

## 탄성계수에 대한 SA 손상도 곡선의 안정성 Stability of SA Fragility Curves on Elastic Modulus

이종헌\*  
Jong-Heon Lee\*

### <Abstract>

In this paper, the stability of SA(Spectral Acceleration) fragility curves is studied for the two sets of elastic modulus of concrete. In doing that, general purpose structural analysis program and generally used probability density function are used. The results of structural analysis are represented by Bernoulli distribution which says damage or no damage. By the use of Maximum Likelihood Method, two parameters of lognormal distribution - median and standard deviation - are found. With them, the fragility curves are constructed.

**Keywords :** *earthquake, Maximum Likelihood Method, fragility curve*

### 1. 서론

1985년 Mexico 지진이 발생한 것을 비롯하여 1988년 Armenia 지진, 1989년 Loma Prieta 지진, 1994년 Northridge 지진, 그리고 1995년 일본 Kobe 지진과 최근 2005년 터키 지진 등 20 세기에 들어와서 세계적으로 지진 활동이 다시 활발해지고 있으며 그에 따른 피해 또한 크게 발생하고 있다.

최근 우리나라에서 큰 지진은 발생하지 않았지만, 삼국시대부터 기록된 역사 문헌들 속에서 밝혀진 지진 기록은 상당히 많다. 역사적으로 우리나라에서는 15세기와 18세기 사이에 많은 지진 발생 기록이 있으며 건물에 상당한 피해를 줄 수 있는 지진도 많이 발생했음을 알 수 있다. 그 이후 20세기 초반까지는 지진

활동이 다소 약화되었는데 이것은 지진휴지기(Seismic Gap)로 판단된다. 그러나 지진 활동이 약화되었다는 것은 지각에 축적된 탄성에너지가 방출되지 않았음을 의미하므로 추후 다시 지진 활동이 활발한 시기가 왔다고 판단할 수 있다. 1936년 지리산 쌍계사 지진(M = 5.3), 1968년 동해에서 발생한 지진(M = 5.4), 1978년 충남 홍성에서 발생한 지진(M = 5.0), 1996년 강원도 영월 지진(M = 4.5) 등은 약 2세기 정도의 지진 휴지기를 거쳐 근래에 우리나라에서 다시 지진 활동이 활발해지고 있음을 보여준다.

최근 세계 각지에서 발생한 강진으로 인한 피해 사례를 조사한 결과에 의하면 지진 피해 규모는 지진에 대한 사회 전체의 준비 태세와 내진설계 기술의 수준 및 시공의 정밀도에 따

\* 정회원, 경일대학교 토목공학부 교수, 工博  
E-mail ; leejh@kiu.ac.kr

\* prof. School of Civil Engineering, Kyungil University

라서 큰 차이가 있는 것으로 알려졌다. 인명과 건축물 및 사회기반 시설물을 포함한 사회-경제 시스템에 대한 지진 피해를 최소화하기 위해서는 지진발생의 장단기 예보, 지진 조기 경보 시스템, 국가적 차원의 지진 위험 관리 시스템 구축, 건축물 및 사회기반 시설물에 대한 내진설계의 방책이 있으나 그 중 내진설계 방책이 가장 신뢰성이 높고 항구적인 방책으로 판단된다.

기존에 사용해오던 신뢰성을 이용한 방법들은 부재 하나 하나의 안전성 수준을 평가하기에는 실용적이나, 전체 구조물에 대한 안전성에 대해서는 시스템 신뢰성 적용 방법이 실용적으로 사용되지 못하고 있다. 특히 지진에 대한 구조물의 위험성 정도를 해석하고자 할 때는 여러 손상 단계에 따른 구조요소의 취약성을 평가할 필요가 있는데 기존의 방법으로는 이러한 요구를 만족시킬 수 없다. 따라서 지진의 규모나 구조물의 특성, 지반과 구조물의 상호작용, 현장 조건 등 예측에 다수의 불확실성이 존재하는 경우 구조물의 취약성 또는 손상도를 평가하는 방법이 필요하다.

