

퍼지의사결정을 이용한 교량 구조물의 건전성평가 모델

안영기¹⁾* · 김성철²⁾*

¹⁾쌍용엔지니어링주식회사 ²⁾경기대학교

(2002년 9월 11일 원고접수, 2002년 11월 29일 심사완료)

Integrity Assessment Models for Bridge Structures Using Fuzzy Decision-Making

Young-Ki Ahn¹⁾, and Sung-Chil Kim²⁾*

¹⁾ Ssangyoung Engineering Co., Ltd, Seongnam 461-161 KOREA

²⁾ Dept. of Civil Engineering, Gyeonggi University, Suwon, 442-760 KOREA

(Received Sept 11, 2002, Accepted Nove. 29, 2002)

ABSTRACT

This paper presents efficient models for bridge structures using CART-ANFIS (classification and regression tree-adaptive neuro fuzzy inference system). A fuzzy decision tree partitions the input space of a data set into mutually exclusive regions, each region is assigned a label, a value, or an action to characterize its data points. Fuzzy decision trees used for classification problems are often called fuzzy classification trees, and each terminal node contains a label that indicates the predicted class of a given feature vector. In the same vein, decision trees used for regression problems are often called fuzzy regression trees, and the terminal node labels may be constants or equations that specify the predicted output value of a given input vector. Note that CART can select relevant inputs and do tree partitioning of the input space, while ANFIS refines the regression and makes it continuous and smooth everywhere. Thus it can be seen that CART and ANFIS are complementary and their combination constitutes a solid approach to fuzzy modeling.

Keywords : integrity, CART-ANFIS, fuzzy decision making

1. 서 론

교량 구조물의 건전성평가를 위한 의사결정은 교량 구조물의 내구성과 내하성을 병행한 평가가 기본이 되어야 하는데, 현재 국내에서는 교량 구조물에 대한 외관상태의 평가기준 이외에는 특별하게 구조물의 건전성에 대한 판단기준이 제시되어 있지 않다. 단지 구조물에 대한 내하력평가를 위해 공용내하력을 재하시험과 설계도면의 해석을 통해서 산출하는 과정만 존재할 뿐, 이에 대한 신뢰성도 많은 이유로 인해서 뚜렷하게 정립되어 있지 못한 실정이다. 선진 외국에서는 내구성에 대한 척도가 각 시스템마다 차이가 있는데, 대표적인 의사결정의 척도로는 충분도지수(sufficiency rating), 상태평가(condition appraisal), 내하력(load rating) 등을 구조물에 대한 내구성의 의사결정에 사용하고 있다. 그러나 무엇보다도 교량 구조물의 보수·보강 등의 유지관리를 위해서는 내구성과 내하성을

병행한 의사결정기준이 절실히 요구된다 하겠다.

교량 구조물의 건전성에 대한 의사결정에 있어서 중요한 결정인자는 시간경과에 따른 중성화 및 염해에 의한 철근부식 그리고 콘크리트의 노후도 등이 있다. 이 결정인자를 사용한 건전성평가의 의사결정이론에는 인공지능의 응용분야 들인 전문가시스템, 신경회로망, 퍼지이론과 유전자 알고리즘 등의 적용이 필요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 주로 구조물의 손상과 진단등에 활용되어 온 분류형 전문가시스템의 일종인 퍼지이론을 이용한 결정목(decision tree)구조와 기존의 인공신경망을 응용한 결정목구조의 내구성평가를 비교 분석하였다. 또한 퍼지의사결정 이론을 토대로 건전성평가 모델로 교량 구조물에 대한 보수·보강 및 교체 등을 판정하고, 구조물의 생애주기비용 평가에 필요한 잔유수명과 보수·보강비에 대한 예측평가의 타당성 및 실용성을 검증하는데 그 목적이 있다.

* Corresponding author

Tel : 031-249-9711 Fax : 031-244-9717

E-mail : sung7kim@kuic.kyonggi.ac.kr

2. 퍼지의 의사결정이론

2.1 퍼지의사결정 모델의 정식화

퍼지의사결정 모델은 인공지능의 응용분야중 하나인 분류형 퍼지전문가시스템(jang 등, 1997)의 지식표현 형식인 결정목(decision tree : 분류목 또는 회귀목)구조 표현이 있다. 이 결정목 구조는 철근콘크리트 구조물의 손상과 진단등과 같이 어떤 대상을 인식하는 전문가시스템으로 이용할 수 있는데, 가끔 분류문제에 사용되는 경우에는 분류목(classification tree)구조라 하고 통계적 회귀문제에 사용될 경우에는 회귀목(regression tree)라고 한다.

두 개의 입력변수 x 와 y 그리고 출력변수 z 을 갖는 전형적인 이원화 회귀목구조는 Fig. 1(a)와 같고, 이원화 회귀목구조의 입력구역을 4개의 중복되지 않은 직사각형 영역으로 분배하여 나타낸 것이 Fig. 1(b)이다.

