

체계신뢰성에 기초한 교량의 시스템여용성 및 저항강도 평가
SYSTEM RELIABILITY-BASED EVALUATION
OF BRIDGE SYSTEM REDUNDANCY AND STRENGTH

조 효 남*
Cho, Hyo-Nam

이 승 재**
Lee, Seung-Jae

임 종 권***
Lim, Jong-Kwon

ABSTRACT

The precise prediction of reserved carrying capacity of bridge as a system is extremely difficult especially when the bridges are highly redundant and significantly deteriorated or damaged. This paper is intended to propose a new approach for the evaluation of reserved system carrying capacity of bridges in terms of equivalent system-strength, which may be defined as a bridge system-strength corresponding to the system reliability of the bridge. This can be derived from an inverse process based on the concept of FOSM form of system reliability index. It may be emphasized that this approach is very useful for the evaluation of the deterministic system redundancy and reserve strength which are measured in terms of either probabilistic system redundancy factor and reserve factor or deterministic system redundancy factor and reserve factor.

The system reliability of bridges is formulated as a parallel-series model obtained from the FMA(Failure Mode Approach) based on the major failure mechanisms. AFOSM and IST methods are used for the reliability analysis of the proposed models. The proposed approach and method for the system redundancy and reserve safety/strength are applied to the safety assessment of actual RC and steel box-girder bridges. The results of the evaluation of reserved system safety or bridge system-strength in terms of the system redundancy and the system safety/strength are significantly different from those of element reliability-based or conventional methods.

1. 서 론

우리나라를 포함한 세계각국의 교량중 절반이상 이 과적트럭의 통행, 적절한 유지보수의 소홀로 인하여 심하게 노후손상되고 있는데 엄청난 재원이 소요되는 노후교량의 유지보수에 대한 최적의 판단지침은 주로 시설교량의 안전도 및 내하력 평가 그리고 시스템 보유안전율의 평가결과에 크게 의존한다. 최근까지 전산구조역학, 비파괴시험기법 그리고 구조신뢰성방법에 있어서 놀랄만한 발전이 있었지만, 이와 같이 심하게 열화, 손상된 교량에 대한 실제적인 시스템 보유안전율 및 여용성(Redundancy) 그리고 시스템으로서의 보유내하력을 정확히 평가하기는 아직까지 매우 어려운 실정이다.

현재 널리 사용되고 있는 교량의 안전도 및 내하력의 평가방법은 가장 위험한 부재나 요소에 대해서 공칭안전도 및 내하력을 산정하는 제래적인 방법에 의존하고 있으나 최근에 열화손상된 시설교량의 보유저항강도 및 손상정도를 평가하기 위하여 시스템여용성의 개념과 이의 표현방법에 대한 다양한 연구가 시도되고 있다.

* 한양대학교 토목공학과 교수

** 한양대학교 토목공학과 강사

*** 한양대학교 산업과학연구소 연구원

본 논문은 상자형교와 같은 교차의 여유성을 가지는 교량의 보유안전율을 보다 합리적으로 평가하기 위해 β -평가규준으로서 체계신뢰성지수에 기초한 새로운 평가방법을 제안하였는데, 이는 체계신뢰성 지수의 FOSM의 형태에서 유도된 등가시스템저항강도 평가방법으로서 보다 실제적이고 합리적인 극한 시스템저항강도(P_m)와 내하율(RF)을 구하는 접근방식이다.