손상도 곡선은 70년대 초에 행해진 원자력 발전소의 지진 확률적 위험도 평가로부터 시작되었으며, 손상을 여러 단계로 구분하여, 각 단계별로 구조물의 취약성을 지진의 규모나 구조물의 특성, 지반과의 상호작용, 현장 조건 등을 고려하여 평가하는 방법으로, 교량 등의 구조물은 내진 성능이 요구되는 바, 면진장치를 이용할 경우 지진으로 인한 영향에 따른 구조물 손상의 정도를 손상도 해석을 할 필요가 있다.

본 논문에서는 범용 구조해석 프로그램과 일반적인 확률밀도함수를 사용하여 면진 콘크리트 교량의 손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하였다. 손상도 곡선을 작성하는 데에는 2변수를 갖는 대수정규분포를 사용하였으며, 지진의 여러 특성 중 스펙트럼 가속도(SA)에 대해 납면진 받침(LRB)을 갖는 교량의 손상도 곡선을 구하였다.

## 2. 손상도 곡선

### 2.1 손상도 곡선의 정의

손상도 곡선이란 어떤 특정한 수준의 지반

운동을 받을 때 구조물이 손상의 상태에 도달하거나 초과하는 확률을 나타내는 것이다. 따라서 특정한 손상 상태에 대한 손상도 곡선은 여러 수준의 지반운동에 대해 손상 상태에 도달하거나 초과하는 조건부 확률을 계산하여 얻는다. 이렇게 계산된 조건부 확률과 특정 지반 운동의 특성과의 관계를 나타낸 그림이 그 손상 상태에 대한 손상도 곡선이다. 조건부 확률은 다음과 같이 정의한다.

$$P_d = P[D \geq d | Y = y] \quad (1)$$

여기서,  $P_d$  = 지반운동의 특성  $y$ 에 대해 특정 손상 상태  $d$ 에 도달하거나 초과하는 확률이고,  $D$  = 손상을 나타내는 확률 변수,  $Y$  = 지반운동의 특성을 나타내는 확률변수이다.

### 2.2 손상도 곡선의 매개변수

손상도 곡선을 대수정규분포로 가정할 때 그 매개변수인 중앙값(median)과 표준편차(standard deviation)를 구하는 데에는 Maximum Likelihood Method를 사용한다. Maximum Likelihood Method는 점 추정방법에서 흔하게 사용된다. 모멘트방법과는 대조적으로, Maximum Likelihood Method는 매개변수의 점 추정을 직접 수행할 수 있는 절차를 제공해 준다. 평균이나 표준편차 등의 매개변수를  $\theta$ 라 할 때 밀도함수가  $f(x; \theta)$ 인 확률변수  $X$ 를 생각하면, 가능한  $\theta$ 의 값 중에서, 관측값  $x_1, \dots, x_n$ 을 얻는 가능성이 최대가 되게 하는 값을 구하는 것이 Maximum Likelihood Method의 기본 개념이다.

특정 표본값  $x_i$ 를 얻는 가능성은  $x_i$ 에서 계산된 확률밀도함수의 값에 비례한다고 가정할 수 있다. 따라서 매개변수가  $m$ 개일 때 임의의 추출에서  $n$ 개의 독립적인 관측값  $x_1, \dots, x_n$ 을 얻는 가능성은 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} L(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m) \\ = f(x_1; \theta_1, \dots, \theta_m) f(x_2; \theta_1, \dots, \theta_m) \\ \dots f(x_n; \theta_1, \dots, \theta_m) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)는  $x_1, \dots, x_n$ 을 얻을 Likelihood Function이다. 그러면  $\theta$ 의 Maximum Likelihood Estimator  $\hat{\theta}$ 는 Likelihood Function  $L(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m)$ 을 최대로 하는 값이다. 그 값은  $L(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m)$ 를  $\theta_j (j=1, \dots, m)$ 에 대해 미분하여 그 도함수를 0으로 하면 일반적으로 절대 최대값을 얻는다. 즉, 다음 식의 해를 구하여  $\hat{\theta}$ 를 얻는다.

$$\frac{\partial L(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m)}{\partial \theta_j} = 0 \quad (3)$$

$(j=1, \dots, m)$

그런데 Likelihood Function이 곱의 형태이므로 그 로그함수의 최대값을 구하는 식 (4)를 이용하는 것이 보다 편리하다.

$$\frac{\partial \log L(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m)}{\partial \theta_j} = 0 \quad (4)$$

$(j=1, \dots, m)$

식 (4)로부터  $\hat{\theta}$ 를 구하면 식 (3)으로부터 구한 값과 같이 된다.

