

# 내진성능확보를 위한 교량의 최적유지보수계획법

## Optimum Maintenance and Retrofit Planning for Reliable Seismic Performance of the Bridges

고 현 무\*  
Koh, Hyun Moo

이 선 영\*\*  
Lee, Sun Young

박 관 순\*\*\*  
Park, Kwan Soon

김 동 석\*\*\*\*  
Kim, Dong Seok

### 국문요약

교량의 내진성능확보를 위한 유지보수계획을 수립하는데 있어서, 전체 생애주기비용의 최소화를 통하여 최적의 검사 및 수리회수의 결정방법을 제시한다. 생애주기 비용에는 초기비용, 파괴비용 뿐만 아니라, 검사 및 보수비용이 포함된다. 시간에 따른 내진성능저하모형을 손상함수를 이용하여 표현하였으며, 손상감지정도에 따른 Event Tree Analysis를 통하여 유지보수에 따른 파괴확률을 랜덤진동이론을 이용하여 산출한다. 예제로서 10경간 연속교의 최적유지보수방법을 살펴본 결과, 가속도계수가 증가하고, 연약지반일수록 최적유지보수회수는 증가하는 것으로 나타났다.

주요어 : 내진성능, 유지보수계획, 생애주기비용, event tree analysis

### ABSTRACT

In the maintenance and retrofit planning of a bridge system, the optimal strategy for inspection and repair are suggested by minimizing the expected total life-cycle cost, which includes the initial cost, the costs of inspection, repair, and failure. Degradation of seismic performance is modeled by using a damage function. And failure probability is computed according to the degree of damage detection by random vibration theory and the event tree analysis. As an example to illustrate the proposed approach, a 10-span continuous bridge structure is used. The numerical results show that the optimum number of the inspection and the repair are increased, as the seismic intensity is increased and the soil condition of a site becomes more flexible.

Key words : seismic performance, maintenance and retrofit, life-cycle cost, event tree analysis

## 1. 서 론

토목구조물은 그 사용목적에 따라 침해적인 환경에 놓이게 되므로, 시간의 흐름에 따라 구조물의 특성이 변화하고 구조물의 손상, 즉 성능이 저하되는 현상이 나타나게 된다. 따라서, 구조물의 안전성을 확보하고, 향후의 값비싼 파괴비용을 감소시키며, 사용기간의 중대를 위해 적절한 유지보수가 필요하게 된다. 최근 유지보수에 대한 관심이 높아지면서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이러한 연구의 대부분은 사용중상태에 있는 교량구조물의 사용성 개선을 위한 유지보수에 국한되어 있다.<sup>(1)-(3)</sup> 그러나, 여러가지 요인에 의한 교량의 침해는 그 정도에 따라서 내진성능에도 크고 작은 영향을 미칠 수 있을 것이다.

한편, 근래에 세계 각국에서 발생한 지진들, 즉 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994), Kobe 지진(1995), 대만 지진(1999) 등으로 인하여 빌딩 및 교량과 같은 사회기반시설물의 피해가 잇따르고 있으며, 우리나라 역시 금세기에 들어서 시작한 계기지진관측으로 얻은 결과와 일련의 중규모의 지진(영월지진, 1996; 경주지진, 1997)으로 지진의 안전지대가 아님을 알 수 있다.<sup>(4)</sup> 따라서, 이러한 사회기반시설물의 지진

으로 인한 피해를 최소화 또는 방지하기 위해서는 내진성능 확보가 무엇보다도 중요하다.

이 연구에서는 교량의 내진성능확보를 위한 유지보수계획을 수립하는데 있어서, 전체 생애주기비용 관점에서 최적의 검사 및 수리회수의 결정방법을 제시한다. 구조물의 건설에서 사용기간 종료까지 기대되는 모든 비용에 대한 현재가치의 합으로 정의되는 생애주기비용함수를 구성함에 있어 검사·보수 비용을 도입하고, 교량구조물이 사회기반시설로서 사회에 끼치는 이익을 극대화 하기 위하여, 생애주기비용을 최소화하는 방법으로 최적의 유지보수계획을 수립하고자 하였다. 이를 위하여, 교량의 각 구조요소가 파괴에 이르게 되는 한계 상태를 정의하고, 이러한 한계상태를 넘어서는 빈도수를 랜덤진동이론을 이용하여 구함으로써 교량의 파괴확률을 추정한다. 시간에 따른 내진성능저하모형을 손상함수를 이용하여 제시하였으며, 손상감지여부에 따른 event tree analysis를 통하여 유지보수에 따른 파괴확률을 산출한다.

예제로서 10경간 연속교량을 통하여 도로교시방서에 규정된 가속도계수 및 지반계수, 그리고 검사방법에 따른 손상감지정도에 따라 생애주기비용이 최소가 되는 최적의 유지보수계획을 제안하였다.

## 2. 교량의 파괴확률 산출

교량의 파괴확률을 구하기 위해서는, 교량의 각 구조요소

\* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수  
(대표저자 : khm@gong.snu.ac.kr)

\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

\*\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 계약조교수

\*\*\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2002. 7. 12 / 심사종료일 : 2002. 8. 20)

가 파괴에 이르게 되는 상태, 즉 한계상태를 정의해야 한다. 지진발생시 교량에 일어날수 있는 파괴상태를 낙교, 교대의 침하, 교각의 휨/전단파괴, 연결부의 파괴, 기초부분의 파괴 등으로 고려할 수 있으나<sup>(5)</sup>, 이 연구에서는 교량의 파손을 크게 상부구조와 교각의 두가지로 단순화하여 정의하고 한계상태를 결정한다.

도로교시방서에 규정된 설계응답 스펙트럼에 상응하는 스펙트럼 밀도함수로 입력지반 운동을 모델링하고, 이러한 입력지반운동이 교량구조물에 작용할 때의 응답이 정의된 한계상태를 넘어서는 빈도수를 랜덤진동이론에 의해 구함으로써 교량의 파괴확률을 산출한다.

