한국전산구조공학회
2003년도 가을 학술발표회 논문집

교량구조시스템의 유지관리를 위한 퍼지 신뢰성해석 모델

Fuzzy Reliability Analysis Models for Maintenance of Bridge Structure Systems

김종길[1] 손용우[2] 이증빈[3] 이채규[4] 안영기[5]

Sohn, Yong-Woo · Lee, Cheung-Bin · Lee, Chai-Kyu · Ahn, Young-Ki

Abstract

This paper aims to propose a method that helps maintenance engineers to evaluate the damage states of bridge structure systems by using a Fuzzy Fault Tree Analysis. It may be stated that Fuzzy Fault Tree Analysis may be very useful for the systematic and rational fuzzy reliability assessment for real bridge structure systems problems because the approach is able to effectively deal with all the related bridge structural element damages in terms of the linguistic variables that incorporate systematically experts experiences and subjective judgement.

This paper considers these uncertainties by providing a fuzzy reliability-based framework and shows that the identification of the optimum maintenance scenario is a straightforward process. This is achieved by using a computer program for LIFETIME. This program can consider the effects of various types of actions on the fuzzy reliability index profile of a deteriorating structures. Only the effect of maintenance interventions is considered in this study. However. any environmental or mechanical action affecting the fuzzy reliability index profile can be considered in LIFETIME. Numerical examples of deteriorating bridges are presented to illustrate the capability of the proposed approach. Further development and implementation of this approach are recommended for future research.

1. 서 론

실제 교량구조시스템의 해석은 교량구조물이 복잡해짐에 따라 많은 변화를 가져 왔느데, 전통적인 교량구조해석에서는 안전성계수의 개념을 사용하여 교량구조물을 확정론적 문제로 취급하였다. 그러나 교량구조물은 시간의 경과와 더불어 교량구조물의 상태가 변화하기 때문에 이러한 방법으로 교량구조물을 정확히 해석하고 유지관리하기가 매우 불가능하다.

교량구조물의 불확실성(Uncerainty)을 고려하는 해석으로 신뢰성해석방법이 기존의 해석을 대신하게 되었는데 확률론적 해석인 신뢰성해석 방법은 교량구조물의 불확실성을 다룬다는 측면에서는 아주 효율적인 방법이다. 그러나 신뢰성해석 방법으로도 교량구조물에 대한 모든 불확실성을 해석에 이용하기에는 어려움이 따르는데, 그 이유는 신뢰성해석 방법으로 다를 수 있는 불확실성의 범위가 매우 제한적이고, 교량구조물에 대한 정보들이 반드시 객관적이고 정량적인 통계자료로 주어지지 않는다는 데 있다.

더구나 손상된 교량시스템의 유지관리에는 객관적이고 정량적인 정보보다 주관적이고 정성적으로 다루어져야 할 정보들이 더 많이 존재한다. 교량구조요소에서 주관적인 정보의 한 실례로 교량구조요소의 손상에 관한 정도를 나타내는 정보는 통계적인 자료로 나타내기가 어렵고, 점검자의 경험에 의해서 주관적으로 표현되기가 쉬워, 상황에 따라서는 애매한 결과를 줄 수도 있다.

이러한 전문가의 주관적이고 애매한 정보를 기존의 신뢰성해석에 도입하기 위해서는 퍼지집합의 연산인 퍼지논리(Fuzzy Logic)이론을 이용할 필요가 있는데, 퍼지논리 이론에서는 이러한 정보를 언어변수(Languistic Variable)를 이용해서 나타낸다. 언어변수란 유지관리에 필요한 정량적 또는 객관적으로 표현하기 어려운 정보를 객관화시키는 방법으로서 이를 계산에 적용함으로써 최종적으로 얻고자 하는 정보를 객관화시키는 데 효율적으로 사용된다.

위에서 설명한 것처럼 유지관리를 위한 퍼지논리 이론은 주관적이고 애매하며 정성적인 정보를 효율적으로 다루는 수학적인 방법으로서, 의미적으로 애매한 개념들을 취급하는 퍼지집합론과 애매한 성질을 판단 및 전개할 수 있는 퍼지측도론으로 구성된다. 퍼지논리의 주요 개념은 어떠한 부정확성

1) 군산대학교 대학원 박사과정
2) 원광대학교 토목환경공학과 겸임교수, 공학박사
3) (재)한국건설품질연구원, 공학박사
4) (재)한국건설품질연구원, 토목담당이사
5) 쌍용엔지니어링주식회사, 대표이사

에 대한 허용 가능성(Possibility)이라 할 수 있다. 이러한 퍼지논리는 기호 및 수치처리를 한다는 의미에서 기존의 서술논리와 차이가 있다. 기존의 서술논리는 확률(Probability)로 기호적이고 조작만을 행하며, 넓은 의미에서 퍼지논리는 기존의 서술논리의 확장이라 할 수 있다. 퍼지논리의 주된 목표는 정확한 것이라기보다 근사적인 추론형태를 취급하기 위한 체계적이고 계산적인 기법가 개념을 전개하는 데 있다. 퍼지논리에서 정확한 추론은 근사추론의 극한 개념이라 할 수 있으며, 퍼지집합과 보통집합간에 차이는 거의 없다고 할 수 있다.

교량구조시스템에 대한 유지관리를 위한 퍼지집합은 기존집합이 0과 1로 명백하게 드러나는 것과는 다르게, 많은 개수의 소속도(Membership)정도를 고려한다는 점에서 기존 집합론보다 더 넓은 범위를 가진다. 이러한 의미에서 기존집합은 퍼지집합의 제한된 형태라 할 수 있다. 요컨대 퍼지집합은 전체집합에 포함된 집합경계가 모호한, 즉 애매한 원소의 집합으로 전문가의 주관이나 과거의 경험을 토대로한 감각적 지식을 반영한 퍼지신뢰성 해석에 이용될 수 있다.

특히 교량구조시스템이 한 번 건설되면 열화부위를 간단히 교체할 수 없기 때문에 구조물의 유지관리를 위한 주기적인 안전점검 및 안전진단의 중요성이 어느 때보다 높아지고 있지만, 지금까지 국내 교량의 상태 및 안전성평가 사례를 살펴보면 합리적이고 과학적인 방법이라기 보다는 기본적인 현장조사를 바탕으로 한 형식적인 평가수준에 그치고 있으므로 퍼지신뢰성해석의 응용분야인 퍼지결함수분석(FFTA : Fuzzy Fault Tree Analysis) 기법과 같은 과학적이고 확률적인 신뢰성평가방법이 절대적으로 필요하다고 본다.

이러한 퍼지기법을 도입한 결함수분석 기법이 실제 교량구조시스템의 퍼지 신뢰성평가에 유용하다고 보는 이유는 기존의 결함수분석 기법으로 교량구조시스템의 신뢰성평가를 수행하기에는 설계 및 시공과 직접 관련된 손상요소 뿐만 아니라 자연재해, 사회 경제적 손상요소, 정치적 손상요소 및 환경적 손상요소 등 교량구조시스템의 손상에 내재되어 있는 손상요소가 다양하고 매우 많기 때문에 이들에 대한 정확한 확률해석과 빈도해석을 수행하여야 만 가능한데, 실제 이러한 확률해석과 빈도해석을 수행할 수 있는 손상요소는 극히 제한되어 있으며 실질적으로 전문가의 판단 아래 정성적으로 교량구조시스템의 신뢰성평가가 이루어지는 경우가 대부분이기 때문이다.

