



강거더교의 부식환경과 강재종류를 고려한 시간 의존적 신뢰도, 여유도 및 위험도의 상호관계

양연지¹ · 김선용^{2*}

¹석사과정, 원광대학교, 토목환경공학과, ²부교수, 원광대학교, 토목환경공학과

Correlation Among Time-Dependent Reliability, Redundancy and Risk Analysis for Steel Girder Bridge Considering Corrosion Conditions and Steel Types

Yang, Yanzhi¹, Kim, Sunyong^{2*}

¹Graduate Student (Master Course), Dept. of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University, Iksan, 54538, Korea

²Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University, Iksan, 54538, Korea

Abstract - In this paper, time-dependent probabilistic performance indicators including reliability, redundancy and risk are investigated. These indicators are computed based on bridge system modeling under various environmental conditions and steel types. The bridge system modeling considers the correlation among the bridge girders such as perfectly correlated and independent girders. This paper shows extensively the effects of the bridge system modeling types, correlation among the bridge girders, environmental conditions and steel types on reliability, redundancy and risk. Furthermore, the relation among the reliability, redundancy and risk is also investigated. This study is illustrated with an existing bridge consisting of nine steel girders. The time-dependent deterioration of the bridge performance is assumed to be affected by corrosion and traffic loads.

Keywords - Corrosion, Probabilistic performance, Redundancy, Reliability, Risk, Steel girder, Steel types

1. 서 론

교량을 포함한 사회기반 시설물은 시간에 따라 구조적 성능이 지속적으로 감소한다. 교량과 같은 다양한 부재로 이루어진 구조물의 성능 저하를 예측하는 것은 광범위한 불확실성을 포함하여, 확률론적인 방법을 사용한다^[1]. 구조성능을 정량적으로 나타내는 가장 일반적인 확률론적인 지표는 파괴확률(probability of failure)과 신뢰도(reliability)이다. 하지만, 파괴확률과 신뢰도는 특정 시점에서의 교량의 안전 및 파괴 가능성만을 수치화한 것으로 교량의 사용 지

속성 및 여유도, 중요도, 구조물의 기능 상실 및 파괴에 따른 직간접 손실을 반영하지 못한다. 예를 들어, 동일한 파괴확률을 가진 교량이라도 중요도가 높고, 파괴에 따른 손실이 클 것으로 예상되면 안전 및 수명관리의 집중도를 높일 필요가 있다. 따라서, 다양한 구조성능 지표를 평가하고 이를 종합적으로 해석하는 교량 안전 및 수명관리가 필요하기 시작하였다^{[2],[3]}.

파괴확률 및 신뢰도 이외의 확률론적 구조성능 지표로서 여유도(redundancy), 사용성(availability), 위험도(risk), 회복력(resilience), 지속가능성(sustainability), 강건성(robustness), 취약도(vulnerability) 등이 있다. 일반적으로 상시화증 및 극한재해를 고려한 개별 교량의 안전성 및 수명관리에 적용하는 구조성능 지표는 파괴확률, 신뢰도, 여유도, 사용성, 위험도, 취약도 등이다. 교량 그룹 및 교량 네트워크 기반의 성능지표는 회복력, 지속가능성, 강건성 등을 포함한다. 이러한 구조성능 지표는 개별교량의 파괴확률을 기초로 구성되나, 특정 사건의 발생확률 계산에 있어서 조건

Note.-Discussion open until June 30, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 05, 2021; revised on October 01, 2021; approved on October 16, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-63-850-6716 Fax. +82-63-850-6666

E-mail. sunyongkim@wku.ac.kr

과 기댓값의 독립적 적용으로 인해 파괴확률의 증감이 이들 구조성능 지표의 증감으로 연결되지 않는다. 따라서, 이러한 다수의 성능지표들을 활용한 적절하고 합리적인 구조성능 예측을 통해 사회기반시설 유지관리의 효과와 효율성을 극대화할 수 있다^[4]. 이에 따라 국외에서는 교량유지관리를 위한 다양한 성능지표의 예측과 이를 활용한 유지관리 체계를 수립하는 연구가 진행 중이며, 보다 상세한 연구내용은 Ghosn *et al.*^[5], Ghosn *et al.*^[6]에서 찾아볼 수 있다.

기존의 연구는 각각의 구조성능지표의 평가와 예측에 중점을 두며, 이들의 상관관계, 구조물의 사용환경 및 시스템 모델링에 대한 영향평가가 부족한 상황이다^{[5],[6]}. 기존 연구와 차별적으로, 본 논문에서는 (1) 교량거더를 모두 고려하는 시스템 모델링을 적용하고, (2) 부식환경 및 강재종류에 따른 신뢰도, 여유도, 위험도의 영향을 평가하며, (3) 이를 바탕으로 신뢰도, 여유도, 위험도의 상호 연관성을 정량적으로 제시한다. 교량의 구조성능은 시스템 모델링에서 교량부재의 상관관계를 반영하게 되는데, 거더 간 완전상관관계와 독립관계를 고려한다. 본 논문은 9개의 강거더로 이루어진 교량을 적용하여, 구조성능저하 요인으로 부식과 하중의 영향을 고려한 시간 의존적 확률론적 구조 성능지표를 계산한다.

2. 확률론적 교량 구조성능 지표

시간에 따른 교량 구조성능의 불확실성을 반영하기 위해 확률론적인 지표를 적용한다. 일반적으로 사용되는 확률론적 성능지표는 신뢰도, 여유도 및 위험도를 포함한다. 교량의 부재 단위의 신뢰도는 해당 부재에 작용하는 외부하중과 부재의 저항능력의 비교를 통해 계산하는데, 이를 전체 교량구조시스템에 적용하기 위해 적절한 모델링이 필요하다. 계산된 교량구조시스템의 신뢰도를 기반으로 여유도 및 위험도를 평가한다.