2. 시스템 여유성 및 보유저항강도

상자형교와 같이 교차의 여유성을 가지는 구조물에 대해서는, 단 한개의 부재나 요소의 파괴가 전체 구조물의 파괴를 유발하는 것이 아니며 따라서 구조물의 극한내하력은 일반적으로 최초 부재의 파괴하중보다 더 크다. 시스템여용성은 한 요소의 초기 파괴후, 구조물이 종국파괴에 저항할 수 있는 시스템 보유저항강도로서 부정정성(Indeterminacy)의 정도 뿐만 아니라 개별 부재의 후파괴거동, 부재강도 및 하중, 부재강도사이의 상호관계, 각 부재의 신뢰성 수준에 따라 좌우된다. 그러므로 구조 여유성은 일반적으로 어떤 한 구조 부재의 부분적 또는 전체적인 파괴가 이루어진 경우, 구조물이 시스템 자체로서 파괴에 저항할 수 있는 능력, 즉 시스템으로서의 보유안전율 및 저항강도의 정도를 나타내는 척도로서 정의될 수 있다[Kritzler/Mohammadi, 1992].

2.1 확률적 시스템여용성 및 보유안전율

교량의 붕괴는 초기파괴후에 여러가지 중간과정을 거쳐 종국파괴에 이르기까지 다양한 파괴경로를 통해 일어난다. 따라서 시스템 여유성은 한 요소의 초기 파괴후 구조물이 종국파괴에 저항할 수 있는 극한저항강도로서 이의 합리적 평가가 관건이 되는데 본 연구에서는 체계신뢰성 해석결과를 사용하여 시설교량의 시스템 여유성 또는 보유안전율을 확률적으로 표현하였다. 즉, 시스템 여유성 또는 보유안전율을 표현하기 위한 몇가지 방법이 몇몇 연구자들[Frangopol/Curley, 1989; Moses/Fu, 1989]들에 의해 제안된 바 있으나, 본 연구에서는 신뢰성지수에 의하여 시스템 여유성과 보유안전율을 다음과 같이 정의하였다.

$$PSRF = \beta_s / \beta_i \quad (1a)$$

$$PSReF = \beta_s / \beta_e \quad (1b)$$

여기서, PSRF(Probabilistic System 여유성 Factor)=확률적 시스템 여유성 계수; PSReF(Probabilistic System Reserve Factor)=확정적 시스템 보유저항강도 계수; β_s =체계신뢰성지수; β_i = 초기파괴요소의 체계신뢰성지수; β_e =요소신뢰성지수.

2.2 확정적 시스템여용성 및 보유저항강도

등가시스템저항강도 P_m 의 향으로 극한시스템저항강도가 구해지면 확정적 시스템 여유성 및 보유저항강도는 상술한 확률적 방법과 마찬가지로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$DSRF = P_m / P_{ni} \quad (2a)$$

$$DSReF = P_m / P_{ne} \quad (2b)$$

여기서, DSRF(Deterministic System 여유성 Factor) = 확정적 시스템 여유성 계수; DSReF(Deterministic System Reserve Factor) = 확정적 시스템 보유저항강도 계수; P_m = 체계신뢰성지수에 상응하는 극한공칭시스템저항강도; P_{ni} = 요소신뢰성지수에 상응하는 요소의 공칭저항강도; P_{ne} = 초기파괴요소의 신뢰성지수에 상응하는 초기파괴의 공칭저항강도.

3. 재래적인 내하력 평가방법 및 요소신뢰성에 기초한 내하력 평가방법

교량의 재래적인 내하력 평가방법은 주로 WSR(Working Stress Rating)과 LFR(Load Factor Rating) 규준에 의해 행하여 진다. 그러나 이들 방법들은 평가대상 교량의 저항강도나 외력하중의 불확실성, 노후손상상태, 실용담특성 등을 체계적으로 반영하지 못하고 있다. 따라서 최근 Moses[1989] 및 본 연구자[조효남 외, 1989] 등은 시설교량의 노후손상상태, 교량의 실용담 및 불확실성을 명시적으로 포함시키므로써 실보유안전율을 합리적으로 평가할 수 있는 신뢰성지수에 기초한 내하력 평가방법을 제안한 바 있는데 목표신뢰성지수에 대응하는 LRFR 판정규준은 다음과 같이 주어진다[Ang/Cho, 1989].

$$P_{ne} = \frac{\phi' D_f R_n - \gamma_D C_D D_n}{\gamma_L C_L K} \quad (3)$$

$$RF = \frac{P_{ne}}{P_r} \quad (4)$$

여기서, P_{ne} = 공칭내하력; P_r = 판정 차량하중; ϕ' , γ_D , γ_L = 각각 공칭저항, 사하중 및 활하중 계수; K = 용답비 = $K_r(1+i)$, 이때 K_r = 측정용력/계산용력, i = 충격계수.

