

신뢰성 방법에 기초한 기설 P.C교의 안전도 및 내하력 평가

Safety Assessment and Capacity Rating of Existing P.C. Bridges based on Reliability Methods

조효남* 김민영** 시종원***
CHO, Hyo Nam Kim, Min Young Seo, Jong Won

ABSTRACT

This study develops practical models and methods for the assessment of safety and capacity rating of existing P.C. girder bridges based on the reliability methods. One of the main objectives of the study is to propose a practical but realistic limit state model for safety assessment and LRFR rating criteria, which explicitly incorporates the degree of deterioration and damage as well as actual condition of P.C. girder bridges in terms of the damage factor and the response ratio. The damage factor proposed in the paper is defined as the ratio of the current estimated stiffness to the intact base-line stiffness of a member. Based on the observation and the results of applications to existing bridges, it may be concluded that the proposed methods for the assessment and capacity rating models, which explicitly account for the uncertainties and the effects of degree of deterioration or damage, provide more realistic and consistent safety-assessment and capacity rating.

1. 서론

현재 사용되고 있는 재래적인 내하력 판정 방법이 안전도 측면에서 일관성이 결여되어있고, 실제 교량의 노후손상도의 합리적인 추정, 반영방법이 결여되어 있는 점을 감안할때 이러한 재래적인 내하력 판정방법 보다 체계적이고도 합리적인 내하력 판정방법의 개발이 시급한 실정이다.

최근에 와서 국내에서는 본 연구자들에 의해 R.C 교량이나 강교량에 대한 LRFR 내하력 평가 기준[7, 8, 15, 16]이 제안된 바가 있으나, 기설 노후손상 P.C.교의 보유안전도 및 내하력평가에 관한 연구는 아직도 미진한 상태에 있다.

본 연구에서는 기설 P.C. 교량의 신뢰성에 기초한 실제적이고도 합리적인 안전도 평가 및 내하력 판정 방법의 개발을 위하여 가용한 현장 조사, 측정 및 시험데이터에 기초한 교량응답 및 노후손상도를 명시적으로 포함시킨 실안건도 및 실내하력 판정을 위한 한계상태 모형과 노후손상도 반영방법을 제안한다.

이와같은 신뢰성 방법에 의한 노후손상된 기설 P.C.교의 중차량 통과에 대한 안전도평가 및 내하력 판정방법을 제시하고 내하력 판정기준의 안전보수율 보정방법을 제안하는 것을 연구의 목적으로 한다.

2. 노후손상교량의 한계상태 모형

2.1 한계상태모형

구조부재의 특정파괴모드에 대한 한계상태는 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = R - \sum_i S_i \quad (2.1)$$

여기서, R = 구조저항, S_i = i번째 하중효과

P.C.교의 휨 또는 전단 파괴모드에 대한 실구조저항 R은 다음과 같은 일반식으로 표현 가능하다

$$R = R_n \cdot D_F \cdot N_R \quad (2.2)$$

여기서, R_n = 실공칭 재료강도(코아시험, VDT시험 등에 의한 추정강도)를 사용한 무손상부재의 추정공칭저항

D_F = 노후손상계수 = $K_D/K_I (= \omega_D^2/\omega_I^2)$

N_R = MFDP (R_n, D_F 추정에 관련된 편기와 모든 불확실량을 내포하는 변량)

이때, M = 재료강도 관련 불확실량 변수
F = 제작시공 관련 불확실량 변수
P = 해석, 모델링 관련 불확실량 변수
D = 노후손상도 추정 관련 불확실량 변수

P.C. 부재의 공칭 휨 저항 R_n 은 활하중 합성 T형 단면의 경우 파괴시 중립축이 대부분 플랜지내에

* 정회원 한양대학교 토목공학과 교수
** 준회원 한양대학교 토목공학과 석사과정
*** 준회원 한양대학교 토목공학과 석사과정

존재하므로 합성 T형 단면의 플랜지를 폭으로 하는 직사각형 단면으로 보고 다음과 같이 휨저항을 계산할 수 있다.

$$M_n = A_p \sigma_{ps} (d_p - a/2) \quad (2.3)$$

여기서, $a = \frac{A_p \sigma_{ps}}{0.85 \sigma_{ck} b}$

$$\sigma_{ps} = \sigma_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{k_1} \cdot P_p \cdot \frac{\sigma_{pu}}{\sigma_{ck}} \right]$$