### 2.1 한계상태의 정의

지진발생시 상부구조의 파괴는 상부구조의 변위가 설계 당시 상부구조에 주어진 여유변위를 넘어설 때 발생한다. 따라서, 상부구조에 대한 한계상태는 상부구조의 수평변위가 최소지지길이 N을 넘는 것, 즉 낙교상태로 정의 하였다. 식 (1)은 도로교시방서에서 정의하고 있는 최소지지길이를 나타낸다.

$$N = 200 + 1.67L + 6.66H(mm) \tag{1}$$

여기서, L은 인접 신축이음부까지 또는 교량단부까지의 거리(m)이고, H는 교각의 높이(m)이다.

교각의 파손에 대한 한계상태에 있어서는 전단파괴보다 휨파괴가 먼저 일어나도록 설계되어 있음을 가정한다. 이 연구의 경우, 수직 상재하중이 일정할 경우의 모멘트강도를 구하는 것이 목적이 되므로, 정해진 수직 상재하중으로부터 P-M상관도에 의하여 그에 해당하는 모멘트강도를 구하고<sup>(6)</sup>, 구해진 모멘트강도를 교각높이로 나누어 항복하중을 결정한다. 교각의 항복변위는 항복하중을 1차강성(k) 값으로 나누어 줌으로써 구하게 되고, 한계상태는 교각의 연성을 고려하여 다음의 식 (2)와 같이 정의한다.

$$u^{lim} = \mu \times x_y \tag{2}$$

여기서,  $u^{lim}$ 는 교각의 한계변위,  $\mu$ 는 교각의 연성도,  $x_y$ 는 교각의 항복변위이다.

### 2.2 랜덤진동이론을 이용한 파괴확률의 산출

입력지반운동이 정규분포를 따르는 것으로 가정하였을 때, 선형시스템의 응답 역시 정규분포를 따른다. 정규분포를 따르는 응답의 랜덤변수가 정의된 한계값을 넘어서는 빈도는 랜덤진동이론(random vibration theory)을 이용하여 다음과 같이 추정할 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$\nu_{ak} = 2\nu_{a_k} = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{\dot{y}_k}}{\sigma_{y_k}} \exp\left(-\frac{a_k^2}{2\sigma_{y_k}^2}\right) \tag{3}$$

여기서,  $\sigma_{y_k}$ 는 응답의 표준편차<sup>(12)</sup>,  $\sigma_{\dot{y}_k}$ 는 응답의 시간변화율

의 표준편차<sup>(12)</sup>,  $\nu_{a_k}$ 는 k자유도의 응답이 설정된 한계상태  $a_k$ 를 단위시간동안 넘어서는 횟수다.

구조물의 응답이 지진 지속시간 동안 한계상태를 넘어서는 사건의 회수가 Poisson 분포를 따른다고 가정하였을 때, 지진발생시 k한계상태의 파괴확률( $P_{f,leq}$ )은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{f,leq} = 1 - \exp(-\nu_{a_k} \cdot t_d) \tag{4}$$

여기서,  $t_d$ 는 평균적인 강진지속시간이다.

따라서, 생애주기 동안 k한계상태의 파손이 일어날 확률은 다음과 같다.

$$P_{f_k} = P_{f,leq} \cdot P_{eq} = P_{eq}\{1 - \exp(-\nu_{a_k} \cdot t_d)\} \tag{5}$$

여기서,  $P_{eq}$ 는 생애주기 동안 지진이 발생할 확률이다.

## 3. 유지보수와 파괴확률

교량구조물은 여러 가지 환경요인에 의하여 시간의 흐름에 따라 구조물의 성능이 저하되고, 이러한 구조물의 성능저하로 인해 내진성능 역시 저하될 수 있다. 시간에 따른 내진성능의 저하모형을 손상함수를 이용하여 표현하고, 시간의 흐름에 따라서 내진성능의 저하로 파괴확률이 증가하는 교량구조물에 대하여, 내진성능에 대한 유지보수의 효과를 손상감지확률과 event tree analysis를 이용하여 유지보수후의 파괴확률을 산출한다.

### 3.1 내진성능 저하모형

교량구조물은 침해적인 환경요인에 의해 초기강성을 유지하지 못하고 시간의 흐름에 따라 구조적인 성능저하가 발생하게 된다. 이 연구에서는 성능의 저하를 교각의 휨모멘트강도로 정의하였다. 즉, 시간이 지남에 따라 교각의 휨모멘트강도가 감소한다고 가정하여, 임의시간 t에서의 교각의 휨모멘트강도는 식 (6), 교각의 초기 휨모멘트강도와 손상함수의 곱으로 정의하였다.<sup>(8)</sup>

$$M(t) = M_0 g(t) \tag{6}$$

여기서,  $M(t)$ 는 임의시간 t에서의 교각의 휨모멘트강도,  $M_0$ 는 교각의 초기 휨모멘트강도,  $g(t)$ 는 손상함수<sup>(14)</sup>로 이 연구에서는 식 (7)과 같이 30년에 10%의 손상이 되는 2차곡선으로 구성하여, 그림 1로 나타낸다.

$$g(t) = 1 - at^2 \tag{7}$$

여기서, a는 손상지수, t는 시간을 나타낸다.

또한, 시간에 따른 교각의 휨모멘트강도 역시 손상함수와 같은 양상이 된다(그림 2).

이러한 휨모멘트강도의 변화에 따라 항복변위가 감소하게 되고, 이러한 항복변위를 갖는 교량에 지진하중이 작용할 경우, 파괴확률이 증가하는 양상으로 내진성능의 저하를 표현하였다(그림 3).