따라서 Fig. 1(a)와 같이 결정목구조를 보통집합의 규칙으로 나타내면 식(1)과 같이 된다.

$$\text{If } x < a \text{ and } y < b, \text{ then } z = f_1 \quad (1a)$$

$$\text{If } x < a \text{ and } y \geq b, \text{ then } z = f_2 \quad (1b)$$

$$\text{If } x \geq a \text{ and } y < c, \text{ then } z = f_3 \quad (1c)$$

$$\text{If } x \geq a \text{ and } y \geq c, \text{ then } z = f_4 \quad (1d)$$

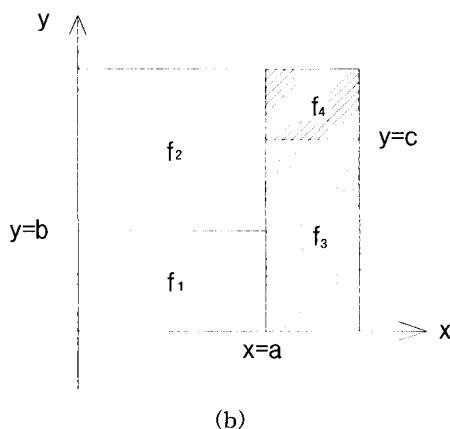
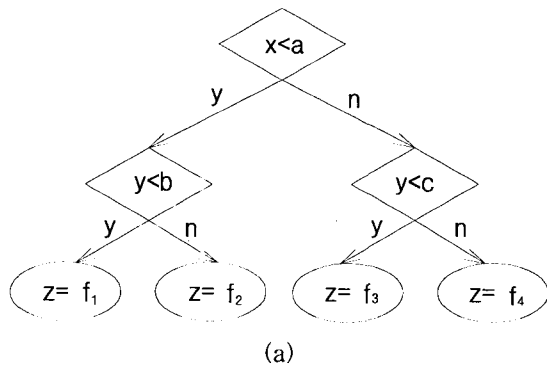


Fig. 1 Typical decision tree partitions

식(1)의 4개의 규칙을 퍼지집합(fuzzy sets)으로 표현하면 Sugeno형의 퍼지추론시스템으로 바꾸면 된다. 결과적으로 퍼지의사결정 이론은 Fig. 2와 같이 적응 뉴로-퍼지 시스템(adaptive neuro-fuzzy inference system : ANFIS)에 분류 와 회귀목구조(classification and regression tree : CART)를 접목한 것이다. 이 CART-ANFIS구조에 기초한 퍼지모델링은 2가지 영역, 즉 임의의 보통집합 규칙을 알아내는 CART의 영역인 구조동정과 임의의 규칙을 전제한 부분을 퍼지화한 후에 파라메타를 조정하는 ANFIS의 영역인 파라메터동정으로 구성된다.

따라서 본 연구에서 개발한 모델에 대한 CART-ANFIS의 각 층 각 노드의 수행연산은 다음과 같이 된다.

Layer1 : 주어진 입력변수(INV)의 멤버쉽함수 등급의 계산

Layer2 : 각 규칙의 발화강도를 발견하기 위해서 주어진 멤버쉽함수 등급의 연산

Layer3 : 주어진 발화강도에 기초한 각 규칙의 정규화 계산

Layer4 : 퍼지추론시스템에 따른 결론부의 규칙 출력의 계산

ANFIS 훈련은 조건부 파라메터의 최적화를 위해서 구배감소 알고리즘을 사용하고 결론부 파라메터를 풀기위해서 최소제곱법을 사용한다. 본 연구에서 사용하는 의사결정은 오차감소를 위한 두개의 상이한 알고리즘을 사용하기 때문에 훈련규칙을 Hybrid로 일컫는다. 이 때 결론부 파라메터 들은 최소제곱 알고리즘을 사용하여 먼저 갱신되고, 조건부 파라메터 들은 오차들을 역전파시키는 방식으로 갱신된다.

2.2 교량구조물의 퍼지의사결정 모델

일반적으로 내구성은 구조물의 구성재료의 시간에 따른 열화 및 유해 환경에 대한 저항성을 의미한다. 그리고 내하

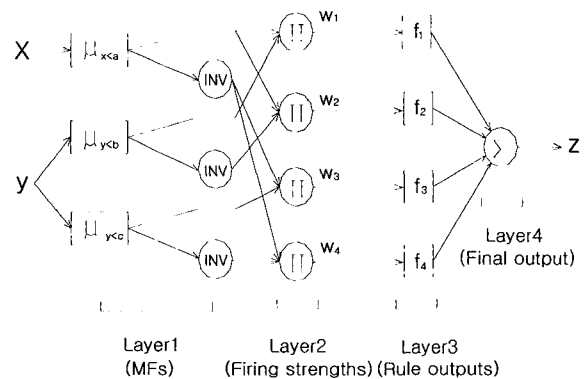


Fig. 2 Adaptive neuro-fuzzy inference system

성은 구조물에 작용하는 외적하중에 대해구조물이 보유하고 있는 내력의 정도를 나타내는 것을 의미한다. 따라서 교량구조물의 내구성과 내하성을 동시에 종합적으로 평가하여 건전성으로 정의하고 건전성을 평가하기 위한 퍼지 의사결정의 내용 및 흐름은 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 외관조사결과에 대해 인공신경망이론에 의하여 외관상태 등급을 판정하고, 외관상태 등급 A, B, C, D, E에 따라 내구성 지수(durability factor : C_r)를 각각 DF=0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.60를 퍼지량으로 하였다. 그리고, 보수·보강전 손상된 교량부재의 내하율과 보수·보강전 원 부재의 내하율의 비를 내하성 지수(rating factor : R_f)라고 하고, 내구성과 내하성을 이용하여 회귀목(decision tree)구조를 응용한 퍼지 의사결정에 의해 건전성 지수(integrity factor : D_f)를 결정하였다.

3. 교량 구조물의 내구성평가 모델

3.1 외관상태 평가 모델

교량 구조물의 상태평가는 교량의 현재상태를 정량적으로 파악하기 위하여 실시하며, 평가방법은 크게 교량의 외관상태를 평가하는 방법과 내하성을 평가하는 방법으로 구분된다. 본 연구에서 사용한 외관상태 평가모델은 건설교통부에서 제정한 교량상태 판정기준을 적용하였고, 인공신경망을 이용한 상태평가 기법의 이론적 전개과정은 Fig. 3과 같다⁴⁾.