- 이때, σ_{ps} = 파괴시 PC강재의 응력
- σ_{pu} = PC강재의 인장강도
- γ_p = PC강재의 종류에 따른 계수
- A_p = PC강재의 면적
- b = 플랜지 유효폭

단시간 교량에 작용하는 주하중은 사하중과 트럭하중이므로, 작용외력 S는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S = C_D D_n N_D + C_L L_n K N_L \quad (2.4)$$

여기서, C_D, C_L = 각각 사하중 및 트럭하중의 작용외력에 대한 노후손상구조물의 추정강성도에 의해 해석한 영향계수

D_n, L_n = 각각공칭사하중 및 트럭하중
 K = 응답비 = $K_s(1+i)$

이때, K_s = 측정 응력 대 계산응력의 비
 i = 계산 또는 실측 충격계수

N_D, N_L = D_n 과 L_n 을 측정하는데 있어서의 불확실량 및 실 재하효과에 대한 편기를 조정하기 위한 각 보정계수

[$N_D = D_s L_D$: 사하중을 작용력으로 해석하는데 수반하는 불확실량(D_s)과 랜덤사하중 변량(L_D)

$N_L = P_s P_T L_P$: 활하중을 작용력으로 변환하는데 수반하는 불확실량(P_s)과 시험 측정과정의 불확실량(P_T)과 랜덤활하중 변량(L_P)]

2.2 통계적 불확실량

기설교량의 안전도 해석에 사용되는 불확실량에는 구조안전도에 영향을 끼칠수 있는 모든 것들을 포함해야 하며 표본자료와 통계적 해석 변동량 뿐만 아니라 추정오차 또는 모델링오차, 불확실한 정보로 인한 오차등도 포함된다. 본 논문에서는 국내외의 관련문헌들을 종합판단하여 다음과 같이 통계적

불확실량을 제시한다[3,4,6,7].

표 2.1 P.C.교의 저항의 불확실량

		문헌 3		본논문
		pretension	post-tension	
\bar{R}/R_n	보통의 강재비	1.06	1.04	1.05
	최대허용 강재비	1.04	1.05	
V_R	보통의 강재비	0.08	0.095	0.16
	최대허용 강재비	0.10	0.14	

표 2.2 사하중의 통계적 불확실량

해석, 모델링		사하중		사하중효과	
\bar{D}_s	V_{D_s}	\bar{L}_D	V_{L_D}	\bar{S}_D/S_{Dn}	V_{S_D}
1.00	0.05	1.05	0.08	1.05	0.10

표 2.3 활하중의 통계적 불확실량

해석, 모델링		시험, 측정		트럭하중		활하중 효과	
\bar{P}_s	V_{P_s}	\bar{P}_T	V_{P_T}	\bar{L}_P	V_{L_P}	\bar{S}_L/S_{L_n}	V_{S_L}
1.00	0.10	1.00	0.05	1.24	0.22	1.24	0.25

3. 노후손상도 추정방법

노후손상도량의 노후손상도를 추정하기 위해서는 노후손상구조물의 동적재하 또는 충격시험에 의한 제한된 측정결과에 바탕을 두고 손상구조물의 손상 부위를 식별하고 손상정도를 추정하여 구조요소별 손상강성도의 추정과 요소손상계수의 추정을 보다 엄밀하고 이론적으로는 최근에 발견된 구조시스템의 동특성추정기법인 각종 SI(System Identification) [9,10,11] 기법을 적용하여 매우 효과적이고 일반적으로 할 수 있다. 또한 가용한 현장조사, 측정결과를 바탕으로한 공학자의 판단에 기초하여 노후손상도를 추정할 수 있으며, 이러한 접근방법으로는 Fuzzy Set[12,13] 이론등이 있고 재래적인 방법인 합성작용계수(C.A.F)를 노후도의 척도로 삼을 수도 있을 것이다. 또한, 근사적으로는 FFT 주파수 분석 기법에 의해서도 손상계수를 추정할 수 있다.

