

퍼지결합수분석을 이용한 교량시스템의 상태 및 안전성평가

The Condition and Safety Assessment using Fuzzy Fault Tree Analysis for Bridge System

이 중 빈¹⁾ 나 기 현²⁾ 손 용 우³⁾ 박 주 원⁴⁾
Lee, Cheung-Bin Na, Ki-Hyun Sohn, Young-Woo Park, Ju-Won

ABSTRACT

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

1. 서 론

우리나라의 도로 건설산업은 경제성장과 더불어 국민생활을 향상시키고, 교통편의를 도모하는데 크게 기여해 왔으나, 대부분의 교량구조물은 열악한 환경조건하에서 공용되고 있어 준공 단계부터 구조물의 유지관리에 대하여 관심을 기울이지 않으면 공용기간 중 만족할 만한 기능의 유지 및 확보는 불가능해지며, 공용 중에 균열이나 변형 등과 같은 열화손상을 조기에 발견하여 기능상의 장애나 사고를 미연에 방지하기 위해서는 정기적인 점검을 통하여 유지관리를 실시하도록 하는 것이 바람직하다.

특히 교량구조물이 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 퍼지결합수분석(FFTA : Fuzzy Fault Tree Analysis) 기법과 같은 과학적이고 확실적인 상태 및 안전성 평가방법이 절대적으로 필요하다고 본다.

이러한 퍼지기법을 도입한 결합수분석 기법이 실제 도로교의 상태 및 안전성평가에 유용하다고 보는 이유는 기존의 결합수분석 기법으로 도로교의 상태 및 안전성평가를 수행하기에는 설계 및 시공과 직접 관련된 손상요소 뿐만 아니라 자연재해, 사회 경제적 손상요소, 정치적 손상요소 및 환경적 손상요소 등 도로교 손상에 내재되어 있는 손상요소가 다양하고 매우 많기 때문에 이들에 대한 정확한 확률해석과 빈도해석을 수행하여야만 가능한데, 실제 이러한 확률해석과 빈도해석을 수행할 수 있는 손상요소는 극히 제한되어 있으며 실질적으로 전문가의 판단 아래 정성적으로 안전성 평가가 이루어지는 경우가 대부분이기 때문이다.

이에 본 연구에서는 실제의 총체적인 교량시스템의 상태 및 안전성 평가분석에 실용적으로 적용할 수 있는 합리적인 모형 및 기법은 제시하였는바, 이는 교량시스템의 종합적인 안전성평가를 객관적인 자료만을 통해 시도한 기존의 결합수분석과는 달리 객관적 자료에 대해서는 데이터의 특성에 적합한 구조신뢰성 기법을 적용하였고, 객관적 자료에 의해 분석할 수 없는 경우의 손상요인에 대해서는 주관적인 판단을 하여 정량적으로 분석 가능한 퍼지집합이론에 기초한 FFТА기법을 적용함으로써 그 상태 및 안전성분석을 결정하였다.

1) 순천제일대학 토목과 교수, 정회원
2) 건설교통부 시설안전과 토목사무관, 정회원
3) 순천제일대학 토목과 겸임교수
4) (주)한국구조안전기술원 전남사무소장

2. 교량시스템의 퍼지적 상태 및 안전성평가모형

퍼지적인 상태 및 안전성 평가를 위해서는 교량구조시스템의 여러 손상요소와 시나리오를 규명하고 의사 결정 모델링을 통한 분석이 반드시 필요하게 되는데, 이 때 가장 널리 이용되는 기법으로는 퍼지결함수분석이 있으며 퍼지결함수분석 기법은 전형적인 연역적 체계의 분석방법으로서 구조시스템의 파괴의 원인이 되는 파괴모드에 대한 분석을 위한 것이다.

퍼지결함수분석 기법은 최악의 사건과 이 사건을 뒤따르는 원인이 되는 기본원인들 사이의 논리적인 상호 연관성을 도해적인 표현으로 나타내는 하나의 모델링 기법이며, 주요 파괴사건을 이끌어내는 여러 가지 결합 또는 파괴사건들의 발생확률 또는 파괴확률에 대한 정량적인 평가를 포함한다.