3.2 철근부식 평가 모델

3.2.1 중성화에 의한 철근부식

철근콘크리트 구조물은 내구적으로 반영구적이라는 가정하에 극한강도설계법에서는 철근부식의 성능저하를 고려한 설계가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 그러나 Mori-Ellingwood⁹⁾의 연구자료에 의하면 Fig. 4과 같이 콘크리트내에 매입된 철근의 평균부식률(average corrosion rate) v 는 약 50 $\mu\text{m}/\text{yr}$ 정도이다. 따라서 힘에 대한 공용년수에 따른 공칭저항 휨강도와 부식철근의 단면적을 계산하는 식은 다음과 같이 된다¹⁰⁾.

$$M_r(t) = \phi A_s(t) f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2a)$$

$$A_s(t) = \frac{n\pi D_b^2}{4} \quad (t \leq T_I),$$

$$A_s(t) = n\pi [D_b - 2v(t - T_I)]^2 / 4 \quad (t > T_I) \quad (2b)$$

이때, 철근의 평균부식률 v 는 상태평가 값에 따라 달라

지며, 상태평가가 C 등급이면 $v = 0.0039 \text{ cm/year}$, D등급이면 $v = 0.0064 \text{ cm/year}$, E등급이면 $v = 0.0089 \text{ cm/year}$ 이다. 한편, 전단에 대한 공용년수에 따른 공칭저항 전단강도와 부식철근의 단면적을 계산하는 식은 다음과 같이 된다.

$$V_r(t) = V_c + V_s(t) = V_c + \frac{A_r(t) f_y d}{S} \quad (3a)$$

$$A_r(t) = 2\pi D_b^2 / 4 \quad (t \leq T_I),$$

$$A_r(t) = 2\pi [D_b - 2v(t - T_I)]^2 / 4 \quad (t > T_I) \quad (3b)$$

여기서, $V_c = 0.53\sqrt{f_{ck}} \text{ bod}$

3.2.2 염해에 의한 철근부식

염해에 의한 철근부식은 Stern-Geary의 분극저항기법을 사용한 부식전위도(corrosion current density)로 계산된다⁸⁾. 이때 철근표면의 공식의 최대 침투가 평균 침투의 4~8배 정도가 된다. 일반적으로 공식은 여러 가지 형태로 발생하는데 Fig. 4에서와 같이 공식이 반구형이라고 하면, 공용년수(t)에 따른 공식의 반경은 식 (4)과 같이 되고, 공용년수에 따른 부식된 철근의 순단면적 $A_s(t)$ 은 식 (5)와 같이 된다.

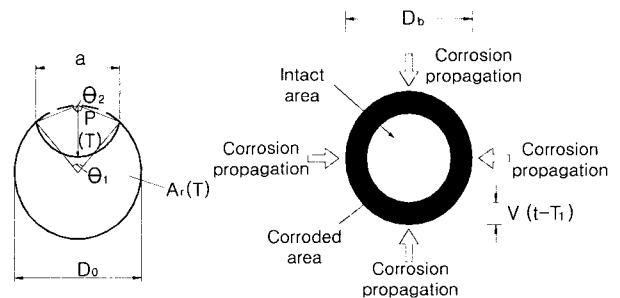


Fig. 4 Average corrosion of rebar

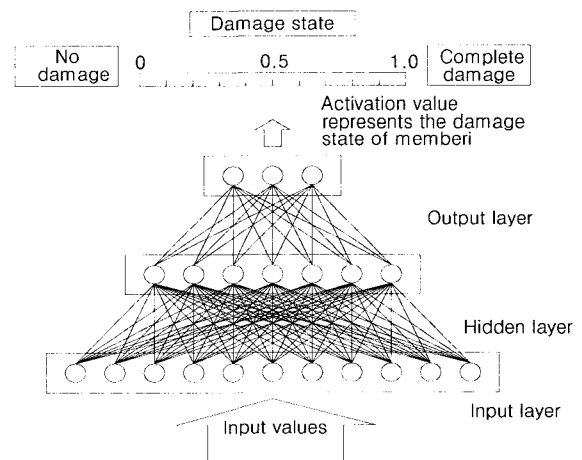


Fig. 3 Artificial intelligence

$$p(t) = 0.0116(t - T)icorrR \quad (4)$$

여기서, $R = 4 \sim 8$

$$\begin{aligned} A_s(t) &= \frac{\pi D_o^2}{4} - A_1 - A_2 \quad (p(t) \leq \frac{\sqrt{2}}{2} D_o) \\ A_s(t) &= A_1 - A_2 \quad (\frac{\sqrt{2}}{2} D_o < p(t) \leq D_o) \\ A_s(t) &= 0 \quad (p(t) > D_o) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } A_1 &= \frac{1}{2} \left[\theta_1 \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 - a \left| \frac{D_o}{2} - \frac{p(t)^2}{D_o} \right| \right] \\ A_2 &= \frac{1}{2} \left[\theta_2 R(t)^2 - a \frac{p(t)^2}{D_o} \right] \\ a &= 2p(t) \sqrt{1 - \left[\frac{p(t)}{D_o} \right]^2} \\ \theta_1 &= 2 \arcsin \left(\frac{2a}{D_o} \right) \quad \theta_2 = 2 \arcsin \left[\frac{a}{p(t)} \right] \end{aligned}$$