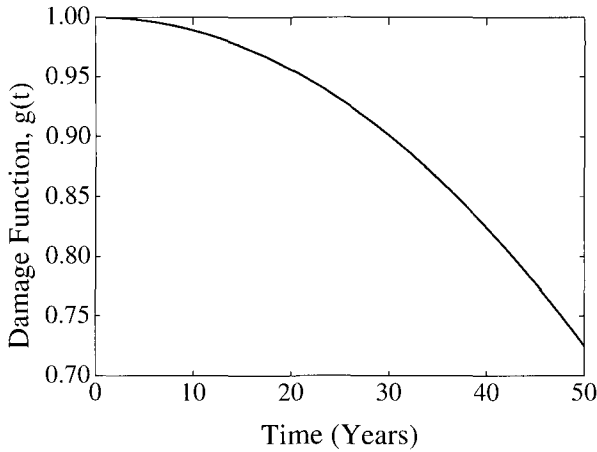


그림 1 시간에 따른 손상함수 g(t) 의 변화

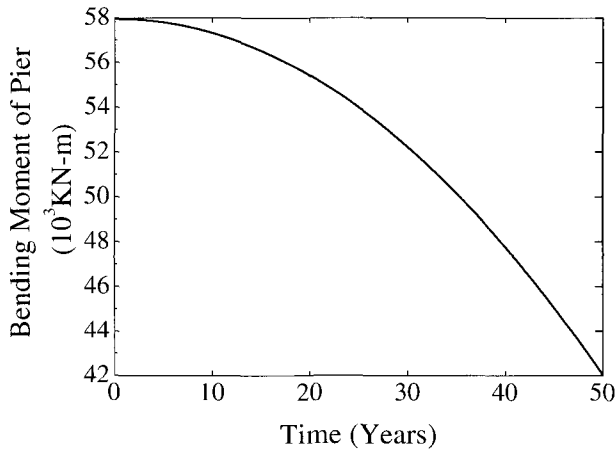


그림 2 시간에 따른 교각의 휨모멘트 변화

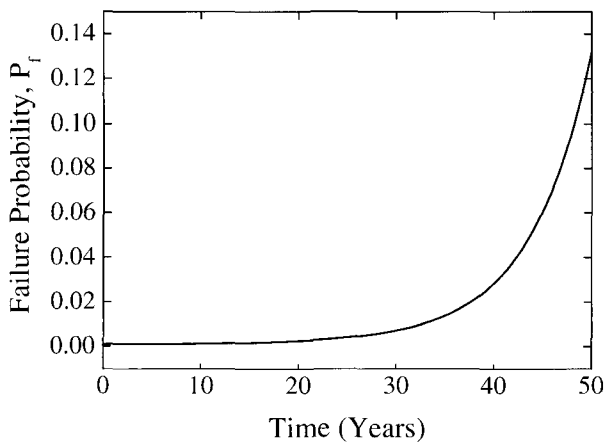


그림 3 교각의 파괴확률

### 3.2 손상감지확률

시간에 따른 구조물의 손상정도를 파악하기 위해서는 손상감지확률이 필요하게 되는데, 이것은 검사방법의 질에 따라 변화할 수 있는 값이다. 즉, 검사방법의 질이 좋을수록

검사시에 손상을 감지할 확률이 커지며, 그에 따라서 검사비용이 증가하게 된다. 따라서, 검사방법의 질을 정의하기 위한 손상감지함수가 필요하게 된다.<sup>(2)</sup> 연구에서는 손상정도 (damage intensity :  $\eta_{str}$ ), 즉 임의 시간 t에서 존재하게 되는 손상정도를 손상감지함수로 택하였으며, 시간에 따른 교각의 휨모멘트강도의 감소로 정의하였다. 이러한 손상정도는 식 (8)로 표현된다. 식 (8)에서  $\eta_{str}=0$ 은 구조물의 손상이 없음을,  $\eta_{str}=1$ 은 구조물이 완전히 손상되었음을 나타낸다.

$$\eta_{str} = \frac{M_{init} - M(t)}{M_{init}} \quad (8)$$

여기서,  $\eta_{str}$ 은 손상정도,  $M_{init}$ 는 교각의 초기 휨모멘트강도,  $M(t)$ 는 임의시간 t에서의 교각의 휨모멘트강도이다.

검사방법의 손상감지확률( $P_{det}$ )이 정규분포( $\Phi$ )를 따른다고 가정하면, 이는 식 (9)로 표현할 수 있다.

$$P_{det} = \Phi\left(\frac{\eta_{str} - \eta_{0.5}}{\sigma_{insp}}\right) \quad (9)$$

여기서,  $\eta_{0.5}$ 는 검사방법이 평균적으로 감지할 수 있는 손상정도,  $\sigma_{insp}$ 는 검사방법이 감지할 수 있는 손상정도의 표준편차이다.

그리고, 연구에서 사용하는 검사방법이 99.7%의 신뢰도를 갖는다고 가정하면, 검사방법이 감지할 수 있는 최소손상정도( $\eta_{min}$ )와 최대손상정도( $\eta_{max}$ )는 식 (10), (11)로 표현할 수 있다.

$$\eta_{min} = \eta_{0.5} - 3.0 \sigma_{insp} \quad (10)$$

$$\eta_{max} = \eta_{0.5} + 3.0 \sigma_{insp} \quad (11)$$

### 3.3 Event Tree Analysis

Event Tree는 검사와 관련된 모든 수리경로를 나타내는데 사용된다.<sup>(1)</sup> 아래의 그림 4는 생애주기가 50년인 어떠한 구조물에 대하여  $t_1$ 과  $t_2$ 에서 2번의 검사를 하였다고 가정하였을 때 발생할 수 있는 수리경로를 나타내는 것이다. 검사 회수(m)가 2번이 되면 수리경로는  $2^2$ , 즉 4가 된다.

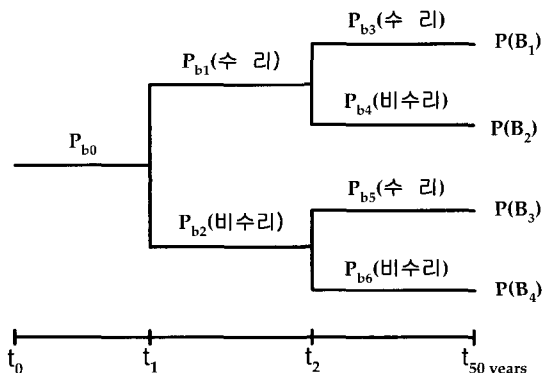


그림 4 사용기간 50년동안 2회 수리를 할 경우의 수리경로

우선, 시간  $t_1$ 에서 검사를 하면  $P_{b1}$ 과  $P_{b2}$  두 가지 경우가 나타날 수 있다. 첫번째는 수리를 행하는 경우로, 수리는 손상이 감지되어야 가능한 것이므로 이러한 수리경로의 확률( $P_{b1}$ )은 시간  $t_1$ 에서의 손상감지확률로 식 (12)로 표현할 수 있다. 두번째는 수리를 하지 않는 경우로서 수리를 하는 경우의 여사건으로 수리경로의 확률( $P_{b2}$ )을 식 (13)과 같이 생각할 수 있다.

$$P_{b1} = P_{\text{det}(t_1)} \quad (12)$$

$$P_{b2} = 1 - P_{b1} \quad (13)$$

결국, 생애주기 동안 두번의 모든 검사를 다 했을 경우, 그림 4와 같이 네가지 수리경로를 생각해 볼 수 있다. 그 중 첫번째 경우와 세번째 경우를 살펴보면 다음과 같다.