### 2.3 손상도 곡선의 작성

손상도 곡선은 1970년대와 1980년대 초반에 행해진 원자력 발전소에 대한 확률적 위험도에 관한 해석방법을 개발할 때 2변수 대수정규분포를 가정하였으며<sup>4)</sup>, 구조물의 손상을 여러 단계로 구분한 후, 각 단계별로 구조물의 취약성을 지진의 규모나 구조물의 특성, 지반의 상호작용, 현장 조건 등을 고려하여 평가하는 방법이다<sup>5)</sup>. 이를 이용하면 실제 구조물의 강도와 설계강도를 연결하는 안전계수를 곱의 형태로 나타낼 때 얻을 수 있는 수학적 편의를 도모한다. Shinozuka는 손상도 곡선을 2변수 대수정규분포함수의 형태로 나타내었으며, 여기서 2변수(중앙값과 표준편차)는 Maximum Likelihood Method를 이용하여 구할 수 있다<sup>6,7)</sup>.

본 연구에서 사용하는 Likelihood Function은 다음과 같다.

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{1-x_i} \quad (5)$$

여기서,  $F(\cdot)$ 는 특정 상태의 손상에 대한 손상도 곡선을 나타내며,  $a_i$ 는  $i$ 번째 교량에 대한 지진의 특성값(PGA 등)이고,  $x_i = 1$  또는 0은 지진의 특성값이  $a_i$  이하일 때 교량이 손상을 받는 경우와 받지 않는 경우를 나타내며,  $N$ 은 대상 교량 전체의 수이다. 대수정규분포를 가정하면  $F(a)$ 는 다음 형태를 갖는다.

$$F(a) = \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{a}{c_m} \right)}{\zeta} \right] \quad (6)$$

여기서,  $\Phi[\cdot]$ 는 표준화 정규분포함수이고,  $c_m$ 은 중앙값,  $\zeta$ 는 표준편차이다.

식 (6)에서 두 개의 매개변수  $c_m$ 과  $\zeta$ 로는,  $L$ 을 최대로 하기 위해  $\ln L$ 을 최대로 하는 다음 식을 만족하는  $c_e$ 와  $\zeta_e$ 를 사용한다.

$$\frac{d \ln L}{dc_m} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (7)$$

각각의 PGV에 해당하는 손상을 손상등급별로 합한 다음 앞서 언급한 Maximum Likelihood Method를 사용하여 각각의 손상등급에 해당하는 손상도 곡선을 작성하였다.

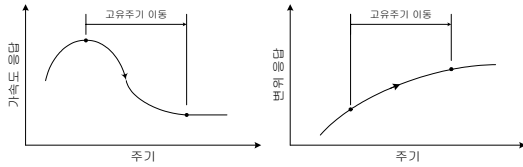
### 2.4 손상등급의 정의

본 연구에 사용한 교량의 손상도 해석을 위한 손상등급은 크게 Major와 Minor의 두 가지로 분류하였으며, Major의 경우 17개의 교각 중에 8개 이상, Minor의 경우 1개 이상의 교각이 파괴가 되는 경우로 정하였다.

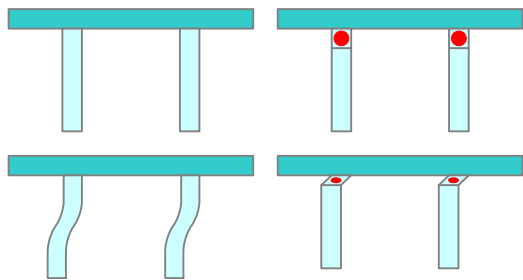
### 2.5 면진 받침

일반적으로 면진구조물은 면진장치를 사용하여 구조물의 고유주기를 인위적으로 길게 함으로써, 지진의 탁월주기 대역을 벗어나도록 설계한 구조물이다(Fig. 1). 예를 들어 교각의 강성이 큰 교량의 경우 교각과 상부구조의 연결부에 적층고무 등과 같은 면진장치를 설치하여 구조물의 고유주기를 강제적으로 늘리기도 한다(Fig. 2). 현재 국내에서는 한국산업규격과 미국

설계기준(AASHTO, IBC) 및 일본 설계기준(도로교 받침판법, 면진구조물설계지침) 등을 준용하여, 면진구조물을 설계한다(Naeim et al., 1999).