특히 본 연구에서 취급하고자 하는 RC교량과 같이 상부구조와 하부구조 요소들이 서로 복합적으로 작용하는 상태에서 외부하중에 대해 교량구조시스템의 상태 및 안전성평가를 정확히 해석하기 위해 교량 총 시스템 모형을 직렬과 병렬시스템을 병행한 조합시스템으로 가정하면 그림 1과 같이 된다.

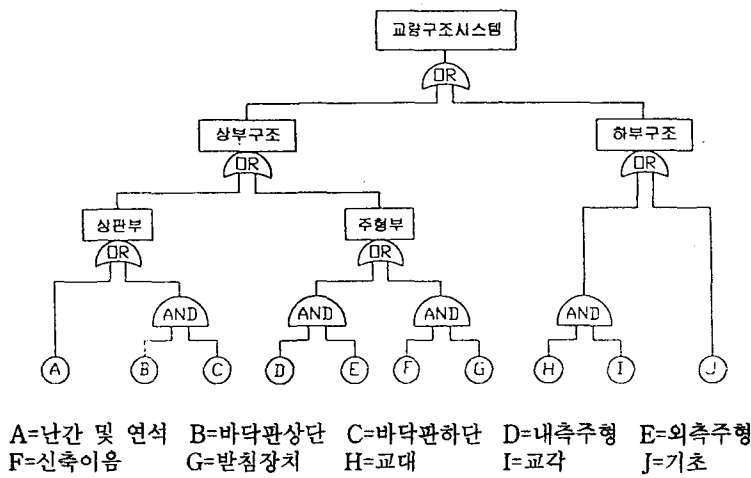


그림 1. 교량시스템의 Fault Tree Diagram

3. 교량구조시스템의 상태평가 기준

3.1 파괴가능성에 의한 퍼지상태평가 해석

실제 교량구조시스템에 있어서는 수치정보로 표현하기 어렵고 인간오차나 시공중의 파오와 같이 전문가의 주관적 판단 등 교량구조시스템에 내재되어 있는 손상요인이 다양하고 매우 많기 때문에 실질적으로 전문가의 경험적 판단 아래 정성적으로 상태 및 안전성평가가 이루어지는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 정성적 상태 및 안전성평가 기법개발에 관한 기초단계로서 그림 2와 같이 파괴가능성(failure possibility)이론을 도입하여 퍼지상태평가 해석을 수행하였다.

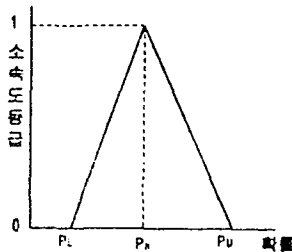


그림 2a. 퍼지확률(Fuzzy probability)

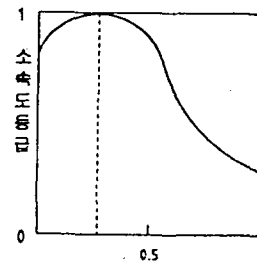


그림 2b. 파괴가능성(Failure possibility)

이 파괴가능성은 교량구조시스템의 상태평가를 통일적으로 표현하는 척도로 정의할 수 있고 자연언어변수를 사용한 [0.1]상의 퍼지집합으로 표현된다. 이 때 파괴가능성의 소속도함수(memberhip function)는 최대소속도함수의 등급이 주어진 매개변수 X_0 와 전문가의 공학적판단에 의한 주관적판단의 불확실 범위로 표현되는 애매성 매개변수 m 으로 나타내면 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, X =주관적 상태지수, m =애매성계수(퍼지성계수)

따라서 교량구조시스템의 손상상태에 대응하는 주관적 상태지수 X_0 는 퍼지-베이시이론에 의한 신뢰성해석으로 산정한 사후파괴확률(예측파괴확률) P_f^j 을 사용하면 다음과 같이 표현된다.

$$X_0 = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/P_f^j))^3} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } k = \frac{1}{\log(1/p_f)}, P_f^j = \frac{C_f P_f^{j-1}}{C_f P_f^{j-1} + C_s (1 - P_f^{j-1})}$$

이 때, k 는 주관적 안전평가 기준으로서 목표파괴확률(p_f) 또는 목표신뢰성지수(β_0)의 값으로 산정된다. 또한 애매성계수 m 는 Dobois-Prade의 퍼지수개념을 이용하여 구한 퍼지확률에서 P_M/P_L , P_U/P_M 과의 비로 결정되는 함수로 나타낸 주관적 판단의 불확실 범위를 정해주는 계수로서 표 1과 같이 된다.