1) 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 에서 수리를 하는 경우 - Branch 1

이러한 경로의 확률은 시간  $t_1$ 에서의 손상감지확률과 시간  $t_2$ 에서의 손상감지확률의 곱으로 식 (14)로 나타낼 수 있다. 그림 5는 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 에서 수리과정을 거친 후의 생애주기 동안 파괴확률의 분포이다. 그림에서 점선은 수리를 하지 않았을 경우의 파괴확률을, 실선은 수리를 하였을 경우의 파괴확률을 나타낸다.

$$P(B_1) = P_{b1} \times P_{b3} = P_{\text{det}(t_1)} \times P_{\text{det}(t_2)} \quad (14)$$

2) 시간  $t_1$ 에서 비수리,  $t_2$ 에서 수리를 하는 경우 - Branch 3

이러한 경로의 확률은 식 (15)로 나타내어 지는데, 시간  $t_1$ 에서의 손상감지확률에 대한 여사건의 값과 시간  $t_2$ 에서의 손상감지확률과의 곱으로 정의된다. 이러한 경로의 생애주기 동안의 파괴확률의 분포는 그림 6이다.

$$P(B_3) = P_{b2} \times P_{b3} = (1 - P_{\text{det}(t_1)}) \times P_{\text{det}(t_2)} \quad (15)$$

따라서, 임의경로의 확률  $P(B_i)$ 는 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$P(B_i) = \prod_{i=1}^{2m} P_{bi} \quad (16)$$

결국 내진성능에 대한 유지보수를 행한 이후, 파괴확률은 식 (17)과 같이 유지보수후의 모든 가능경로에 대한 파괴확률에 그 경로가 차지하는 확률(branch 확률)을 곱함으로써 구할 수 있게 된다.

$$P_{f, Life} = \sum_{i=1}^{2m} P_{f, Life, i} P(B_i) \quad (17)$$

이를 이용하여, 유지보수후의 파괴확률을 구하게 되면, 그림 7과 같다. 그림의 점선은 수리를 하지 않았을 경우의 파괴확률을, 실선은 수리를 하였을 경우의 파괴확률을 나타낸다.

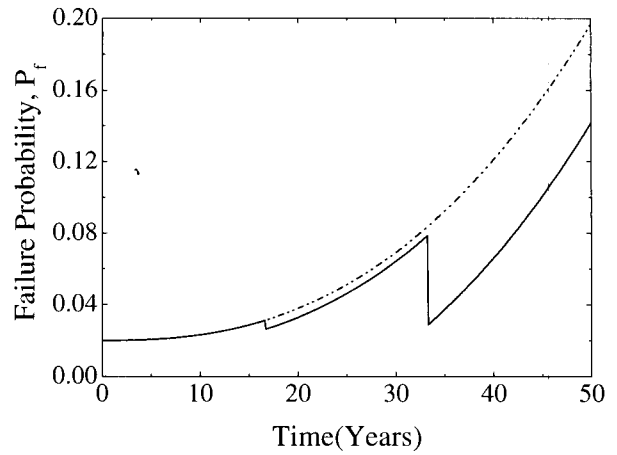


그림 5  $t_1, t_2$ 에서 수리할 경우의 파괴확률

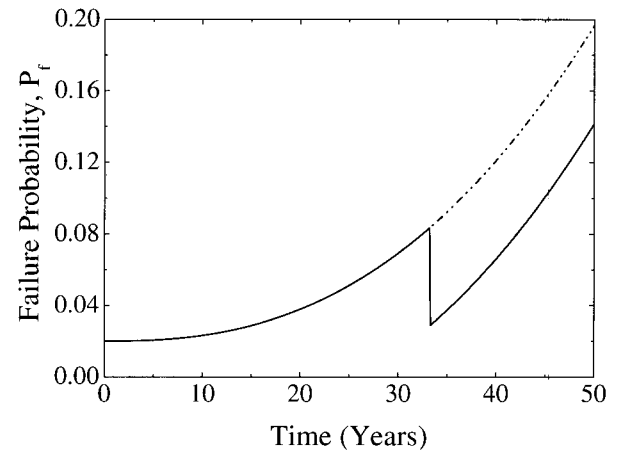


그림 6  $t_1$  비수리,  $t_2$  수리할 경우 파괴확률

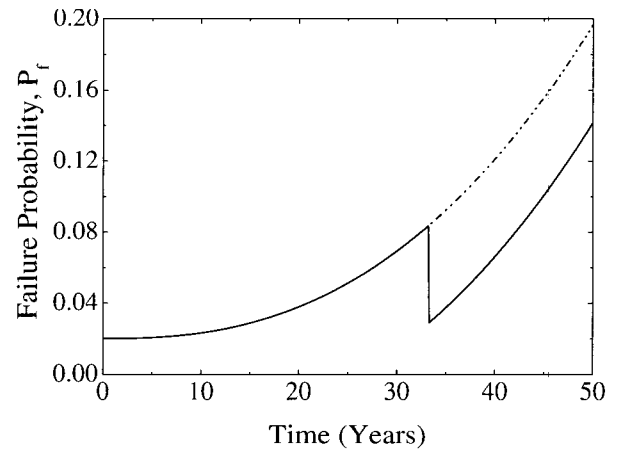


그림 7 유지보수후의 파괴확률

#### 4. 생애주기비용함수의 구성

시설물을 건설하여 이용하기 위해서는 기획·설계·건설·운영관리 및 폐기에 이르는 각각의 단계에서 비용이 발생한다. 생애주기비용(life cycle cost)라는 것은 구조물의 건설에서 사용기간 종료까지 기대되는 모든 비용에 대한 현재가치의 합으로 정의된다.<sup>(9),(10)</sup> 연구에서는 검사·보수 비용을 고려하여 식 (18)과 같이 생애주기비용함수를 구성하였다.

$$C_T = C_{INIT} + C_{INSP} + C_{REP} + C_{FAIL} \quad (18)$$

여기서,  $C_T$ 는 총생애주기비용,  $C_{INIT}$ 는 초기비용,  $C_{INSP}$ 는 검사비용,  $C_{REP}$ 는 수리비용,  $C_{FAIL}$ 는 파괴비용을 나타낸다.