(a) 가속도응답의 감소 (b) 변위응답의 증가  
Fig. 1 면진 구조물의 지진시 응답



(a) 일반 교량 (b) 면진 교량  
Fig. 2 면진 교량의 지진시 거동

LRB 면진장치는 Fig. 3과 같이 탄·소성 거동을 하게 되면 고무의 유연성에 의해 구조물의 고유주기를 이동시켜 지진력을 감소시키고, 납의 소성거동에 의해 지진에너지를 흡수한다. 따라서 LRB 면진장치의 설계시 고려할 중요한 사항은 구조물에 전달되는 지진력과 변위를 최소로 하는 고무의 유연성과 납심의 크기를 어떻게 조합하느냐를 결정하는 것이다. Fig. 3에서  $K_u$ 는 LRB 면진장치의 항복 전 강성(1차 강성),  $K_d$ 는 항복 후 강성(2차 강성),  $K_{eff}$ 는 유효강성,  $Q_d$ 는 납심의 항복강도,  $F_y$ 는 초기항복력,  $F_d$ 는 최대수평력,  $x_y$ 는 납심의 항복변위 및  $x_d$ 는 LRB 면진장치의 최대변위이다.

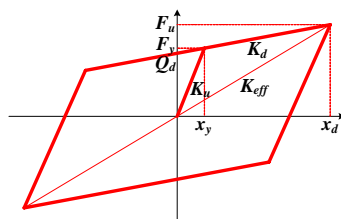


Fig. 3 LRB 면진 장치의 특성 곡선

일반적으로 구조물의 면진설계에서는 구조물의 장주기화를 가장 큰 목적으로 한다. 따라서 LRB 면진장치를 이용한 구조물의 면진설계시, 구조물을 설계 고유주기로 이동시킬 수 있는 LRB 면진장치의 소성 전·후의 강성( $K_u$ ,  $K_d$ )을 정하고, 부가적인 감쇠효과를 위한 납심의 크기는 납의 항복강도( $Q_d$ )가 구조물의 질량의 5% 정도의 것을 사용하는 것을 추천하고 있다(Ghobarah & Ali, 1988).

### 3. 수치해석 및 고찰

#### 3.1 교량 모델

손상도 곡선의 작성을 위하여 현재 국내 고속국도 상에 설계 시공된 18경간의 길이가 800m, 폭이 30m인 PSC Box Girder 교량인 손곡교를 모델로 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000으로 모델링 하였다.