3.3 콘크리트의 노후도 평가모델

교량 구조물의 내구성과 직결되는 노후화(deterioration)는 일반적으로 교량 구조물의 외부환경적인 요인과 내부의 재료적인 성질에 의해서 시간이 경과함에 따라 구조 성능이 지속적으로 저하되는 특징이 있다. 본 연구에서는 Frangopol 등¹¹⁾이 개발한 공용년수에 따른 초기저항모멘트의 구조성능이 매년 0.4~0.8% 감소하는 노후율 개념을 도입하여 잔류저항모멘트의 구조성능 $M_r \cdot \text{age}(t)$ 을 평가 모델로 사용하면 다음과 같이 된다.

$$M_r \cdot \text{age}(t) = (1 - \alpha_r t) M_{r0} \quad (6)$$

여기서, M_{r0} = 원래의 저항모멘트의 구조성능,
 t = 공용년수,
 α_r = 콘크리트의 노후율

식 (6)에서 사용하는 α_r 은 철근콘크리트 구조물의 상태 평가 등급에 따라 값이 변화하는데 상태평가가 C등급이면 $\alpha_r = 0.004$, D등급이면 $\alpha_r = 0.006$, E등급이면 $\alpha_r = 0.008$ 이 된다.

4. 교량구조물의 보강설계이론 및 손상검출

4.1 휨보강 설계이론

4.1.1 내구성 회복의 보강설계

교량 구조물이 손상되어 내구성이 저하된 경우에 저하된 내구성을 회복시키는 것을 목적으로 보강하는 경우는

소요보강 모멘트를 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\phi_{rd} M_{rd} + \phi_r M_{rep} \geq M_u \quad (7)$$

여기서, M_{rd} = 보강전 원부재의 손상된 공칭저항모멘트,
 M_{rep} = 보강시 필요한 소요보강 저항모멘트
 ϕ_{rd} = 원부재의 손상된 저항계수,
 ϕ_r = 보강재의 저항계수

또한 보강전 원부재의 공칭저항모멘트 M_{rb} 와 보강전 원부재의 손상된 공칭저항모멘트 M_{rd} 의 비를 내구성지수 (durability factor : C_r) C_{rb} 라 하면 식 (8)과 같이 되고, 보강전 원부재의 공칭저항모멘트 M_{rb} 와 보강후 원부재의 보강저항모멘트 M_{ra} 의 비를 보수·보강 후의 내구성지수 (durability factor) C_{ra} 라 하면 식 (9)와 같이 된다.

$$C_{rb} = M_{rd} / M_{rb} \quad (8)$$

$$C_{ra} = M_{ra} / M_{rb} \quad (9)$$

여기서, $M_{ra} = \phi_{rd} M_{rd} + \phi_r M_{rep}$

4.1.2 내하력 증가의 보강설계

성능개선을 위한 보강된 부재의 공칭저항모멘트는 보강전 부재의 구성요소에 보강후의 재 산정된 중립축을 적용하여 산정한 모멘트 분량과 보강재가 가지고 있는 추가저항모멘트 분량을 더한 것으로 그 모멘트 분량의 합이 극한저항모멘트보다 커야하므로 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{rb} M_{rb} + \phi_r M_{rep} \geq M_u \quad (10)$$

여기서, M_{rb} = 보강전 원부재의 공칭저항모멘트

4.2 건전성의 판정기준

손상되지 않은 교량 구조물의 보수·보강전후의 모멘트의 증가율은 손상된 교량 부재의 보수·보강전후의 모멘트 증가율과 서로 비례하므로 보수·보강 후 손상된 원부재의 공칭저항모멘트와 손상되지 않은 원부재의 공칭저항모멘트의 비를 이용한 건전성 지수 D_b 는 다음과 같다.

보수·보강 전 :

$$D_b = 1 - 2.15(1 - R) \cdot \frac{M_{rd}}{M_{rb}} = 1 - 2.15(1 - R) \cdot C_{rb} \quad (11a)$$

보수·보강 후 :

$$D_{fa} = 2.15(R_f' - 1) \cdot \frac{M_{ra}}{M_{rb}} = 2.15(R_f' - 1) \cdot C_{ra} \quad (11b)$$

여기서, R_f = 보수·보강전의 내하율, R_f' = 보수·보강 후의 내하율

식 (11)는 내구성과 내하성을 동시에 고려한 함수로서 교량 구조물의 내구성평가로 교량구조물의 손상을 정량적으로 평가할 수 있기 때문에 교량 구조물의 손상검출에 매우 효율적이다.

교량 구조물에 대한 손상도(건전성)의 판정기준과 그 대책기준은 Table 1과 같다.

4.3 보수비 예측평가모델

교량 구조물의 열화 또는 손상을 회복시키기 위하여 각종 보수 및 보강공법이 사용되고 있다. 보수공법과 보강공법으로 분류하는 기준은 내하력 부족을 회복시킬 수 있는 공법인가에 따라서 분류되지만 명확한 경계가 있는 것은 아니다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 제시하고 있는 보수·보강공법의 효과를 토대로 각 공법의 보수효과 즉 손상회복 효과를 정량화하여 보수비 예측평가 방법을 개발한다. 보수효과의 정량화는 보수전과 보수후의 공칭저항 모멘트와 본래의 공칭저항모멘트의 함수로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$e_{rep} = \frac{M_{ra} - M_{rb}}{M_{ro}} \quad (12)$$

여기서, M_{ro} = 본래의 공칭저항모멘트,

M_{ra} = 보수·보강후의 공칭저항모멘트,

M_{rb} = 보수·보강전의 공칭저항모멘트

식 (12)에서 M_{ra} , M_{rb} 의 값은 전절의 철근부식 평가와 콘크리트의 노후화 평가에 따라 달라지는데, 보수비 예측 모델 평가에 필요한 M_{ra} , M_{rb} 의 값과 보수비용을 보수효과로 표현하면 식 (13) 및 식 (14)와 같이 된다.