이에 본 연구에서는 실제의 총체적인 교량구조시스템의 신뢰성평가 분석에 실용적으로 적용할 수 있는 합리적인 모형 및 기법은 제시하였는바, 이는 교량구조시스템의 종합적인 신뢰성평가를 객관적인 자료만을 통해 시도한 기존의 결함수분석과는 달리 객관적 자료에 대해서는 데이터의 특성에 적합한 구조신뢰성 기법을 적용하였고, 객관적 자료에 의해 분석할 수 없는 경우의 손상요인에 대해서는 신뢰성감지여부에 따른 파괴가능성을 통해 주관적인 판단을 하여 정량적으로 분석 가능한 퍼지집합이론에 기초한 FFTA기법을 적용함으로서 그 신뢰성해석을 결정하였다.

2. 교량구조시스템의 퍼지신뢰성 해석 모델

2.1 파괴가능성의 정의

실제 교량구조시스템에 있어서는 수치정보로 표현하기 어렵고 인간오차나 시공중의 과오와 같이 전문가의 주관적 판단 등 교량구조시스템에 내재되어 있는 손상요인이 다양하고 매우 많기 때문에 실질적으로 전문가의 경험적 판단 아래 정성적으로 신뢰성평가가 이루어지는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 정성적 신뢰성해석 모델개발에 관한 기초단계로서 그림 1와 같이 파괴가능성(failure possibility)이론을 도입하여 퍼지신뢰성 해석을 수행하였다.

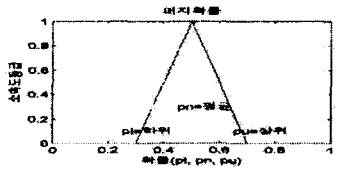

그림 1a. 퍼지확률(Fuzzy probability)

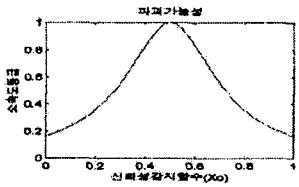

그림 1b. 파괴가능성(Failure possibility)

이 파괴가능성은 교량구조시스템의 신뢰성평가를 통일적으로 표현하는 척도로 정의할 수 있고 자연언어변수를 사용한 [0.1]상의 퍼지집합으로 표현된다. 이 때 파괴가능성의 소속도함수(membership function)는 퍼지집합의 등급을 1로하는 매개변수, 즉 최대 소속도함수의 등급이 주어진 매개변수 X_0와 전문가의 공학적판단에 의한 주관적판단의 불확실 범위로 표현되는 애매성 매개변수 m으로 나타내면 다음과 같이 정의된다.

$$\mu(X)=\frac{1}{1+20\times|X-X_0|^m} \tag{1}$$

여기서, X=본래의 주관적 신뢰성감지함수, m=애매성계수(퍼지성계수)

이러한 애매성계수 m는 Dobois-Prade의 퍼지수개념을 이용하여 구한 퍼지확률에서 P_M/P_L, P_U/P_M과의 비로 결정되는 함수로 문헌·3)에 자세히 설명되어 있다. 그리고 그림 1b에서 와같이 주관적 신뢰성감지함수은 X_o=0.5를 기준으로 X_o<0.5이면 안전영역이고, X_o>0.5이면 파괴영역으로 신뢰성지수를 0~1사이의 수치로 치환한 것이다.

2.2 손상 교량부재요소의 퍼지 신뢰성 해석

손상 교량구조시스템에 있어서는 확률과 통계이론으로 구해진 랜덤성을 갖는 객관적인 불확실성뿐만 아니라 설계자의 경험이나 공학적 판단에 의해 주관적으로 평가되는 인간오차나 시공중의 과오 또는 구조설계에 미치는 사회적, 정치적 및 경제적 요청 등의 퍼지성을 갖는 주관적 불확실성이 함께 존재하게 된다. 이 때문에 현실적으로 랜덤성과 퍼지성을 동시에 고려한 유지관리를 위한 신뢰성평가에 대한 퍼지이론의 도입이 필수 불가결한 것이다.

따라서 본 연구에서는 Frangopol 등이 개발한 손상된 구조물에 대한 시간이력의 신뢰성해석 모델을 이용하면, 보유성능에 의한 신뢰성지수의 감소는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\triangle\beta=\frac{1}{\sqrt{(\sigma_{\ln S})^2+(\sigma_{\ln R})^2}}\ln\frac{R_0}{R(t)} \tag{2}$$

여기서, $\triangle\beta$ = 손상된 부재요소에 대한 신뢰성지수의 감소, $\sigma_{\ln S}$= 하중효과에 대한 표준편차, $\sigma_{\ln R}$= 저항에 대한 표준편차, R_o= 원래의 공칭저항 휨강도, $R(t)$= 시간이력 저항 휨강도

식(2)의 R_o, $R(t)$에 대한 계산은 문헌·2)에 상세히 수록되어 있다. 그리고 외관상태평가에 의한 신뢰성지수의 감소를 계산하는데 필요한 식(2)의 $R(t)$는 문헌·1)의 퍼지이론을 이용한 상태평가 모델을 사용하였다.

따라서 손상 교량부재요소에 대한 점검시점의 시간이력 신뢰성지수는 다음과 같이 된다.

$$\beta(to)=\beta_{opt}-\triangle\beta \tag{3}$$

여기서, $\beta(to)$= 손상부재요소의 시간이력 신뢰성지수, β_{opt}= 최적신뢰성지수, $\triangle\beta$ = 신뢰성지수의 감소, 그리고, 식(3)의 β_{opt}는 문헌·7, 8)의 Kanda가 제안한 신뢰성해석으로 산정된다.

시간에 따른 손상 교량부재요소의 신뢰성정도(degree of reliability detection)를 파악하기 위해서는 전문가의 평가주관이나 과거의 경험에 바탕을 둔 감각적 지식을 반영하는 신뢰성감지함수(reliability detection function)가 필요하게 되는데, 이것은 전문가 평가방법의 주관이나 과거의 경험에 따라 변화할 수 있는 값이다.

따라서 식(3)의 손상부재요소의 시간이력 신뢰성지수, 즉 일명 정량적인 객관적 신뢰성지수를 이용하면 교량구조시스템의 손상부재요소에 대응하는 신뢰성정도 즉, 정성적인 파괴가능성의 주관적 신뢰성감지함수 X_o는 다음과 같이 표현된다.

$$X_o=\frac{1}{1+(k\times\log(1/P_{fi}))^3} \tag{4a}$$

여기서, $k=\frac{1}{\log(1/p_{f_0})}$ (4b)

$$P_{fi}=\Phi(-\beta(to)) \tag{4c}$$

이 때, k는 주관적 안전평가 기준으로서 목표파괴확률(p_{f_o}) 또는 목표신뢰성지수(β_0)의 값으로 산정된다. 식(4)에서 X_o=0은 교량부재요소의 신뢰성정도가 양호한 신뢰도를 나타내고, X_o=1은 교량부재요소의 신뢰성정도가 불량한 신뢰도를 나타내며, X_o=0.5는 주관적 목표 신뢰도감지함수로서 신뢰도정도의 기준이된다.