교량구조물의 초기비용은 한국건설기술연구원에서 제안한 초기비용함수 모델을 이용하였다.<sup>(11)</sup> 이에 따르면, RC 슬래브교의 경우, 초기비용은 식 (19)와 같다.

$$C_{INIT} = 3477219 \times L^{0.65895} \times W^{0.80350} \times H^{0.25905} \quad (\text{원}) \quad (19)$$

여기서, L은 교장, H는 교고이며, W는 교폭이다.

검사비용은 검사방법의 질에 따라 그 값이 변화하게 된다. 즉, 검사방법의 질이 좋을수록, 검사시에 손상을 감지할 확률이 늘어나 작은 손상도 감지할 수 있게 되지만, 그에 따라서 검사비용이 증가하게 된다. 그러므로, 검사비용은 검사방법의 질, 즉  $\eta_{min}$ 에 따라서 변화하도록 하였다. 결국, 검사비용은 식 (20)과 같이 나타낸다.<sup>(1)</sup>

$$C_{ins} = \alpha_{ins}(1 - \eta_{min})^{20} \quad (20)$$

여기서,  $C_{ins}$ 는 실제 검사비용,  $\alpha_{ins}$ 는 이상적상태에서의 검사비용(검사로 손상을 100%감지할 때의 검사비용),  $\eta_{min}$ 는 감지 가능한 최소의 손상정도를 나타낸다. 총생애주기 동안 m번의 검사를 하였을 경우, 생애주기동안의 총검사비용  $C_{INSP}$ 은 한번의 검사에 사용되는 비용에, 검사를 행하는 그 시점에 대해 현재 가치화를 해주는 식 (21)로 표현된다.

$$C_{INSP} = \sum_{i=1}^m C_{ins} \frac{1}{(1+r)^{T_i}} \quad (21)$$

여기서, m은 검사회수,  $C_{ins}$ 는 한번의 검사에 사용되는 비용,  $T_i$ 는 검사간격, r은 할인율이다.

교량의 수리는 검사를 통하여, 손상이 감지될 경우에 행하게 된다. 즉, 교량의 수리여부의 결정은 검사의 질에 의해 좌우되는 것이다. 질이 좋은 검사방법을 사용하게 되면 작은 손상도 감지할 수 있고, 이러한 작은 손상에 대해 수리가 가능하게 되므로 수리가 보다 효과적이 된다. 질이 좋은 검사방법을 사용할 수록, 질이 좋은 수리도 가능하며 이러한 수리로 인하여 구조물은 초기상태와 거의 같은 상태를 갖게 된다. 그러나, 현실적으로 검사방법이 완벽한 것이 아니므로, 수리가 필요한 부분이라도 그냥 지나치게 될 수 있다. 교량구조물에 대한 수리이후의 손상정도는 수리 이전의 손상정도( $\eta_{str}$ )에서  $\eta_{rep}$ 로 감소하게 되며, 수리 이전의 손상정도에 따라서 수리후의 손상정도는 식 (22)로 정리해 볼 수 있다.

$$\eta_{rep} = \begin{cases} \eta_{str} & 0 < \eta_{str} < \eta_{min} \\ (\eta_{str} + \eta_{min})/2 & \eta_{min} < \eta_{str} < \eta_{max} \\ \eta_{0.5} & \eta_{str} > \eta_{max} \end{cases} \quad (22)$$

여기서,  $\eta_{rep}$ 는 보수작업 후의 손상정도,  $\eta_{str}$ 는 임의시간 t에

서의 구조물의 손상정도,  $\eta_{0.5}$ 는 검사방법이 평균적으로 감지할 수 있는 손상정도,  $\eta_{min}$ 는 검사방법이 감지할 수 있는 최소손상정도,  $\eta_{max}$ 는 검사방법이 감지할 수 있는 최대손상정도를 나타낸다. 수리비용은 식 (23)과 같이 교체비용과 수리효과의 곱으로 정의하였다.<sup>(1)</sup>

$$C_{rep} = \alpha_{rep} e_{rep} \quad (23)$$

여기서,  $\alpha_{rep}$ 는 교체비용,  $e_{rep}$ 는 수리효과로 교각의 휨모멘트강도비로 식 (24)로 정의하여, 수리로 인해 개선된 양만큼 수리비용에 포함되도록 하였다.

$$e_{rep} = \frac{M_{rep} - M_{before}}{M_{init}} \quad (24)$$

여기서,  $M_{init}$ 는 교각의 초기 휨모멘트강도,  $M_{before}$ 는 수리 전 교각의 휨모멘트강도,  $M_{rep}$ 는 수리후 교각의 휨모멘트강도를 나타낸다. 총생애주기 동안 m번의 검사를 하였을 경우, 생애주기동안의 총수리비용  $C_{REP}$ 은 모든 가능한 수리경로(2<sup>m</sup>개 수리경로)의 수리비용에 그 경로가 차지하는 확률(branch 확률)을 곱하여 얻게 된다. 수리비용은 식 (25)로 표현된다.

$$C_{REP} = \sum_{i=1}^{2^m} C_{rep,i} P(B_i) \quad (25)$$

여기서, m은 검사회수,  $C_{rep,i}$ 는 i번째의 수리비용,  $P(B_i)$ 는 전체 수리경로 중 i번째의 수리경로가 차지하는 확률이다.

