000	0.0000	0.0000
0.5g	0.4067	0.9033	0.9977	0.0000	0.0000	0.0004
0.6g	0.5936	0.9597	0.9994	0.0000	0.0000	0.0013
0.7g	0.7306	0.9817	0.9998	0.0000	0.0000	0.1083
0.8g	0.8193	0.9907	0.9999	0.0000	0.0000	0.6604
0.9g	0.8790	0.9952	1.0000	0.0000	0.0000	0.9124
1.0g	0.9200	0.9976	1.0000	0.0000	0.0103	0.9712
1.1g	0.9486	0.9998	1.0000	0.0000	0.0818	0.9897
1.2g	0.9672	1.0000	1.0000	0.0000	0.2306	0.9962
1.3g	0.9799	1.0000	1.0000	0.0005	0.4146	0.9977
1.4g	0.9879	1.0000	1.0000	0.0049	0.5733	0.9983
1.5g	0.9927	1.0000	1.0000	0.0191	0.6903	0.9989
1.6g	0.9955	1.0000	1.0000	0.0504	0.7598	0.9990
1.7g	1.0000	1.0000	1.0000	0.0933	0.8208	1.0000
1.8g	1.0000	1.0000	1.0000	0.1466	0.8651	1.0000
1.9g	1.0000	1.0000	1.0000	0.2066	0.8962	1.0000
2.0g	1.0000	1.0000	1.0000	0.2695	0.9202	1.0000
2.1g	1.0000	1.0000	1.0000	0.3352	0.9387	1.0000
2.2g	1.0000	1.0000	1.0000	0.4006	0.9544	1.0000
2.3g	1.0000	1.0000	1.0000	0.4643	0.9659	1.0000
2.4g	1.0000	1.0000	1.0000	0.5231	0.9740	1.0000
2.5g	1.0000	1.0000	1.0000	0.5792	0.9808	1.0000
2.6g	1.0000	1.0000	1.0000	0.6332	0.9865	1.0000
2.7g	1.0000	1.0000	1.0000	0.6840	0.9908	1.0000
2.8g	1.0000	1.0000	1.0000	0.7321	0.9940	1.0000
2.9g	1.0000	1.0000	1.0000	0.7750	0.9962	1.0000
3.0g	1.0000	1.0000	1.0000	0.8122	0.9975	1.0000



(a) 구조물 A



(b) 구조물 B

〈그림 10〉 대수분포함수 그래프로 나타낸 취약도



은 추세선 분석을 통하여 얻어진 대수분포함수와 관련된 계수는 표 5와 같다.

위 2.3절에서 언급한 바와 같이 식 (3)을 이용하여 Memphis 시가 위치한 장소에 해당하는 지진함수를 구할 수 있다. 여기서 주의할 것은 지진함수의 매개변수를  $s_a$ 로 정하였기 때문에 지진함수는 각 구조물의 고유주기에 따라서 다르게 나올 수 있다는 것이다. 지진함수의 작성을 위해서는 해당 지역의 발생초과확률에 따른 지진의 응답스펙트럼을 작성한 후 구조물의 고유주기에 해당하는 응답치( $s_a$ )를 구해야 한다. 그림 11은 FEMA<sup>(8)</sup>에서 제공되는 응답스펙트럼 작성법을 따라 50년 초과확률 2%, 5%, 10%, 20% 별로 작성된 Memphis 시 지역에 해당하는 응답스펙트럼이며, 그림 12는 이 결과를 바탕으로 구조물 A, B에 대하여 작성된 지진 재해도곡선을 보여준다.

구조물의 일정 시간 내의 손상확률 분포를 구하기 위한 식 (4)에서  $s_a^{\hat{}}$ 와  $\sigma_{\ln s_a}$ 는 기 작성된 구조물 A, B에 대한 지

진취약도에서부터 구할 수 있으며, 보정계수 k는 지진재해도함수에서부터 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 산정된 각 구조물의 각 손상상태에 대한 초과손상확률분포는 표 6과 같다.