2.3 시간이력의 주관적 보유신뢰성 해석 모델

현행 건설교통부에서 제정한 교량의 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 의하면 상태 및 안전성 평가등급의 산정할 때 공용수명기간 중에 발생하는 손상과 열화조건에 따른 구조적 그리고 물리적 성능 및 불확실량은 전혀 고려하지 않고 주관적 판단에 의해 산정하고 있다. 그러나 실질적으로 교량부

재요소의 구조적 성능은 확률적 도구를 이용하여, 즉 안전과 신뢰성에 기초한 측면에서 수명을 예측할 수 밖에 없다. 이러한 측면을 극복하기 위하여 본 연구에서는 교량부재요소에 대한 부식철근의 역학적 특성에 의한 객관적 신뢰성지수와 퍼지이론에 기초한 파괴가능성의 주관적 신뢰성지수를 동시에 고려한 공용수명에 따른 구조저항에 대한 시간이력의 주관적 보유신뢰성 해석 모델를 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\beta_X(t) = \beta_{X_t} \cdot \varphi_{\beta_X}(t) \quad (5)$$

여기서, $\beta_X(t)$ = 휨 강도에 대한 시간이력 주관적 신뢰성지수, β_{X_t} = 휨강도에 대한 원래 주관적 신뢰성지수, $\varphi_{\beta_X}(t)$ = 주관적 신뢰성감소함수(주관적 보유신뢰성함수)

식(5)에서 주관적 보유신뢰성함수식 $\varphi_{\beta_X}(t)$는 주관적 신뢰성손실함수의 기울기와 부식율에 의한 곡선식의 매개변수로 나타내면 다음과 같다.

$$\varphi_{\beta_X}(t) = 1 - kt^{\alpha} \quad (6)$$

여기서, k= 주관적 신뢰성손실함수의 기울기, α =곡선식의 매개변수. 이 때, 식(6)의 k에 필요한 신뢰성손실함수 β_d는 $\beta_d = [\beta_{X_t} - \beta_X(t)] / \beta_{X_t}$로 된다.

본 연구에서는 식(6)를 교량부재요소에 대한 점검시점의 공칭저항 휨 강도와 부식철근의 단면적 및 압축블록의 깊이 등을 이용한 객관적 신뢰성해석에 전문가의 주관이나 자연언어를 사용한 주관적 신뢰성해석를 도입하였다. 이에 대한 주관적 신뢰성감소함수(보유신뢰성함수)는 다음과 같이 표현된다.

$$\varphi_{\beta_X}(t) = \beta_X(t) / \beta_{X_t} = 1 - [(1 - \beta_{X_{fcr}}) / to^{\alpha}] \cdot t^{\alpha} \quad (7a)$$

$$k = (1 - \beta_{X_{fcr}}) / to^{\alpha} \quad (7b)$$

여기서, $\beta_{X_{fcr}} = X_t / X_o$= 점검시점의 주관적 보유신뢰성함수, t_o = 점검시점.

이 때, X_o는 손상 교량부재요소에 대한 점검시점의 주관적 신뢰성감지함수 식(4)로 산정되고, X_t는 원래의 주관적 신뢰성감지함수로서 이에 대한 파괴확률은 $P_{f_i} = \Phi(-\beta_{X_t})$로 계산 된다.

3. 교량구조시스템의 퍼지결함수분석 기법

3.1 퍼지결함수분석 모델

퍼지적인 신뢰성 해석을 위해서는 교량구조시스템의 여러 손상요소와 시나리오를 규명하고 의사결정 모델링을 통한 퍼지결함수분석(FFTA)이 반드시 필요하게 되는데, 본 연구에서 취급하고자 하는

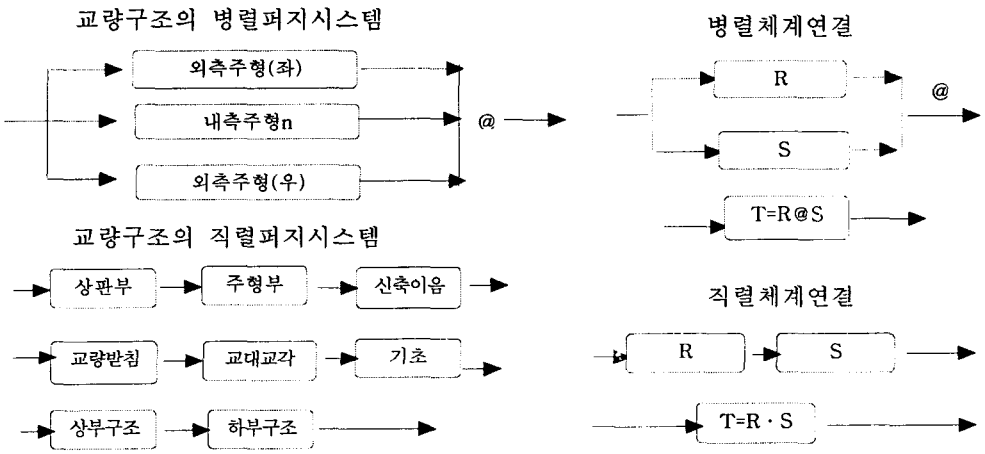

그림 2. 교량시스템의 결함수다이아그램(Fault Tree Dirgram)

교량구조시스템과 같이 상부구조와 하부구조 요소들이 서로 복합적으로 작용하는 상태에서 외부하중에 대해 교량구조시스템의 신뢰성평가를 정확히 해석하기 위해 교량 총 구조시스템 모형을 직렬과 병렬시스템을 병행한 조합시스템으로 가정하면 그림 2과 같이 된다.

3.2 퍼지결함수분석 기법

3.2.1 수치정보에 의한 해석방법

수치정보에 의한 해석방법은 퍼지집합의 기본연산인 논리합과 격렬합을 사용하면 직렬체계의 손상 교량부재요소에 대응하는 파괴가능성의 주관적 신뢰성감지함수 X_0는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\text{논리합} \ : \ X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1+(k\times \log(1/p_f))^3} \tag{8a}$$

$$\text{격렬합} \ : \ X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{[(X_{01}/(1-X_{01}))^3+(X_{02}/(1-X_{02}))^3]^{1/3}}{1+[(X_{01}/(1-X_{01}))^3+(X_{02}/(1-X_{02}))^3]^{1/3}} \tag{8b}$$

$$\text{여기서,} \ P_f = P_{f1}+P_{f2}-P_{f1}\times P_{f2} \tag{8c}$$

단, P_f=논리합연산(OR연산)의 전체 사후파괴확률, X_{01}=직렬체계 1의 파괴가능성에 대한 주관적 신뢰성감지함수, X_{02}=직렬체계 2의 파괴가능성에 대한 주관적 신뢰성감지함수