표 1. m , k 와 애매성의 언어변수

등급	k	m	애매성의 언어변수
1	$k \leq 3$	2.0	애매성이 적다
2	$3 < k \leq 5$	2.5	애매성이 중간정도이다
3	$5 < k \leq 10$	3.0	애매성이 약간 크다
4	$10 < k$	3.5	애매성이 크다

* $k = P_M/P_L$ 또는 P_U/P_M P_M =평균퍼지확률, P_U =상위퍼지확률, P_L =하위퍼지확률

3.2 퍼지결함수분석 기법

3.2.1 수치정보에 의한 해석방법

수치정보에 의한 해석방법은 퍼지-베이시이론에 의한 신뢰성해석이론을 이용한 정량적이고 객관적방법으로서 퍼지집합의 기본연산인 논리합과 격렬합을 사용하면 직렬체계의 손상상태에 대응하는 파괴가능성의 주관적상태지수 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.

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

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

$$\text{여기서, } P_f = P_{f1} + P_{f2} - P_{f1} \times P_{f2} \quad (3c)$$

단, P_f =논리합연산(OR연산)의 전체 사후파괴확률

X_{01} =직렬체계 1의 파괴가능성에 대한 주관적상태지수

X_{02} =직렬체계 2의 파괴가능성에 대한 주관적상태지수

이 때, X_{01} , X_{02} 는 식 (2)를 이용하면 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X_{01} = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p_{f1}))^3}, X_{02} = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p_{f2}))^3} \quad (4)$$

한편, 병렬체계의 퍼지상태평가에서는 퍼지집합의 기본연산에서 논리곱과 격렬곱을 사용하게 되는데, 병렬

체계의 손상상태에 대응하는 정량적정보에 의한 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\text{논리곱} : X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p))} \quad (5a)$$

$$\text{적렬곱} : X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + [(1 - X_{01})/X_{01}]^{1/3} + [(1 - X_{02})/X_{02}]^{1/3}} \quad (5b)$$

$$\text{여기서, } P_f = P_A \times P_B \quad (5c)$$

- 단, P_f =논리곱연산(AND연산)의 전체 사후파괴확률
- X_{01} =병렬체계 1의 파괴가능성에 대한 주관적상태지수
- X_{02} =병렬체계 2의 파괴가능성에 대한 주관적상태지수

이 때, 병렬체계의 X_{01}, X_{02} 는 식 (4)를 이용하여 계산되어 진다.

3.2.2 언어정보에 의한 해석방법

언어정보에 의한 해석방법은 파괴가능성에 의한 퍼지상태평가 해석을 이용한 정성적이고 주관적인 방법으로서 교량구조시스템을 구성하고 있는 구조요소의 손상요인 등이 주로 언어변량으로 표현되고 전문가의 주관에 기인되기 때문에 언어정보에 의한 상태평가해석이 검토되어야 한다.

따라서 직렬체계의 퍼지상태평가해석인 경우에는 식 (3)의 수치파라미터를 파라미터 c 로 치환하면, 퍼지집합의 연산에 대한 파괴가능성의 전체 주관적상태지수 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\text{논리합} : X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p))^c} \quad (6a)$$

$$\text{적렬합} : X_0 = G(X_{01}, X_{02}) = \frac{[(X_{01}/(1 - X_{01}))^c + (X_{02}/(1 - X_{02}))^c]^{1/c}}{1 + [(X_{01}/(1 - X_{01}))^c + (X_{02}/(1 - X_{02}))^c]^{1/c}} \quad (6b)$$