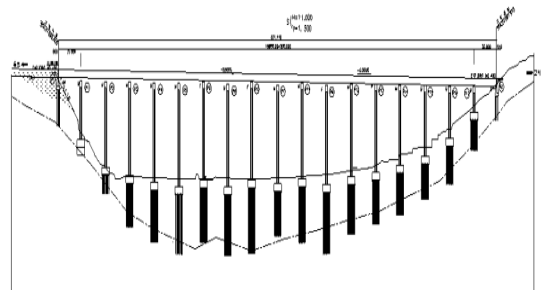


Fig. 4 손곡교의 종단면도

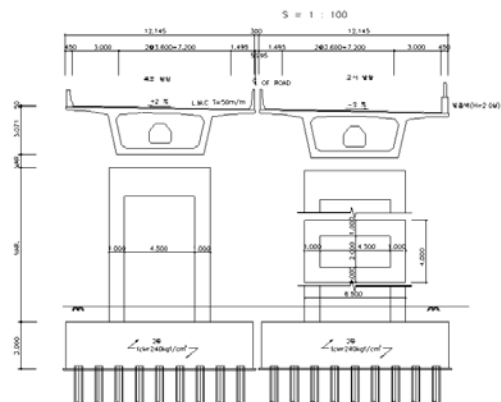


Fig. 5 손곡교의 횡단면도

#### 3.2 재료의 성질

본 연구에서는 콘크리트와 철근의 재료특성을 확률변수로 취급하여 교량의 확률론적 구

조해석을 수행하였다. 손곡교의 콘크리트 강도는 공칭적으로 동일하지만 통계적으로 다른 교량을 얻기 위하여 엑셀프로그램을 이용하여 상부 슬래브와 기둥의 콘크리트강도를 각각 80개씩 난수 발생시켜 이를 이용하였으며, 철근 역시 대수정규분포를 따르는 80개 항복강도의 난수 값을 얻어내어 이를 이용하여 첫 번째 교량군(Bridge 1)을 생성하고, 다시 콘크리트의 탄성계수를 난수발생 시켜 통계적으로 다른 두 번째 80개의 교량군(Bridge 2)을 생성하여 해석한 결과를 두 교량군의 교량을 1:1로 비교·분석하였다.

### 3.3 적용지진

지진의 지반 운동에 대하여는 Howard et al.이 생성한 시간 이력을 사용하였다. 이들 시간 이력의 적용 영역은 1846년에 발생한 규모 6.5의 지진의 진앙지였던 Arkansas주의 Marked Tree로부터 40km에서 100km의 범위이다. Howard et al.은 규모 M=6.5, 7.0, 7.5, 8.0에 대해 각각 진앙지로부터의 거리 R = 40km, 60km, 80km, 100km에 해당하는 인공지진을 50개씩 생성시켰으나, 본 연구에서는 계산의 편의를 위해 각 항에서 처음 5개씩의 지진을 택하였다<sup>8)</sup>.

이들 80개의 지진을 80개의 교량에 1대1로 적용하여 구조해석을 수행하였다. 이때 교량에는 지진이 종방향과 횡방향에 모두 작용하는 것으로 하였다. 여기서 지진의 이름 중 처음 2자리는 규모 M에 관련되며, 다음의 3자리는 진앙지로부터의 거리를 나타낸다.

### 3.4 구조해석

구조해석에서 얻어진 SAP2000의 출력 결과에서 교량의 각각의 주기를 알 수 있다. 따라서 각 지진의 가속도 스펙트럼에 곡선에서 그 주기에 해당하는 가속도를 읽으면 각 경우에 대한 스펙트럼 가속도를 읽을 수 있다. 이렇게 얻어진 각 교량의 주기를 Maximum Likelihood Method를 이용하여 스펙트럼 가속도를 구한 것이 Table 1 ~ 2 이다.

Table 1 ~ 2의 값과 해석 결과 얻어진 각 교량의 안전 또는 파괴 여부를 입력 데이터로 하여 MLM 프로그램을 사용하여 손상도 곡선을 작성하기 위한 대수정규분포의 중앙값과 표준편차를 구한 것이 Table 3 ~ 4이다.

Table 1 해석 결과(Non)

No	SA (g)	NON			
		Bridge 1		Bridge 2	
		Major	Minor	Major	Minor
1	0.0304	1	1	1	1
2	0.0651	1	1	1	1
3	0.0150	0	1	1	1
4	0.0329	1	1	1	1
5	0.0178	0	1	0	1
6	0.0163	0	1	1	1
7	0.0508	1	1	1	1
8	0.0107	0	1	0	1
9	0.0240	0	1	0	1
10	0.0115	0	0	0	0
11	0.0093	0	0	0	0
12	0.0310	0	1	1	1
13	0.0099	0	0	0	1
14	0.0193	0	0	0	0
15	0.0084	0	0	0	0
16	0.0091	0	0	0	0
17	0.0210	0	1	0	1
18	0.0091	0	0	0	0
19	0.0144	0	0	0	0
20	0.0071	0	0	0	0
21	0.0554	1	1	1	1
22	0.1151	1	1	1	1
23	0.0347	1	1	1	1
24	0.0869	1	1	1	1
25	0.0363	1	1	1	1
26	0.0286	1	1	1	1
27	0.0660	1	1	1	1
28	0.0239	1	1	1	1
29	0.0469	1	1	1	1
30	0.0210	0	1	0	1
31	0.0178	1	1	1	1
32	0.0445	1	1	1	1
33	0.0213	0	1	1	1
34	0.0376	1	1	1	1
35	0.0163	0	0	0	0
36	0.0152	0	1	0	1
37	0.0315	1	1	1	1
38	0.0162	0	1	0	1
39	0.0263	0	1	0	1
40	0.0147	0	0	0	0