측정 가속도 응답파에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 주파수 분석 방법에 의하면 쉽게 구조물의 기본 고유진동수를 추정할 수 있으므로 강성도가 고유진동수의 자승에 비례한다는 점을 유의하

면 FFT에 의해 본 연구에서 근사적으로 제안하는 손상계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_F = \frac{K_D}{K_I} = \frac{\omega_D^2}{\omega_I^2} \quad (3.1)$$

여기서, K_D = 손상부재의 강성도
 K_I = 원래 무손상부재의 강성도
 ω_D = 손상부재의 기본 고유진동수
 ω_I = 원래 무손상부재의 기본 고유진동수

물론, FFT 외에도 동적재하시험결과 구한 시간영역에서의 기록이 가용한 경우에도, 고유진동수는 여진부분의 감쇄파의 주기수와 시간의 계산으로부터 $\omega = n/t$ 로 고유진동수를 근사적으로 추정할 수 있다.

4. 신뢰성 방법에 기초한 기설교량의 내하력 판정 기준

4.1 LRFR 판정 방법

위에서 언급한 불확실량들을 반영시킬수 있는 LRFR 판정규준은 목표신뢰성지수에 따라 식(2.1), (2.2) 와 식(2.4)로부터 유도될 수 있다.

내하율 RF는 공칭내하력 P_n 과 식방석에서 규정하는 표준트럭하중 PL 의 비로서

$$RF = \frac{P_n}{PL} = \frac{\phi' D_F R_n - \gamma_D' C_D D_n}{\gamma_L' C_L KPL} \quad (4.1)$$

여기서, $\phi' = \phi / \gamma_R$ (공칭저항계수)
 $\gamma_D' = \phi / \gamma_D$ (공칭사하중계수)
 $\gamma_L' = \phi / \gamma_L$ (공칭활하중계수)
 $\gamma_R, \gamma_D, \gamma_L$ = 각각 저항, 사하중, 활하중 평균공칭비

기존 노후교량을 판정하기 위해서는 다음에 서술하는 두가지 하중수준에 대해 판정기준이 제시되어야 한다. 하나는 교량의 정상운용을 위한 허용안전하중수준에 대응하는 공용내하율 (service load rating ; SLR) 이고, 다른 하나는 특수차량 통과허용(과하중 제한)등과 같이 교량의 특별한운용을 위한 최대 허용하중수준에 대응하는 최대과하중 내하율(maximum over load rating ; MOR)이다. 내하력 판정규준의 안전수준은 목표신뢰성지수 β_0 에 의해 결정되기 때문에 신뢰성 방법에 의해 설계규준이나 내하력 판정규준을 제시할 때 합리적이고 적절한 목표신뢰성지수의 선택이 요구된다.

본 연구에서는 문헌[7, 8, 15]에서와 같이 가장 보편적으로 사용하고 있는 목표 안전수준에 따라 SLR의 경우 $\beta_0 = 3.0$, MOR의 경우 $\beta_0 = 2.0$ 을 사용하기로 한다.

로 한다.

4.2 내하력 판정규준 보정

본 연구에서 제시된 하중저항계수 판정규준(Load and Resistance Factor Rating)은 고려하는 모든 하중조건에 대해서 목표신뢰도의 근처에서 일관성 있는 안전수준을 유지하기 위해서 공용내하율과 최대과하중 내하율에 대하여 저항계수 ϕ' 와 공칭하중계수 γ_i' 이 다음과 같은 보정절차에 의해 구해진다[5].

첫째, 목표신뢰도에 대응하는 각 하중조건 및 파괴모드에 대응하는 안전모수 ϕ, γ_i 는 Rackwitz - Fiessler 알고리즘을 이용한 AFOSM방법에 의해 계산한다.

둘째, 공칭하중계수 γ_D', γ_L' 은 하중비에 따른 상대적 가중치를 고려한 다음식과 같은 $I(\gamma')$ 의 최소화로부터 최확하중비(most probable load ratio)를 사용하여 근사적으로 결정된다.

$$I(\gamma_D', \gamma_L') = \sum_i \sum_j p_i q_j (R_{c_{ij}}^{II} - R_{c_{ij}}^I)^2 \quad (4.2)$$

여기서, p_i = 각 하중비 $(L_n/D_n)_i$ 에 해당하는 상대적 가중치

q_j = 파괴모드 j 에 대한 상대적 가중치
 $R_{c_{ij}}^{II} = \beta_0$ 에 대응하는 Level II AFOSM 알고리즘으로부터 계산된 특성 저항
 $R_{c_{ij}}^I$ = Level I 시방서 형식의 하중계수에 의한 특성 저항

셋째, 공칭하중계수가 결정되고 나면, 저항계수 ϕ' 은 식(4.2)와 비슷하게 공칭저항의 향으로 표현된 다음 식으로부터 $I(\phi')$ 을 최소화함으로써 계산된다.

$$I(\phi') = \sum_j q_j (R_n^{II} - R_n^I)^2 \quad (4.3)$$

여기서, R_n^{II} = Level II에서의 공칭강도 저항
 R_n^I = Level I에서의 공칭강도저항.