파괴비용은 식 (19)로 표현되는 초기비용에 일정한 가중값(DS)를 곱한 값으로 식 (26)과 같이 표현하였으며<sup>(12),(13)</sup>, 파괴비용의 기대값은 파괴비용과 유지보수후의 파괴확률의 곱으로 식 (27)과 같이 정의하였다.

$$C_f = C_{INIT} \times DS \quad (26)$$

$$E[C_{FAIL}] = C_f P_{f, life} \quad (27)$$

여기서, DS는 구조물의 중요도에 따라서 정해지는 손상규모(damage scale),  $C_f$ 는 파괴비용,  $P_{f, life}$ 는 유지보수후의 파괴확률이다.

## 5. 최적유지보수 계획

이 연구에서 제시한 내진성능의 확보를 위한 유지보수계획 최적화에 대한 적용성을 검증하기 위해, 10경간 연속교량을 선정하였으며, 그림 8과 같이 단자유도로 모델링하였다. 예제교량에 대하여 제4장에서 정의한 생애주기비용이 최소가 되는 검사 및 수리회수를 조사하였으며, 지반가속도 및 지반조건에 대한 경향을 살펴보았다. 교량 및 지진의 특성값을 표 1에 나타내었다. 여기에서 검사간격은 일정하다고 가정하였다.

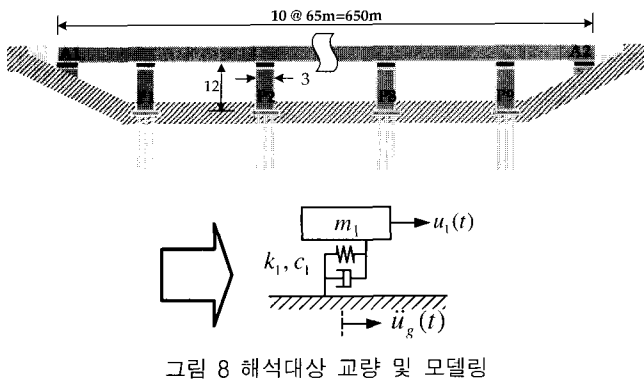


그림 8 해석대상 교량 및 모델링

표 1 교량 특성치 및 지진특성치

교장	10 @ 65m	교각높이	12m
교각형식	원형RC교각	상부구조물 중량	1,695tonf (1개교각당)
콘크리트압축강도	$2.05 \times 10^7 \text{N/m}^2$	철근항복강도	$4.0 \times 10^8 \text{N/m}^2$
RC탄성계수	$2.16 \times 10^7 \text{KN/m}^2$	교각감쇠비	5%
지진발생확률(50년)	0.1	강진지속시간	16.6초
교량생애주기	50년	할인율	2%

교량구조물에 작용하는 지반운동은, 교량 설계의 기준이 되는 도로교시방서의 내진규정을 이용하여, 입력지반운동을 가속도계수와 지반계수에 의해 구성되는 응답스펙트럼의 형태로 모델링하였다.<sup>(12),(15)</sup> 다음의 그림 9와 그림 10은 도로교시방서규정의 설계응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼밀도 함수를 나타낸 것이다.

### 5.1 가속도 · 지반계수별 최적유지보수계획

도로교시방서에 규정되어 있는 가속도계수와 지반계수 조합별로 만들어진 입력지반운동을 이용하여, 생애주기비용이 최소가 되는 내진성능확보를 위한 최적의 유지보수계획, 즉 검사 및 수리회수의 결정에 대해 조사하였다.

그림 11은 가속도계수(A)가 0.154, 지반계수(S)가 1.0인 경우의 생애주기비용과 검사회수와의 관계를 나타낸 것이다. 이때 사용한 검사방법은 3.5% ( $\eta_{min}$ ) 이상의 손상을 감지하는 방법이다. 그림의 가로축은 검사회수, 세로축은 생애주기비용이다. 초기비용은 검사회수가 증가하여도 일정한 값을 보이지만, 검사비용과 수리비용은 검사회수가 증가할수록 그 비용이 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편 파괴비용은 검사회수가 증가함에 따라, 유지보수를 통하여 파괴확률이 감소하여 그 비용이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 네가지 비용(초기, 검사, 수리, 파괴비용)의 합으로 정의되는 총생애주기비용이 최소가 되는 검사회수는 2회, 즉 16.7년에 한번씩의 검사를 행하는 것이 최적안이 된다.

이때의 최적의 수리회수는 그림 12와 같이 1회가 된다. 검사는 16.7년과 33.4년에 두번 행하게 되지만, 사용한 검사방법에 의하면 첫번째 검사때인 16.7년에는 손상이 감지되지