한편, 병렬체계의 퍼지상태평가인 경우에는 식 (5)의 수치파라미터를 파라미터 n 으로 치환하면, 정성적정보에 의한 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\text{논리곱} : X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/p))^n} \quad (7a)$$

$$\text{적렬곱} : X_0 = H(X_{01}, X_{02}) = \frac{1}{1 + [(1 - X_{01})/X_{01}]^{1/n} + [(1 - X_{02})/X_{02}]^{1/n}} \quad (7b)$$

3.3 퍼지이론에 의한 교량구조의 상태평가 기준

지금까지 수행된 교량구조시스템의 안전도평가에서 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 구체화하여 이러한 외관조사결과를 실제 내하력 산정시 반영하는 방법의 일환책으로 퍼지이론에 의한 상태평가기준을 나타내면 다음의 표 2와 같이 된다.

표 2. 퍼지이론에 의한 교량구조시스템의 상태평가 기준

정량적 해석방법			상태기준	보수·보강 기준	정성적 해석방법		
손상도등급	사후신뢰성지수(β)	주관적상태 지수(X_0)			손상도등급		
A	A1	5.0이상	건설당시의 상태		0.078	A1	A
	A2	5.0 ~ 4.5	건설당시의 상태		0.078 ~ 0.126	A2	
	A3	4.5 ~ 4.0	매우 양호한 상태	보수 불필요	0.126 ~ 0.206	A3	
B	B1	4.0 ~ 3.5	양호한 상태	보수가 필요할 수 있음	0.206 ~ 0.330	B1	B
	B2	3.5 ~ 3.0	비교적 양호한 상태	보수가 필요할 수 있음	0.330 ~ 0.500	B2	
C	C1	3.0 ~ 2.5	보통상태	경미한 보수가 필요할 수 있음	0.500 ~ 0.687	C1	C
	C2	2.5 ~ 2.0	한계상태	즉시 보수 또는 보강이 필요	0.687 ~ 0.842	C2	
D	D1	2.0 ~ 1.5	불량한 상태	즉시 보수 또는 보강이 필요	0.842 ~ 0.936	D1	D
	D2	1.5 ~ 1.0	심각한 상태	보수 또는 부강시 구조물 폐쇄	0.936 ~ 0.979	D2	
E	E1	1.0 ~ 0.5	위험한 상태	구조물 폐쇄, 보수 가능	0.979 ~ 0.994	E1	E
	E2	0.5 ~ 0.0	파괴 상태	구조물 폐쇄, 보수 불능	0.994 ~ 0.999	E2	
	E3	0.0이하	파괴 상태	구조물 폐쇄, 보수 불능	0.999	E3	

4. 교량구조시스템의 안전성 평가기준

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 내하력평가에 대한 퍼지이론의 도입이 필수 불가결한 것이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 모순점을 개선하기 위한 일환으로 각 구조부재요소의 손상상태에 대한 안전 전문가의 주관적 판단을 퍼지언어변수로 표현하고, 퍼지집합론의 논리를 근거로 한 퍼지근사추론법을 이용하여 교량시스템의 내하력평가를 수행하였다.

4.1 퍼지근사추론법에 의한 안전성평가 분석모형

교량구조시스템의 안전성평가 분석에 있어 내하력평가로 부터 기인되는 5 가지 보정인자, 즉 응력 및 처짐 보정계수(X1), 노면상태 보정계수(X2), 교통상태 보정계수(X3), 외관상태 보정계수(X4) 및 내하율(X5)에 대한 표현을 퍼지언어변수(fuzzy linguistic variable)를 이용하고 각 보정인자의 퍼지언어변수값(fuzzy linguistic value)을 근사추론법(approximate reasoning)에 의해 합성하므로써 교량의 정밀한 공용내하력 판정방법을 제시한다.