이 때, X_{01}, X_{02}는 식 (4)를 이용하면 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X_{01} = \frac{1}{1+(k\times \log(1/p_{f1}))^3} \tag{9a}$$

$$X_{02} = \frac{1}{1+(k\times \log(1/p_{f2}))^3} \tag{9b}$$

한편, 병렬체계의 손상 교량부재요소에 대응하는 정량적정보에 의한 X_0는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\text{논리곱:} \ X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1+(k\times \log(1/p_f))^3} \tag{10a}$$

$$\text{격렬곱:} \ X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1+[(1-X_{01})/X_{01})^{1/3}+((1-X_{02})/X_{02})^{1/3}]^3} \tag{10b}$$

$$\text{여기서,} \ P_f = P_{f1}\times P_{f2} \tag{10c}$$

단, P_f=논리곱연산(AND연산)의 전체 사후파괴확률, X_{01}=병렬체계 1의 파괴가능성에 대한 주관적 신뢰성감지함수, X_{02}=병렬체계 2의 파괴가능성에 대한 주관적 신뢰성감지함수, 이 때, 병렬체계의 X_{01}, X_{02}는 식 (9)를 이용하여 계산되어 진다.

3.2.2 언어정보에 의한 해석방법

언어정보에 의한 해석방법은 파괴가능성에 의한 퍼지 신뢰성해석을 이용한 정성적이고 주관적인 정보를 이용한 방법으로서 직렬체계의 퍼지 신뢰성해석인 경우에는 식 (8)의 수치파라미터를 파라미터 c로 치환하면, 퍼지집합의 연산에 대한 파괴가능성의 전체 주관적 신뢰성감지함수 X_0는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\text{논리합:} \ X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1+(k\times \log(1/p_f))^c} \tag{11a}$$

$$\text{격렬합:} \ X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{[(X_{01}/(1-X_{01}))^c+(X_{02}/(1-X_{02}))^c]^{1/c}}{1+[(X_{01}/(1-X_{01}))^c+(X_{02}/(1-X_{02}))^c]^{1/c}} \tag{11b}$$

식(11)의 파라미터 c는 평가자의 주관에 따라 달라지는 데, 문헌·4)에 의하면 c값은 c=2.5(낙관적 평가), c=1.5(표준적 평가), c=0.85(보수적 평가)으로 선택하고 있다.

한편, 병렬체계의 퍼지 신뢰성해석인 경우에는 식 (10)의 수치파라미터를 파라미터 n으로 치환하면, 정성적정보에 의한 X_0는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\text{논리곱:} \ X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1+(k\times \log(1/p_f))^n} \tag{12a}$$

$$\text{격렬곱:} \ X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1+[(1-X_{01})/X_{01})^{1/n}+((1-X_{02})/X_{02})^{1/n}]^n} \tag{12b}$$

식(12)의 파라미터 n는 평가자의 주관에 따라 달라지는 데, 문헌·4)에 의하면 n값은 n=2.9(낙관적 평가), n=2.05(표준적 평가), n=1.0(보수적 평가)으로 선택하고 있다.

3.3 퍼지이론에 의한 교량구조시스템의 신뢰성평가 기준

지금까지 수행된 교량구조시스템의 신뢰성평가에서 실시한 외관조사의 상태평가 기준은 실제적으로 교량구조시스템의 내하력평가시나 내구성 및 기능성을 판별하는데 적용되지 않고 유지관리를 위한 외관망도의 작성 또는 보수·보강의 근거로 사용되고 있는 경우가 대부분이다. 따라서 외관조사의 결과로부터 교량구조시스템의 노후등급을 산정하는 방법을 퍼지논리로 구체화하여 이러한 외관조사결과를 실제 내하력 산정시 반영하는 방환의 일환책으로 퍼지이론에 의한 신뢰성평가기준을 나타내면 다음의 표 1 같이 된다.

표 1 퍼지신뢰성에 의한 신뢰성(도)평가기준 및 유지관리 대책

신뢰성등급	판정 구분	신뢰성(도)평가기준 및 유지관리 대책		
		신뢰성지수($\beta(t)$)	보유신뢰성함수($\varphi_{\beta}(t)$)	유지관리대책
A	매우 우수	$3.00 < \beta(t)$	$1.0 < \varphi_{\beta}(t)$	보수 불필요
B	우수	$3.0 < \beta(t) \leq 2.5$	$1.0 < \varphi_{\beta}(t) \leq 0.80$	일상적 유지관리
C	양호	$2.5 < \beta(t) \leq 2.0$	$0.80 < \varphi_{\beta}(t) \leq 0.65$	예방보수 또는 적정보수
D	적합	$2.0 < \beta(t) \leq 1.5$	$0.65 < \varphi_{\beta}(t) \leq 0.50$	보강 필요
E	부적합	$1.5 > \beta(t)$	$0.50 > \varphi_{\beta}(t)$	교체
☞ 주관적 퍼지신뢰성해석 시는 신뢰성지수= $\beta_X(t)$, 보유신뢰성함수= $\varphi_{\beta_X}(t)$로 계산함				

4. 적용 예 및 고찰

4.1 대상교량구조시스템의 퍼지신뢰성해석 및 평가 결과

대상교량은 문헌·1)에서 제시된 바와 같이 철근콘크리트 T형교이며 설계하중은 DB-13.5인 2등교이다. 보강공법은 NEFAC공법(신기술 제209호)를 사용하였고, 본 연구에서 사용하는 대상교량의 상부구조에 대한 외관조사 결과는 전문가의 주관적인 판단에 의한 데이타로 상판부, 주형부, 교면포장 그리고 신축이음의 외관상태등급이 공히 "C급"으로 판단되었으며, 이 데이터를 이용하여 MATLAB에 의한 퍼지논리 툴박스(Fuzzy Logic Toolbox)을 사용하여 추론한 결과, 추론값이 공히 x= 0.6044로서 "C급"으로 가정하였다. 따라서 퍼지추론에 의한 외관상태등급의 지수인 객관적인 등급을 이용하여 교량구조요소(상판부, 주형부, 교변포장, 신축이음)와 교량구조시스템에 대한 신뢰성감지함수를 산정하여 표 2에 나타냈다.

표 2. 교량구조시스템 및 구조요소에 대한 신뢰성감지함수의 결과 비교분석

구분	교량상부 구조	신뢰성감지함수			
		수치정보	언어정보(낙관적)	언어정보(중간적)	언어정보(보수적)
교량구조 요소	상판부	0.837151	0.796461	0.670279	0.613932
	주형부	0.830449	0.789848	0.665630	0.610678
	교면포장	0.768372	0.768372	0.627061	0.584131
	신축이음	0.715364	0.683085	0.598532	0.564910
교량구조 시스템	논리합	0.902011	0.864105	0.723502	0.652248
	격렬합	0.865900	0.841127	0.811011	0.843931

표 2 및 그림 3에서 신뢰성감지함수는 손상 교량구조의 부재요소에 대한 점검시점의 시간이력 신뢰성지수를 주관적 퍼지신뢰성지수로 변환하는데 사용되는 함수로서 본 연구에서의 수치 및 언어정보의 수치는 각각 수치정보의 c=3.0, 낙관적 언어정보의 c=2.5, 중간적 언어정보의 c=1.3, 보수적 언어정보의 c=0.85를 사용하였다. 교량구조의 부재요소 및 전체구조시스템에 대한 신뢰성감지함수(X_o)를 X_o =0.5는 주관적 목표 신뢰도감지함수으로 비교해 보면, 보수적 언어정보의 X_o은 교량부재요소의 신뢰성정도가 양호한 신뢰도에 가까워 지고, 수치정보의 X_o은 교량부재요소의 신뢰성정도가 불량한 신뢰도에 가깝게 나타났다. 즉 c값이 작을수록 신뢰성감지함수가 작게 된다.