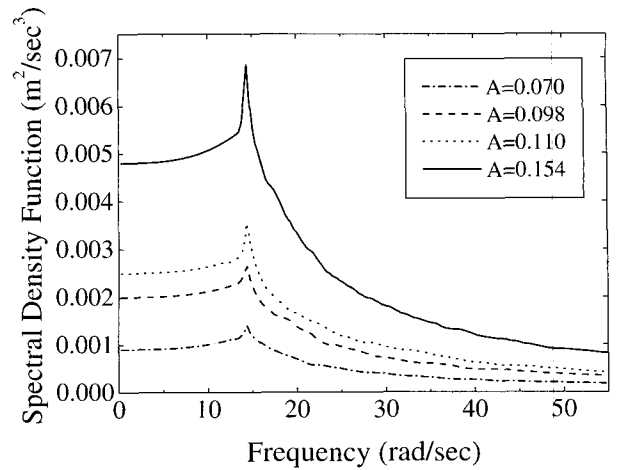


그림 9 가속도계수 값에 따른 스펙트럼 밀도함수의 변화

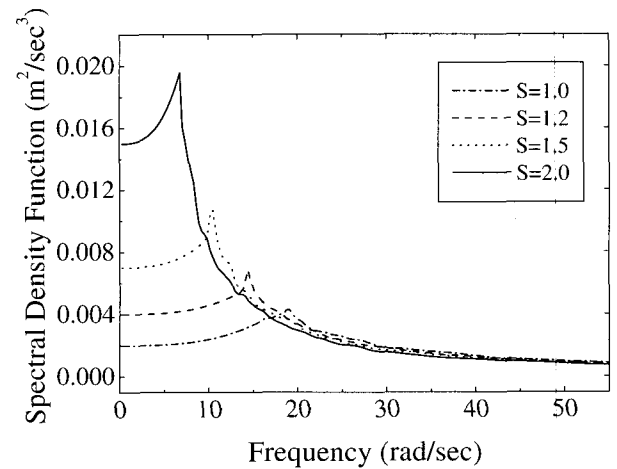


그림 10 지반계수 값에 따른 스펙트럼 밀도함수의 변화

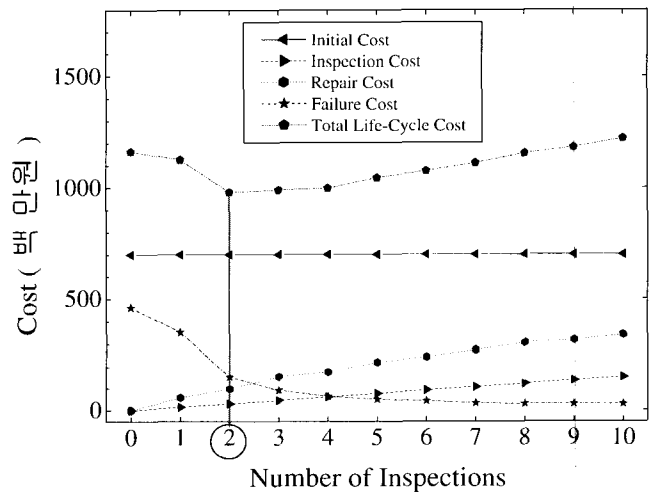


그림 11 A=0.154, S=1.0일때 최적검사회수

않았기 때문에 수리 없이 지나가고, 두번째 검사를 하게 되는 33.4년에 이르게 되어서야 수리를 하는 것이다. 그림 12를 보면, 수리를 하지 않을 경우 점선과 같이 파괴확률이 계속 증가하지만, 수리로 인해 실선과 같이 파괴확률이 감소, 즉 내진성능이 보장되었음을 알 수 있다.

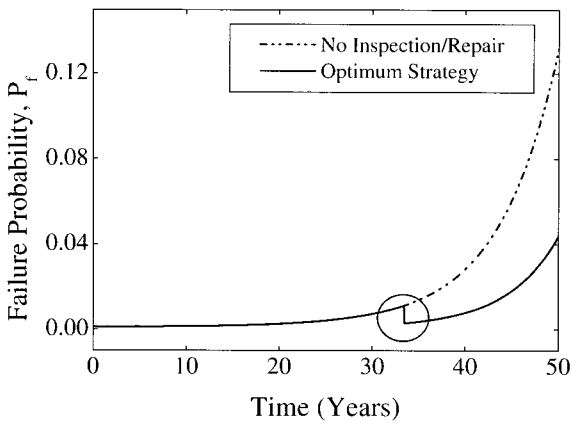


그림 12 A=0.154, S=1.0일때 최적수리회수

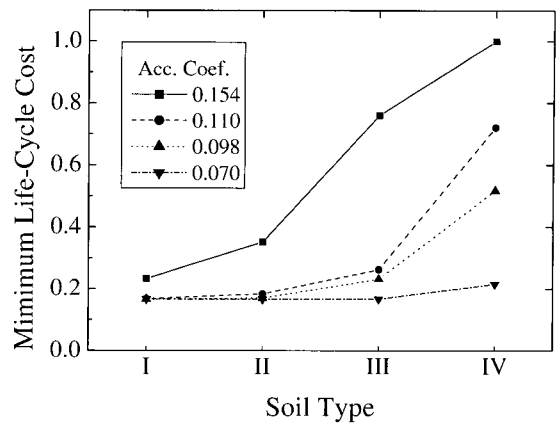


그림 13 도로교시방서규정의 가속도·지반계수 조합별 최소생애주기비용

### 5.2 가속도계수와 지반계수 조합별 유지보수 경향

도로교시방서 규정의 가속도계수와 지반계수의 조합별로 최적의 유지보수회수의 결정을 위한 해석을 수행하였다. 그림 13은 최소생애주기비용의 변화를, 그림 14는 검사회수의 변화를 나타낸다. 그림 13의 최소생애주기비용은 가속도계수(A)가 0.154이고, 지반계수(S)가 2.0인 경우의 생애주기비용에 대한 상대값으로 표현한 것이다. 그림에서 나타나는 것처럼 가속도계수와 지반계수가 증가할수록, 생애주기비용과 검사회수가 증가한다. 이는 같은 물성치를 가지는 구조물에 대하여 가속도계수와 지반계수의 증가로 인하여, 구조물의 파괴확률이 증가하게 되고 파괴비용도 증가하게 됨으로써 생애주기비용과 검사회수가 증가하게 되는 것이다.

그림에서 가속도계수가 0.07인 약진구역의 경우는 지반계수가 증가하여도, 검사회수의 변화는 거의 없다. 즉 지반계수의 변화에 민감하지 않다. 그러나, 가속도계수가 0.154인 경우, 지반계수가 증가함에 따라 검사회수가 급격히 증가, 즉 검사회수가 지반계수에 민감하다는 것을 알 수 있다.

### 5.3 검사방법의 손상감지능력별 유지보수 경향

검사방법의 손상감지능력, 즉 검사의 질을 변화시키면서 검사의 질과 생애주기비용 및 검사회수와와의 관계를 알아보았다. 검사를 하지 않을 경우와 3.5%이상, 7%이상, 10.5% 이상의 손상을 감지하는 검사방법의 네가지 경우로 나누어 최적의 검사회수의 결정에 대해 알아보았다.

다음의 그림 15는 가속도계수(A)가 0.154이고 지반계수(S)가 1.5일 경우, 검사의 질별 최소생애주기비용과 검사회수를 나타낸 그림이다. 이때의 최소생애주기비용은 수리를 하지 않을 경우에 대한 각 검사방법의 상대값으로 나타낸 것이다. 손상감지능력이 뛰어난 검사방법을 사용할수록, 생애주기비용과 검사회수가 감소하는 것을 볼 수 있다.

즉, 손상감지능력이 좋은 검사방법이 생애주기비용 및 검사회수를 줄이는 등 보다 효과적임을 알 수 있는데, 이는 손상의 조기발견으로 인하여, 내진성능확보가 가능하기 때문인 것으로 판단된다.