2.1 파괴확률 및 신뢰도 지수

교량부재의 신뢰도 계산을 위한 시간에 따른 상태함수 $g_i[\mathbf{X}(t)]$ 는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$g_i[\mathbf{X}(t)] = r_i[\mathbf{X}(t)] - s_i[\mathbf{X}(t)] \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{X}(t)$ 는 하중-저항에 관련한 시간에 따른 확률변수 벡

터이며, r_i 와 s_i 는 i 번째 교량부재의 저항과 하중을 나타낸다. 식 (1)의 상태함수를 사용하여 i 번째 교량부재의 파괴확률 (probability of failure) $p_{f,i}(t)$ 와 신뢰도 지수(reliability index) $\beta_i(t)$ 를 다음과 같이 나타낸다.

$$p_{f,i}(t) = P[g_i(\mathbf{X}(t)) < 0] \quad (2a)$$

$$\beta_i(t) = -\Phi^{-1}[p_{f,i}(t)] \quad (2b)$$

여기서, Φ 는 표준정규분포의 누적분포함수이다. 교량부재의 파괴확률로 교량 구조시스템의 파괴확률 $p_{f,sys}$ 및 신뢰도 지수 β_{sys} 를 계산하기 위해서는 일반적으로 교량전체를 직렬-병렬로 모델링한다. 또한, 교량부재의 상태함수에 포함된 확률변수의 다양한 분포형상과 상관계수를 고려하여 구조시스템의 파괴확률 및 신뢰도 지수를 계산하기 위해, CALREL, STRUREL, PROBAN과 UQlab 등과 같은 프로그램을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 MATLAB 기반의 UQlab^[7]을 사용한다.

2.2 여유도 지수

교량구조시스템의 여유도는 교량부재의 손상에서 파괴에 도달하기 전까지의 사용 가능성을 나타내는 것으로 이를 정량화하기 위해 다양한 정의가 존재한다. 본 논문에서는 여유도 지표(redundancy index) RI 를 다음과 같이 계산한다^[8].

$$RI(t) = \beta_{sys}(t) - \beta_{dmg}(t) \quad (3)$$

여기서, $\beta_{sys}(t)$ 는 시간 t 에서 손상이 없는 상태의 시스템 신뢰도 지수이며, $\beta_{dmg}(t)$ 는 시간 t 에서 최초 구조부재 파괴 시 시스템 신뢰도 지수를 나타낸다. $\beta_{sys}(t)$ 와 $\beta_{dmg}(t)$ 의 상대적 차이가 클수록 큰 여유도를 가진다.

2.3 위험도

위험도는 구조물의 파괴에 따른 결과를 정량화하는 지표로서 파괴확률과 이에 따른 손실을 곱하여 계산한다. 일반적으로 구조물의 파괴에 따른 손실은 직접손실과 간접손실로 나뉜다. 직접손실은 구조물을 원래 상태로 복원하는데 필요한 비용으로 간주한다. 간접손실은 구조물손상으로 인해 발생하는 경제적, 사회적 손실을 포함한다. 교량부재의 파괴로 인한 교량구조시스템의 직접손실과 간접손실에 대한 위험도를 다음과 같이 구분하여 계산할 수 있다^[9].

$$RK_{dir,i}(t) = p_{f,i}(t) \times L_{dir,i}(t) \quad (4a)$$

$$RK_{ind,i}(t) = p_{f,i}(t) \times p_{f,sub,i}(t) \times L_{ind,i}(t) \quad (4b)$$

여기서, $RK_{dir,i}(t)$ 와 $RK_{ind,i}(t)$ 는 i 번째 교량부재 파괴에 따른 직접 위험도와 간접 위험도이며, $L_{dir,i}(t)$ 와 $L_{ind,i}(t)$ 는 이와 관련한 손실을 나타낸다. 또한, $p_{f,sub,i}(t)$ 는 i 번째 교량부재의 파괴로 인한 교량 전체 시스템의 파괴확률이다. 여기서, 직접손실에 대한 위험도 $RK_{dir,i}(t)$ 는 해당교량 부재의 교체에 따른 기대 비용만을 나타내지만, 간접손실에 대한 위험도 $RK_{ind,i}(t)$ 는 교량 부재의 파괴로 인해 발생할 수 있는 전체 시스템의 파괴에 따른 간접적 손실의 기대비용을 나타내므로 $p_{f,sub,i}(t)$ 를 추가로 곱하게 된다. i 번째 교량부재의 파괴로 인한 교량 시스템의 전체 위험도 $RK_i(t)$ 는 다음과 같다.

$$RK_i(t) = RK_{ind,i}(t) + RK_{dir,i}(t) \quad (5)$$

위험도의 간접손실 $L_{ind,i}(t)$ 은 교량 사용자가 우회도로를 사용함에 따라 발생하는 금전적 손실과 안전손실 비용으로 계산할 수 있다. 교량 사용자의 우회도로 사용에 따른 거리 비용 C_{dis} 은 다음과 같이 계산한다^[10].

$$C_{dis} = C_{veh} \times D \times AAT \times t_{de} \quad (6)$$

여기서, C_{veh} 는 거리 당 차량운행비용, D 는 우회거리, AAT 는 일평균교통량, 그리고 t_{de} 는 우회도로 사용기간을 나타낸다. 또한, 우회도로 사용에 따른 시간비용 C_{tm} 은 승용차 탑승인원 수에 따른 사용자 비용과 트럭의 상품운반에 필요한 시간비용을 고려하여 다음과 같이 계산한다^[10].

$$C_{tm} = \left[C_{va,u} \times O_{cc} (1 - ADTT) + C_{va,trk} \times ADTT \right] \times \frac{D \times AAT \times t_{de}}{S} \quad (7)$$

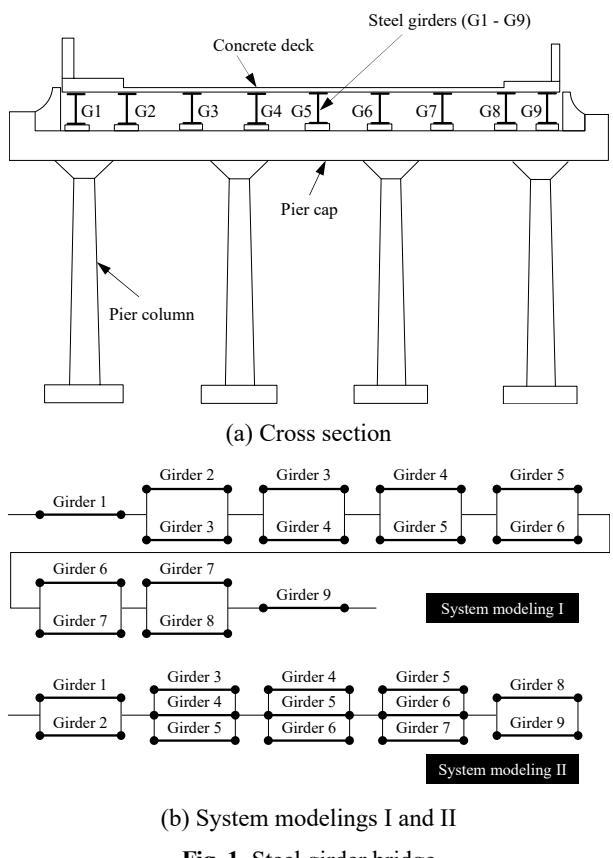
여기서, $C_{va,u}$ 는 시간당 사용자 임금, O_{cc} 는 승용차 평균 탑승 인원수, $ADTT$ 는 일평균트럭비율, $C_{va,trk}$ 는 트럭의 상품운반 시간비용, 그리고 S 는 평균속도를 나타낸다. 안전 손실 비용 C_{saf} 는 다음과 같이 평가한다^[11].

$$C_{saf} = \left(\frac{L_{br}}{D_S} + 1 \right) [O_{cc} (1 - ADTT) + O_{trk} \times ADTT] \times ICAFB \quad (8)$$

여기서, L_{br} 은 교량 총길이, D_S 는 차량운행간격, O_{trk} 는 평균 트럭대수, 그리고 $ICAFB$ 는 단위인명손실비용을 의미한다. 간접손실비용 $L_{ind,i}(t)$ 은 식 (6), 식 (7)과 식 (8)의 합으로 계산한다.

