

# 확률적 지진요구모델을 이용한 구조물의 최적 내진보강

## Optimal Seismic Rehabilitation of Structures Using Probabilistic Seismic Demand Model

박주남<sup>1)</sup> · 최은수<sup>2)</sup>

Park, Joo-Nam · Choi, Eun-Soo

**국문 요약** >> 내진설계기준이 반영되지 않은 기존 구조물의 경우 내진보강에 의하여 구조물의 내진성능을 향상시킬 수 있다. 내진보강의 수준을 합리적으로 결정하기 위해서는 구조물의 사용기간 동안에 예상되는 지진피해 관련 손실이 최소화되도록 하여야 하는데, 이를 위해서는 구조물이 위치한 지역에 대한 지진의 강도별 발생빈도, 지진에 의한 구조물의 기능상실 및 직접/간접 피해를 복합적으로 고려하여 구조물의 예상 손실비용을 산정하여야 하며 이는 구조물 손상에 대한 지진위험도 해석을 통해서 그 해석을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 확률적 지진요구모델을 이용한 위험도 평가를 통하여 구조물의 지진에 대한 피해 손실을 정량적으로 산정하고 이를 바탕으로 초기비용과 예상손실비용을 포함한 총 손실비용을 최소화시킬 수 있도록 내진보강 수준을 최적화하는 절차를 제시하였다. 구조물과 관련된 지진 피해 산정에 있어서 지진하중의 강도별 발생확률 및 구조물의 손상확률을 동시에 고려하여 구조물 생애주기에 대한 구조물의 지진손상 확률밀도함수 및 누적분포함수를 수식화하였으며 수식의 유효성을 유지하기 위한 확률변수의 유효범위를 정의하였다. 또한 여기에 사회적, 경제적 손실을 정량화하기 위한 손실함수를 결부시켜 구조물과 관련된 지진 피해 손실의 기댓값을 정량적으로 산정할 수 있도록 하였다. 제시된 해석기법은 기존의 시뮬레이션에 의한 손실산정법과 비교하여 해석의 정확도는 잃지 않으면서 구조해석의 반복횟수를 대폭 줄일 수 있다는 장점이 있으며 빌딩과 교량을 비롯한 구조물의 내진성능 평가 및 개선을 위한 의사결정 시에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어** 확률적 지진요구모델, 최적 내진보강, 확률적 의사결정 해석

**ABSTRACT** >> The seismic performance of a structure designed without consideration of seismic loading can be effectively enhanced through seismic rehabilitation. The appropriate level of rehabilitation should be determined based on the decision criteria that minimize the anticipated earthquake-related losses. To estimate the anticipated losses, seismic risk analysis should be performed considering the probabilistic characteristics of the hazard and the structural damage. This study presents the decision procedure in which the probabilistic seismic demand model is utilized for the effective estimation and minimization of the total seismic losses through seismic rehabilitation. The probability density function and the cumulative distribution function of the structural damage for a specified time period are established in a closed form, and are combined with the loss functions to derive the expected seismic loss. The procedure presented in this study could be effectively used for making decisions on the seismic rehabilitation of structural systems.

**Key words** probabilistic seismic demand model, optimal seismic rehabilitation, probabilistic decision analysis

### 1. 서론

내진설계기준이 반영되지 않은 기존 구조물의 경우 내진보강에 의하여 구조물의 내진성능을 향상시킬 수 있다. 내

진보강 설계 시에는 일반적으로 내진설계 기준에서 요구하는 내진성능을 가질 수 있도록 보강을 수행하는 것이 일반적이지만, 보다 합리적인 내진보강 수준의 결정을 위해서는 구조물의 사용기간 동안에 예상되는 지진피해 관련 손실이 최소화되도록 하여야 할 것이다. 이를 위해서는 구조물 위치에 해당하는 지반특성을 고려한 지진의 강도별 발생빈도, 지진에 의한 구조물의 손상에서 오는 기능상실 및 복구비용 등 직접/간접 피해를 복합적으로 고려하여 구조물의 예상 손실비용을 산정하여야 하는 지진위험도 해석을 수행하여

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

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

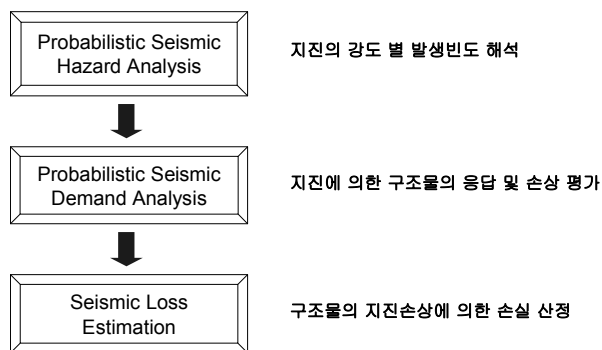
본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내 주시기 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 3. 10 / 수정일 : 2008. 4. 15 / 게재확정일 : 2008. 4. 15)

야 한다. 지진위험도 해석은 그림 1에서 보는 바와 같이 3단계로 나눌 수 있는데, 우선 확률적 지진위험원 해석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)을 통해 위치에 따른 지진 강도별 발생빈도를 알아낸 후, 확률적 지진요구해석(Probabilistic Seismic Demand Analysis)을 수행하여 입력 지진강도에 대한 구조물의 응답을 평가한다. 그리고 마지막으로 구조물의 지진에 대한 손상으로부터 사회적, 경제적 손실을 정량적으로 평가하는 지진손실평가(Seismic Loss Estimation) 단계가 있다. 이러한 단계별 해석을 통하여 식 (1)과 같이 지진손실의 확률을 알 수 있고 그 결과 예상손실비용을 산정할 수 있다.<sup>(1),(2)</sup> 여기서  $L$ 은 지진관련 손실을,  $D$ 는 구조물의 손상을, 그리고  $EQ$ 는 지진하중의 강도를 나타내는데, 각각의 단계마다 지진 위험원 및 구조물의 응답, 그리고 손상 예측과 관련된 불확실성이 존재하며 위험도 해석 수행 시 이러한 불확실성의 단계별 전파를 적절히 묘사할 수 있어야 한다.

$$P[L] = \sum_{eq} \sum_d P[L|D=d] \cdot P[D=d|EQ=eq] \cdot P[EQ=eq] \quad (1)$$

일반적으로 역학법칙을 이용한 수학적 표현을 통하여 하중에 대한 구조물(요소가 아닌 시스템)의 응답 및 손상을 나타내는 것은 어려우며, 가능하더라도 효율성이 많이 감소될 것이다. 이는 구조물 및 하중조건이 복잡할수록 더욱 그러한데, 이러한 경우에는 유한요소해석 등의 컴퓨터 도구를 이용해서 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 같은 이유로 지진하중에 대한 구조물 응답을 확률적으로 평가할 때에도 입력지진 강도별로 지진하중과 구조물 지지력의 불확실성을 고려한 해당 확률변수에 대해 여러 번의 구조해석을 수행하는 시뮬레이션이 필요하며, 그 결과로 나타나는 응답의 분포로부터 구조물 응답의 확률적 특성을 산정하게 된다.<sup>(3-5)</sup> 이러한 해석의 결과로 얻을 수 있는 일반적 형태의 결과물로 구조물의 취약도(Fragility Curves), 연간손상확률분포(Annual Damage Probability Distribution) 등을 들 수 있