4. 체계신뢰성에 기초한 등가시스템저항강도

본 논문은 상자형교와 같은 교차의 여유성을 가지는 교량의 보유안전율을 보다 합리적으로 평가하기 위해 β -평가기준으로서 체계신뢰성지수에 기초한 새로운 보유내하력 평가방법을 제안하였다. 즉, 이는 체계신뢰성지수의 FOSM의 형태에서 유도된 등가시스템저항강도 평가방법으로서 보다 실제적이고 합리적인 극한시스템내하력(P_{ne})과 내하율(RF)을 구하는 접근방식이다.

체계신뢰성지수 β_s 는 개념적으로 FOSM 형태인 ln-ln 모델로 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\beta_s = \frac{\ln(\bar{R}_s / \bar{Q}_s)}{\sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{Q_s}^2}} \quad (5)$$

여기서, \bar{R}_s = 평균시스템저항; \bar{Q}_s = 평균시스템 하중효과; Ω_{R_s} , Ω_{Q_s} = 시스템저항과 하중효과에 대한 변동계수; \bar{Q}_s = 공칭사용하중 P_{ne} 과 단위평균하중효과 \bar{q}_s 로 표현되는 시스템 평균하중효과 ($\bar{Q}_s = \bar{q}_s P_{ne}$)를 나타내며 식(5)는 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{ne} &= \frac{\bar{R}_s}{\bar{q}_s} \text{EXP}(-\beta_s \sqrt{\Omega_{R_s}^2 + \Omega_{Q_s}^2}) \\ &= Z_m \text{EXP}(-\beta_s \Omega_s) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, Z_m 은 시스템 평균저항(\bar{R}_s / \bar{q}_s), Ω_s 는 시스템 불확실량을 개념적으로 각각 내포하고 있는 매개변수이다.

그림 1에서 보는 바와 같이 P_{ne} 과 β_s 와의 관계식은 식(6)에 의해 지수함수 형태로 표현됨을 알 수 있다. 미지의 매개변수 Z_m , Ω_s 는 상하 두개의 평가하중에 대응하는 체계신뢰성지수로 정해지는 두개의 평가점 (P_{R1} , β_{s1}), (P_{R2} , β_{s2})를 식(6)에 대입하므로써 얻어질 수 있다. 따라서 식(6)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{R1} = Z_m \text{EXP}(-\Omega_s) \beta_{s1} \quad (7a)$$

$$P_{R2} = Z_m \text{EXP}(-\Omega_s) \beta_{s2} \quad (7b)$$

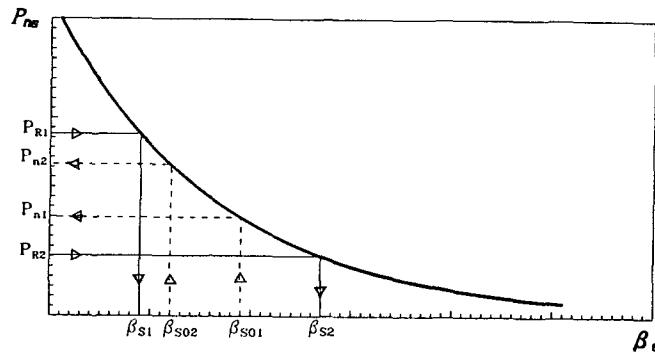


그림 1. β_s vs. P_{ne}

식 7(a)과 7(b)를 식(6)에 대입하여 풀면 $\Delta\beta = \beta_{s1} - \beta_{s2}$ 라고 했을 때, 매개변수 Z_m, Ω_s 는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_m = \left(\frac{P_{R1}^{\beta_{s1}}}{P_{R2}^{\beta_{s2}}} \right)^{1/\Delta\beta} \quad (8)$$

$$\Omega_s = \frac{1}{\Delta\beta} \ln \left(\frac{P_{R1}}{P_{R2}} \right) \quad (9)$$