3. 확률론적 교량 구조성능 지표와 상관관계

교량 시스템의 확률론적 교량 구조성능 지표인 신뢰도, 여유도 및 위험도의 적용은 Fig. 1의 강거더 교량을 대상으로 한다.



(b) System modelings I and II

Fig. 1. Steel girder bridge

3.1 시간에 따른 상태함수, 확률변수 및 시스템 모델링

Fig. 1(a)의 강거더 교량은 3경간 단순보로 9개의 강거더와 콘크리트 상판으로 구성된다. 해당 교량에 대한 구체적인 정보는 Estes^[12], Estes and Frangopol^[13]에서 찾을 수 있다. 본 논문에서는 외측거더 1, 9, 내측거더 2와 8과 내측 거더 3~7로 구분하여, 휨 파괴에 대한 다음의 상태함수를 사용한다.

$$g_{1,9}(t) = Z_{ex}(t)F_y\nu_{mg} - 145.32\lambda_{con} - 37.3\lambda_{stl} - M_{trk,ex}(t)DF_{ex}I_{bm} \quad (9a)$$

$$g_{2,8}(t) = Z_{in}(t)F_y\nu_{mg} - 244.08\lambda_{con} - 31.7\lambda_{stl} - 28.8\lambda_{aph} - M_{trk,in}(t)DF_{in_ex}I_{bm} \quad (9b)$$

$$g_{3_7}(t) = Z_{in}(t)F_y\nu_{mg} - 197.65\lambda_{con} - 31.7\lambda_{stl} - 57.64\lambda_{aph} - M_{trk,in}(t)DF_{in}I_{bm} \quad (9c)$$

식 (9a) - (9c)의 확률변수의 정의와 값을 Table 1에 정리하였다. 여기서, λ_{con} , λ_{stl} , λ_{aph} 는 각각 콘크리트, 강재, 아스팔트 고정하중의 불확실성을 나타내는 계수이며, DF_{ex} , DF_{ex_in} 과 DF_{in} 은 하중분배계수를 나타낸다. $Z_{ex}(t)$ 와 $Z_{in}(t)$ 은 시간에 따른 외측거더와 내측거더의 소성단면 계수로 부식에 따라 감소하게 되는데, Kayser and Nowak^[14]에 의해 평균 부식침투 깊이 $d_{cor}(t)$ (10 mm^3)를 다음과 같이 계산한다.

$$d_{cor}(t) = d \times t^\psi \quad (10)$$

여기서, d 와 ψ 는 강재의 종류와 부식환경에 따라 결정되는

확률변수로는 로그정규분포를 가지며, 평균, 표준편차 및 상관계수를 Kayser and Nowak^[14], Sharifi and Paik^[15]에 의해 Table 2와 같이 정리하였다. 본 논문에서는 Table 2에서 보는 바와 같이 외측거더(1, 9)와 내측거더(2~8)에 대한 부식환경을 A_{cor} 과 B_{cor} 로 구분하였으며, 일반강재와 내후성강재에 사용조건을 각각 CS와 WS로 나타낸다. 본 논문에서는 부식환경과 강재사용을 조합하여 4가지 경우(A_{cor} -CS, A_{cor} -WS, B_{cor} -CS, B_{cor} -WS)를 적용하여 신뢰도, 여유도 및 위험도를 비교 평가하였다. 또한, Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 9개 거더의 흡파괴를 모두 고려하는 2개의 시스템 모델링을 사용하였다. 시스템 모델링 I에서는 어느 하나의 외부거더 파괴 또는 인접한 2개 내부거더 파괴가 전체 시스템 파괴로 가정하였고, 시스템 모델링 II에서는 외부거더와 인접한 내부거더의 파괴 또는 인접한 3개 내부거더의 파괴가 전체 시스템의 파괴로 가정하였다.

3.2 신뢰도 지수

Fig. 1(a)의 거더를 Table 2의 carbon steel에 대한 부식환

Table 1. Random variables to define the state function in Eq. (9)^{[9],[12],[13]}

Properties	Random variables							
	Yield strength F_y (MPa)	Modeling uncertainty ν_{mg}	Weight uncertainty factor			Traffic load distribution factor		Impact factor of traffic load I_{bm}
Mean	250	1.11	λ_{con}	λ_{stl}	λ_{aph}	DF_{ex}	DF_{in_ex}	DF_{in}
Standard deviation	30	0.128	0.105	0.082	0.25	0.122	0.142	0.163
Distribution type	Normal							

Table 2. Corrosion parameters for carbon and weathering steels for two environmental conditions^{[14],[15]}

Girders	Properties	Environmental conditions for corrosion							
		Condition A_{cor}				Condition B_{cor}			
		Carbon steel A_{cor} -CS		Weathering steel A_{cor} -WS		Carbon steel B_{cor} -CS		Weathering steel B_{cor} -WS	
		d	ψ	d	ψ	d	ψ	d	ψ
1 and 9	Mean	80.2	0.59	50.7	0.57	70.6	0.79	40.2	0.56
	Standard deviation	33.68	0.24	15.21	0.21	46.60	0.39	8.84	0.056
	Correlation coefficient	0.68	-	0.19	-	-0.31	-	-0.45	-
2 - 8	Mean	34	0.65	33.3	0.50	80.2	0.59	50.7	0.57
	Standard deviation	3.06	0.065	11.22	0.045	33.68	0.24	15.21	0.21
	Correlation coefficient	-	-	-0.05	-	0.68	-	0.19	-