〈그림 1〉 지진위험도 해석 절차

다. 그런데 이러한 해석방법은 많은 수의 유한요소해석을 동반하는 시뮬레이션을 필요로 하기 때문에 많은 시간과 노력이 필요하게 된다. 특히 내진보강의 설계 또는 최적화 문제에 있어서는 이러한 시뮬레이션이 한 번으로 끝나는 것이 아니라 설계변수 및 환경변수를 변화시키면서 해석을 반복 수행하여야 하므로 더욱 많은 수의 시뮬레이션이 필요하게 되어 해석을 위한 효율성이 급격히 떨어진다고 할 수 있다. 기존 연구<sup>(6),(7)</sup>의 경우 구조물의 예상 지진 손실을 산정하기 위하여 발생 가능한 지진을 강도별로 4-5단계의 강도로 나누어 각 단계별로 시뮬레이션을 수행하여 일정 수준의 지진에 의한 피해 손실을 산정한 후 이를 각 단계의 지진 강도별 발생빈도(초과확률)를 고려하여 전체적인 손실의 기댓값을 계산하였기에, 시뮬레이션에 필요한 구조해석의 횟수가 매우 많아 해석의 효율성이 떨어지기 쉬웠다.

본 연구에서는 확률적 지진요구모델(PSDM)을 이용하여 지진하중에 대한 연간(또는 다른 일정 기간 동안의) 구조물 손상의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF) 및 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 수식적으로 표현, 활용함으로써 지진 위험도 해석에서 필요한 시뮬레이션의 수를 경감하고 결과적으로 해석의 효율성을 높이고자 하였다. 또한 이를 이용하여 초기비용을 포함한 지진피해 총 손실의 기대치를 최소화할 수 있도록 내진보강수준을 결정하는 절차를 제시하고자 한다.

## 2. 확률적 지진위험원모델(Probabilistic Seismic Hazard Model)

지진의 강도를 표현하는 지수로는 여러 가지가 있을 수 있는데, 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration), 최대지반속도(Peak Ground Velocity), 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration), 스펙트럼 변위(Spectral Displacement) 등이 그 예이다. 이러한 여러 가지 형태의 지수로 표현될 수 있는 지진강도와 그 발생빈도와의 관계를 알아내기 위하여 확률적 지진위험원 해석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)을 수행하게 되는데 이를 위해서는 지진의 근원지를 고려한 지진의 위치별 강도, 지진파의 특성 등의 불확실성을 고려하게 된다.<sup>(3),(8)</sup> 그 결과로 일정 지역에 해당하는 지진강도와 그 강도에 해당하는 발생확률과의 관계를 나타내는 지진재해도함수(Seismic Hazard Function)를 작성할 수 있는데, Cornell et al.<sup>(8)</sup>에 따르면 일정 지진강도지수  $EQ$ 로 표현된 지진강도에 해당하는 연간초과확률(일 년 내에 해당 지진의 강도와 같거나 더 큰 강도의 지진이 발생할 확률)은 다음의 식과 같이 대수평면 상의 선형관계식으로 나타낼 수 있다.

$$H(eq) = P[EQ \geq eq] = k_0(eq)^{-k} \quad (2)$$

여기서  $k$ 와  $k_0$ 는 지진재해도함수를 정의하는 계수인데, 지진강도와 그 발생빈도와의 관계를 살펴보면 일반적으로 높은 강도의 지진일수록 그 발생빈도는 줄어들지만 지역에 따라 그 특성은 서로 다르며 이러한 특성이  $k$ 와  $k_0$ 로 나타내어진다. 여기서 지진재해도 함수의 기울기를 나타내는  $k$ 는 발생 가능한 지진강도의 분산 정도를 나타내며 미 서부 등 지진활성 지역의 경우는 그렇지 않은 지역에 비해서 높은  $k$ 값을 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>(3)</sup>

### 3. 확률적 지진요구모형(Probabilistic Seismic Demand Model)

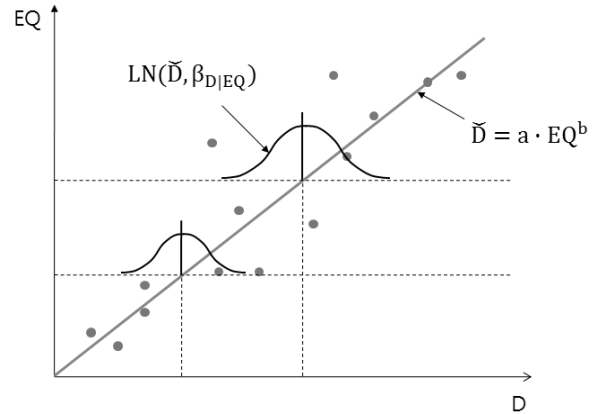
발생 가능한 지진과 대상 구조물의 응답(또는 손상)과의 관계는 식 (1)에서  $P[D=dEQ=eq]$ 에 해당되는데 이는 일정 강도를 갖는 지진이 발생했을 때에 대한 구조물의 조건부 손상확률을 나타내며, 이 조건부 확률분포는 대수정규분포를 따른다고 알려져 있다.<sup>(3),(8),(9)</sup> 또한 Comell et al.<sup>(8)</sup>에 따르면 입력지진강도와 구조물 응답(또는 손상)의 중앙값(Median)과의 관계는 다음과 같은 지수모델로 표현이 가능하다.

$$\hat{D} = aEQ^b \quad (3)$$

여기서  $EQ$ 는 정해진 지진강도지수로 나타낸 입력지진을,  $\hat{D}$ 는 입력지진에 대한 구조물의 응답분포의 중앙값(Mmedian)을 정해진 손상지수로 나타낸 값이며,  $a$ 와  $b$ 의 값은 회귀분석을 통하여 얻을 수 있을 수 있는 계수이다. 다음으로, 일정한 입력지진에 대한 구조물의 초과손상확률(일정 수준 이상의 손상이 일어날 확률)을 수식으로 표현하면,

$$P[D \geq d|EQ=x] = 1 - \Phi \left[ \frac{\ln d - \ln ax^b}{\beta_{DEQ}} \right] \quad (4)$$

여기서,  $\Phi$ 는 표준정규밀도함수이며,  $\beta_{DEQ}$ 는  $EQ$ 에 대한  $D$ 의 조건부 확률분포인 대수정규분포의 표준편차이다. 식 (3)과 식 (4)의  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$ 는 위에서 언급한 대로 입력지진강도  $EQ$ 와 그에 따른 구조물의 손상지수  $D$ 와의 관계를 나타내는 회귀분석을 통해서 얻을 수 있는데(그림 2 참조), 이를 위해서는 일정 범위 내에서 지진강도를 변화시켜 가면서 구조물 지지력의 불확실성에 관계된 인자들을(예: 물성치 등) 확률변수로 동시에 고려하여 여러 번 동적구조해석을 수행하여야 한다. 실제  $\beta$ 는 지진강도의 수준에 따라서 그 값이 다르며 지진강도가 높아질수록 증가하는 추세를 보이지만<sup>(9)</sup>