최종적으로, 식(8)과 식(9)를 식(6)에 대입하여 정리하면 등가시스템저항강도 P_m 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_m = \frac{P_{R2}^{\Delta\beta_1 / \Delta\beta}}{P_{R1}^{\Delta\beta_2 / \Delta\beta}} \quad (10)$$

여기서, P_{R1}, P_{R2} = 평가하중; $\Delta\beta_1 = \beta_{s1} - \beta_{so}$; $\Delta\beta_2 = \beta_{s2} - \beta_{so}$, 여기서, β_{s1}, β_{s2} = 각각 P_{R1}, P_{R2} 에 따른 체계신뢰성지수 β_{sm} ; β_{so} = 목표신뢰성지수.

본 연구에서 제안하는 체계신뢰성에 기초한 등가시스템저항강도의 평가방법은, 새로운 개념으로서, 두개의 평가하중 각각에 대한 체계신뢰성지수만 구하게 되면 실제적인 극한시스템저항강도 P_m 를 공용내하중(SLR, $\beta_{so1}=3.0$)과 최대과하중내하중(MOR, $\beta_{so2}=2.5$)에 대해서 식(10) 또는 그림 1을 사용하여 손쉽게 구할 수 있는 매우 유용한 방법이라고 생각된다.

5. 한계상태모형

5.1 선형강도한계상태

거더교량에 대한 선형한계상태함수는 R 을 저항, S_i 를 i 번째 하중효과라고 했을 때 저항 및 하중효과의 함으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = R - \sum S_i \quad (11)$$

대부분의 거더교량의 파괴모드인 교통하중에 의한 휨파괴가 지배적인 경우 한계상태모형은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = M_R - (M_D + M_L) \quad (12)$$

여기서, M_R = 실저항모멘트; M_D, M_L = 실작용하중에 의한 하중효과를 나타내는데, M_R 은 노후손상계수 D_F 를 도입한 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$M_R = M_n N_M D_F \quad (13)$$

여기서, M_n = 공칭모멘트; D_F = 손상계수; $N_M = M, N, D_F$ 추정치에 관련된 불확실량을 내포하는 변량(=MFPD); 이때, M =재료강도관련 불확실량 변수, F =제작시공 관련 불확실량 변수; P =해석, 모델링 관련 불확실량 변수를 나타낸다. 또한, 사하중과 활하중에 의한 하중효과 M_D, M_L 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_D = m_D D_n N_D \quad (14a)$$

$$M_L = m_L L_n K N_L \quad (14b)$$

여기서, $m_D, m_L =$ 사하중 및 활하중 영향계수; $D_n, L_n =$ 공칭 사하중 및 활하중; $N_D, N_L = D_n, L_n$ 의 추정치에 관련된 불확실량 및 실제효과에 대한 편기를 조정하기 위한 각각의 보정계수.

5.2 시스템 한계상태

체계신뢰성해석에 있어서 교량시스템의 붕괴기구에 기초를 둘 때 다음과 같은 시스템 메카니즘의 한계상태가 사용될 수 있다[Ang/Bennett, 1986].

$$g_i(\cdot) = \sum_j C_{ij} M_{Rij} - \sum_k [b_{Dik} S_{Dik} + b_{Lk} S_{Lk}] \quad (19)$$

여기서, M_{Rij} 는 i 번째 파괴기구에 있어서의 j 번째 파괴단면에서의 실저항모멘트, S_{Dik}, S_{Lk} 는 i 번째 파괴기구의 k 번째의 작용하중효과, C_{ij}, b_{Dik}, b_{Lk} 는 붕괴모드를 정의하는 계수를 나타내는데 여기서 실저항모멘트 M_{Rij} 와 작용하중효과 S_{Dik} 는 식(13)과 식(14a), (14b)와 마찬가지로 모델링할 수 있다.