경을 적용하였을 때, 시간에 따라 신뢰도 지수를 Fig. 2에 나타내었다. 외측거더(거더 1과 9), 내측거더(거더 2와 8), 그리고 내측거더(3~7)는 식 (9a), 식 (9b)과 식 (9c)의 상태함수를 적용하여 식 (2)에 의해 신뢰도 지수 β 를 계산한다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 외측거더는 초기 가장 큰 신뢰도 지수를 가지며, 내측거더 2와 8이 두 번째로 크지만, 이후 내측거더 3~7보다 작게 된다. 또한, B_{cor-CS} 가 A_{cor-CS} 보다 부식을 더 유발시키는 조건이므로, Fig. 2(b)의 B_{cor-CS} 에 대한 신뢰도 지수 감소가 Fig. 2(a)의 A_{cor-CS} 보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

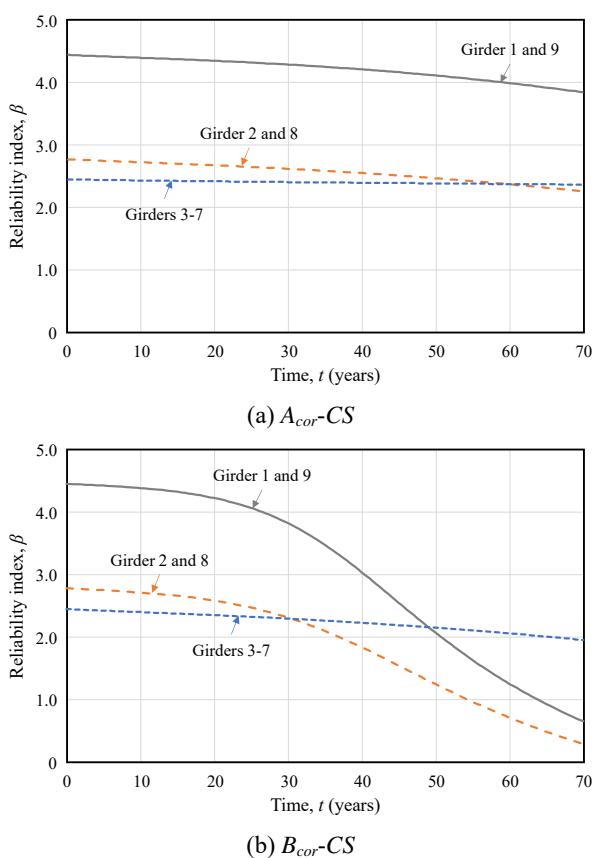


Fig. 2. Reliability index of each girder

Fig. 1(b)의 시스템 모델링 I과 II에 대한 신뢰도 지수를 Fig. 3에 나타낸다. 이는 Fig. 2에서 계산된 각 거더의 신뢰도 지수와 프로그램 UQlab^[5]을 사용하여, Fig. 1(b)의 시스템 모델링 I과 II에 대해 거더 1~9 관계가 독립(independent)인 경우와 완전상관(perfectly correlated)관계인 경우로 나누어 신뢰도 지수를 계산하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에서 동일한 상관관계에서 시스템 모델링 I이 II보다 신뢰도 지수가 A_{cor-CS} 와 B_{cor-CS} 에서 대체로 작으나, B_{cor-CS} 의 경우 약

40년 이후 시스템 모델링 I의 크기가 시스템 모델링 II보다 크다. 또한, 동일한 시스템 모델링에서 거더 간 완전상관관계가 독립관계보다 신뢰도 지수가 항상 작으며, 거더 간 완전상관관계에서는 시스템 모델링 I과 II의 시스템 신뢰도 지수의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

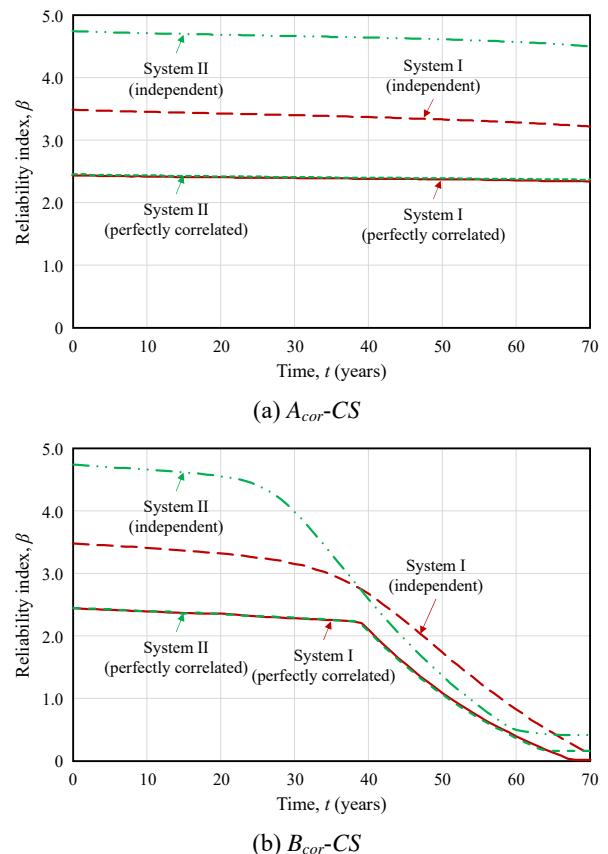


Fig. 3. Reliability index of system

3.3 여유도 지수

여유도 지수는 앞서 설명한 바와 같이 손상단계에서 파괴에 도달하기 전까지의 교량의 사용가능성을 나타내는 지표이다. 여유도는 식 (3)에 의해 시스템 모델링 I과 II의 A_{cor-CS} 와 B_{cor-CS} 에 대해 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 각각 나타낸다. 여유도는 A_{cor-CS} 와 B_{cor-CS} 에서 주어진 거더의 상관관계에서 모두 시스템 모델링 II이 시스템 모델링 I보다 크다. 또한 A_{cor-CS} 의 경우, 거더 간 완전상관관계에서는 시스템 모델링 I과 II 사이에 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이는 시스템 신뢰도 지수가 독립관계에서 가장 크며, 완전상관관계에서 시스템 신뢰도 지수의 차이가 크지 않는 Fig. 3의 결과와 일치함을 알 수 있다. Fig. 4(b)에서 시스템 모델링 I과 II에

서 여유도 지수가 시간이 지남에 따라 일부 증가함을 볼 수 있는데, 이는 식(3)의 여유도 지수의 정의에 의해 시간 t 에 따라 $\beta_{sys}(t)$ 의 감소가 $\beta_{dmg}(t)$ 의 감소보다 작기 때문이다.