〈그림 2〉 지진강도와 손상지수의 상관성 분석<sup>(8)</sup>

해석의 효율성을 위하여 회귀분석에서 얻어지는 값을 상수로 정의하였다. 위험도평가의 중요 도구라고 할 수 있는 지진취약도(Seismic Fragility Curve) 역시 이러한 방법으로 구한 계수( $a$ ,  $b$ ,  $\beta$ )를 이용하여 작성이 가능하다.<sup>(10),(11)</sup>

식 (4)를 지진재해도함수인 식 (2)를 이용하여 전체 발생 가능 지진강도의 범위에 대하여 적분을 하면 다음과 같이 연간 초과손상확률을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_D(d) &= P[D \geq d] \\ &= H(eq^d) \exp \left[ \frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} \beta_{DEQ}^2 \right] \\ &= k_0 (eq^d)^{-k} \exp \left[ \frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} \beta_{DEQ}^2 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $eq^d$ 는  $d$ 에 대응되는 입력지진의 강도, 즉  $(d/a)^{1/b}$ 이다.

식 (5)에서부터 구조물의 연간손상에 대한 누적분포함수(CDF)  $F_D(d)$ 를 구하면,

$$\begin{aligned} F_D(d) &= P[D \leq d] \\ &= 1 - P[D \geq d] \\ &= 1 - k_0 \left[ \left( \frac{d}{a} \right)^{-k/b} \right] \exp \left[ \frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} \beta_{DEQ}^2 \right], \quad d \geq d_0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 손상치의 최소한계를 0이 아닌  $d_0$ 로 정의하였는데, 식 (6)의 경우  $d$ 가 0에 근접하게 되면 음수를 가지게 되어 누적분포함수의 기본개념에 어긋나게 된다. 이는 식 (2)를 수립하기 위해서 수행한 회귀분석에서 매우 작은 수준의 지진강도를 고려하지 않았기 때문이다. 그러므로 식 (6)을 위험도평가에 적용할 수 있도록 유효성을 부여하기 위해서는  $d$ 의 최소한계값  $d_0$ 를 정의하여야 한다. 식 (6)에서  $d_0$ 를 정의하기 위해  $F_D(d)$ 가 0이 되도록 하는  $d$ 의 값을 찾으면 식 (7)과 같다.

$$d_0 = k_0^{\frac{b}{k}} a \exp \left[ \frac{1}{2} \frac{k}{b} \beta_{DEQ}^2 \right] \quad (7)$$

구조물 연간손상에 대한 확률밀도함수(PDF)는,

$$f_D(d) = \frac{dF_D(d)}{dd} = \frac{k_0 k}{b} \left(\frac{1}{a}\right)^{-\frac{k}{b}} d^{-\frac{k}{b}-1} \exp\left[\frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} \beta_{DEQ}^2\right], \quad d \geq d_0 \quad (8)$$

구조물 내진보강 최적화를 위한 위험도 평가는 일반적으로 일 년을 대상으로 하지 않고 대부분 구조물의 사용주기 또는 수명주기를 고려해서 여러 해에 걸친 시간범위를 대상으로 한다. 임의의 시간범위  $n$ 에 대하여(예를 들어 30년 시간범위의 경우에는  $n=30$ )  $n$ 해 동안 일어날 수 있는 구조물 손상의 누적분포함수(CDF)를 수식으로 표현하면 식 (9)와 같으며,  $n$ 해 동안의 구조물 손상에 대한 확률밀도함수(PDF)는 식 (10)과 같다.

$$F_D(d)_n = (1 - P[D \geq d])^n = \{F_D(d)\}^n = \left\{1 - k_0 \left[\left(\frac{d}{a}\right)^{-\frac{k}{b}}\right] \exp\left[\frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} \beta_{DEQ}^2\right]\right\}^n, \quad d \geq d_0 \quad (9)$$

$$f_D(d)_n = \frac{dF_D(d)_n}{dd} = n \{F_D(d)\}^{n-1} f_D(d) = n \left\{1 - k_0 \left[\left(\frac{d}{a}\right)^{-\frac{k}{b}}\right] \exp\left[\frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} \beta_{DEQ}^2\right]\right\}^{n-1} \cdot \frac{k_0 k}{b} \left(\frac{1}{a}\right)^{-\frac{k}{b}} d^{-\frac{k}{b}-1} \exp\left[\frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} \beta_{DEQ}^2\right], \quad d \geq d_0 \quad (10)$$

식 (1)을 통하여 지진손실확률 산정을 할 때, 식 (9)와 식 (10)으로부터 산정된 구조물 손상의 확률분포를 이용하면 손실비용의 확률분포 산정이 가능하다. 그러므로 그림 (2)에서와 같이 동적구조해석을 병행한 회귀분석을 수행하여 필요한 계수( $a, b, \beta$ )를 정하게 되면 그 이후의 과정은 수식적으로 처리가 가능하므로 해석의 효율을 높일 수 있다.

#### 4. 지진손실평가(Seismic Loss Estimation)

지진에 대한 손실비용은 구조물의 물리적 손상과 직접적인 관계가 있다. 구조물의 손상과 지진손실 사이의 관계를 정량적으로 수립하기 위하여 기존의 문헌들을 참고한 결과 그 관계는 손실종류, 구조물의 형식 및 용도 등에 따라서 다른 것으로 알려져 있다. 예를 들어 미국의 연방 긴급사태 관리국인 FEMA(Federal Emergency Management Agency)에서 제작한 지진손실산정 프로그램인 HAZUS<sup>(7)</sup>에서 제공하는 자료를 분석해보면, 빌딩구조물의 최대변위로 나타내어진 구조물의 손상과 지진피해 손실의 관계는 보수비용, 장비 및 설비 복구비용 등의 비용 손실은 선형적으로, 그리

고 사망 및 부상 등의 인명손실은 지수관계로 모델링할 수 있다. 이에 대한 보다 자세한 해석은 본 논문의 뒷부분인 해석 적용 예에서 제시된다.