6. 교량의 신뢰성모델 및 해석

6.1 교량의 신뢰성모델

기설교량의 신뢰성평가는 대부분의 경우 여러가지 불확실량, 신뢰성 해석 및 수치해석에 관련된 오차 등으로 인하여 매우 어려운 문제이기 때문에 여러가지 다른 형식의 교량에 대한 가장 효과적인 신뢰성 모델링은 교량의 안전도를 평가하기 위한 근사적이면서도 실용적인 방법으로 개발되어야 한다. 체계신뢰성해석에 기초한 등가시스템저항강도의 항으로 시스템 보유저항강도 및 여유성을 평가하는데 있어서 신뢰성 해석모델에는 어떠한 것이 사용되어도 무방하지만 본 논문에서는 여러 형식의 교량에 대한 신뢰성평가를 위해서 보다 실제적이며 합리적인 모델 및 방법을 사용하였다. 가로보, 보강재, 격벽 그리고 상판등을 포함하는 교차의 여유성을 가지는 교량의 상부구조는 어느 한개의 요소 및 부재가 파괴된다 하더라도 전체 시스템이 파괴되는 경우는 극히 드물며, 따라서 교량의 시스템 파괴확률은 분명히 요소 파괴확률과는 다르게 된다. 기설교량 상부구조의 시스템파괴는 시스템 한계상태로서 정의될 수 있으며, 시스템파괴 또는 시스템저항은 이론이나 실제적인 방법에 기초하여 다양하게 표현할 수 있다.

본 논문에서는 시스템모델링을 주요파괴기구에 기초한 FMA(Failure Mode Approach)로 부터 얻어지는 직-병렬 모델로서 정식화하였다. 즉, 강상자형교의 체계신뢰성해석의 경우, 각 거더의 시스템 파괴상태는 상판과 가로보의 효과를 고려하거나 고려하지 않은 상태에서 주요거더의 붕괴기구로서 가정될 수 있다. 이러한 접근방법에서 또한가져 가정은 인장파괴기구 구역에서는 항복모멘트, 압축파괴기구 구역에서는 좌굴모멘트를 각각 취하므로써 근사적인 의사붕괴기구를 구축하였다는 것이다. 마찬가지로, RC상자형교에서는 시스템 파괴상태는 휨파괴모드의 경우 상판 및 격벽을 효과를 고려하거나 고려하지 않은 상태에서 주요거더의 붕괴기구로서 정의하였고, 전단파괴모드의 경우 지점부 단면의 전 웨브의 전단파괴로서 정의하였다.

6.2 신뢰성 해석

구조신뢰성은 파괴확률에 의해서 개념적으로 추정되고 수치적으로 평가될 수 있지만, 실제적으로는 구조요소나 시스템의 상대적인 보유안전율은 신뢰성지수 β 에 의해서 가장 잘 표현될 수 있다. 즉,

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (8)$$

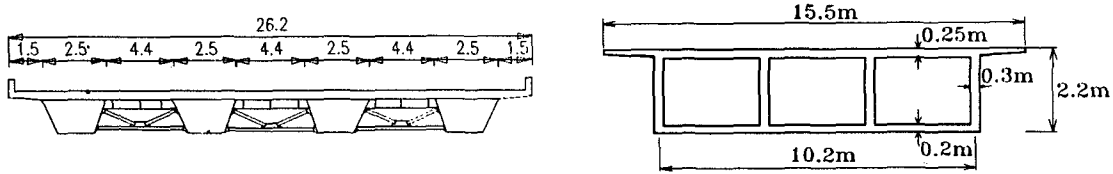
여기서, $P_F =$ 파괴확률; $\Phi^{-1} =$ 표준정규분포함수의 역함수.