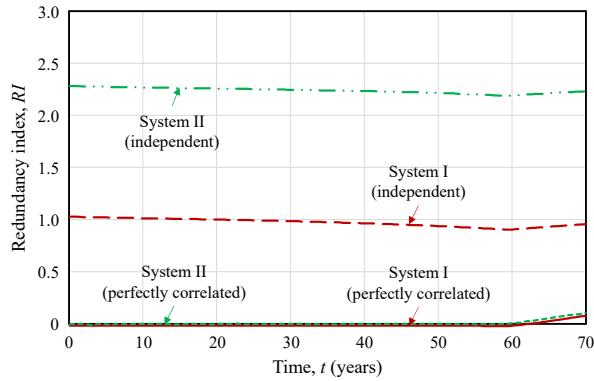
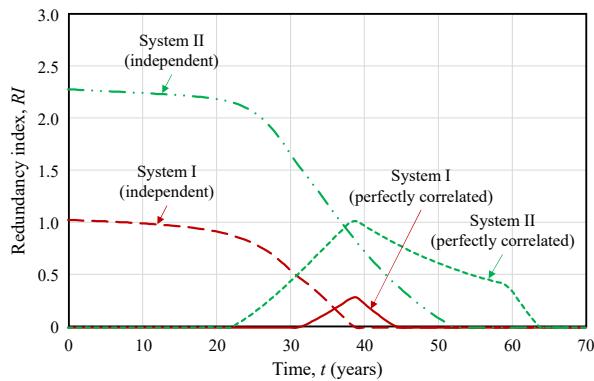
(a) A_{cor-CS} (b) B_{cor-CS}

Fig. 4. Redundancy index of system

3.4 위험도

위험도는 식(4)-(8)을 적용하여 계산하며, 간접손실계산에 필요한 변수의 값을 Table 3에 정리하였으며, 보다 상세한 정보는 Stein *et al.*^[10], Estes^[12]에서 찾아볼 수 있다. Fig. 5에서 시스템 모델링 I과 II의 파괴에 따른 위험도를 나타내었다. 식(4)-(8)에 따라 각 거더의 파괴에 따른 위험도를 계산하는데, Fig. 5의 시스템 모델링 I과 II의 위험도는 시스템 파괴화률에 교량 시스템 모델에 대한 $L_{dir}(t)$ 와 $L_{ind}(t)$ 의 합을 곱하여 계산한다.

Fig. 5의 위험도는 시간 증가에 따라 파괴화률이 증가하며, 신뢰도 지수가 감소하기 때문이며, Fig. 3의 신뢰도 지수에 직접적인 영향을 받게 된다. 시스템 I과 II에서 거더 간 완전상관관계의 위험도 차이가 적은 것도 Fig. 3에서 시스템 I과 II에서 거더 간 완전상관관계의 신뢰도 지수 차이가 적기 때문이다.

Table 3. Parameters for indirect cost estimation^{[10],[12]}

Parameters	Values
C_{veh} (\$/km)	0.16
D (km)	0.64
AAT (vehicles/day)	8,500
t_{de} (days)	180
$C_{va,u}$ (\$/h)	7.05
O_{cc} (vehicles)	1.5
$ADTT$	0.10
$C_{va,trk}$ (\$/h)	20.56
S (km/h)	64
L_{br} (m)	42.1
D_S (m)	30
$ICAFB$ (\$)	2.6×10^6

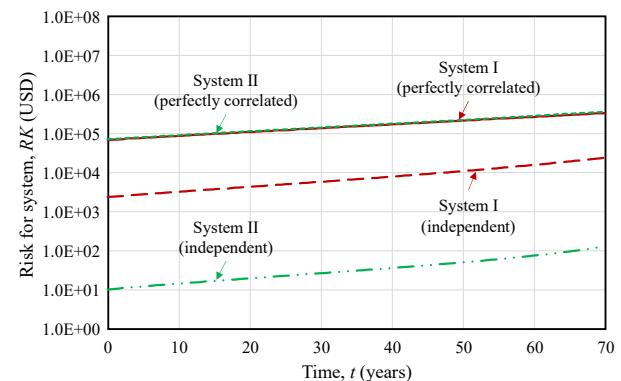
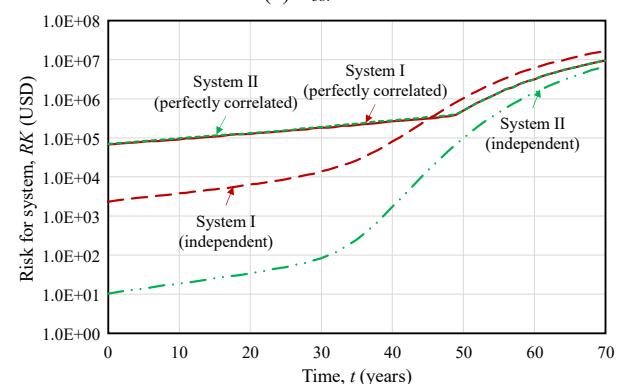
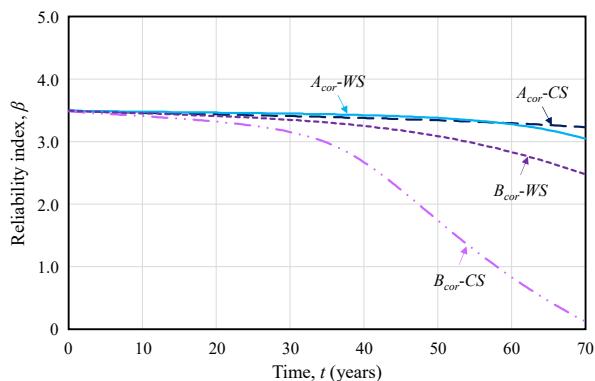
(a) A_{cor-CS} (b) B_{cor-CS}

Fig. 5. Risk of system modeling with carbon steel

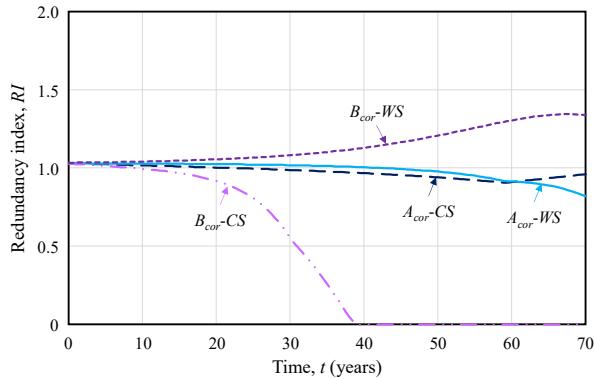
3.5 강재 및 부식 환경에 따른 교량 구조성능 비교

시스템 모델링 I의 독립관계와 완전상관관계에서 Table 2에 정의된 네 가지 조건 A_{cor-CS} , A_{cor-WS} , B_{cor-CS} 그리고