앞서 말한 바와 같이 지진손실은 여러 종류가 있을 수 있으며 이는 구조물의 지진손상과 밀접한 관계가 있다. 이러한 지진손실의 종류를  $L_i(i=1, 2, \dots, m)$ 라고 할 때, 구조물의 손상  $D$ 와의 관계가 함수  $g_i(D)$ 에 의해 표현된다면,

$$L_i = g_i(D) \quad (11)$$

지진에 대한 손실평가에 있어서, 지진에 의한 사회적 손실(인명피해 등), 경제적 손실(비용손실) 등 여러 가지 종류의 손실을 통합하여 등가의 비용손실로 나타내는 경우가 많다. 이럴 경우에는 산정된 각 종류의 손실을 등가의 비용손실로 환산해 주어야 하는데 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$L_T = \sum_{i=1}^m C_i \cdot g_i(D) = g_T(D) \quad (12)$$

여기서,  $L_T$ 는 등가의 비용으로 나타낸 총 손실,  $C_i$ 는 각 손실 종류별 환산비이다. 이 때  $g_T(D)$ 는  $L_T$ 에 대한 단조증가 함수(Monotonically Increasing Function)로 볼 수 있기 때문에,  $L_T$ 의 CDF 및 PDF는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{L_T}(l_T) = F_D[g_T^{-1}(l_T)] \quad (13)$$

$$f_{L_T}(l_T) = f_D[g_T^{-1}(l_T)] \left| \frac{dg_T^{-1}(l_T)}{dl_T} \right| \quad (14)$$

따라서 지진피해손실의 기댓값은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$E(l_T) = \int_{l_{T_0}}^{\infty} l_T \cdot f_{L_T}(l_T) dl_T = \int_{d_0}^{\infty} g_T(d) \cdot f_D(d) dd \quad (15)$$

여기서,  $l_{T_0} = g_T(d_0)$ 이다.

위험도 기반 기대손실의 최소화를 위한 구조물의 내진보강 수준을 결정하기 위해서는 식 (15)에서 얻어진 지진피해 손실의 기댓값과 그에 따른 초기비용(내진보강을 위한 비용)을 동시에 고려하여 총 손실이 최소가 되도록 설계변수를 조정하여야 한다.

#### 5. 적용 예

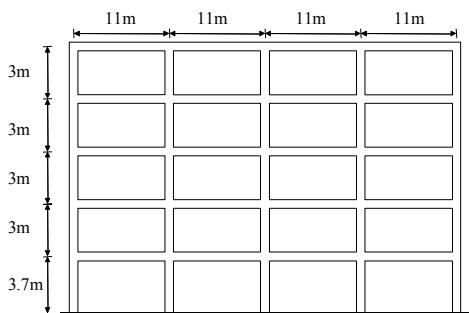
##### 5.1 대상 구조물

본 절에서는 앞서 제시된 확률적 지진요구모델을 이용한

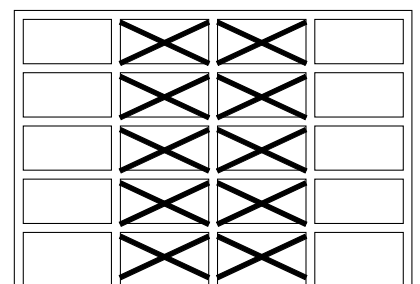
위험도 기반의 내진보강 최적화 해석에 대한 적용 예를 수행하고자 한다. 본 예제 해석을 위해서 기존 연구<sup>(9)</sup>에서 사용된 5층 4경간 형태의 철근콘크리트 모멘트 프레임 빌딩구조물 중 내진설계 미반영 구조물을 대상 구조물로 정의하였다(그림 3(a), 건물의 보다 자세한 제원은 박주남 등<sup>(9)</sup> 참조). 해석에 쓰여질 구조물의 내진성능 개선을 위한 내진보강기법으로는 강브레이싱을 사용하여 구조물의 강성을 증대시키는 방안을 택하였다(그림 3(b) 참조). 넓은 의미의 내진보강 최적화라고 하면, 브레이싱을 설치하는 위치 및 설치 브레이싱 강도를 설계변수로서 동시에 고려하여야 하지만 본 예제에서는 해석의 편의를 위해 브레이싱 강도만을 설계변수로 보아 최적의 강도 산정을 찾는 것을 해석의 목표로 정하였다.

위험도 해석을 위해서는 구조물의 지진피해와 관련된 손실비용 정보를 이용하여야 하는데, 이러한 손실비용 정보를 정하기 위한 지진 기록 및 관련 데이터베이스의 양이 일반적으로 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 손실정보를 위해서 미국 FEMA에서 활용하고 있는 손실산정 프로그램인 HAZUS<sup>(7)</sup>를 이용하였다. 또한 본 빌딩구조물은 미국 중진지역인 Tennessee주의 Memphis시에 위치한 병원 건물로 가정하였다.

지진위험도 평가에 있어서 전 해석 절차에 걸쳐서 지진강도지수 및 구조물 손상지수를 일관되게 사용해야 하는 것은 매우 중요하다. 위험도 평가의 정확성 및 효율성을 높이기 위하여 단계별로 연구를 수행할 경우 상이한 지수를 사용하면 각각의 연구 결과의 통합이 매우 어려워질 수 있기 때



(a) 대상 구조물<sup>(9)</sup>



(b) 강브레이싱을 사용한 내진보강

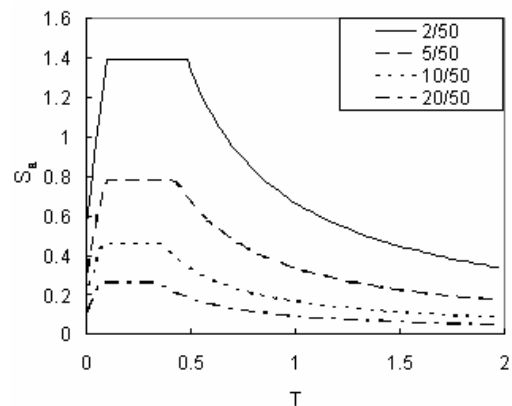
〈그림 3〉 해석 대상 구조물 개요

문이다. 본 예제에서는 빌딩구조물에 대한 지진위험도 분야에서 널리 쓰이고 있는 지수를 선택하여 해석을 수행하였는데, 구조물의 손상지수로는 최대층간변위율(Maximum Interstory Drift)을, 그리고 지진강도지수로는 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration,  $S_a$ )를 사용하였다.

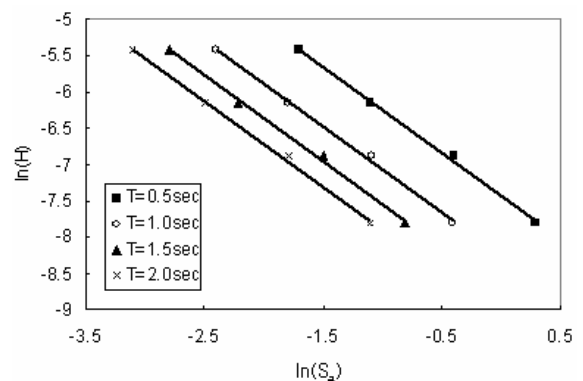
## 5.2 확률적 손상해석

### 5.2.1 확률적 지진위험원 해석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis)

PSDA를 수행하기 위해서는 앞서 말한 바와 같이 해당 지역의 지진특성을 확률적으로 나타낼 수 있도록 확률적 지진위험원해석(PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis)을 수행해야 하는데, 이를 통해 지진의 강도별 발생확률을 나타낼 수 있는 지진재해도 곡선(Hazard Curve)을 작성할 수 있다. 만약 지진의 강도가 스펙트럼 가속도( $S_a$ )로 나타내어질 경우에는 그에 해당되는 지진재해도 곡선은 대상구조물의 고유주기에 따라 다르게 정의될 것이다. 그림 4는 FEMA<sup>(12)</sup>에서 제공되는 자료를 바탕으로 작성한 Memphis시에 해당되는 응답스펙트럼을 나타내는데 이를 바탕으로 그림 5와 같이 고유주기별로 지진재해도 곡선을 작성할 수