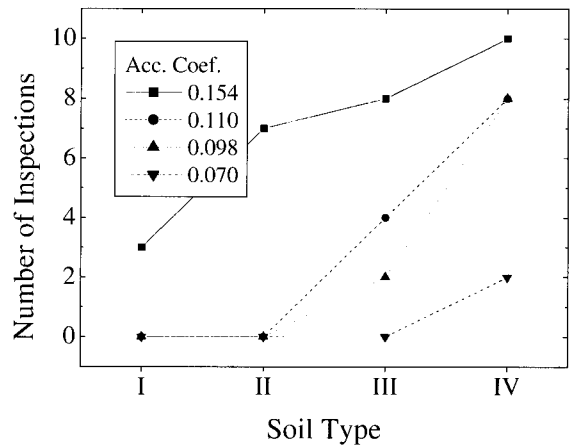


그림 14 도로교시방서규정의 가속도·지반계수 조합별 최적 검사회수

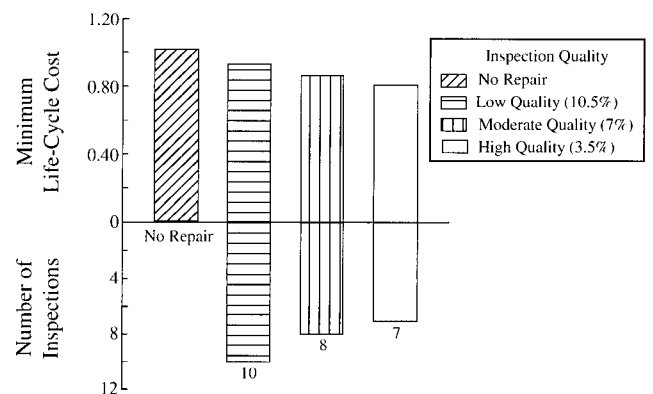


그림 15 A=0.154, S=1.5일 때, 검사의 질별 최적유지보수회수

## 6. 결 론

이 논문에서는 교량의 내진성능 확보를 위한 유지보수계획에 관하여 연구하였다. 검사·수리비용을 고려하여 생애주기비용함수를 구성하고, 이를 최소화하는 최적의 검사 및 수리회수를 제시하였다. 손상함수를 통하여 내진성능저하모델을 정의하였으며, event tree analysis를 이용하여 유지보수 후의 파괴확률을 산출하였다.

제시된 방법으로 도로교시방서 규정의 가속도계수와 지반계수에 따른 최적유지보수를 알아보았다. 그 결과 가속도

계수가 증가할수록, 지반계수가 증가할수록 생애주기비용을 최소화하는 검사회수가 증가하며, 이때의 최소생애주기비용 역시 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 이는 같은 물성치를 가지는 구조물에 대하여, 가속도계수와 지반계수의 증가에 따라 파괴확률이 증가하여, 이로 인한 파괴비용이 증가됨으로써 생애주기비용 및 검사회수가 증가하는 것으로 판단된다.

또한, 손상감지능력이 뛰어난 검사방법을 사용할수록, 생애주기비용을 최소화하는 검사회수와 이에 따른 최소생애주기비용이 감소하는 것으로 나타났다. 손상감지능력이 좋은 검사방법은 그 검사방법 자체는 고가이지만, 작은 손상을 감지하고 이를 수리함으로써 전체 생애주기비용에 미치는 효과가 검사방법 자체의 비용에 비해 보다 탁월한 것을 알 수 있다. 즉, 검사의 질이 좋은 방법이 손상의 조기발견으로 인한 내진 성능의 확보정도가 크기 때문에 보다 효과적임을 나타낸다.

제시된 방법은 교량구조물의 성능저하가 30년에 10%가 되도록 내진성능모델을 정의하였다. 그런데, 실제교량구조물의 경우 구조물의 형식과 현장의 조건들에 따라 성능저하 정도가 달라질 수 있으므로, 이에 대한 구체적인 연구가 필요하다. 그러나 이 연구에서 제시하는 방법은 내진성능확보를 위한 유지보수계획의 방법론에 관한 기초적인 연구로서 그 의미가 있다.

### 감사의 글

이 연구는 2001년 두뇌한국21(BK21) 사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학기술재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 이루어 졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Mori, Y. and Ellingwood, B. R., "Maintaining reliability of concrete structures. II: Optimum inspection/repair," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 3, 1994, pp. 846-862.
2. Estes, A. C., "A System Reliability Approach to the Lifetime Optimization of Inspection and Repair of Highway Bridges," Ph. D. Thesis, University of Colorado,

- Boulder, CO, 1997.
3. Tanaka, H. and Toyoba-Makino, M., "Cost-based optimal relation between inspection time and assessment time for random fatigue crack growth," *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 13, 1998, pp. 69-76.
4. 한국지진공학회, "국제내진설계 학술세미나", 보고서, 1999.
5. Priestly, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley and Sons, Inc., N.Y., 1996.
6. Nawy, E. G., *Reinforced Concrete : A Fundamental Approach*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1984.
7. Newland, D. E., *An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis*, John Wiley and Sons Inc., N.Y., 1993.
8. Ellingwood, B. R. and Mori, Y., "Reliability-based service life assessment of aging concrete structures," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 5, 1993, pp. 1600-1621.
9. Frangopol, D. M., "Bridge safety and reliability," ASCE, 1999.
10. Ang, A. H-S. and Leon, D. D., "Target reliability for structural design based on minimum expected life-cycle cost," *Proc. of 7<sup>th</sup> IFIP WG7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural System*, 1996, pp. 71-84.
11. 건설교통부, "교량관리체계(BMS) 개선에 관한 연구", 보고서, 1998.
12. 고현무, 송준호, "사용기간 비용 최소화를 위한 지진격리교량의 경제성평가," 대한토목학회 논문집, 제19권, 제1-4호, 1999, pp. 539-550.
13. 박관순, 고현무, 함대기, "점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 최적통합설계," 대한토목학회 논문집, 제22권, 제2-A호, 2002, pp. 413-422.
14. 한국원자력안전기술원, "원전구조물 신뢰성 해석기법 연구", 보고서, 2000.
15. 송준호, "최소 사용기간비용 내진설계에 의한 지진격리교량의 경제성 평가", 석사학위논문, 서울대학교, 1999.