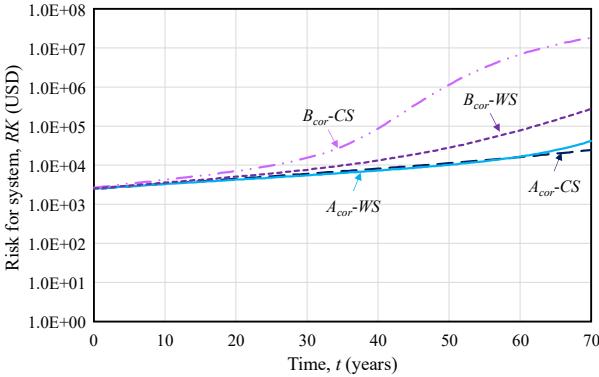
B_{cor} -WS에 대한 신뢰도 지수, 여유도 지수, 위험도를 Fig. 6 와 Fig. 7에 비교하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 각 조건에서 신뢰도 감소와 위험도 증가가 일관성을 가지지만, 여유도는 B_{cor} -CS 조건에서는 지속적으로 감소하며, B_{cor} -WS에서는 증가하는 경향을 가진다. 또한, Fig. 7의 시스템 모델링 I의 완전상관관계에서도 네 가지 조건 A_{cor} -CS, A_{cor} -WS, B_{cor} -CS 그리고 B_{cor} -WS에서 신뢰도 감소와 동시에 위험도 증가가 나타나지만, 여유도는 B_{cor} -CS 조건을 제외한 나머지



(a) Reliability index



(b) Redundancy index

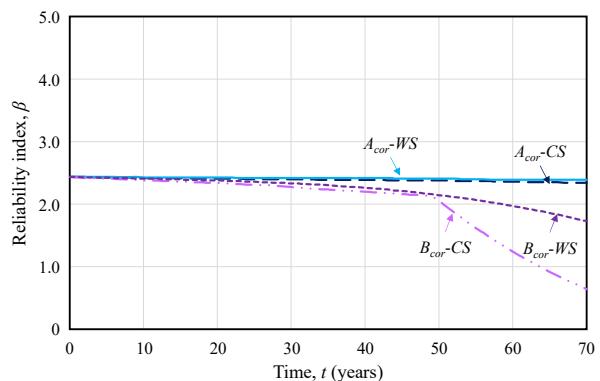


(c) Risk

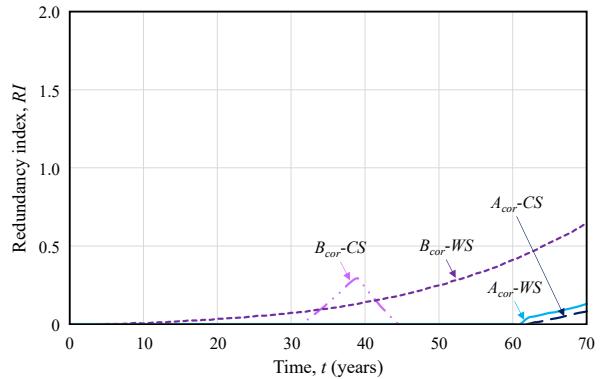
Fig. 6. Performances of system modeling I
with independent girders

3개 조건에서는 시간에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다.

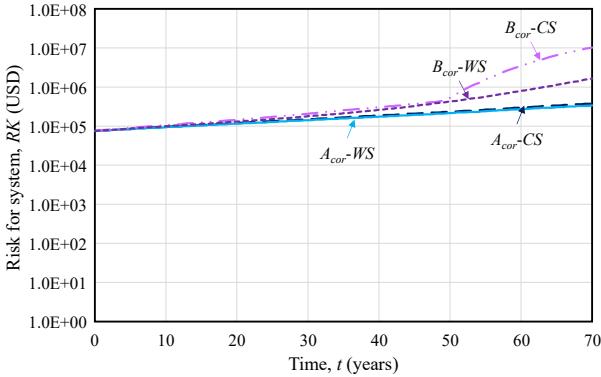
Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)의 신뢰도 지수 비교에서는 A_{cor} -CS 와 A_{cor} -WS가 독립관계와 완전상관관계에서 모두 B_{cor} -CS 와 B_{cor} -WS보다 각각 큰 값을 가진다. 이에 따라 위험도는 Fig. 6(c)와 Fig. 7(c)에서 보는 바와 같이 A_{cor} -CS와 A_{cor} -WS 가 B_{cor} -CS와 B_{cor} -WS보다 각각 작은 값을 가진다. 또한, B_{cor} -CS와 B_{cor} -WS의 차이는 신뢰도와 위험도 모두 A_{cor} -CS 와 A_{cor} -WS의 차이보다 크며, 이를 통해 부식환경조건 A_{cor}



(a) Reliability index



(b) Redundancy index



(c) Risk

Fig. 7. Performances of system modeling I
with perfectly correlated girders

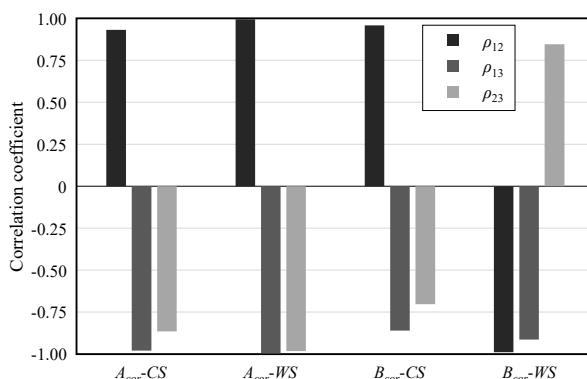
보다 B_{cor} 에서 사용강재의 영향이 교량 시스템의 신뢰도 지수와 위험도 측면에서 더 크다고 볼 수 있다. 한편, 여유도 지수는 완전상관관계와 독립관계에서 모두 B_{cor} -WS가 가장 큰 값을 가진다. 이는 여유도 지수가 $\beta_{sys}(t)$ 와 $\beta_{dmg}(t)$ 의 차이에 의해 결정되므로, Figs. 6-7의 신뢰도 지수와는 다른 경향을 가진다.