이와 같이 두 가지 종류의 설계 대체안 중에서 어떤 대체안을 선택할 것인지에 대한 결정은 두 구조물의 초과손상확률을 바탕으로 지진에 대한 예상 손실을 산정한 후에 내릴 수 있다. 식 (5)로 표현된 등가비용모델을 이용할 경우에 CR, CL, CF 등의 손실비용은 구조물의 손상확률에서부터 구할 수 있다. 구조물의 손상치를 D라고 한다면, 지진과 관련한 예상 비용을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$CT = CI + CR + CL + CF$$

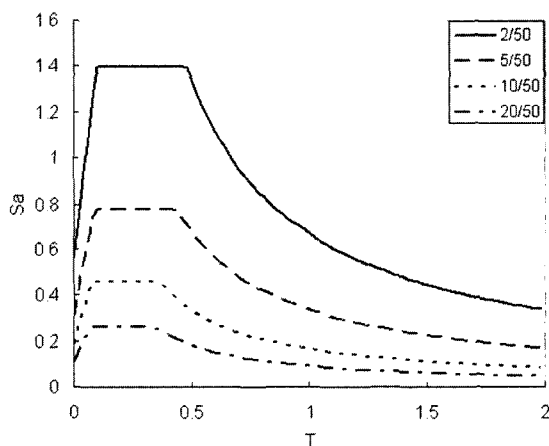
$$= CI + f_R(D) + f_L(D) + f_F(D) \tag{7}$$

여기서, 지진과 관련한 손실 종류별 예상비용 산정 함수  $f_R(D)$ ,  $f_L(D)$ ,  $f_F(D)$ 를 정의하기 위해서는 구조물의 손상

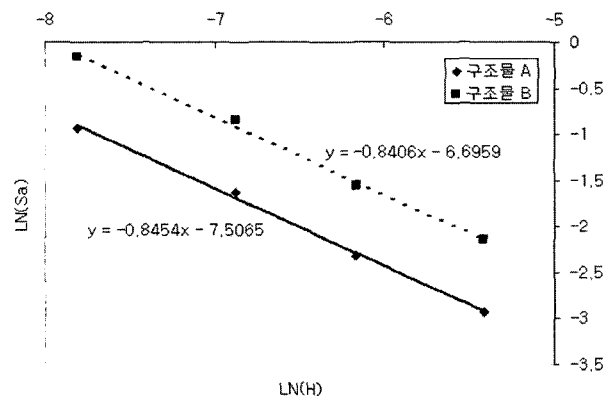
〈표 5〉 각 구조물의 지진취약도 관련 계수

손상상태	구조물 A		구조물 B	
	$\hat{s}_a$	$\sigma_{\ln s_a}$	$\hat{s}_a$	$\sigma_{\ln s_a}$
Immediate Occupancy	0.1242	0.0703	0.8039	0.1020
Life Safety	0.2832	0.1418	1.4590	0.3340
Collapse Prevention	0.5641	0.2523	2.3750	0.6108

Response Spectrum (Memphis)



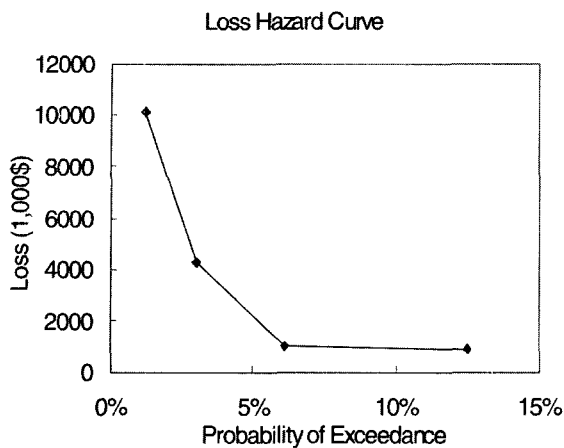
〈그림 11〉 각 초과확률 별 응답스펙트럼



〈그림 12〉 구조물 A, B에 대한 Memphis 시의 지진재해도곡선

〈표 6〉 각 구조물의 연간 및 50년간 초과손상확률

손상정도	구조물 A			구조물 B		
	Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention	Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention
연간 초과확률	0.0032	0.0016	0.0009	0.0014	0.0009	0.0007
50년간 초과확률	0.1458	0.0773	0.0446	0.0718	0.0457	0.0335