따라서 대상교량의 부재요소별과 전체 구조시스템에 대한 신뢰성지수를 비교하여 보면 표 3와 같이 된다. 표 3에서 확률론적 신뢰성해석 방법은 저항과 하중의 통계치만으로 사용한 기존의 정량적이고 객관적인 신뢰성해석 방법을 의미하고, 본 연구에서 개발한 퍼지론적 신뢰성해석 방법은 주관적 상태평가인 언어정보를 사용한 정성적이고 주관적 신뢰성해석 방법을 의미한다. 이때 언어정보에 의한 주관적 신뢰성지수는 c=1.5으로 계산한 것이다.

현행 건설교통부의 교량안전점검 및 정밀안전진단에 대한 상태평가 및 안전성평가 기준이 정성적이고 주관적으로 작성되어 있기 때문에 이러한 언어정보를 객관화 시킬 수 있는 주관적 신뢰성지수의 산정이 필요하게 된다. 따라서 본 연구의 퍼지신뢰성해석 방법은 향후 교량구조시스템의 상태 및 안전성평가에 대한 신뢰성지수 프로파일(profile)로 충분히 활용될 수 있다.

표 3. 대상 교량구조시스템에 대한 신뢰성지수의 결과 비교분석

구분	해석방법	교량상부구조요소의 신뢰성지수			
		상판부	주형부	교면포장	신축이음
교량구조요소	확률론적 해석	2.28459	2.31227	2.54210	2.71362
	퍼지론적 해석	2.40244	2.42044	2.58248	2.71875
교량구조 시스템	확률론적 해석	1.96507			
	논리합	2.21663			
	격렬합	2.06119			

4.2 신뢰성프로파일에 의한 신뢰성 해석 결과 분석 비교

현행 건설교통부의 교량의 공용수명 연장방안에 사용되는 LCP(Life Cycle Activity Profile)의 접근방식의 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 교량구조요소의 시각적인 측면의 열화상태와 구조성능을 동시에 고려하는 신뢰성에 기초한 신뢰성 프로파일에 의해 대상교량의 신뢰성해석 및 유지관리조치시기의 추정 결과를 분석하면 다음과 같이 된다.

1) 교량구조요소에 대한 신뢰성해석 결과 분석

교량구조시스템의 상부구조 4요소(상판부, 주형부, 교면포장, 신축이음)의 경우에 대한 손상부재의 신뢰성지수 결과를 언어정보에 의한 산정한 결과를 나타내면 표 4과 같다.

표 4. 언어정보에 의한 교량상부구조의 신뢰성해석 결과 분석 비교

구분	해석방법	교량상부구조요소			
		상판부	주형부	교면포장	신축이음
확률론적 방법	신뢰성해석	2.28459	2.31227	2.54210	2.71362
퍼지론적 방법	수치정보	1.99145	2.00752	2.16971	2.33048
	언어정보(낙관적)	2.09319	2.11071	2.28089	2.44061
	언어정보(중간적)	2.48724	2.50461	2.65866	2.78578
	언어정보(보수적)	2.71552	2.72999	2.85405	2.95116

표 4에서와 같이 손상된 교량상부구조요소에 대한 확률론적 신뢰성지수($\beta(t)$)의 추정값과 퍼지론적 신뢰성지수($\beta_X(t)$)의추정값을 비교하여 보면, $\beta(t)$가 중간적 언어정보의 $\beta_X(t)$에 가장 근접하고 있다. 이때 상판부의 손상원인은 철근의 단면적감소원인으로, 주형부의 손상원인은 염해에 의한 항복강도의 감소가 주원인이고, 교면포장은 단차 및 함몰에 의한 저항성저하가 주손상원인이며, 신축이음은 균열, 탈락 및 파손 등에 의한 손상원인으로 보유성능에 따른 신뢰성해석하였다.

그리고 전절3.2의 퍼지결함수분석 기법인 논리합 및 격렬합으로 교량상부구조, 즉 상판부, 주형부, 신축이음에 대한 직렬체계의 퍼지신뢰성해석한 결과를 표 5에 나타냈다. 표 5에서와 같이 확률론적 추정값이 낙관적 언어정보의 추정값에 근접하고 있고, 퍼지론적 해석방법 중에서 보수적 언어정보의 추정값이 가장높게 산정되었다.

따라서 신뢰성프로파일에 의한 퍼지신뢰성 해석시에 주관적 신뢰성지수는 표 1의 신뢰성평가기준 및 유지관리조치에 따른 경제분석에 영향을 미치기 때문에 교량구조시스템과 구조요소에 대한 수치 및 언어정보의 해석방법의 선택이 무엇보다 중요하다.

표 5. 언어변수에 의한 교량구조시스템의 신뢰성해석 결과 분석 비교

구분	교량구조시스템의 신뢰성해석				
	확률론적 방법	퍼지론적 방법			
	신뢰성해석	수치정보	언어정보(낙관적)	언어정보(중간적)	언어정보(보수적)
논리합	1.96507	1.84825	1.99643	2.30427	2.55599
격렬합	1.96507	1.92533	1.98203	2.05563	2.19754

2) 유지관리조치 시나리오에 의한 조치시기 결과 분석

기존의 연구결과에 의하면 교량의 LCP은 교량의 상태등급 모델을 설정하고 관리수준 목표에 도달했을 때에 유지관리조치를 부여하는 상태에 기초한 유지관리방법과 교량의 구조 보유성능(내하력)등급 모델을 설정하고 관리수준 목표에 도달했을 때에 유지관리조치를 부여하는 신뢰성에 기초한 유지관리방법으로 크게 두 가지 방법이 있다. 따라서 본 연구에서는 Frangopol의 연구와 같이 신뢰성에 기초한 유지관리방법으로 8가지의 시나리오. 즉, 무조치인 경우, 1회, 2회, 3회, 4회의 사후조치인 경우, 0회, 1회, 2회의 사후조치를 포함한 예방조치인 경우의 8가지 시나리오로 신뢰성 프로파일을 구성하여

유지관리조치를 수행하였다. 그 결과 그림 4은 교량구조요소에 대해 신뢰성평가 2차곡선식에 따라 1번의 수명주기(one life cycle)에서 1회의 사후유지관리조치만 취한 신뢰성 프로파일을 나타낸 것이다. 그리고 그림 5은 신뢰성평가 2차곡선식에 따라 1번의 수명주기에서 3회의 사후유지관리조치만을 취한 신뢰성 프로파일을 나타낸 것이다.