내하력판정 조건문은 $P_{X1}, P_{X2}, P_{X3}, P_{X4}, P_{X5}$ 및 P_S 를 각각 X1, X2, X3, X4, X5 및 S에 관한 퍼지명제라고 하면 퍼지논리에 의해 식 (8)과 같이 된다.

$$IF (X1 = P_{X1}) \cap (X2 = P_{X2}) \cap (X3 = P_{X3}) \cap (X4 = P_{X4}) \cap (X5 = P_{X5}) THEN S = P_S \quad (8)$$

위 조건문의 전제조건은 $P = P_{X1} \cap P_{X2} \cap P_{X3} \cap P_{X4} \cap P_{X5}$ 이다. 따라서 식 (8)에서의 퍼지관계 R은 식 (13)과 같이 정의할 수 있다.

$$R = R_{X1} \cap R_{X2} \cap R_{X3} \cap R_{X4} \cap R_{X5} \quad (9)$$

여기서, $R_{X1}, R_{X2}, R_{X3}, R_{X4}, R_{X5}$ 및 R은 각각 교량의 응력 및 처짐 보정계수(X1), 노면상태 보정계수(X2), 교통상태 보정계수(X3), 외관상태 보정계수(X4) 및 내하율(X5)의 퍼지관계를 나타낸다.

이상과 같은 과정에 보정인자에 관한 조건이 변할 때 퍼지합성규칙(fuzzy compositional rule)에 의한 근사추론법을 이용하여 새로운 공용내하력 판정을 추론할 수 있다. 따라서 보정인자의 조건이 $X1=P_{X1}', X2=P_{X2}', X3=P_{X3}', X4=P_{X4}'$ 및 $X5=P_{X5}'$ 로 변하였다고 가정하면, 퍼지합성규칙에 의해 결정되는 공용내하력판정은 $i=1, 2, \dots, 5$ 라 할 때 식 (10)과 같다.

$$S = \bigcap_{i=x_i} = (P' \cdot R_i) \quad (10a)$$

$$S(X_S) = \bigwedge_{i=x_i} [\bigvee_{x_i \in X_i} (P_i'(X_i \wedge r_i(X_i : X_j)))] \quad (10b)$$

여기서, $\wedge = \text{Min}, \vee = \text{Max}$

지금까지의 과정은 교량의 공용내하력 판정을 퍼지근사추론법을 통해 산정한 것이었고, 다시 언어표현으로 전환시키는 과정을 언어근사법(linguistic approximation)이라고 하는데 이 때 Kaufuman의 해밍거리(hamming distance)의 개념을 도입하면 식 (11)과 같다.

$$d(A, B) = \sum_{i=x_i \in X} | \mu_A(X_i) - \mu_B(X_i) | \quad (11)$$

따라서 도출된 퍼지집합을 $S_d^0 = (S_{d1}^0, S_{d2}^0, \dots, S_{dm}^0)$ 이라 하면, 여기에 근사화시킨 S내의 한 퍼지부분집합 S_d^* 은 $d \in 1, 2, \dots, m$ 라 할 때 식 (12)와 같다.

$$S_d^* = \text{Min } d(S_d^0, S_d) = \text{Min } \sum_{i=1}^m | S_{di}^0 - S_{di} | \quad (12)$$

4.2 공용내하력 평가기준

퍼지이론을 이용한 공용내하력 평가기준은 외관조사 및 비파괴시험에 따른 손상요인의 정성적영향을 반영하고, 현장계측에서 얻은 정량적 실용담비(실처짐비)와 실충격계수를 명확히 포함시킴으로서 식 (13)과 같이 된다.

$$P_n = RF \times P_r \times K \quad (13)$$

여기서, RF=강도설계법에 의한 내하율, P_r=설계하중, K=X1·X2·X3·X4(보정계수)

식 (13)의 4가지 보정인자, 즉 응력 및 처짐 보정계수(X1), 노면상태 보정계수(X2), 교통상태 보정계수(X3), 외관상태 보정계수(X4) 및 내하율(X5)에 대한 소속도함수(membership function)는 식 (14)와 같이 된다.