〈그림 4〉 Memphis 시의 초과확률 별 응답 스펙트럼



〈그림 5〉 고유주기별 지진재해도 함수(Memphis 지역)

있다. 앞서 언급한 대로 지진의 강도와 초과확률은 대수평면 상에서 선형관계를 가지고 있는 것을 알 수 있으며 여기서 식 (2)의 매개변수  $k_0$ 와  $k$ 는 지진재해도 곡선의  $y$ 절편과 기울기로부터 각각 구할 수 있는데, 동일 지역에 대한 지진재해도 함수이기 때문에 구조물의 고유주기별로  $k$ 값은 거의 일정하나  $k_0$ 값은 구조물의 특성에 따라서 변동이 있다. 이에 고유주기에 대한  $k_0$ 값의 변화를 일반화시키기 위하여 그림 6과 같이 회귀분석을 한 결과 다음의 식으로 그 관계의 표현이 가능하였다.

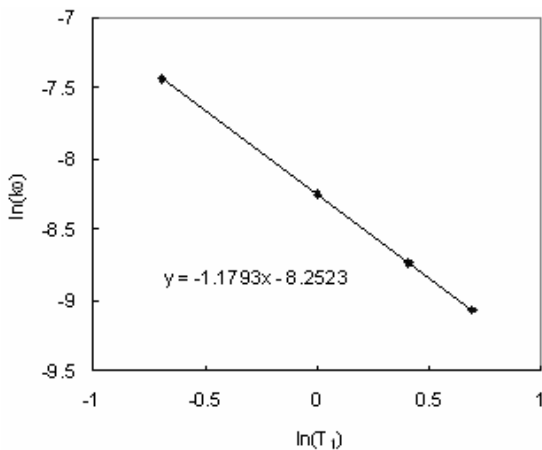
$$k_0 = 0.000261 T_1^{-1.1793} \quad (16)$$

여기서 주의할 점은, 이러한 관계식은 지역별로 다르게 수립된다는 것이다. 즉, 식 (16)은 해석이 수행되는 해당지역에서만 국한되어 사용할 수 있으며 다른 지역에 대해서는 별도의 해석을 수행하여 상관관계를 나타내어야 한다.

앞서 이야기했듯이 PSDM 해석을 위해서는 구조물의 지지력에 관련된 불확실성 이외에 지진하중의 불확실성 또한 고려하여야 한다. 지진하중의 불확실성(즉, 일정 입력강도의 지진조건 하에 발생하는 지진파의 불확실성)은 일정 동일 성질을 갖춘 일련의 지진파를 이용하여 표현할 수 있는데, 본 연구에서는 Memphis시의 설계스펙트럼에 맞추어 Wen and Wu<sup>(13)</sup>가 개발한 일련의 지진파 중 그 초과확률이 50년간 2%인 지진파 10개와 50년간 10%인 지진파 10개, 도합 20개의 지진파를 이용하기로 한다.

**5.2.2 확률적 지진요구 해석(Probabilistic Seismic Demand Analysis)**

PSDM 해석을 위해 구조물의 지지력 불확실성 고려를 위하여 대표적 물성치 및 동적계수를 여러 연구결과<sup>(4),(5),(14)</sup>를 참조하여 확률변수로 정의하였는데, 정의된 확률변수 및



〈그림 6〉 고유주기와  $k_0$ 의 상관도(Memphis 지역)

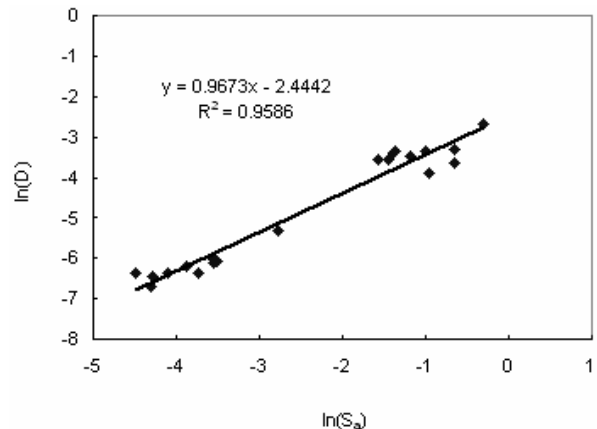
그 확률적 특성은 표 1과 같다. 이렇게 정의된 확률변수와 위에서 언급한 20개의 지진파를 조합하여 일련의 동적구조해석을 수행할 수 있는데, 본 연구에서는 Latin Hypercube Sampling 기법<sup>(15)</sup>을 적용하여 각각의 확률변수에서 발생확률이 같도록 10개의 샘플을 채취하여 각 확률단계별(50년 초과확률 2% 및 10%) 지진파 10개씩과 무작위로 매칭을 시킨 후 해석을 수행하여 총 20회의 동적구조해석을 행하였으며 그 결과로 얻어지는 구조물의 최대층간변위율(Maximum Story Drift)의 분포를 관찰하였다. Latin Hypercube Sampling 기법의 적용 시 샘플의 수를 정할 때에 적은 수의 샘플은 해석의 효율을 높이지만 정확도가 떨어질 수 있으므로 주의를 요하게 되는데, 기존 연구<sup>(4)</sup>를 참조할 때 본 연구와 같은 확률적 해석을 위해서는 10개의 샘플과 20개의 지진파를 이용한 시뮬레이션으로도 필요한 정확도를 얻을 수 있다고 판단된다. 그림 7은 브레이싱 보강 이전의 구조물에 대해 수행한 시뮬레이션의 결과를 나타내는데, 앞 절에서 언급하였다시피 이 그래프에서부터 식 (3)과 식 (4)에서의 계수  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$ 를 산정할 수 있다. 이와 같은 방법으로 내진보강의 수준(단면적으로 표시된 브레이싱의 양)을 달리하며 시뮬레이션을 수행하여 내진보강 수준 별  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$ 의 값을 표 2와 같이 산출하여 후에 수행될 손실해석을 통하여 최적 내진보강 수준을 결정할 수 있게 하였다.