표 6. 대상교량의 상판부에 대한 유지관리조치시기 결과 분석 비교

구 분	유지관리조치시기			
	1차보수시기	2차보수시기	3차보수시기	1차교체시기
신뢰성해석	27.4413	41.7488	56.4975	35.6916
수치정보	24.2618	37.3726	47.7452	31.5562
언어정보(낙관적)	25.4168	38.5283	50.0566	32.8242
언어정보(중간적)	30.5479	50.5944	74.1887	39.7323
언어정보(보수적)	35.7414	54.0000	81.0000	46.4872

표 6은 손상원인에 의한 대상교량의 상판부에 대한 유지관리조치시기를 신뢰성평가 2차곡선식에 따라 분석 한 결과를 비교한 것이다. 이때 1, 2, 3차 보수시기의 신뢰성지수는 $\beta(t)$=2.25으로 상태 및 안전성 C등급에서 B등급으로 향상되는 예방유지관리차원의 신뢰성지수 값을 사용하였고, 1번의 수명주기에서 1회의 교체조치만 취해지는 1차 교체시기의 신뢰성지수는 사용한계상태에 도달한 신뢰성지수 $\beta(t)$=1.5 값을 사용하였다.

그림 4, 5 및 표 6에서와 같이 본 연구에서 개발한 LIFETIME프로그램의 신뢰성 프로파일로 손상교량구조시스템의 적절한 사후 또는 사전(예방)유지관리조치의 시기를 결정할수 있다. 따라서 향후 교량구조시스템의 구조적특성과 교량이 설치된 지역여건, 지역교통량에 따른 신뢰성 프로파일 프로그램을 개발하면 제 4.2절의 확률적 경제성분석을 합리적이고 과학적으로 수행할 수 있고 교량유지관리시스템(BMS)의 구축에 활용할 수 있다.

한편, Frangopol의 신뢰성 프로파일은 교량의 안전수준이 사후유지관리인 경우는 목표신뢰도에 거의 다 다른 경우이며, 예방유지관리의 경우는 목표신뢰도(target reliability)보다 높은 건전한 상태로 정의하고 있다. 그러나 이러한 신뢰도 추정은 구조물의 종류별, 교통량별, 기타 다양한 요소의 함수로 되어 있으므로 우리나라 전체의 적정유지관리 수준을 도출하는데는 적합하지 않은 방법으로 본 연구에서는 Frangopol의 목표신뢰도를 사용한계 신뢰도, 즉 교체상태한계 신뢰도로 치환하여 퍼지신뢰성 프로파일를 구축하여 적정유지관리 수준을 도출하였다.

표 7, 8은 신뢰성평가 2차곡선식으로 교량상부구조 요소에 대한 유지관리조치 시기를 비교한 것이다. 그리고 그림 4은 신뢰성평가 2차곡선식으로 교량상부구조, 즉, 상판부, 주형부, 교면포장 및 신축이음에 따라 1번의 수명주기(One Life Cycle)에서 1회의 사후유지관리조치만 취한 신뢰성 프로파일을 나타낸 것이다. 또한 그림 5, 6은 신뢰성평가 2차곡선식으로 교량상부구조요소에 따라 1번의 수명주기에서 3회의 사후유지관리조치만을 취한 신뢰성 프로파일을 나타낸 것이다.

표 7. 대상교량 상부구조요소의 유지관리조치시기 결과 분석 비교

구분	교량상부구조 요소(단위 : 년)			
	상판부	주형부	교면포장	신축이음
1차보수시기	29.1248	29.4103	32.4253	35.8351
2차보수시기	45.2318	45.9977	54.0000	54.0000
3차보수시기	63.4635	64.9954	81.0000	81.0000
1차교체시기	37.8813	38.2526	42.1740	46.6091

그림 4, 5, 6 및 표 7, 8에서와 같이 본 연구에서 Matlab언어로 개발한 LIFETIME프로그램의 신뢰성 프로파일로 주요 손상원인에 의한 교량구조시스템의 사후 또는 사전(예방)유지관리조치의 시기를 결정할수 있다. 따라서 향후 교량구조시스템의 구조적특성과 교량이 설치된 지역환경 여건, 지역교통량 환경에 따른 감소원인에 대한 퍼지신뢰성 프로파일 프로그램을 개발하면 신뢰성에 기초한 확률적 생애주기비용분석을 수행하여 경제적 유지관리전략(cost-effective maintenance strategies)의 수립을 위한 의사결정의 지원도구로서 사용될 수 있다.

표 8. 대상교량구조시스템의 유지관리조치시기 결과 분석 비교

구분	유지관리조치시기			
	1차보수시기	2차보수시기	3차보수시기	1차교체시기
논리합	26.5938	54.0000	81.0000	34.5894
격렬합	24.9175	46.2055	65.4110	32.4090

표 9은 신뢰성평가 2차곡선식에 의해 교량상부 구조요소에 대한 잔여수명 평가 결과를 비교한 것이

다. 표 9에서와 같이 철근부식에 의한 철근의 단면적감소와 염해에 의한 항복강도감소에 따른 상판과 주형부의 잔여수명이 다른 손상원인에 따른 교면포장과 신축이음의 잔여수명보다 민감함을 알 수 있었다. 이 때 잔여수명을 평가하기 위한 언어정보의 c값은 c=1.5를 사용하였다.

표 9. 언어정보에 의한 교량상부 구조요소의 잔여수명 평가 결과 비교

구 분	교량상부 구조요소의 잔여수명(년) 평가			
	보수·보강전	잔여수명 연장기간	보수·보강후	신뢰성지수의 저하율(β_k)
상판부	5.30153	18.2318	23.5333	0.00127825
주형부	5.61812	18.9977	24.6158	0.00125356
교면포장	8.96195	27.0000	35.9619	0.00103128
신축이음	12.7437	27.0000	39.7437	0.00084435

한편 Mori는 열화손상 메카니즘 모델에 따라 신뢰성평가 곡선식을 철근부식인 경우는 1차식으로 염해인 경우는 2차식, 그리고 염소이온인 경우는 평방근식을 제안하고 있다. 따라서 우리의 현재 유지관리수준이나 정기점검 및 정밀진단의 수준이 불확실한 상황임을 고려하다면, 교량구조시스템의 유지관리 조치후의 경제성 분석은 표 9에서와 같이 열화손상 메카니즘에 따른 신뢰성평가 곡선식을 철근부식인 경우는 1차식으로 염해인 경우는 2차식, 그리고 염소이온인 경우는 평방근식을 사용하여도 무방하다고 판단된다.