1) 삼각형 퍼지집합인 경우

$$\begin{aligned} \mu_{Xi(1)} &= 0.25/8 + 0.75/9 + 1.0/10 \\ \mu_{Xi(2)} &= 0.25/5 + 0.75/6 + 1.0/7 + 0.75/8 + 0.25/9 \\ \mu_{Xi(3)} &= 0.25/3 + 0.75/4 + 1.0/5 + 0.75/6 + 0.25/7 \\ \mu_{Xi(4)} &= 0.25/2 + 0.75/3 + 1.0/4 + 0.75/5 + 0.25/6 \\ \mu_{Xi(5)} &= 1.0/1 + 0.75/2 + 0.25/3 \end{aligned} \tag{14a}$$

2) π형 퍼지집합인 경우

$$\begin{aligned} \mu_{Xi(1)} &= 0.08/8 + 0.68/9 + 1.0/10 \\ \mu_{Xi(2)} &= 0.32/6 + 0.92/7 + 0.92/8 + 0.32/9 \\ \mu_{Xi(3)} &= 0.08/3 + 0.68/4 + 1.0/5 + 0.68/6 + 0.08/7 \\ \mu_{Xi(4)} &= 0.32/2 + 0.92/3 + 0.92/4 + 0.32/5 \\ \mu_{Xi(5)} &= 1.0/1 + 0.68/2 + 0.08/3 \end{aligned} \tag{14b}$$

이 때, 각 보정인자 X1, X2, X3, X4 및 X5는 퍼지집합의 소속도함수로서 식 (14a)의 삼각형 퍼지집합을 사용하고, 공용내하력 판정 S는 식 (14b)와 같이 π형 퍼지집합을 사용하여 공용내하력 판정을 수행하였으며, 교량의 공용내하력 판정시에 사용되는 각 보정인자에 대한 퍼지언어변수의 표현은 표 3과 같다.

표 3. 퍼지집합이론에 의한 공용내하력 평가시의 퍼지언어변수

보정인자	퍼지부분집합	퍼지언어변수	보정인자	퍼지부분집합	퍼지언어변수
응력 및 처짐 보정계수(X1)	X1-1	very mild	외관상태 보정계수(X4)	X4-1	mild
	X1-2	mild		X4-2	moderate
	X1-3	moderate		X4-3	severe
	X1-4	severe		X4-4	very severe
	X1-5	very severe		X4-5	extreme
노면상태 보정계수(X2)	X2-1	very low	내하율(X5)	X5-1	mild
	X2-2	low		X5-2	moderate
	X2-3	medium		X5-3	severe
	X2-4	abundant		X5-4	very severe
	X2-5	very abundant		X5-5	extreme
교통상태 보정계수(X3)	X3-1	very low	공용내하력 판정(S)	S1	very good
	X3-2	low		S2	good
	X3-3	medium		S3	average
	X3-4	abundant		S4	poor
	X3-5	very abundant		S5	very poor

따라서 건설교통부에서 제정한 공용내하력 평가기준을 근거로 하여 퍼지근사추론법에 의한 공용내하력 평가기준은 표 4와 같이 된다.

표 4. 퍼지근사추론법에 의한 교량시스템의 공용내하력 평가기준

판정등급	내하율	공용내하력	구조상태	유지관리지침
S1	RF>1.0	P _n ≥18.0	매우 안전	육안검사
S2	1.0<RF<0.75	15.0<P _n <18.0	안전	유지 및 정기 육안검사
S3	0.75<RF<0.57	13.5<P _n <15	안전도 및 내하력 부분상실	유지·보수
S4	0.57<RF<0.25	10.125<P _n <13.5	안전도 및 내하력 상실	보수·보강
S5	RF<0.25	P _n <10.125	불안전	주요 부분 보강 및 교체

* S1=Very Good, S2=Good, S3=Average, S4=Poor, S5=Very Poor

5. 적용 예 및 고찰

5.1 적용대상교량의 제원과 일반사항

본 연구에서는 퍼지결합수분석에 의한 교량시스템의 상태 및 안전성평가를 체계적으로 제시하였고, 본 연구에서 적용한 방법에 대한 검토를 위하여 4개소의 교량에 대해 기존의 방법과 퍼지결합수분석 기법을 동시에 적용해 보았다. 다음의 표 5는 적용대상교량의 제원과 일반사항을 나타내고 있다.