교량의 신뢰성해석을 위해서는 다양한 수치해석방법을 사용할 수 있지만, 본 논문에서는 요소신뢰성 해석의 경우 AFOSM 알고리즘[Ellingwood, MacGregor and Cornell, 1980], 체계신뢰성해석에는 본 연구자에 의해 개선된 IST(Importance Sampling Technique) 알고리즘[Cho/Kim, 1991]을 사용하였다. 관련문헌[Melchers, 1989]에서 알 수 있듯이 IST 알고리즘은 Interaction Type과 같이 극심한 비선형을 갖는 한계상태함수에 매우 효율적으로 사용할 수 있다.

7. 적용에 및 고찰

7.1 적용교량

체계신뢰성에 기초한 시스템 여유성, 보유안전율 및 보유저항강도에 대한 모델 및 방법을 상자형교량에 대해 적용해 보았다. 대상교량은 상일교와 섬진교로서 상일교는 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 4-cell을 가진 3경간 연속 강상자형교이며 교량의 일반사항은 표 1과 같으며, 섬진교는 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 3경간 연속 RC 상자형교인데, 특히 이 교량에 대해서는 최근에 본 연구자에 의해 체계적인 외관조사, 비파괴시험 및 코아채취에 의한 콘크리트 압축강도시험, 정·동적 재하시험을 통한 광범위한 안전도평가가 수행된 바 있으며, 이로부터 획득한 측정데이터 및 내하력 평가자료를 표 1에 제시하였다.



(a) 상일교(강상자형)

(b) 섬진교(RC 상자형교)

그림 2. 적용교량

표 1. 교량의 일반사항 및 내하력 평가자료

교량명(거더형식)	상일교(강상형)	섬진교(RC상자형)
Type	3경간 연속교	3경간 연속교
설계하중	DB-24	DB-24
거더간격	5.00	3.40
노후손상계수, D_F	1.00	0.70
$1 + i$	1.25	1.23
K_s	0.69	0.77

7.2 등가시스템저항강도

적용교량의 요소수준에 대한 저항강도 평가결과를 표 2에 정리하였다. 재래적인 WSR에 의한 내하력 평가결과, 휨강도한계상태의 경우 상일교에 대해서는 RF가 3.49로서 신뢰성에 기초한 LRFR (RF=2.53) 이나 재래적인 LFR 방법(RF=2.42)보다 다소 높으며, 섬진교의 경우에는 RF가 -0.49로 LRFR (RF=0.85) 이나 LFR 방법(RF=1.31)보다 오히려 낮은 결과를 나타내고 있다.

표 2. 개별 요소수준의 내하력평가

Codified Capacity Rating		상일교(강상자형)		섬진교(RC상자형)			
		Bending		Bending		Shear	
		$P_{ne}(t)$	RF	$P_{ne}(t)$	RF	$P_{ne}(t)$	RF
LRFR	SLR	109.2	2.53	36.7	0.85	-	-0.10
	MOR	155.6	3.60	59.2	1.37	-	-
WSR		150.8	3.49	-	-0.49	-	-
LFR (AASHTO)	IR*	104.7	2.42	56.6	1.31	40.6	0.94
	OR**	174.5	4.04	94.2	2.18	67.8	1.57

* Inventory Rating

** Operating Rating

표 3에서는 등가시스템저항강도에 의한 내하력 평가개념의 검증에 위하여 이를 요소의 내하력평가에 적용한 등가요소저항강도 및 LRFR 내하력 평가결과를 비교, 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이, SLR에 대해 상일교의 경우 LRFR과 등가요소저항강도 평가결과가 각각 RF가 2.53, 2.21, 또한 섬진교의 경우 각각 RF가 0.85, 0.68로서 두 평가방법에 의한 결과가 거의 유사함을 알 수 있는데 이는 본 논문에서 제안한 등가시스템저항강도에 의한 내하력 평가방법이 매우 합리적임을 나타낸다.