**5.3 손실함수 정의**

본 예제 해석을 위해서 앞서 언급된 HAZUS 및 기존의

〈표 1〉 입력 확률변수 정의

확률변수	확률분포	평균	변동계수
콘크리트 압축강도(MPa)	정규분포	31.4	0.14
철근 항복강도(MPa)	대수정규분포	390.0	0.11
감쇠비(%)	균등확률분포	5.0	0.29



〈그림 7〉 내진보강 이전 구조물에 대한 지진요구해석

〈표 2〉 내진보강 수준 별 계수의 산정

보강브레이싱 단면적, $cm^2 (in^2)$	고유주기 (sec)	$k$	$k_0$	$a$	$b$	$\beta$
0	1.61E+00	1.18E+00	1.49E-04	8.68E-02	9.67E-01	3.09E-01
32.3 (5)	9.10E-01	1.18E+00	2.92E-04	3.28E-02	1.10E+00	2.80E-01
64.5 (10)	7.12E-01	1.18E+00	3.90E-04	2.21E-02	1.16E+00	1.83E-01
96.8 (15)	6.09E-01	1.18E+00	4.68E-04	1.66E-02	1.19E+00	2.14E-01
129.0 (20)	5.44E-01	1.18E+00	5.35E-04	1.07E-02	1.11E+00	1.57E-01
161.3 (25)	4.99E-01	1.18E+00	5.93E-04	9.49E-03	1.15E+00	2.05E-01
193.5 (30)	4.65E-01	1.18E+00	6.45E-04	6.35E-03	1.04E+00	1.38E-01

지진손실자료<sup>(16),(17)</sup>를 이용하여 구조물의 지진에 대한 손상과 지진손실과의 관계를 정립하였다. 고려된 지진손실의 종류는, 경제적 손실로는 구조물 복구비용, 장비/설비 복구비용, 이윤상실, 임시설치비, 기타 기능상실 관련 비용을 고려하였고, 인명손실은 사망 및 부상으로 나누어 고려하였다. 평가된 지진손상에 따른 경제적 손실 및 인명손실을 그래프 상에서 표현하면 그림 8과 같이 경제적 손실은 선형적으로, 그리고 인명손실은 지수 형태의 관계를 가지고 있다는 것을 알 수 있는데, 이러한 관계를 회귀분석을 통한 수식으로 표현하면 다음과 같다.

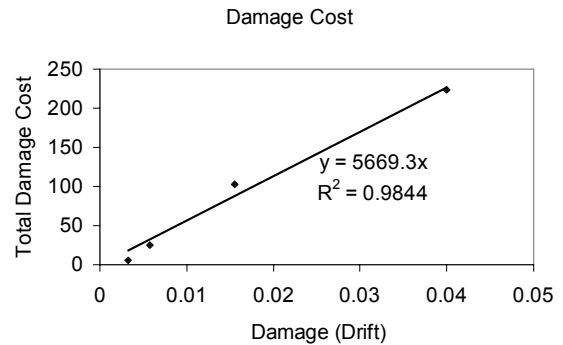
$$L_c = 5669.3 \cdot D \quad (17)$$

$$L_l = 4 \times 10^{-6} \cdot \exp(204.27 \cdot D) \quad (18)$$

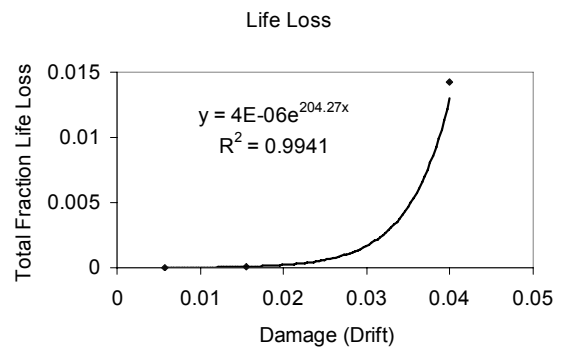
여기서,  $D$ 는 구조물의 손상을 나타내는 최대층간변위율을,  $L_c$ 는 구조물의 단위 면적 별 경제적 손실( $\$/ft^2$ )을, 그리고  $L_l$ 은 구조물 내 상주인원에 대한 인명손실의 비율을 나타낸다. 여기서 부상 20명은 사망 1명과 동등하게 산정하였는데, 이러한 환산방법은 해당 사회의 문화적, 경제적 또는 정치적 배경 등에 따라서 다르게 결정될 수 있다는 점을 주의해야 한다.

경제적 손실이 화폐단위로 표시될 수 있는 것에 비해 인명손실은 그 표시 단위가 사망자 또는 부상자의 수로 나타나기 때문에 표시 단위가 서로 다르다. 이럴 경우에 대체안들의 직접적인 비교를 위해서 단위가 다른 종류의 손실을 하나의 단위로 통일을 시킬 필요가 있다. 공학적 의사결정에 있어서 대부분의 경우 등가의 화폐가치로 손실을 산정하게 되는데, 인명손실에 대한 금전적 가치를 정의하는 것은 매우 어려운 문제이다. 인명손실에 대한 금전적 가치에 대한 것은 본 연구의 주제에서 벗어나는 것이기에 여기서는 사망 한 명에 해당되는 금전적 손실을 참조문헌<sup>(16)</sup>의 제안값을 고려하여 \$5,000,000으로 정하였다.

지진과 같은 미래의 위험요소에 대한 손실을 산정할 때에는



(a) 경제적 손실



(b) 인명 손실

〈그림 8〉 지진손상에 따른 손실함수

미래의 금전가치가 현재의 금전가치와 다르다는 것을 나타내는 할인효과(Discount Effect)를 반드시 고려해야 한다.<sup>(17)</sup>  $T$ 라는 기간에 걸쳐서( $c_0, c_1, \dots, c_T$ )의 지출이 예상될 때 총 지출에 대한 등가의 현재 가치  $C_{npv}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{npv} = \sum_{t=0}^T \frac{c_t}{(1+\lambda)^t} \quad (19)$$

여기서  $\lambda$ 는 단위 시간  $t$ 당 적용되는 할인율(Discount Rate)이다. 할인율 역시 인명손실의 금전적 가치와 마찬가지로 결정하기 어려우나 본 예제에서는 5%의 할인율을 적용하여 해석을 수행하였다.

5.4 내진보강 최적수준 결정

구조물의 지진관련 손실은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_S = L_c + L_l \tag{20}$$

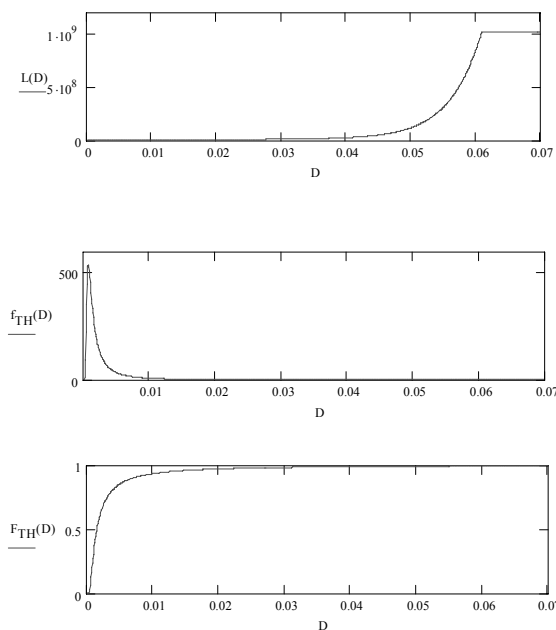
여기서  $L_S$ 는 총 지진손실,  $L_c$ 는 지진으로 인한 예상 경제적 손실,  $L_l$ 은 지진으로 인한 예상 인명손실이다.  $L_c$ 의 계산 시 할인효과를 고려했으며  $L_l$ 를 계산할 때는 인명손실을 등가의 비용으로 환산하였다. 이러한 방법으로 적용 브레이싱의 단면적에 따라서 모델링 된( $A=0in^2$ 부터  $A=30in^2$ 까지  $5in^2$ 씩 증가시키며 모델링) 구조물에 대하여 구조물 손상에 대한 PDF 및 CDF 및 예상 지진손실과의 관계를 식 (9)와 식 (10), 그리고 식 (17)과 식 (18)을 이용하여 산정할 수 있는데, 그림 9는 이 중 브레이싱 적용 전 구조물과 브레이싱 단면적  $20in^2$ 를 적용한 구조물에 대하여 산정된 구조물의 손상에 따른 손실 및 PDF와 CDF를 보여준다. 예상 지진손실의 경우 구조물의 손상치가 작을 때는 거의 손실이 없다가 최대 층간변위율이 0.03이 넘어가면서 급격히 증가해 0.06이 넘어서는 시점에서 최대치를 보이고 있다. 그 반면 구조물 손상에 대한 확률분포는 매우 작은 수준의 손상에만 대부분의 발생확률이 집중되어있고 큰 수준의 손상이 일어날 확률은 매우 작은 것으로 나타나 있는데, 이것이 지진을 Low Probability High Consequence Event라고 부르는 이유라 할 수 있다. 하지만 작은 수준의 손상치에 있어서 브레이싱 적용 전(그림 9(a)) 과 적용 후(그림 9(b),  $A=20in^2$ ) 구조물의 PDF와 CDF는