〈그림 13〉 손실비용과 초과확률의 관계도 작성 예

치와 손실 사이의 관계가 정량적으로 수립되어야 하는데, 기존의 문헌들을 참고하여 이를 산정해본 결과 그 관계가 손실 종류, 구조물의 형식 및 용도 등에 따라서 다르기 때문에 일반화된 관계식을 적용하기 어려운 것으로 알려져 있다<sup>(11)</sup>. 따라서 일반화된 수식을 이용한 예상손실비용의 산정은 실질적으로 어렵기 때문에, 손실의 기댓값을 구하기 위해서는 지진에 의한 손실을 입력지진 강도 별로 산정한 후 이를 취합하여야 한다. 각 지진수위 별로 산정된 손실비용을 도표화하면 손실비용과 초과확률과의 관계도표를 그림 13과 같이 얻을 수 있으며, 여기서 그래프의 면적을 계산하면 해당 구조물의 기대손실비용을 계산할 수 있다.

여기서 주의할 점은 CR, CL, CF 등의 손실 산정 시 구조물의 물리적 손상 이외에도 구조물의 용도, 사회적 기능, 예상사용인원 등을 동시에 고려해야 한다는 것이며, 이러한 요소들을 고려하여 손실을 산정할 때 각 단계별로 내재되어 있는 불확실성 또한 고려되어야 할 것이다.

이렇게 지진관련 예상비용을 각 구조물 대체안에 대하여 구한 후 예상비용의 기댓값이 적은 대체안을 결정하게 된다. 다시 말해서, 내진설계가 미반영된 구조물 A에 대해 산정된 총 비용  $CT_A$ 와 내진설계를 도입할 경우인 구조물 B에 대해 산정된 총 비용  $CT_B$ 를 비교하여  $CT_A$ 가  $CT_B$ 보다 크게 산정이 되었다면 내진설계 도입이 필요하다는 결론을 내릴 수 있다. 이와 같은 방법을 사용한다면, 내진설계 도입 뿐 아니라 기존 구조물의 내진보강의 종류 및 수준 결정에 대한 의사결정에 있어서 필요한 공학적 뒷받침이 가능하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지진취약도 작성을 통해 지진하중에 대한 발딩 구조물의 내진성능을 확률적으로 평가하고, 내진설계

도입의 필요성을 정량적으로 입증하는 절차를 제시하였다. 내진성능의 확률적 평가를 위해서 지진하중과 구조물 자체에 내재되어 있는 불확실성을 고려하여 구조물의 지진취약도를 작성하였으며 시뮬레이션의 효율성을 높이기 위한 Latin Hypercube 샘플링 기법을 도입하여 해석을 수행하였다. 내진설계 도입의 필요성 검증을 위해서는 구조물의 물리적 내진성능 이외에도 구조물의 사회적, 경제적 기능 및 가치에 대한 고려가 필요하며 이러한 요소를 고려한 의사결정해석 절차를 등가비용모델의 예를 들어 제시하였다.

구조물의 내진성능 평가에 있어서 중요한 점은, 지진하중의 강도측정지수에서부터 구조물의 손상지수, 손상정도, 그리고 손실산정에 이르기 까지 일관된 매개변수를 사용해야 한다는 것이다. 미국의 경우에는 미국지질조사소(USGS)에서 위치에 따른 입력지진파의 응답스펙트럼을 작성할 수 있는 계수를 제공하고 있고<sup>(20)</sup> 방재청(FEMA)에서는 구조물의 종류별 손상정도 정의 및 해석절차에 대한 가이드를 제시하고 있으며<sup>(8)</sup>, 또한 일정 지역에 대한 지진손실산정 시, 구조물 개개의 구조해석이 실질적으로 불가능할 때를 위하여 구조적 특성별로 분류된 구조물에 대한 취약도를 작성하여 제공하는 지진손실산정 프로그램인 HAZUS<sup>(9)</sup>를 제작하여 관련기관 및 국민에게 무료로 배포하고 있다. 보다 본격적인 지진연구 및 예방대책 수립 활동을 위해서는 국내에서도 이와 같은 정보체계 구축이 필요하다고 사료된다.