표 3. Codified(LRFR) vs. 등가요소저항강도

Codified/Equivalent Element Strength		상일교(강상자형)		섬진교 (RC상자형)			
		Bending		Bending		Shear	
		P_{ne}, P_{nr}	RF	P_{ne}, P_{nr}	RF	P_{ne}, P_{nr}	RF
Codified (LRFR)	SLR	109.2	2.53	36.7	0.85	-	-0.10
	MOR	155.6	3.60	59.2	1.37	-	-
Equivalent Element Strength	SLR	95.5	2.21	29.3	0.68	4.9	0.11
	MOR	142.2	3.29	41.1	0.97	9.5	0.22

표 4에는 등가 요소/시스템 저항강도 평가결과를 비교하기 위하여 요약하여 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이, SLR에 대해 상일교의 경우 등가 요소/시스템 저항강도 평가방법에 의한 결과가 각각 RF가 2.21, 3.26, 또한 섬진교의 경우 각각 RF가 0.68, 1.00으로서 두 평가방법에 의한 결과가 상당히 다를 수 있는데 이는 대상교량과 같이 교차의 여유성을 가지는 상자형교량의 경우에는 시스템수준에서 평가된 교량의 보유저항강도가 요소수준에서 평가된 것보다는 상당히 차이가 있음을 의미하는 것이다.

이러한 비교 고찰을 통해서, 교차의 여유성을 가지는 교량에 대해서는 시스템 수준으로 평가된 교량의 저항강도가 요소수준에서 평가된 것과는 분명히 다르며 따라서 본 논문에서 새로이 제안하고 있는 체계신뢰성에 기초하여 유도한 등가시스템저항강도 평가방법이 기설교량의 실제적인 시스템 여유성과 보유내하력의 평가에 성공적으로 적용할 수 있는 매우 합리적인 방법임을 알 수 있다.

표 4. 등가 요소/시스템 저항강도

등가 요소/시스템 저항강도		상일교(강상자형)		섬진교(RC상자형)			
		Bending		Bending		Shear	
		P_{ne}, P_{nr}	RF	P_{ne}, P_{nr}	RF	P_{ne}, P_{nr}	RF
Element reliability-based	SLR	95.5	2.21	29.3	0.68	4.9	0.11
	MOR	142.2	3.29	41.1	0.97	9.5	0.22
System reliability-based	SLR	140.9	3.26	43.2	1.00	16.1	0.37
	MOR	229.4	5.31	85.7	1.98	24.3	0.56

7.3 시스템 여유성 및 보유 안전을 및 보유저항강도

체계신뢰성에 기초한 시스템 여유성 및 교량의 보유안전을 및 보유저항강도의 평가결과를 표 5에 정리하였다. 확률적 및 확정적 시스템 여유성 및 보유안전을 및 보유저항강도에 있어서 상일교의 경우 PSReF/PSRF, DSReF/DSRF가 각각 1.56/2.04, 1.61/2.12로서 상대적으로 높은 결과를 나타냈으며, 섬진교의 경우에도 마찬가지로 1.21~2.98의 넓은 범위에 걸쳐 나타났다. 이것은 상판, 가로보, 격벽 그리고 기타 2차부재 등이 시스템 여유성에 상당히 기여하고 있음을 분명히 보여주는 결과이다. 그러므로 본 논문의 적용교량과 같이 교차의 여유성을 가지는 교량에 대해서는 실보유안전을 및 내하력을 평가하는데 있어 체계신뢰성에 기초한 방법이 필수적임을 나타내는 것이다.