4.3 제안 LRFR 내하력 판정규준

전술한 보정절차를 거쳐 본 논문에서 제안하는 LRFR내하력 판정규준은 표 4.1과 같다.

표 4.1 제안 LRFR 내하력 판정규준

SLR (공용내하율)	MOR (최대과하중내하율)
$0.95 D_F R_n - 1.20 C_D D_n$	$0.95 D_F R_n - 1.20 C_D D_n$
$0.90 C_L KPL$	$1.70 C_L KPL$

5. 적용에 및 예민도 분석

5.1 기설 P.C.교의 신뢰도 평가

본 논문에서 제시한 안전도 평가 방법을 실제 P.C.교량에 적용하기 위해 실제 내하력조사를 실시한 바 있는 충남 공주에 위치한 산정교를 선정하여 안전도 평가를 실시하였다.

표 5.1에는 교량의 신뢰성지수 β 및 내하력판정 계산에 필요한 데이터와, 기설 P.C.교량의 한계상태 모형과 저항 및 하중 불확실량을 2장에서 기술한 바와 같이 적용하고 실제 내하력 조사의 자료를 이용하여 Rackwitz-Fissler 알고리즘을 이용한 실용적인 AFOSM 구조신뢰성 방법에 의해 안전도 평가 기준의 첫 단계라 할 수 있는 신뢰성 지수 β 를 나타내었다. 교량상부구조의 시스템 파손상태를 기준으로한 체계신뢰성지수를 FMA (Failure Mode Approach)에 의해 2계 구간해[2]나 IST(Importance Sampling Technique)[14]에 의한 시뮬레이션에 의해 쉽게 구할 수 있으나 본 논문에서는 요소신뢰성해석으로 국한시키기로 한다.

표 5.1 적용 교량에 대한 데이터 및 신뢰성지수

준공년도	1981
설계하중	DB-18
Rating 하중	DB-24
지간길이(m)	20
$R_N(t-m)$	370.1
$S_{DN}(t-m)$	130.9
$S_{LN}(t-m)$	112.2
D_f	0.96
K_s	0.68
$1+I$	1.286
K	0.87
β	1.77

표 5.1에서 나타내는 바와 같이 AFOSM에 의해 계산된 신뢰성지수는 $\beta=1.77$ 로써 결과적으로, 본 교량의 안전도는 신뢰성지수에 의한 판정방법의 $1 \leq \beta < 2$ 에 해당하는 값으로 보수, 강화 및 중량한계를 표시하여야 한다.

한편, 표 5.1에서 $D_f=0.96$ 으로 본 교량은 그다지 노후되었다고 볼 수는 없으나, 신뢰성 지수가 낮게 산출된 이유는 본 교량은 설계하중이 DB-18 트럭하중으로 설계되었는데, 준공이후 주변도시의 산업화로 말미암아 차량수기 급증하고 중량화하는 추세에 있어서 설계하중이 아닌 DB-24 트럭하중에 대한 안전도 평가를 수행하였기 때문이다.

5.2 내하율 비교

전절에서 나타낸 신뢰성지수 β 와 함께 기설교량의 측정시험 결과치를 이용하고, 전장에서 제안한 내하력 판정규준(LRFR)에 의해 내하율 RF값을 계산하였고, 이를 현행 내하력 평가방법에 의해 계산되는 내하율과 비교검토하기 위해 표 5.2에 함께 나타내었다.

표 5.2 적용 교량에 대한 내하율의 비교

LRFR	SLR	0.74
	MOR	1.09
WSR		1.12
LFR		0.56
AASHTO	I. RF	0.52
	O. RF	0.87

결과치들을 검토해보면, 본 논문에서 제안한 LRFR 규준에 의한 내하율은 SLR의 경우 0.74로 현행의 방법들의 결과치인 0.52 ~ 1.12 사이의 값으로 산출되며, 이중 WSR에 의한 방법과는 0.38정도로 가장 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 현행의 내하력 판정규준이 안전모수를 신뢰성방법에 의해 합리적으로 보정된 값을 사용하고 있지 않을 뿐 아니라, 노후손상도와 응답비를 명확하게 고려하지 않는다는 기인하는 것이다. 또한 LRFR에 의한 결과는 신뢰성지수 β 에 의한 방법과도 잘 일치하여 적용교량인 산정교는 보수 및 보강이 필요한 교량이다.