Table 1 해석 결과(Non) (계속)

No	SA (g)	NON			
		Bridge 1		Bridge 2	
		Major	Minor	Major	Minor
41	0.0822	1	1	1	1
42	0.2272	1	1	1	1
43	0.0855	1	1	1	1
44	0.1555	1	1	1	1
45	0.0541	1	1	1	1
46	0.0417	1	1	1	1
47	0.0951	1	1	1	1
48	0.0559	1	1	1	1
49	0.0894	1	1	1	1
50	0.0368	1	1	1	1
51	0.0309	1	1	1	1
52	0.0584	1	1	1	1
53	0.0421	1	1	1	1
54	0.0537	1	1	1	1
55	0.0306	1	1	1	1
56	0.0283	1	1	1	1
57	0.0370	1	1	1	1
58	0.0335	0	1	1	1
59	0.0337	1	1	1	1
60	0.0243	0	1	0	1
61	0.1366	1	1	1	1
62	0.3097	1	1	1	1
63	0.1943	1	1	1	1
64	0.2288	1	1	1	1
65	0.1248	1	1	1	1
66	0.1017	1	1	1	1
67	0.1314	1	1	1	1
68	0.1093	1	1	1	1
69	0.1191	1	1	1	1
70	0.0689	1	1	1	1
71	0.0798	1	1	1	1
72	0.0778	1	1	1	1
73	0.0807	1	1	1	1
74	0.0796	1	1	1	1
75	0.0542	1	1	1	1
76	0.0503	1	1	1	1
77	0.0684	1	1	1	1
78	0.0616	1	1	1	1
79	0.0726	1	1	1	1
80	0.0429	1	1		1
no. of fail		55	69	60	70

주. 1 : 파괴, 0 : 안전

Table 2 해석 결과(LRB)

No	SA (g)	LRB			
		Bridge 1		Bridge 2	
		Major	Minor	Major	Minor
1	0.08403	0	0	0	0
2	0.09995	0	0	0	0
3	0.05193	0	0	0	0
4	0.04727	0	0	0	0
5	0.04535	0	0	0	0
6	0.04753	0	0	0	0
7	0.07103	0	0	0	0
8	0.02940	0	0	0	0
9	0.03032	0	0	0	0
10	0.03105	0	0	0	0
11	0.02956	0	0	0	0
12	0.06456	0	0	0	0
13	0.02347	0	0	0	0
14	0.02788	0	0	0	0
15	0.02537	0	0	0	0
16	0.02177	0	0	0	0
17	0.05382	0	0	0	0
18	0.02098	0	0	0	0
19	0.02417	0	0	0	0
20	0.02148	0	0	0	0
21	0.11839	0	0	0	0
22	0.24569	0	1	1	1
23	0.09247	0	1	0	0
24	0.09372	0	0	0	0
25	0.12244	0	0	0	0
26	0.06322	0	0	0	0
27	0.16291	0	0	0	0
28	0.05572	0	0	0	0
29	0.07315	0	0	0	0
30	0.07312	0	0	0	0
31	0.04003	0	0	0	0
32	0.12083	0	0	0	0
33	0.04326	0	0	0	0
34	0.05608	0	0	0	0
35	0.04874	0	0	0	0
36	0.03214	0	0	0	0
37	0.09388	0	0	0	0
38	0.03633	0	0	0	0
39	0.04181	0	0	0	0
40	0.03595	0	0	0	0
41	0.17592	0	0	0	1
42	0.63679	1	1	1	1
43	0.18110	0	0	0	1

주. 1 : 파괴, 0 : 안전

Table 2 해석 결과(LRB) (계속)