표 5. 시스템 보유안전을 및 보유저항강도

Redundancy	상일교(강상자형)	섬진교(RC상자형)	
	Bending	Bending	Shear
PSRF	2.04	1.23	1.38
PSReF	1.56	1.21	1.34
DSRF	2.12	2.98	2.57
DSReF	1.61	2.09	2.56

8. 결론

본 논문은 상자형교와 같은 교차의 여유성을 가지는 교량의 보유안전을 합리적으로 평가하기 위하여 체계신뢰성지수의 FOSM 형태에서 유도한 등가시스템저항강도의 향으로 표현된 교량의 실 보유내하력 평가방법을 제안하였다.

제안된 체계신뢰성에 기초한 저항강도 평가방법은 노후손상된 기설교량의 보수 및 복구, 유지관리에 있어서 최적의 판단자료를 제공하기 위한 실제적인 내하력평가 방법으로서 매우 효율적으로 사용될 수 있다고 사료된다.

9. 참고문헌

Ang, A. H-S. and Bennett, R. M. (1986), "Formulations of Structural System Reliability," Jour. of structural Eng., ASCE, Vol. 112, No. 11, Nov., pp. 1135-1151., 1986.

Ang, A. H-S. and Cho, H. N. (1989), "Reliability Assessment and Reliability-Based Rating of Existing Road Bridges," 5th International Conference on STRUCTURAL SAFETY AND RELIABILITY (ICOSSAR '89), San Francisco, Calif., USA, pp. 2235-2238., 1989.

Cho, H. N. and Kim, I. S. (1991), "Importance Sampling Technique for the Practical System Reliability Analysis of Bridge," Proceedings of the US-Korea-Japan Trilateral Seminar, Honolulu, pp. 87-100., 1991.

Ellingwood, B., Galambos, T. V., MacGregor, J. C. and Cornell, C. A. (1980), "Development of a Probability-Based Load Criterion for the American National Standard A58," National Bureau of Standard SP-577, Washington D.C., June., 1980.

Frangopol, D. M. and Curley, J. P. (1987), "Effects of Damage and Redundancy on Structural Reliability," Jour. of Structural Eng., ASCE, Vol. 113, No. 7, July, pp. 1533-1549, 1987.

Frangopol, D. M. and Nakib, R. (1989), "Redundancy Evaluation of Steel Girder Bridges," 5th International Conference on STRUCTURAL SAFETY AND RELIABILITY (ICOSSAR'89), San Francisco, Calif., USA, pp. 2172-2178., 1989.

Kritzler, R.W. and Mohammadi (1992), "Probabilistic Evaluation of Redundancy of Bridge Structures", 6th ASCE Specialty Conf. on Probabilistic Mechanics and Structural and Geotechnical Reliability, in Denver, Colorado from July 8 through 10 of 1992, pp.156-159, 1992

Melchers, R.E. (1989), "Importance Sampling in Structural System," Structural Safety, Vol.7, pp.247-254., 1989

Moses, F. (1982), "System Reliability Developments in Structural Engineering," Structural Safety, Vol. 1, pp. 3-13., 1982.

Moses, F. and Fu, G. (1989), Probabilistic Concepts of Redundancy and Damage Tolerability," 5th International Conference on STRUCTURAL SAFETY AND RELIABILITY (ICOSSAR'89), San Francisco, Calif., USA, pp. 967-974., 1989.

Nowak, A. S. and Tabsh, S. W. (1991), "Reliability of Highway Girder Bridge," J. of Structural Eng., ASCE, Vol.117, No.8, pp.2372-2388, 1991.

Salmon, C. G. and Johnson, J. E. (1990), "Steel Structures," Harper & Row, Publisher, New York., 1990.

Shin, J. C., Cho, H. N. and Chang, D. I. (1989), "A Practical Reliability-Based Capacity Rating of Existing Road Bridges," Jour. of Structural Eng., JSCE, Vol.5, No.2, pp. 245-254., 1989.