3.6 강재 종류, 부식 환경, 시스템 모델링에 따른 교량 구조성능의 상관관계

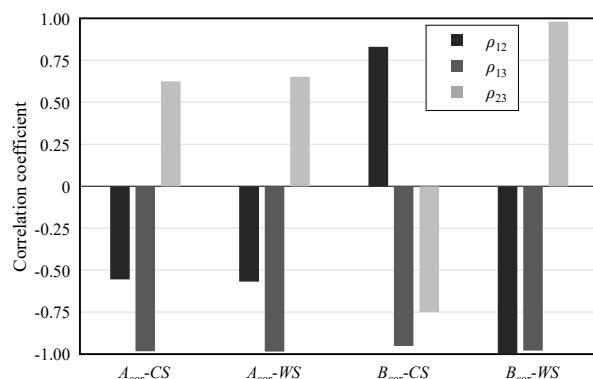
강재 종류와 부식환경, 교량 시스템 모델링과 그 구성요소인 거더의 상관관계에 따른 신뢰도 지수, 여유도 지수와 위험도의 상호관계를 정량화하기 위해 3.2절에서 3.5절에 제시된 결과를 기반으로 각 지표들의 상관계수 ρ (correlation coefficient)를 계산하였다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 Table 2에 정의된 네 가지 조건 A_{cor} -CS, A_{cor} -WS, B_{cor} -CS 그리고 B_{cor} -WS에서 시스템 모델링 I의 거더 간 독립관계와 완전상관관계에

서의 각 지표 간 상관계수를 나타내며, Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)는 시스템 모델링 II의 각 지표들의 상관계수를 나타낸다. 여기서, 두 개의 성능지표에 대한 상관계수는 값은 -1에서 1의 값을 가지며, 0일 경우 두 개의 성능지표는 독립관계이다. 두 개의 지표값이 동시에 선형으로 증가(또는 감소)하는 경우 상관계수는 1이며, 반대로, 하나의 지표 값의 증가가 다른 하나의 선형적 감소를 유발할 경우 상관계수는 -1이다. Fig. 8과 Fig. 9에서 ρ_{12} , ρ_{13} 와 ρ_{23} 는 각각 신뢰도와 여유도, 신뢰도와 위험도, 그리고 여유도와 위험도의 상관계수를 나타낸다.

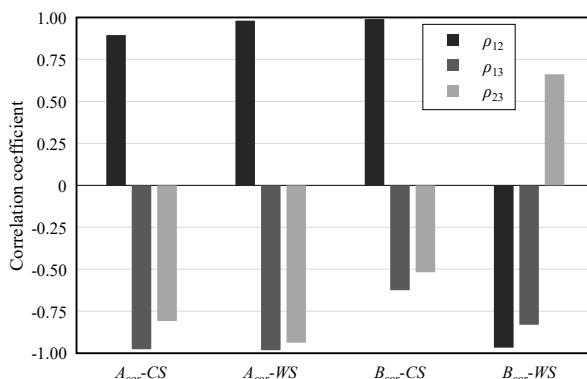
Figs. 8-9에서 신뢰도와 위험도의 상관계수 ρ_{13} 는 항상(-) 값을 가지며, 이는 신뢰도의 증가가 위험도의 감소를 유발함을 나타낸다. 상관계수 ρ_{13} 값은 대체로 -0.8에서 -1.0의 값을 가지나, 시스템 모델링 II의 B_{cor} -CS에서 -0.6에서 -0.8의 값을 가져 상대적으로 적은 상관성을 가진다. 한편, 신뢰도와 여유도(또는 여유도와 위험도)는 상관계수의 (+) 또는 (-)의 일관성이 없으며, 여유도 지수는 강재 종류와 부식환



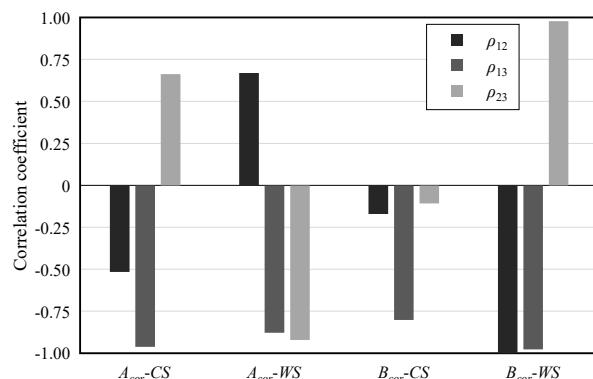
(a) Independent girders



(b) Perfectly correlated girders

Fig. 8. Correlation coefficient for system modeling I

(a) Independent girders

**Fig. 9.** Correlation coefficient for system modeling II

경, 교량 시스템 모델링과 그 구성요소인 거더의 상관관계에 따라 신뢰도나 위험도로부터 추정이 어려우며, 별도의 평가가 필요함을 나타낸다. 마지막으로, 신뢰도와 위험도는 상관성이 크므로, ρ_{12} 와 ρ_{13} 가 동일한 부호(+ 또는 -)의 상관계수값을 가질 경우 ρ_{23} 의 상관계수는 (+)값을 가진다. 이와 반대로 ρ_{12} 와 ρ_{13} 가 다른 부호의 상관계수값을 가질 경우 ρ_{23} 는 (-)값의 상관계수를 가진다.

4. 결 론

본 논문에서는 교량부재인 거더 간 완전상관관계와 독립관계를 고려하여, 교량 시스템 모델링의 종류, 부재간의 상관관계, 부식환경 및 강재종류에 따른 신뢰도, 여유도, 위험도의 평가방법 및 적용을 제시한다. 또한, 확률론적 구조성능지표의 효율적 적용을 위해 이들의 상관관계를 정량적으로 평가하였다. 제시된 연구결과를 통해 다음의 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 교량에 작용하는 시간 의존적 성능저하 환경에 따라 신뢰도지수는 감소하고, 위험도는 증가한다. 신뢰도 지수는 교량 부재 간 완전상관관계에서 독립관계보다 더 작은 값을 가지며, 이에 따라 위험도는 완전상관관계에서 독립관계보다 더 큰 값을 가진다.
- (2) 교량 부재 부식에 더 불리할수록 신뢰도 지수는 더 작은 값을 갖게 되면, 위험도는 더 큰 값을 갖게 된다. 또한, 일반 강재에 대한 신뢰도 지수보다 내후성 강재에 대한 신뢰도 지수의 감소와 위험도의 증가가 더 완만하며, 강재에 대한 부식환경이 더 불리할수록 일반 강재와 내후성 강재에 대한 신뢰도 지수와 위험도 차이가 많이 발생한다.
- (3) 교량 시스템의 신뢰도와 위험도는 시간에 따라 대체로 일관성 있는 증감소 경향을 가지는데, 이는 위험도가 교량 시스템의 파괴확률에 직접적인 영향을 받기 때문이다. 한편, 교량 시스템의 여유도는 시간에 따라 지속적으로 감소하지 않는다. 이는 본 논문에서 적용한 여유도의 정의에 의해 비손상 교량 시스템의 신뢰도와 최초 구조부재의 파괴 시 교량 시스템의 신뢰도 지수 차이가 시간에 따라 일정하게 감소하지 않기 때문이다. 이를 정량적으로 해석하기 위해 강재 종류와 부식환경, 교량 시스템 모델링과 그 구성요소인 거더의 상관관계에 따른 신뢰도, 여유도와 위험도의 상관

계수를 계산하였다.