5.3 예민도 분석

본 논문에서는 노후손상계수 D_f , 응답비 K , 활하중 변동계수 V_{SL} 의 변화에 따른 적용교량의 신뢰성지수 β 의 변화에 대한 예민도를 분석해보았다.

아울러 본 논문에서는 기설 P.C.교량의 내하력 측정자료가 빈곤하여, 내하력 평가 대상교량은 1개에 국한되었지만, 본 절의 예민도 분석에서는 정적 시험만 수행한 2개의 교량을 추가하여 3개의 기설 P.C. 교량에 대해 예민도를 분석해보았다.

그림 5.1과 5.2, 5.3은 각각 노후손상계수 D_f , 응답비 K , 활하중 변동계수 V_{SL} 의 변화에 따른 신뢰성지수 β 의 변화를 나타낸다.

그림 5.1과 5.2에서 보이는 바와 같이 D_f 의 값이 1.0 에서 0.75로 낮아짐에 따라 세계 교량의 신뢰성지수 β 는 70 ~ 45% 정도로 대단히 큰 감소율을 보이며, 응답비 K 가 0.7 에서 1.2로 변함에 따라서 β 는 52 ~ 58% 정도로 역시 크게 감소한다.

그러나, 상대적으로 그림 5.3에서 보는바와 같이

활하중변동계수 V_{SL} 이 0.16 에서 0.32로 2배가 변함에 따라 신뢰성지수 β 는 15 ~ 20%정도만 감소하는것을 알 수 있다. 이 사실은 기설교량의 합리적인 안전도 및 내하력평가를 수행하기 위해서는 활하중변동계수 보다 노후손상도와 응답비의 정확한 추정이 중요하다는 것을 보여준다.