차이를 보이고 있는데, 적용 전의 구조물은 손상을 입을 확률이 0에서 0.01 사이에 주로 분포가 되어있는 반면 적용 후의 구조물은 0.005 이하의 손상치에 대하여 발생확률이 주로 분포되어 있다. 그러므로 손상치에 따른 예상 지진손실비용 또한 그 차이만큼 발생할 것이라 예측할 수 있다.

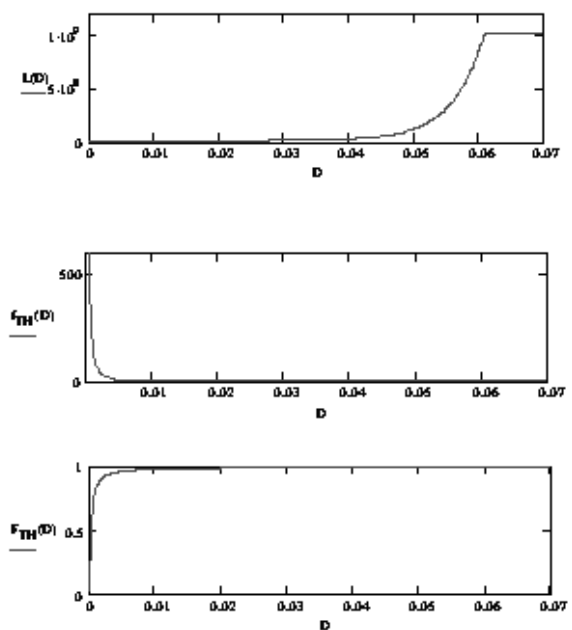
최적 내진보강 수준을 결정하기 위하여 고려하여야 할 손실은 위 식 (20)에서 산정된 지진손실과 내진보강에 필요한 비용의 합으로 나타낼 수 있는데, 이는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$L_T = L_c + L_l + L_i \tag{21}$$

여기서  $L_T$ 는 내진보강을 포함한 총 비용 및 지진손실,  $L_i$ 는 내진보강을 위한 초기비용이다. 초기비용 또한 여러 가지 환경 요소에 의해서 유동적으로 산정될 수 있지만 본 연구에서는 관련참조문헌<sup>(16),(17)</sup>을 바탕으로 산정하였다. 위에서 언급한 대로 적용 브레이싱 수준에 따라 모델링 된 각각의 구조물에 대하여 식 (15)-식 (21)을 이용하여 초기 내진보강 비용, 예상 지진손실비용, 그리고 두 비용을 합친 총 손실비용의 기댓값을 산정하였는데 그 결과는 그림 10과 같다. 그림 10(a)에서 보는 바와 같이 내진보강의 수위를 높일수록 초기에 들어가는 내진보강비용은 높아지지만 그에 따라 예상되는 지진손실비용의 기댓값은 낮아진다는 것을 볼 수 있다. 여기서 예상 지진손실비용은 이미 언급한 바와 같이 할인효과를 고려한 비용손실과 등가의 비용으로 환산된 인명손실을 합친 값이다. 초기 내진보강비용과 예상 지진손실비



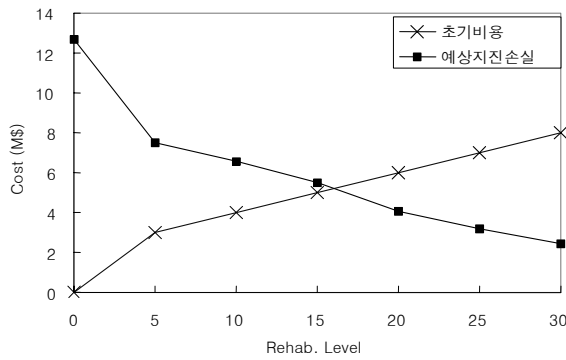
(a) 브레이싱 적용 전



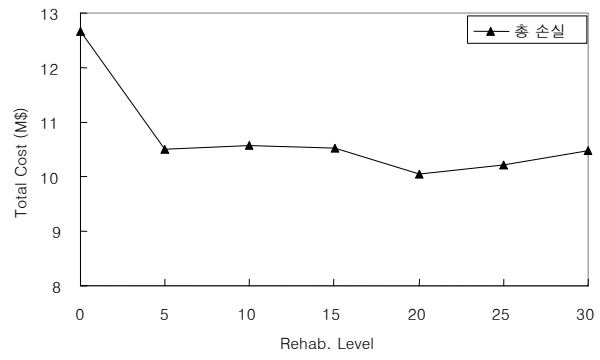
(b) 브레이싱 적용( $A=20in^2$ ) 후

〈그림 9〉 구조물 손상에 따른 손실 및 손상의 PDF, CDF





(a) 초기 내진보강비용 및 예상지진손실비용



(b) 총 손실비용

〈그림 10〉 내진보강 수준에 따른 지진손실비용

용 두 가지 비용을 합친 비용을 총 손실비용이라고 할 때 그림 10(b)는 내진보강의 수준과 총 손실비용과의 관계를 보여주고 있다. 그래프 상에서 최소 수준의 내진보강을 실시한 경우( $A=5in^2$ ) 내진보강 이전의 구조물에 비하여 총 손실액이 급격히 떨어지는 것을 알 수 있는데 이것은 내진보강의 필요성을 말해주는 결과라 할 수 있다. 그 후 내진보강 수위에 따른 총 손실비용의 변화는 상대적으로 적게 변화나  $A=20in^2$ 인 곳이 최소 손실이 발생하는 곳으로, 최적 내진보강 수준이라고 할 수 있다.