- (4) 신뢰도와 위험도의 상관계수는 항상(-)값을 가지며, 대체로 -0.8에서 -1.0의 값을 가져 상관성이 큼을 확인하였으며, 일부 조건에서 -0.6에서 -0.8의 값을 가진다.
- (5) 여유도는 신뢰도와 위험도의 상관계수값이 작아, 강재 종류와 부식환경, 교량 시스템 모델링과 그 구성요소인 거더의 상관관계에 따라 별도의 평가가 필요한 구조지표임을 알 수 있다.
- (6) 본 논문의 교량구조성능 평가에 사용된 강재 부식을 고려한 상태함수와 확률변수 값은 신뢰성 확보를 위해 기존 국외 연구자료 및 데이터를 기반으로 한 것으로 국내교량에 직접 적용하기 위해서는 설계자료를 기반으로 최근 연구결과를 반영한 상태함수의 구성과 이에 관련한 확률변수 데이터의 확보가 필요하다.
- (7) 적절한 교량 시스템 모델링을 통해 신뢰도, 여유도, 위험도 등을 평가하게 되는데, 이러한 시스템 모델링에서는 교량 구성요소의 기능 및 다른 구성요소와의 구조적 연관성 등의 종합적 판단이 필요하다. 이에 따라, 확률론적 구조성능 평가를 위한 교량 시스템 모델링의 일반화를 위한 추가연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 원광대학교 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Biondini, F., and Frangopol, D.M. (2016) Life-Cycle Performance of Deteriorating Structural Systems Under Uncertainty: Review, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 142, No.9, F4016001.
- [2] Park, S.Y. (2003) Linkage of Damage Evaluation to Structural System Reliability, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.15, No.1, pp. 41-50 (in Korean).
- [3] Joe, W.D.J., Park, Y.M., Jin, S.H., Hwang, M.O., and Chung, H.J. (2009) Reliability-Based Redundancy Evaluation Method for Steel Plate Girder Bridges,

- Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.5, pp.493-503 (in Korean).
- [4] Sahrapeyma, A., Hosseini, A., and Merefat, M.S. (2013) Life-Cycle Prediction of Steel Bridges Using Reliability-Based Fatigue Deterioration Profile: Case Study of Neka Bridge, *International Journal of Steel Structures*, KCSS, Vol.13, No.2, pp.229-242.
- [5] Ghosn, M., Dueñas-Osorio, L., Frangopol, D.M., McAllister, T.P., Bocchini, P., Manuel, L., Ellingwood, B.R., Arangio, S., Bontempi, F., Shah, M., Akiyama, M., Biondini, F., Hernandez, S., and Tsaiatas, G. (2016) Performance Indicators for Structural Systems and Infrastructure Networks, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 142, No.9, F4016003.
- [6] Ghosn, M., Frangopol, D.M., McAllister, T.P., Shah, M., Diniz, S.M.C., Ellingwood, B.R., Manuel, L., Biondini, F., Catbas, N., Strauss, A., and Zhao, Z.L. (2016) Reliability-Based Structural Performance Indicators for Structural Members, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.142, No. 9, F4016002.
- [7] Marelli, S., and Sudret, B. (2014) UQLab: A Framework for Uncertainty Quantification in MATLAB, *Proceeding of the 2nd International Conference on Vulnerability, Risk, Analysis and Management (ICVRAM 2014)*, American Society of Civil Engineers, UK, pp.2554-2563.
- [8] Frangopol, D.M. (2011) Life-Cycle Performance, Management, and Optimisation of Structural Systems Under Uncertainty: Accomplishments and Challenges, *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, Vol.7, No.6, pp.389-413.
- [9] Zhu, B., and Frangopol, D.M. (2012) Reliability, Redundancy and Risk as Performance Indicators of Structural Systems During Their Life-Cycle, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.41, pp.34-49.
- [10] Stein, S.M., Young, G.K., Trent, R.E., and Pearson, D.R. (1999) Prioritizing Scour Vulnerable Bridges Using Risk, *Journal of Infrastructure Systems*, American Society of Civil Engineers, Vol.5, No.3, pp.95-101.
- [11] Rackwitz, R. (2002) Optimization and Risk Acceptability Based on the Life Quality Index, *Structural Safety*, Elsevier, Vol.24, No.2-4, pp.297-331.
- [12] Estes, A.C. (1997) *A System Reliability Approach to the Lifetime Optimization of Inspection and Repair of Highway Bridges*, Ph.D. Dissertation, University of Colorado, USA.
- [13] Estes, A.C., and Frangopol, D.M. (1999) Repair Optimization of Highway Bridges Using System Reliability Approach, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.125, No.7, pp.766-775.
- [14] Kayser, J.R., and Nowak, A. (1989) Reliability of Corroded Steel Girder Bridges, *Structural Safety*, Elsevier, Vol.6, No.1, pp.53-63.
- [15] Sharifi, Y., and Paik, J.K. (2011) Ultimate Strength Reliability Analysis of Corroded Steel-Box Girder Bridges, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.49, No. 1, pp.157-166.

요약: 본 논문에서는 신뢰도, 여유도 그리고 위험도를 포함한 시간 의존적 확률론적 구조 성능지표를 다룬다. 이들은 다양한 구조 성능 저하환경과 강재종류를 고려한 교량시스템 모델링을 기반으로 계산한다. 교량 시스템 모델링은 교량부재의 상관관계를 반영하는 데, 본 논문에서는 완전상관관계와 독립관계를 고려한다. 이를 통해 교량 시스템 모델링, 부재간의 상관관계, 부식환경 및 강재종류에 따른 신뢰도, 여유도, 위험도의 영향을 평가한다. 또한, 구조 성능지표인 신뢰도, 여유도, 위험도의 상호연관성을 제시한다. 본 논문의 연구결과는 9개의 강거더로 이루어진 강교량을 기반으로 하며, 구조성능저하 요인으로 부식과 하중의 영향을 반영하여 시간 의존적 확률론적 구조 성능지표의 상호관계를 정량적으로 분석한다.

핵심용어 : 부식, 확률론적 구조성능, 여유도, 신뢰도, 위험도, 강거더, 강재종류