식(5)에서 상수 β_{X_i}는 유지관리조치, 즉 일상유지보수, 보수, 보강, 교체의 보유성능의 향상등급을 나타내는 함수로써 건설교통부/시설안전기술공단에서 연구·수행한 상태등급곡선에 의한 경제성분석시에 상태등급 향상을 최대 B등급으로 한정하고 있는 모순점을 극복할 수 있다. 또한 상수 β_{X_i}를 사용함으로써 교량의 구조적·물리적 성능에 따른 구체적인 보수공법이나 보강공법 중에서 가장 경제적인 공법이 무엇인가를 선정하기 위한 분석을 할 수 있고, 신설교량의 형식이나 공법 등을 선정하기 위한 도구로 사용될 수도 있다.

표 10. 언어정보에 의한 교량구조시스템의 잔여수명 평가 결과 비교

구분	교량구조시스템의 잔여수명(년) 평가			
	보수·보강전	잔여수명연장기간	보수·보강후	저하율(β_k)
논리합	2.49448	27.0000	29.4945	0.00153313
격렬합	0.63529	19.2055	19.8408	0.00174636

한편, 언어정보에 의한 교량구조시스템의 잔여수명 평가 결과를 비교한 것이 표 10이다. 표 10에서와 같이 논리합에 의한 잔여수명이 격렬합에 의한 잔여수명 보다 높게 산정되었다. 이러한 방법은 유지관리조치에 필요한 공용수명의 연장기간을 산정할 때 중요한 인자로서 교량의 유지관리조치에 필요한 경제성 분석에 중요한 영향인자임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서의 퍼지신뢰성 해석방법은 교량구조시스템의 현재 보유신뢰성상태를 고려한 적절한 유지관리 조치행렬에 따른 생애주기의 프로파일에 활용할 수 있다.

표 11. 신뢰성프로파일에 의한 잔여수명 평가 결과 비교

구 분	상판부의 잔여수명(년) 평가			
	보수·보강전	잔여수명 연장기간	보수·보강후	신뢰성지수의 저하율
기존신뢰성해석	3.43438	14.7488	18.1831	0.0014389
수치정보	-0.0918	10.3726	10.2807	0.00184203
언어정보(낙관적)	0.98931	11.5283	12.5176	0.00170246
언어정보(중간적)	6.87983	23.5944	30.4742	0.00116193
언어정보(보수적)	12.6398	27.0000	39.6398	0.00084879

표 11은 외관상태 등급이 C등급인 대상교량에 대한 상판부의 보수·보강 전 후의 잔여수명을 신뢰성평가 2차곡선식으로 기존의 신뢰성해석 방법과 퍼지 신뢰성해석 방법으로 평가한 결과이다. 표 11에서와 같이 잔여수명 연장기간이 수치정보< 언어정보(낙관적)< 기존신뢰성해석< 언어정보(중간적)< 언어정보(보수적)의 순서임을 알 수 있었다. 따라서 우리의 현재 유지관리수준이나 정기점검 및 정밀진단의 수준이 불확실한 상황이고 점검자의 주관에 의해 좌우됨을 고려하다면 퍼지신뢰성감소함수 $\varphi_\beta(t)$를 퍼지 신뢰성지수 프로파일(일명 퍼지 신뢰성프로파일로 칭함)로 추정할 때는 Mori의 열화

손상 메카니즘 모델에 따른 신뢰성평가 곡선식인 1차식(철근부식인 경우), 2차식(염해인 경우) 그리고 평방근식(염소이온인 경우)으로 잔여수명을 추정하고 예방 유지관리조치를 취함이 타당하다고 사료된다. 따라서 광섬유센서를 이용한 교량안전진단의 변형률 및 변위모드의 정기적이고 장기적인 계측결과를 사용함으로써 노후 또는 열화된 교량구조시스템의 주관적 보유신뢰성를 분석하는 자료로 활용될 수 있고, 이에 따른 주관적 보유신뢰성의 분석자료를 사용하여 교량구조 시스템에 대한 적정한 유지관리조치를 사전에 예측할 수 있기 때문에 교량구조시스템의 신속한 응급조치 및 보수·보강대책을 수립하기 위한 방재시스템에 활용될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 보다 체계적이고 합리적인 교량구조시스템의 퍼지적 상태 및 안전성평가 을 이용한 신뢰성해석 모델을 제시하였고, 퍼지적 신뢰성해석에 관한 기초연구의 일환으로 퍼지결함수분석 기법을 실제 교량구조시스템의 신뢰성프로파일 평가에 적용하여 보았으며, 이를 위하여 교량구조시스템의 신뢰성감지함수에 따른 신뢰성 프로파일의 프로그램인 LIFETIME를 개발하여 공용수명을 분석하고 경제성 분석방법을 제시하였다. 따라서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기존의 교량구조시스템의 신뢰성평가는 교량구조시스템에 내재되어 있는 손상요소가 다양하고 매우 복잡하기 때문에 이들에 대한 정확한 확률해석과 빈도해석을 수행해야만 가능하게 되는데, 이러한 확률 및 빈도해석을 수행할 수 있는 손상요소는 극히 제한되어 있는 경우가 대부분이기 때문에 퍼지적 신뢰성분석 기법의 적용이 불가피하다고 본다.
2) 본 연구에서 수치예제로 적용한 퍼지결함수분석 기법은 교량구조시스템에 내재되어 있는 다양한 불확실량을 언어학적 변량으로 취급할 수 있으므로 실제 교량구조시스템의 신뢰성평가를 위한 유용한 방법이라 하겠다.
3) 본 연구에서 제시한 MATLAB 언어를 사용한 신뢰성 프로파일의 LIFETIME 프로그램은 향후 교량구조시스템의 예방유지관리 수준에 대한 경제성 분석을 수행하여 체계적인 유지관리전략의 수립을 위한 의사결정의 지원도구로서 사용될 수 있다. 또한 선진외국에서 수행되고 있는 시간에 따른 철근콘크리트 및 강교량의 부재요소 및 부재 시스템의 시간이력 신뢰성해석을 바탕으로 둔 적정유지관리의 시나리오에 따른 교량구조시스템의 잔여수명 예측과 경제성 분석에 활용될 수 있다.
4) 본 연구에서 제시한 유지관리를 위한 퍼지 신뢰성해석 모델은 보유성능 및 내진성능확보를 위한 노후된 사회기반시설물의 최적유지보수계획에 활용될 수 있고, 광섬유센서의 계측결과 자료를 이용한 사회기반시설물의 신속한 응급조치 및 보수·보강대책을 수립하기 위한 방재시스템에 확장 적용할 수 있다.