본 예제의 수행을 위하여 기존의 시뮬레이션 방법<sup>(6),(7)</sup>을 따른다면, 각 보강수준에 대하여 적어도 4단계의 지진강도에 대한 시뮬레이션이 이루어져야 하고 구조적 손상과 손실 함수와의 관계 역시 시뮬레이션에 의한 방법에 의존하여야 하므로 Latin Hypercube 기법 등의 샘플링 기법을 사용할 경우라 할지라도 최소 560회 이상의 구조해석이 이루어져야 한다. 또한 여기서 손실함수나 입력 변수(예를 들어 등가 인명손실 등)의 값이 변동될 경우마다 시뮬레이션을 반복해야 하는 불편함이 야기된다. 이에 비하여 본 연구에서 수립된 수식적 방법을 따를 경우에는 시뮬레이션 수행을 위하여 필요한 구조해석의 횟수가 위에서 언급했던 바와 같이 총 7단계의 각 보강수준(일정 수준의 브레이싱 단면)에 대하여 20회 씩 총 140회 정도에 머무르며 입력 변수의 변동에 따른 추가 해석 시에도 추가 시뮬레이션은 필요치 않아 더욱 효율적이라는 것을 알 수 있다. 또한 가능 손실 범위를 일정수의 구간으로 나누어 총 기대 손실을 계산하는 개략적인 방법에 비하여 제안된 방법을 따를 경우에는 손실의 확률분포를 수식적으로 표현하였으므로 수치해석을 수행함으로써 더 높은 정확도를 기대할 수 있다.

본 해석 예에서는 브레이싱 설치라는 내진보강 방법을 정하고 위험도 기반 최적 보강수준을 찾았다. 하지만 이 이외에도 많은 수의 적용 가능한 내진보강 방법이 존재하며 어

떠한 방법이 가장 효율적인지에 대해서는 별도의 연구가 이루어져야 할 것이다. 또한 본 예에서는 인명피해에 대한 등가 비용, 할인율, 브레이싱의 가격 등 의사결정 해석의 입력 인자를 고정된 상수로 취급하였으나 실제로는 이러한 인자들의 값은 시대, 위치에 따라 변하며 경우에 따라 불확실성을 내포하기도 할 것이다. 그러므로 보다 심도 있는 의사결정 해석을 위해서는 이러한 인자들에 대한 자세한 조사와 더불어 민감도 해석 등을 통하여 이러한 인자들이 의사결정에 미치는 영향도를 고찰할 필요가 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 확률적 지진요구모형을 이용한 위험도 평가를 통하여 구조물의 지진에 대한 피해 손실을 정량적으로 산정하고 이를 바탕으로 초기비용과 예상손실비용을 포함한 총 손실비용을 최소화시킬 수 있도록 내진보강 수준을 최적화하는 절차를 제시하였다. 구조물과 관련된 지진 피해 산정에 있어서 지진하중의 강도별 발생확률 및 구조물의 손상확률을 동시에 고려하여 구조물 생애주기에 대한 구조물의 지진손상 확률밀도함수 및 누적분포함수를 수식화 하였으며 수식의 유효성을 유지하기 위한 확률변수의 유효범위를 정의하였다. 또한 여기에 사회적, 경제적 손실을 정량화 하기 위한 손실함수를 결부시켜 구조물과 관련된 지진 피해 손실의 기댓값을 정량적으로 산정할 수 있도록 하였다. 제시된 해석기법은 기존의 시뮬레이션에 의한 손실산정법과 비교하여 해석의 정확도는 잃지 않으면서 구조해석의 반복 횟수를 대폭 줄일 수 있다는 장점이 있다.

내진보강의 최적수준을 결정함에 있어서는 내진보강의 초기비용과 예상손실비용을 포함한 총 손실의 기댓값을 최소화하는 것을 최적화의 기준으로 삼도록 하였다. 수립된 해석절차를 5층 RC형식의 병원 건물에 대한 스틸 브레이싱

을 이용한 내진보강 최적수준 결정에 적용하였는데, 구조물의 지진손상 확률함수 및 지진손실함수 도출, 할인율의 적용, 그리고 비용손실과 인명손실을 동시에 고려한 총 비용 손실 산정에 의한 의사결정 절차를 과정별로 예증하였다. 본 절차에 따르면 구조물의 내진보강에 있어서 필요로 하는 초기비용 및 그에 따른 성능개선효과를 직관적으로 볼 수 있으며 또한 보강 수위에 따른 이들 두 요소가 결합된 총 손실의 추이를 볼 수 있어 내진보강에 대한 의사결정을 용이하게 할 수 있다.

본 연구에서 수립된 내진보강 최적화 절차는 빌딩과 교량을 비롯한 구조물의 내진성능 평가 및 개선을 위한 보강에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만 본 논문에서는 위험도 기반의 내진보강 의사결정을 위한 공학적 절차를 제시하였으므로 의사결정을 위한 가치기준 및 비용 관련 입력치를 정적인 값으로 취급하였으나 실제 의사결정 시에는 일반적으로 이러한 입력치를 확정적으로 볼 수 없는 경우가 대부분이므로 이에 관하여 민감도 분석 등의 심층 고찰이 추가되어야 한다. 또한 해석의 정확도를 보다 높이기 위해서는 보강의 종류 및 수준과 관련된 비용 산정 기법, 구조물의 지진 손실 산정을 위한 손실함수의 정확도 향상 등의 연구가 보강되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Wen, Y. K., Ellingwood, B. R., Veneziano, D., and Bracci, J., *Uncertainty Modeling in Earthquake Engineering*, Report No. MAE-FD-2, Mid-America Earthquake Center, 2003.
2. Ellingwood, B. R. and Wen, Y. K., "Risk-Benefit- Based Design Decisions for Low-Probability/High Consequence Earthquake Events in Mod-America," *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 7, No. 2, 2005, pp. 56-70.
3. Ellingwood, B. R., "Earthquake Risk Assessment of Building Structures," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 74, No. 3, 2001, pp. 251-262.
4. 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
5. 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.
6. Park, J., "Development and Application of Probabilistic Decision Support Framework for Seismic Rehabilitation of Structural Systems," Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2004.
7. HAZUS, *Technical Manual*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1999.
8. 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.
9. 박주남, 최은수, "취약도 해석을 통한 빌딩구조물의 내진성능 비교 및 평가," 한국지진공학회 논문집, Vol. 11, No. 3, 2007, pp. 11-21.
10. Nielson, B. G., "Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones," Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2005.
11. Choi, E. and Jeon, J., "Seismic Fragility of Typical Bridges in Moderate Seismic Zone," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 7, No. 1, 2003, pp. 41-51.
12. FEMA-Federal Emergency Management Agency, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Report No. FEMA-356, Washington, D.C., 2000.
13. 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.
14. Galambos, T. V., Ellingwood, B. R., 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.
15. Iman, 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.
16. FEMA-Federal Emergency Management Agency, *A Benefit-Cost Model for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Report No. FEMA-227, Washington, D.C., 1992.
17. FEMA-Federal Emergency Management Agency, *Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, Vol 1 - Summary*, Report No. FEMA-156, Washington, D.C., 1995.
18. Frederick, S., Loewenstein, G., and O'Donoghue, T. , "Time Discounting and Time Preference: A Critical Review," *Journal of Economic Literature*, Vol. 40, No. 2, 2002, pp. 351-401.