No	SA (g)	LRB			
		Bridge 1		Bridge 2	
		Major	Minor	Major	Minor
44	0.26043	1	1	1	1
45	0.22297	1	1	1	1
46	0.09244	0	0	0	0
47	0.30792	0	0	0	0
48	0.11679	0	0	0	0
49	0.15223	0	0	0	0
50	0.13771	0	0	0	0
51	0.06525	0	0	0	0
52	0.19587	0	0	0	0
53	0.09301	0	0	0	0
54	0.10881	0	0	0	0
55	0.09383	0	0	0	0
56	0.06064	0	0	0	0
57	0.12539	0	0	0	0
58	0.07110	0	0	0	0
59	0.08065	0	0	0	0
60	0.06699	0	0	0	0
61	0.27673	1	1	1	1
62	1.09171	1	1	1	1
63	0.40572	1	1	1	1
64	0.51682	1	1	1	1
65	0.35493	0	0	0	1
66	0.20613	0	0	0	0
67	0.53778	0	0	0	0
68	0.19329	0	0	0	0
69	0.30805	1	1	1	1
70	0.20380	0	0	0	0
71	0.15961	0	0	0	0
72	0.28414	0	0	0	0
73	0.13825	0	0	0	0
74	0.18252	0	0	0	0
75	0.13254	0	0	0	0
76	0.11788	0	0	0	0
77	0.18394	0	0	0	0
78	0.16565	0	0	0	0
79	0.14666	0	0	0	0
80	0.09600	0	0	0	0
no. of fail		8	14	9	12

주. 1 : 파괴, 0 : 안전

Table 2 해석 결과(LRB) (계속)

### 3.5 손상도 곡선

해석 결과를 지반 운동의 특성인 SA에 대하여 손상도 곡선을 작성하였으며, SA에 대하여 MLM(Maximum Likelihood Method)을 적용

함으로 대수정규분포의 중앙값과 표준편차를 구하였다. 앞의 해석 결과에서 보듯이 교량의 물성치를 달리하여 얻은 통계적인 결과값을 비교하였을 때 상당한 유사성을 보이고 있음을 확인하였다.

MLM의 결과 각 경우에 대한 손상도 곡선의 해석 결과와 통계값은 Table 3~4와 같다.

Table 3 SA에 대한 손상도 곡선의 통계값(Bridge 1)

손상등급		중앙값(g)	표준편차
NON	Major	0.026	0.2414
	Minor	0.014	0.2823
LRB	Major	0.346	0.4362
	Minor	0.260	0.5863

Table 4 SA에 대한 손상도 곡선의 통계값(Bridge 2)

손상등급		중앙값(g)	표준편차
NON	Major	0.021	0.297
	Minor	0.013	0.3532
LRB	Major	0.326	0.4441
	Minor	0.275	0.4659

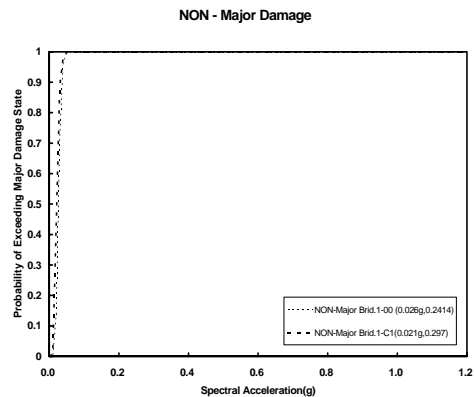


Fig. 4 Major의 파괴에 대한 손상도 곡선(Non)

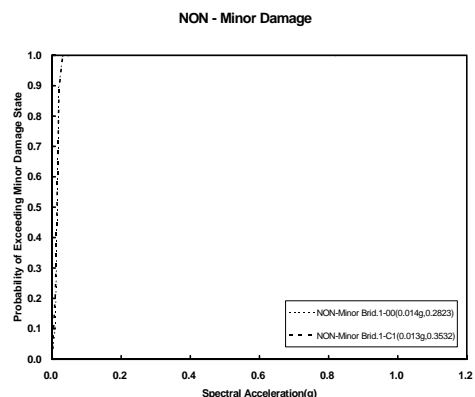


Fig. 5 Minor의 파괴에 대한 손상도 곡선(Non)