참고문헌

1. 김종길·손용우·이증빈·이채규·안영기, "성능평가를 고려한 철근콘크리트교의 경제성 분석", 한국구조물진단학회 가을 학술발표회 논문집, 제7권 제1호, 2002, pp 119-130.
2. 이증빈·신형우, "하중계수에 기초한 최적신뢰성의 해석모델 개발", 전산구조공학회 논문집,제5권. 제4호, 1992,12, pp.113 - 124.
3. 이증빈, 나기현, 손용우, 박주원, "퍼지결함수분석을 이용한 교량시스템의 상태 및 안전성평가", 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 제12권 제2집, 1999.10, pp.107~114.
4. 건설교통부., "안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량)," 2002.12.
5. Mori, Y., and Nonaka, M., "LRFD for Assessment of Deteriorating Existing Structures," Structural Safety, Elsevier, 23, 2001, pp 297~313.
6. Kong, J.S., Frangopol, D.M., "Life-Cycle Reliability-Based Maintenance Cost Optimization of Deteriorating Structures with Emphasis on Bridges," Journal of Structural Engineering, Vol 129, No.6, 2003.6, pp.818-828
7. Kanda, J., and Ellingwood, B., "Formulation of Load Factor based on Optimum Reliability," Structural Safety, 1991, 9 pp. 197~ 210.
8. Kanda, J., and Adachi, T., "Influence of Probability Distribution of Load on Optimum Reliability," Reliability Engineering and System Safety, Elsevier 73, 2001, pp. 197~ 204.
9. Aktas, E., Moses, F., and Ghosn, M., "Cost and Safety Optimization of Structural Design Specfications," Reliability Engineering and System Safety, Elsevier 73, 2001, pp. 205~ 212.
10. Mori, Y., and Nonaka, M., "LRFD for Assessment of Deteriorating Existing Structures," Structural Safety, Elsevier 23, 2001, pp. 297~ 313.
11. Xu, K., Tang, L.C., Xie, M., and Zhu, M.L., "Fuzzy Assessment of FMEA for Engine Systems," Reliability Engineering and System Safety, Elsevier 75, 2002, pp. 17~ 29.

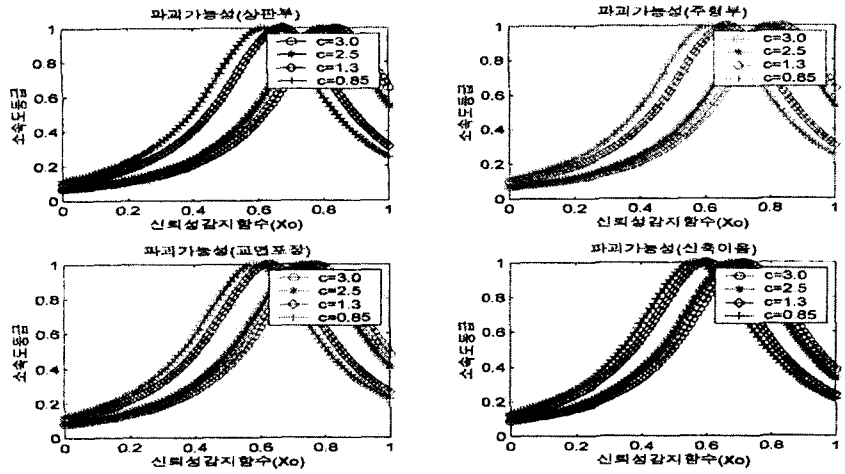

그림 3. 교량상부구조요소의 신뢰성감지함수(Xo)

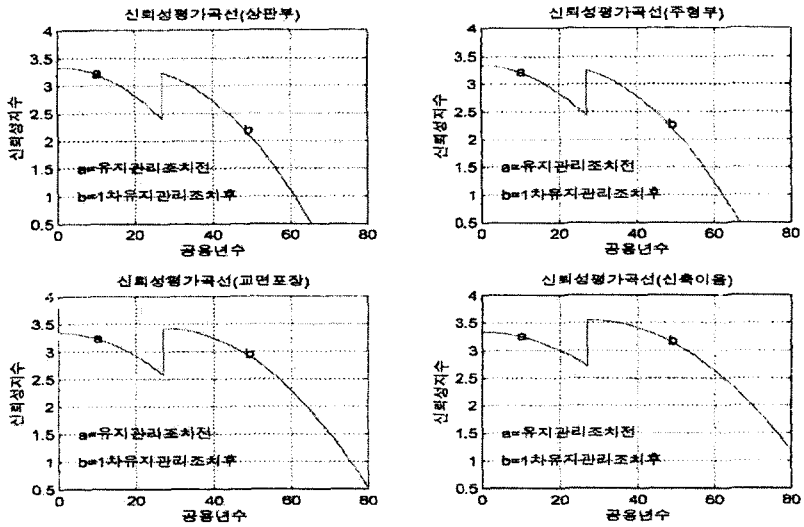

그림 4. 교량상부구조요소의 신뢰성 프로파일(1회조치시)

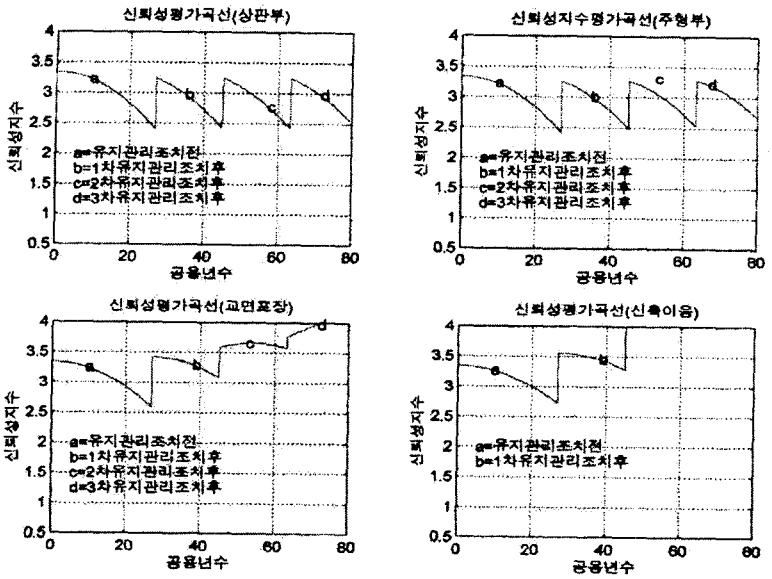

그림 5. 교량상부구조 요소의 신뢰성프로파일(3회조치시)

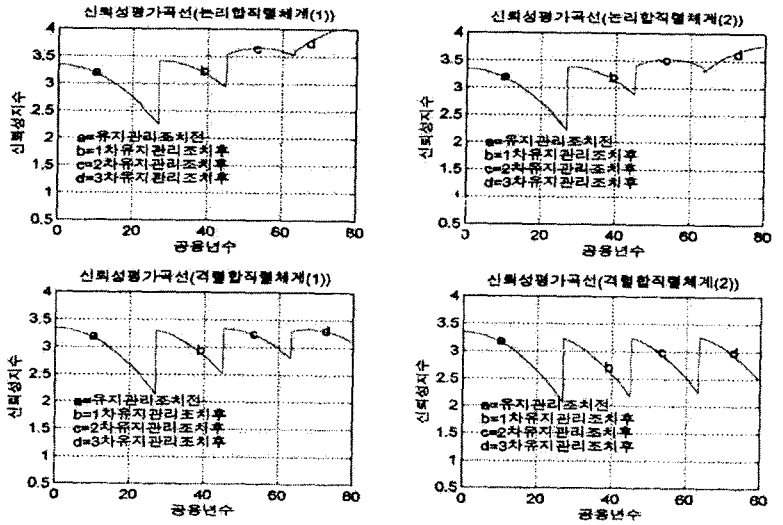

그림 6. 교량구조시스템의 신뢰성 프로파일(3회조치시)