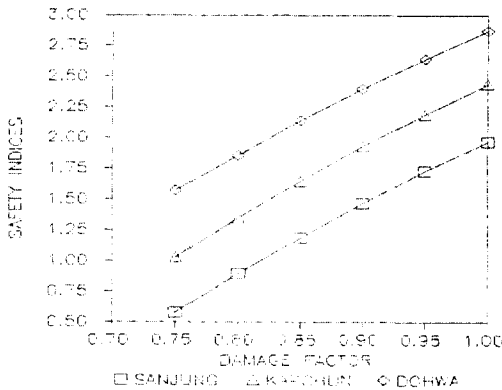


그림 5.1 Df의 변화에 따른 β 의 변화

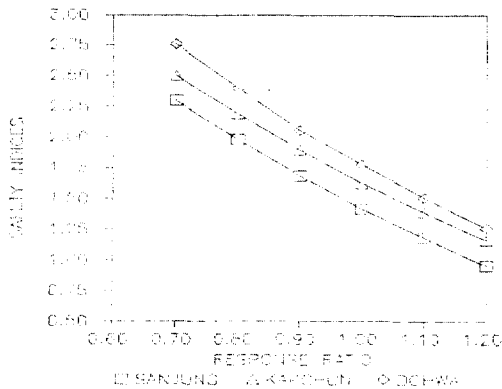


그림 5.2 K의 변화에 따른 β 의 변화

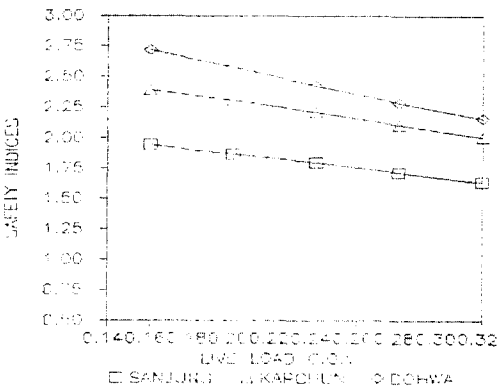


그림 5.3 V_{SL} 의 변화에 따른 β 의 변화

6. 결론

기설 P.C.교량의 신뢰성방법에 기초한 안전도 및 내하력평가에 관한 본 논문의 연구결과로부터 다음과 같이 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 본 연구에서는 노후손상도를 명확하게 포함시키는 실용적 한계상태모형과 노후손상도를 교량의 안전도 및 내하력판정에 합리적으로 고려하는 방법을 제안하였다.
- 2) 본 연구에서는 확률론적 신뢰성모형을 토대로 각종 통계적 불확실량을 합리적으로 반영하고, 적절한 목표신뢰성지수와 보정기법을 사용하여 하중저항계수판정규준(LRRF)을 제시하였으며, 이 방법은 고려하는 모든 하중조건에 대해서 거의 일정한 신뢰도를 갖는 합리적인 방법이라고 사료된다.
- 3) 각종 통계적 불확실량을 합리적으로 반영하여 제안한 내하력 판정규준은 현행의 내하력 판정규준과 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 내하력 판정규준의 보정시 각종 통계적 불확실량을 합리적으로 반영해야 하며, 판정규준식에 노후손상교량의 손상계수 및 실용응답비를 명확히 포함시켜야 함을 보여주고 있다.
- 4) 안전도 분석결과 노후손상계수 D와 응답비 K의 판정이 안전도 및 내하력평가에 매우 크게 작용하는것을 알 수 있으므로 노후손상도 및 응답비의 정확한 추정을 위한 충분한 현장측정식별자료의 활용과 SI기법과 같은 엄밀한 노후손상도 분석방법의 적용이 매우 중요하다고 할 수 있다.

7. 참고문헌

- [1] Ang, A.H-S. and Tang, W.H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", John Wiley, New York, 1984
- [2] Theil-Christensen, P. and Marston, Y., "Application of Structural Systems Reliability Theory", Springer-Verlag, Berlin, 1986
- [3] MacGregor, J.G., Mirra, S.A. and Ellinwood, P., "Statistical Analysis of Resistance of Reinforced and Prestressed Concrete Beams", ACI Journal, May-June 1983 pp.10-13
- [4] Siriaksern, A., "Serviceability and Reliability Analysis of Partially Prestressed Concrete Beams", Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois, Chicago Circle, 1980
- [5] Ellingboe, P. et al., "Probability Based Load Criteria", Jour. of Struct. Div. ASCE, Vol.106, No.875, 1980, pp.978-987
- [6] Moser, F. and Glavin, M., "Bridge Load

- Modelling and Reliability Analysis", Research Report, Case Western Reserve Univ., May, 1984
- [7] Cho, H-N., Shin, J-C. and Chang, D-I., " A Practical Reliability-Based Capacity Rating of Existing Road Bridges", Jour. of Struct. Eng. / Earthquake Eng., JSCE, Vol.5, No.2, Oct. 1988, pp. 245-254
- [8] Cho, H-N. and A. H-S. Ang., "Reliability Assessment and Reliability - Based Rating of Existing Road Bridges", Proc. of ICOSSAR-89, Aug. 1989
- [9] Natke, H.G., "Application of System Identification in Engineering", CISM Courses and Lectures, No.296, Springer-Verlag, 1988
- [10] Shinozuka, M., Yun, C. B. and Imai, H., "Identification of Linear Structural Dynamic System", Jour. of ASCE, Vol.108, No.EM6, Dec.1982, pp.1371-1389
- [11] Hoshiya, M. & Saito, E., "Structural Identification by Extended Kalman Filter", Jour. of Eng. Mechanics Vol.110, No. 12, Dec. 1984, pp.1757-1770
- [12] Brown, C.B. and Yao, J.T.P. et al., "Proceedings of Workshop on Civil Engineering Applications of Fuzzy Sets", Potter Eng. Center, Purdue Univ. Oct. 1985
- [13] Brown, C.B., " A Fuzzy Safety Measure", Jour. of the Eng. Mechanics, ASCE, Vol.105, No.5, pp.855-872
- [14] Melchers, R. E., "Importance Sampling in Structural Systems", Structural Safety, 6 1989, pp.3-10
- [15] 조 효남, 강 동일, 신 재철, "구조신뢰성 방법에 의한 도로교의 내하력 평가에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 7(2) : 109-126(1987)
- [16] 조 효남, 서 종원, "신뢰성방법에 기초한 기설 강판형교의 안전도 및 내하력 평가에 관한 연구", 한국강구조공학회 논문집, 2(2), 1989, pp. 146-154
- [17] "교량안전도 평가 및 내하급수 판정시스템 개발", 건설부, 1990. 9
- [18] "고속도로 구조물 안전진단용역 종합보고서" 한국도로공사, 1987.12