$$M_{ra} = M_{rtp} \quad (M_{agep} \geq M_{rtp}),$$

$$M_{ra} = (M_{agep} + M_{rtp})/2 \quad (M_{agep} < M_{rtp}) \quad (13a)$$

$$M_{rb} = M_{rt} \quad (M_{age} \geq M_{rt}),$$

$$M_{rb} = (M_{age} + M_{rt})/2 \quad (M_{age} < M_{rt}) \quad (13b)$$

여기서, M_{rtp} = 보수·보강 후 철근부식에 의한 공칭저항강도, M_{agep} = 보수·보강 후 콘크리트 노후화에 의한 공칭저항강도, M_{rt} = 보수·보강 전 철근부식에 의한 공칭저항강도, M_{age} = 보수·보강 전 콘크리트 노후화에 의한 공칭저항강도

$$C_{rep} = \alpha_{rep} \left(\frac{M_{ra} - M_{rb}}{M_{ro}} \right)^v = \alpha_{rep} e_{rep}^v \quad (14)$$

여기서, v = 모델파라미터(매개변수), α_{rep} = 교량구조물의 교체(개축) 비용

이 때, 실제로 예산이 배정된 개축비용(건설교통부, 1998)을 근거로 하여 산정한 값을 사용하면 라멘교, 슬래브교 및 PSC형교의 교체(개축)비용 α_{rep} (원단위)는 다음과 같이 된다.

$$\text{라멘교} \quad \alpha_{rep} = 10656,901 \times L^{0.58198} \times W^{0.54829} \quad (15a)$$

$$\text{슬래브교} \quad \alpha_{rep} = 3477,219 \times L^{0.65895} \times W^{0.80350} \times H^{0.25905} \quad (15b)$$

$$\text{PSC형교} \quad \alpha_{rep} = 7679,466 \times L^{0.70037} \times W^{0.20233} \times H^{0.59763} \quad (15c)$$

여기서, L, W 및 H = m 단위의 교장, 교폭 및 교고

4.4 교량구조물의 노화예측 모델

보수·보강 공법에 의해 교량 구조물의 손상도가 향상되면 교량의 잔여수명도 증가하게 되며, 잔여수명의 증가는 교량 구조물의 손상예측모델과 손상도의 노화예측을 위해서는 대상 구조물의 손상모델(2)이 필요하게 된다. 본 연구에서는 내구성지수(DF), 내하성지수(RF) 및 손상도지수(IF)를 이용한 공용년수에 따른 교량 구조물의 노화에

Table 1 Integrity assessment and counterplan of bridge

Rate	Condition	Integrity assessment			Counterplan
		C_r	R_f	D_f	
A	Very good	$X > 1.0$	$Y > 1.0$	1.1	Observation
B	Good	$X \geq 0.85$	$Y \geq 0.89$	0.89	Partial repair
C	Fair	$X \geq 0.85$	$Y < 0.89$	0.70	Repair
D	Poor	$X < 0.85$	$Y \geq 0.63$	0.54	Reinforcement
E	Very poor	$X < 0.85$	$Y < 0.63$	0.29	Replacement

측도 모델을 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} S_L &= f(t) = b_L - a_L t^4, \\ S_D &= g(t) = b_D - a_D t^3, \\ S_R &= p(t) = b_R - a_R t^3 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, S_L = 내하성지수에 의한 평균건전도, S_D = 손상도지수에 의한 평균건전도, S_R = 내구성지수에 의한 평균 건전도, $a_L, a_D, a_R, b_L, b_D, b_R$ = 정수

또한 교량 구조물의 경과년수와 내하성의 평균건전도의 함수인 내하성지수, 내구성의 평균건전도의 함수인 내구성지수 및 손상도의 평균건전도의 함수인 손상도지수를 이용하면 보수·보강전후의 잔여수명을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{내하성} : t_L &= \sqrt[4]{b_L/a_L} - t, \\ \text{손상도} : t_D &= \sqrt[3]{b_D/a_D} - t, \\ \text{내구성} : t_R &= \sqrt[3]{b_R/a_R} - t \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, t_L = 내하성에 의한 잔여수명
 t_D = 손상도에 의한 잔여수명
 t_R = 내구성에 의한 잔여수명

5. 적용 예 및 고찰

Table 2 Generation of adopted bridge

Site	Local load 887 line		
Construction year	1974	Design load	DB-13.5
Dimension	b = 210cm, h = 125cm, b ₀ = 50cm, d = 115cm, A _s = 79.42cm ² , A _v = 2.53cm ² , f _{ck} = 240kg/cm ² , f _y = 3000kg/cm ² , M _D = 6,909,606kgf·cm, M _L = 2,867,239kgf·cm, V _d = 1,967,000kgf, V _L = 347,000kgf		
Material property & load test result	i _{cal} = 0.27, i _{test} = 0.3, f _{ck} ' = 171.4kg/cm ² , δ _{sap-외측} = 2.11mm, δ _{test-외측} = 2.04mm, K _r = 0.85, K _t = 1.0, K _o = 0.85, K _s = 1.01		