또한 구조물의 물리적 손상에서부터 실제 사회적, 경제적 손실을 정확히 예측하는 기법 수립이 필요한데, 아직까지는 구조물의 손상 산정 이외에 사회적, 경제적 손실 산정에 대한 불확실성의 고려가 미흡한 실정이고 또한 비교할 자료 및 실험의 부족으로 정량적이고 객관적인 관계수립이 어려워 손실 산정 시 전문가의 의견에 따른 추정치를 상당부분 사용하는 등의 문제가 존재하고 있으므로 이에 대한 심층연구가 필요하다고 생각된다.

#### 참고 문헌

1. Ellingwood, B.R., "Earthquake Risk Assessment of Building Structures," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 74, No. 3, 2001, pp. 251-262.
2. Cornell, C.A., Jalayer, J., Hamburger, R.O. and Foutch, D.A. "Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 4, 2002, pp. 526-533.
3. 최인길, 안성문, 전영선, "비선형 지진해석에 의한 PSC 격납건물의 지진취약도 분석," 한국지진공학회 논문집, Vol. 10, No. 1, 2006, pp. 63-74.

4. 이진학, 윤진영, 윤정방, “지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도 평가,” 한국지진공학회 논문집, Vol. 8, No. 6, 2004, pp. 31-43.
5. Imam, R.L. and Conover, W.J., “Small Sample Sensitivity Analysis Techniques for Computer Models, with an Application to Risk Assessment,” *Communications in Statistics*, A9, No. 17, 1980, pp. 1749-1842.
6. Park, Y.J. and Ang, A.H., “Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 38, No. 4, 1985, pp. 722-739.
7. Song, J. and Ellingwood, B.R., “Seismic Reliability of Special Moment Steel Frames with Welded Connections II,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No. 4, 1999, pp. 372-384.
8. FEMA-Federal Emergency Management Agency, “Pres-tandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings,” Report No. FEMA-356, Washington, D.C., 2000.
9. HAZUS, “Technical Manual,” Federal Emergency Manage-ment Agency, Washington, D.C., 1999.
10. Towashiraporn, P., “Building Seismic Fragilities Using Response Surface Metamodels,” Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2004.
11. Park, J., “Development and Application of Probabilistic Deci-sion Support Framework for Seismic Rehabilitation of Structural Systems,” Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2004.
12. Ang, A.H. and De Leon, D., “Determination of Optimal Target Reliabilities for Design and Upgrading of Structures,” *Structural Safety*, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 91-103.
13. American Concrete Institute, “ACI-318: Building Code Requirements for Structural Concrete”, Farmington Hills, Missouri, U.S.A., 1995.
14. International Code Council, “IBC2000: International Building Code”, Falls Church, Virginia, U.S.A., 2000.
15. Prakash, V., Powell, G.H. and Campbell, S., “DRAIN- 2DX Base Program Description and User Guide,” Version 1.10, Dept. of Civil Engineering, University of California Berkeley, CA., 1993.
16. Wen, Y.K. and Wu, C.L., “Uniform Hazard Ground Motions for Mid-America Cities,” *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 2, 2001, pp. 359-384.
17. Galambos, T.V., Ellingwood, B., MacGregor, J.G. and Cornell, C.A., “Probability Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice,” *Journal of Structural Division*, Vol. 108, No. 5, 1982, pp. 959-977.
18. Singhal, A. and Kiremidjian, A.S., “Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 12, 1996, pp. 1459-1467.
19. Kleijnen, J.P.C., “Statistical Techniques in Simulation: Part 1,” Marcel Dekker, Inc., New York, NY., 1974.
20. USGS, USGS National Seismic Hazard Mapping Project, <http://eqhazmaps.usgs.gov/>, 2003.