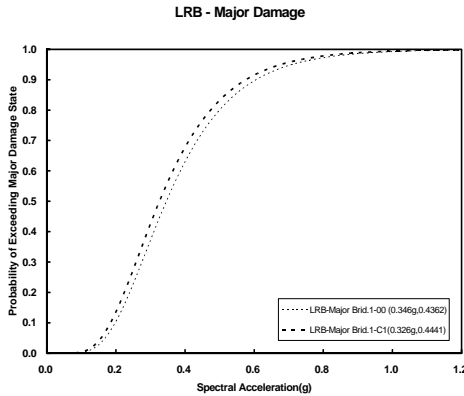


Fig. 6 Major의 파괴에 대한 손상도 곡선(LRB)

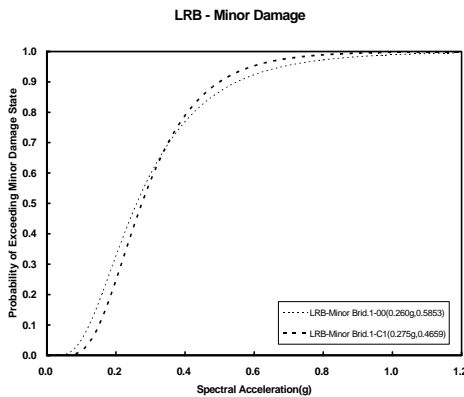


Fig. 7 Minor의 파괴에 대한 손상도 곡선(LRB)

위의 Table 1과 2의 값의 이용하여 손상등급에 따른 Bridge 1과 2의 손상도 곡선을 비교한 것이 Fig. 4 ~ 7이다.

#### IV. 결론

본 연구는 일반적인 확률밀도함수를 사용하여 구조물의 손상도 곡선을 구하는 방법을 제시하고, 교량의 손상도 곡선에 미치는 영향을 평가하는데 목적을 두고 연구를 수행하였다.

이러한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 PSC Box Girder교를 대상으로 하여 Major와 Minor damage에 대해 손상도 곡선을 구하였다.
2. 지진의 특성 중 스펙트럼 가속도(SA)에 대하여 손상도 곡선을 구한 결과 교량의 물성치의 변화에 따른 결과 값이 상당히 유사한 값을 보이고 있음을 알 수 있었다.
3. 지진의 특성 중 스펙트럼 가속도(SA)에 대한 손상도 곡선을 연구하였는데, 본 연구의 범위를 확장하여 스펙트럼 속도(SV) 등 지

진의 기타 특성에 대해 손상도 곡선을 구해보면, 특정 형태의 교량에 대해 손상도의 영향을 평가하는 데에 가장 좋은 척도가 되는 지진의 특성을 분석할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Ang, A. H-S., and Tang, W. H.(1984). Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. 2 - Decision, Risk and Reliability, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- 2) Howard, H., Hwang, M., and Huo, J-R.(1996). Simulation of Earthquake Acceleration Time Histories, Center for Earthquake Research and Information, The Univ. of Memphis, Technical Report.
- 3) Hwang, H. H. M., and Huo, J-R.(1994). Generation of hazard consistent fragility curves, Soil Dyn. and Earthquake Engrg., Vol. 13, 345-354.
- 4) Hoel, P. G.(1962). Introduction to Mathematical Statistics, 3rd. Ed., J. Wiley and Sons, New York.
- 5) Shinozuka, M.(1983). Basic Analysis of Structural Safety, J. of Struct. Eng., ASCE, Vol. 109, No. 3, Mar., 721-740.
- 6) Shinozuka, M., Feng, M,Q., kim, H.K., Ueda, T.(2002). Statistical Analysis of Fragility Curves, Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, New York, USA.
- 7) Shinozuka, M.(1972). Probability Modeling of Concrete Structures, J. of Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 98, No. EM6, Dec., 1433-1451.
- 8) Howard, H., Hwang, M., and Huo, J-R.(1996). Simulation of Earthquake Acceleration Time Histories, Center for Earthquake Research and Information, The Univ. of Memphis, Technical Report.

(2006년 6월 26일 접수, 2006년 8월 20일 채택)