Table 3 The estimated result of integrity and residual life

		Before rehabilitation			Before rehabilitation		
		View ins.	Concrete deterioration	Corrosion	View ins.	Concrete deterioration	Corrosion
Integrity	C _r	0.8736	0.8920	0.8853	1.2901	1.3232	1.3165
	R _f	0.8442	0.8775	0.8654	1.5998	1.6587	1.6465
	D _f	0.7073	0.7651	0.7437	1.6610	1.8738	1.8300
Load	carrying capacity	11.3962	11.8462	11.6825	21.5841	22.3920	22.2283
Residual life	C _r	7.4293	7.6693	7.5824	25.0031	25.4431	25.3546
	R _f	7.6373	7.9743	7.8529	22.4872	22.9438	22.8524
	D _f	9.2317	10.1923	9.8437	22.7138	24.7518	24.3455

5.1 대상 구조물의 일반사항

대상 교량 구조물의 개요는 Table 2에 제시된 바와 같이 철근콘크리트 T형교량이며 설계하중은 DB-13.5인 2등교량이다. 본 연구에서 제안한 인공지능을 이용한 외관상태평가를 수행한 결과 대상 구조물의 상태평가등급은 output a = 0.6044로 건설교통부안의 C등급에 해당되는 값으로 추정되었고, 보강재는 무기질재료와 보강판넬(Poweron board)을 사용하였다.

5.2 건전성 및 잔여수명예측 평가

본 연구에서는 교량 구조물의 손상도와 건전성의 해석 결과를 검증하기 위하여 Table 3에서와 같이 철근콘크리트 T형 교량에 있어 기존의 외관 육안검사와 현장재하시험의 측정결과로 건전성 및 잔여수명예측 결과를 분석하였다.

Table 3의 건전성은 3가지 방법 즉 내구성지수(잔류저항계수), 내하성지수 및 손상도지수에 의한 건전성을 무기질재료와 Poweron board을 사용하여 보강전과 보강후로 분석한 결과 보강전에는 모든 결과 값이 1.0이하로 내구성과 내하성을 상실하였으나, 보강후의 모든 결과 값이 1.0이상으로 내구성과 내하성이 회복되었다. 이와 같이 교량 구조물에 대한 성능지수는 교량 구조물의 개축과 성능개선을 판정할 수 있는 주요 결정요소라 할 수 있다. 교량 구조물의 외관상태를 통해서 판단할 수 있는 교량 구조물의 손상도는 교량 구조의 노후화의 정도를 판단할 수 있

는 주요한 단서가 되기는 하지만 교량 구조물의 수명과 내하력을 통한 종합적인 평가 측면에서는 미흡한 점이 있다.

따라서, 종합적인 평가에 대한 적절한 의사결정을 위해서는 교통량에 대한 정보, 현재까지의 수명, 구성부재별 건전성 등이 종합적으로 평가되어야 할 내구성(잔류저항계수)과 내하성(내하율)을 병행한 손상도지수(손상도)에 의한 건전성평가가 수행되어야 한다.

5.3 교량구조물의 노화에측평가

현재 건설교통부의 상태평가시스템은 교량 부재의 현재의 손상도는 파악할 수 있지만 장래의 노화진행 정도는 예측할 수 없다. 이에 본 연구에서는 교량 구조물에 대한 건전성을 나타내는 지표로서 내하성지수와 내구성지수 및 손상도지수의 3가지로 분류하여 각각의 공용년수에 따른 값들을 나타내면 Fig. 5, 6, 7, 8과 같이 되며, 콘크리트 노후화와 철근부식에 대한 보수·보강전후의 건전성평가 지표인 내구지수와 노화지수로 나타낸 것으로 장래의 건전성평가를 예측할 수 있다.

Fig. 5, 6는 공용년수에 따른 보수·보강전후의 내구성 평가를 나타낸 것으로 내구성, 내하성 및 손상도에 의한 노화지수가 외관상태, 콘크리트 노후화 및 철근부식의 경우 거의 비슷하게 나타나고 있다. 따라서 교량 구조물의 공용수명은 적절한 보수·보강을 수행함에 따라 성능이 뚜렷하게 개선될 뿐만 아니라 교량 구조물의 공용년수를 연장시킬 수 있으며, 또한 예방적인 보수·보강을 시행할 경우에는 과도한 결함이 노출된 후에 보수·보강을 실시하는 경우보다 공용수명을 보다 연장시킬 수 있고, 공시수행도 훨씬 수월하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 7, 8는 공용년수에 따른 노화에측평가를 나타낸 것으로서 보수·보강전과 보수·보강후의 노화예측에 필요한 내구지수, 내하지수 및 손상지수의 값이 일반적으로 교량의 수명이 오래될수록 노화현상이 급속히 진행되고 있음을 입증하고 있다. 그리고 잔류저항계수의 노화예측곡선이 내하율의 노화예측곡선보다 더 완화곡선이 된다. 이는 내구성지수의 곡선식은 3차식을 사용하는데 반하여 내하성지수의 곡선식은 4차식을 사용했기 때문이다. 이와 같이 손상된 교량 구조물을 적절하게 유지관리하기 위해서는 결함과 성능에 대한 본 연구의 분석을 통해서 언제 어느 시점에서 어떻게 보수·보강을 시행해야 하느냐를 정확히 결정하는 것이 중요하게 되고 이에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

Table 4와 Fig. 9에서와 같이 외관상태 등급에 따른 보수·보강후의 건전성평가 중에서 외관상태등급 E의 손상지수는 0.7084로 보수·보강의 대책에 있어서 교체대상이며, 본 연구에서 제안한 외관상태 등급에 따른 보수·보강전에 대한 내구성지수, 내하성지수 및 손상도지수의 값들