표 5. 적용대상교량의 제원과 일반사항

구 분		화죽교	칭학교	낙포교	삼일교
구조 형식	형식	RC슬래브연속교	RC슬래브연속교	라멘교	라멘식 T형거더교
	교 폭	9.5m	10.7m	27.0m	15.0m
	연 장	2@12.5m=25.0m	3@6.0m=18.0m	3@13.3m=40.0m	2@4.0+12.0m=20.0m
	하부 교대	역 T형	역 T형	벽식	벽식
	교각	벽식	벽식	벽식	라멘식
교량등급		2등교	2등교	2등교	2등교
설계하중		DB-18	DB-18	DB-18	DB-18
교좌장치		교부받침	-	-	-
신축이음		ACE조인트	-	-	-
난간형식		강재파이프	강재파이프	강재파이프	콘크리트
준공년도		1991	1991	1969년	1968년

5.2 퍼지이론에 의한 상태평가

본 연구에서는 각 구조부재요소의 손상상태에 대한 안전전문가의 주관적 판단을 손상인자, 즉 손상심각도, 손상범위 및 손상노출정도의 3가지 퍼지언어변수로 표현하고, 퍼지집합의 개념을 도입한 파괴가능성에 의한 퍼지상태평가 및 퍼지결합수 분석기법을 이용하여 적용대상교량의 외관조사의 결과를 토대로 상태평가를 실시하였으며, 적용대상교량의 손상점검항목 및 중요도지수의 설정은 문헌·6, 7)에 상술되어 있으므로 생략하고, 적용대상교량의 상태평가 수행결과만을 표 6에 정리하였다.

표 6. 적용대상교량에 대한 상태평가 수행결과

구 분	상부구조							하부구조				종합판정	건교부안 상태등급
	난간 및 연석	바닥판		주형	신축 이음	받침 장치	계	교대	교각	기초	계		
		상단	하단										
화죽교	B2	C1	C2	-	C1	D1	C1	B2	B2	A2	B1	B2	B
칭학교	B2	C2	E1	-	-	-	C1	D1	D1	A2	C2	C1	C
낙포교	D2	C2	E2	-	-	-	D2	E1	E1	A2	C2	D2	D
삼일교	C1	C1	C2	C2	-	-	C1	C1	B2	A2	B1	C1	C

표 6의 결과는 주관적이고 정성적인 손상 및 외관조사와 객관적이고 정량적인 현장제측의 결과를 토대로 하여 산정한 값으로서 본 연구에서 수행한 교량구조시스템의 요소별, 상·하부구조별 및 교량구조의 종합판정은 기존의 상태평가 방법보다 훨씬 체계적이고 합리적인 평가방법이라고 판단된다.

5.3 퍼지이론에 의한 안전성평가

본 연구에서의 적용대상교량에 대한 안전성평가는 현장재하시험 및 구조해석의 결과를 토대로 하여 허용응력이론에 의한 방법, 강도설계법에 의한 방법 및 본 연구에서 제시한 퍼지근사추론법에 의한 방법을 적용하였으며, 표 7은 그 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

특히 현재의 강도설계법에서는 공용내하력 평가시에 2가지 보정인자, 즉 응력보정계수와 공용년수, 활하중 동시재하확률, 교통량 및 차선수 등의 보정계수를 사용한다 반하여 퍼지근사추론법에 의한 방법에 있어서는 허용응력설계법에서와 같이 5가지 보정인자, 즉 응력 및 처짐 보정계수(X1), 노면상태 보정계수(X2), 교통상태 보정계수(X3), 외관상태 보정계수(X4) 및 내하율(X5)에 대한 소속도함수(membership function)와 퍼지부분집합의 퍼지언어변수를 사용하여 교량시스템의 보정항목에 따른 정량적인 공용내하력판정을 분석한 점이 특이하다 하겠다.

표 7에서의 값이 내하율과 공용내하력을 현행 강도설계법과 퍼지근사추론법으로 비교해 본 결과 전반적으로 퍼지근사추론법에 의한 값이 강도설계법에 의한 값보다 낮게 되는 것은 퍼지근사추론법에 의한 방법에 있어 외관조사의 결과와 4가지 보정계수를 실제 내하율과 내하력 산정시에 반영했기 때문이다.

표 7. 적용대상교량의 상부구조물에 대한 안전성평가의 결과

구 분		화죽교	청학교	낙포교	삼일교
허용용력법	내하율(RF)	1.46	1.45	-	-
	공용내하력(P_n)	DB-37.00	DB-32.90	-	-
강도설계법	내하율(RF)	0.95	1.15	0.92	0.77
	공용내하력(P_n)	DB-21.00	DB-18.00	DB-13.16	DB-13.9
퍼지근사추론법	내하율(RF)	0.71(S3)	0.88(S2)	0.83(S2)	0.76(S2)
	공용내하력(P_n)	DB-18.91(S1)	DB-15.79(S2)	DB-13.48(S3)	DB-13.77(S3)

* (S_i): 표 4의 판정등급임.

따라서 내하율과 내하력평가에 있어 퍼지근사추론법에 의한 방법을 기존의 방법과 비교해 볼 때 보정계수 인자에 외관손상요인을 고려한 안전성평가가 용이하게 되고, 이러한 인자에 대해서도 언어학적 변량으로 취급하여 해석할 수 있으므로 상대적인 퍼지상태 지수값을 비교함으로써 교량시스템의 안전성평가를 위한 조치 및 제어를 위하여 매우 유용한 방법이라 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 보다 체계적이고 합리적인 교량시스템의 퍼지적 상태 및 안전성평가 모형에 대해 제시하였고, 퍼지적 손상도평가에 관한 기초연구의 일환으로 퍼지결함수분석 기법을 실제 교량시스템의 안전성평가에 적용하여 보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존의 교량시스템의 상태 및 안전성평가는 교량시스템에 내재되어 있는 손상요소가 다양하고 매우 많기 때문에 이들에 대한 정확한 확률해석과 빈도해석을 수행해야만 가능하게 되는데, 이러한 확률 및 빈도해석을 수행할 수 있는 손상요소는 극히 제한되어 있는 경우가 대부분이기 때문에 퍼지적 손상도분석 기법의 적용이 불가피하다고 본다.
- 2) 본 연구에서 수치예제로 적용한 퍼지결함수분석 기법은 교량시스템에 내재되어 있는 다양한 불확실량을 언어학적 변량으로 취급할 수 있으므로 실제 교량시스템의 상태 및 안전성평가를 위한 유용한 방법이라 하겠다.
- 3) 본 연구에서 제시한 교량시스템의 체계적인 퍼지적 안전성 평가모형은 향후 건설구조물 시스템의 손상도 분석 평가 및 관리를 위한 모형으로서 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Lee, C. B., and Park, J. W., "Reliability Analysis Based on Fuzzy-Bayesian Approach", proc. of ICCCB E-VII, Vol.1, 1997, pp.589~593.
2. 정철원, 이증빈, 나기현, 박주원, "Fuzzy개념을 이용한 R.C도로교의 건전성 평가모델 개발", 한국구조물진단학회지 VOL.2, NO.2 1998.4 pp.151-161
3. 이증빈, 박주원, 장영부, "퍼지근사추론법에 의한 손상구조물의 건전도평가시스템개발", 한국구조물진단학회 봄학술발표회논문집, 제2권 제1호, 1998.5. pp.41-48
4. 이증빈, 백대우, 박주원, 강수경, "퍼지-베이즈 이론에 의한 기존구조물의 신뢰성평가모델", 한국전산구조공학회지, VOL.42, NO.4, 1998.12. pp.219-227
5. 이증빈, 손용우, 박주원, "구조시스템의 퍼지신뢰성해석 및 상태평가모델", 한국전산구조공학회 가을학술발표회 논문집, 제11권 제2집, 1998.10, pp.61~68.
6. 전라남도도로안전관리사업소, "지방도 교량 2개소 정밀안전진단보고서", 1999.6.
7. 전라남도여수시, "시도 1호선 교량 2개소 정밀안전진단보고서", 1999.6.