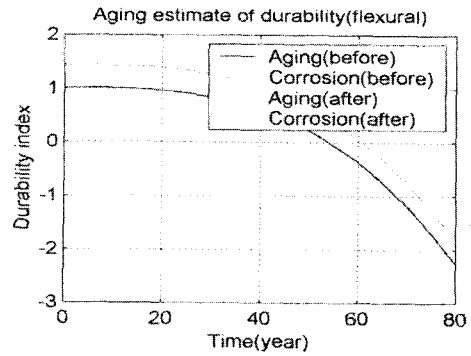


Fig. 5 Deterioration before & after rehabilitation by C_r

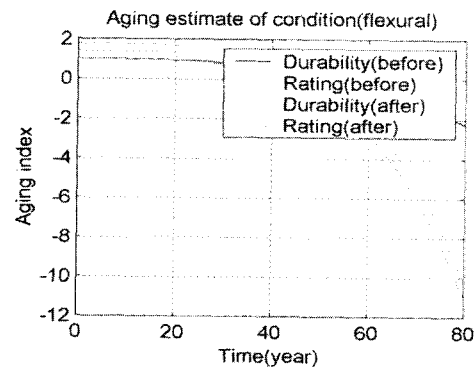


Fig. 6 Deterioration before & after rehabilitation by view inspection result

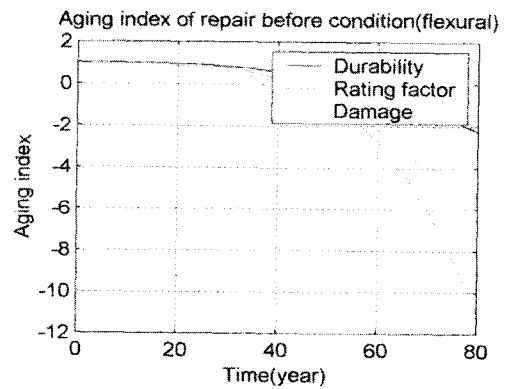


Fig. 7 Deterioration Index before rehabilitation

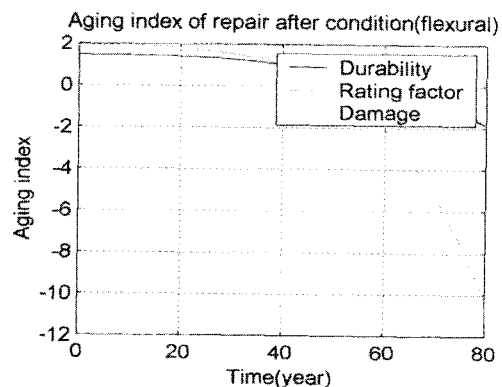


Fig. 8 Deterioration Index after rehabilitation

은 교량구조물의 건전성평가의 기준이 될 수 있다.

또한 본 연구 대상 교량구조물에 있어서 건전성에 대한 노화예측 곡선식중에서 b_i 상수값은 Table 5와 같이 된다. 이 때, 식 (16)의 노화예측 곡선식의 정수값은 잔류저항계수 $a_L=6.4217 \times 10^{-6}$, 내하율 $a_D = 2.9324 \times 10^{-7}$, 손상지수 $a_R=1.4871 \times 10^{-5}$ 이다. 이와같은 건전성에 대한 노후화예측 곡선식을 이용함으로써 현장재하실험 없이 외관상태 평가와 간단한 비파괴실험 즉, 중성화 및 염해에 의한 철근부식과 콘크리트 노후도 시험으로 장래의 상시건전성 감시시스템을 실용·적용할 수 있게 된다. 따라서 Fig. 10, 11, 12에서와 같이 본 연구에서 개발한 건전성에 대한 노화예측모델은 지금까지 개발된 교량 유지관리시스템의 잔여수명예측과 노후화모델에 적용하지 못한 단점을 보완할수 있는 것으로 판단된다.

5.4 보수비용 예측평가 결과

건전성에 대한 노화예측 곡선식을 이용하여 외관상태, 콘크리트 노후도 및 철근부식에 의한 보수비용을 비교한 것이 Fig. 13이다. Fig. 13에서 공용년수가 증가함에 따라 보수비용이 급격하게 변화함을 볼 때 보수비용의 최적시점 선정이 무엇보다 중요하고, 이와 같은 보수비용은 보수·보강공법을 선정함에 있어 보수·보강 우선순위를 결정함에 유효할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 보수·보강공법에 무기질 재료와 보강판넬(Poweron board)을 사용하였는바 손상회복을 위한 보수효과 (e_{rep})는 0.4312(43.12 %)이고, 예측보수비용은 1.1857×10^8 원으로 나타났다.

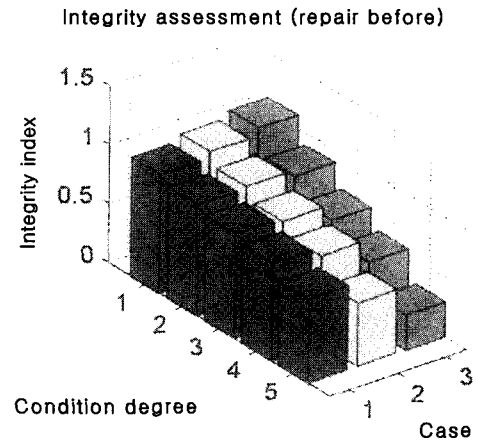


Fig. 9(a) Integrity assessment before rehabilitation

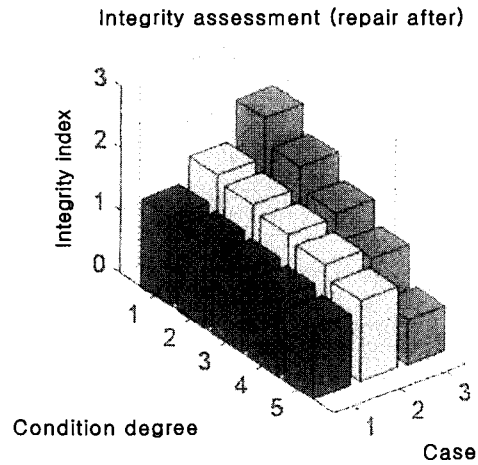


Fig. 9(b) Integrity assessment after rehabilitation

Table 4 The result if integrity assessment according to result of view inspection

		Rate of view inspection				
		A	B	C	D	E
Result of view inspection		0.058	0.2486	0.5020	0.7562	0.9935
Before rehabilitation	C_r	1.0000	0.9318	0.8736	0.8154	0.6989
	R_f	1.0552	0.9497	0.8442	0.7386	0.5276
	D_f	1.1175	0.8992	0.7073	0.5418	0.2902
After rehabilitation	C_r	1.0000	1.3474	1.2901	1.2329	1.1217
	R_f	1.8063	1.7026	1.5988	1.4951	1.2937
	D_f	2.4351	2.0353	1.6610	1.3123	0.7084

Table 5 The constant of b_i in the deterioration curve

구 분	Before rehabilitation			After rehabilitation		
	View ins.	Concrete deterioration	Corrosion	View ins.	Concrete deterioration	Corrosion
	1.1447	1.1417	1.1428	1.0980	1.0955	1.0960
	1.1846	1.1776	1.1801	1.0975	1.0940	1.0946
	1.4138	1.3826	1.3936	1.1762	1.1562	1.1599

6. 결 론

본 연구에서는 손상형태에 대한 구조적 동특성의 양상으로부터 퍼지의사결정이론을 이용한 내구성평가 시스템 모델을 제시하였고, 교량 구조물의 보수·보강을 위한 우선순위를 결정하는 척도를 개발하였으며, 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 기존의 교량에 대한 유지관리를 위한 의사결정은 교량 구조물의 성능개선 및 보수를 위한 예산을 배분함에 있어서 최적의 우선순위를 결정하는 척도로 충분도지수, 상태평가, 내하력 등을 들 수 있는 반면에 본 연구에서는 손상검출의 추정식인 손상지수의 척도를 개발하였고, 이에 따른 건전성 및 잔유수명 예측을 개발하였다.

2) 현재 교량 구조물의 증가에 따라 상대적으로 부족한 기술자들로만 교량 구조물에 대한 효과적인 유지관리를 실시하기 어려운 실정이므로 본 연구의 내구성 평가 시스템 모델을 이용함으로써 보다 효율적인 교량의 유지관리 뿐만 아니라 생애주기비용에 대한 보수비용 예측을 수행할 수 있다.

3) 인공지능기술을 이용한 외관상태, 콘크리트의 노후화, 그리고 철근부식에 대한 노화예측모델 식을 이용함으로써 현장 육안 외관조사나 현장계측 등을 통하지 않고서도 개략적인 공용년수에 따른 내구성평가를 할 수 있어 정기점검 등에 활용될 수 있다. 따라서 대상 교량의 대표적인 노화예측 식은 다음과 같다.

$$\text{보수·보강전 : } S_R = 1.0 - 6.42169 \times 10^{-6} x^3$$

$$\text{보수·보강후 : } S_R = 1.4165 - 6.42169 \times 10^{-6} x^3$$

4) 본 연구에서 개발한 내구성 평가 시스템 및 보수비용 예측평가모델은 실제 개축비용자료를 바탕으로 회귀분석방법에 의해 개발되었기 때문에 교량 구조물의 유지관리에 필요한 보수·보강을 위한 우선순위 결정에 실용적으로 활용될 수 있다고 사료된다.

참고문헌

1. 이증빈, 나기현, "인공지능기술을 이용한 교량구조물의 손상검출," 대한토목학회 학술발표회, 2001.10.
2. 이증빈, 손용우, "교량구조물의 건전도 감시시스템 모델 개발," 대한토목학회 학술발표회, 2001.10.
3. 전라남도도로안전관리사업소, "지방도 887호선 증암교 정밀안전진단보고서," 2001.6.
4. 건설교통부, "97 교량관리체계(B.M.S)개선에 관한 연구," 1998.10.

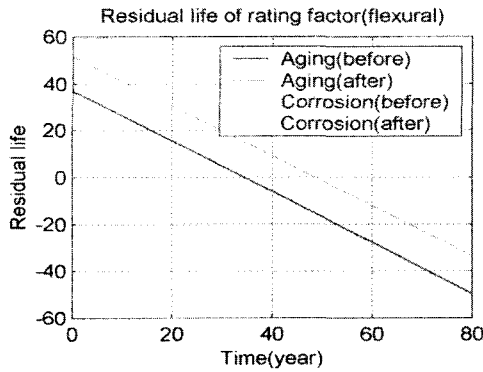


Fig. 10 Residual life before rehabilitation by R_f

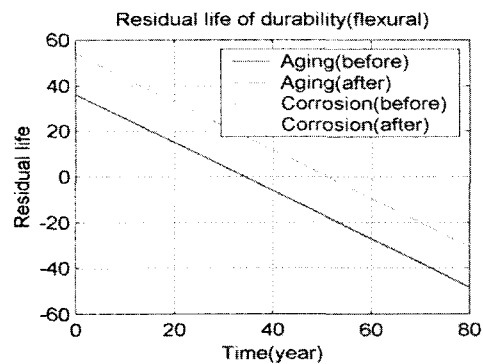


Fig. 11 Residual life after rehabilitation by C_f

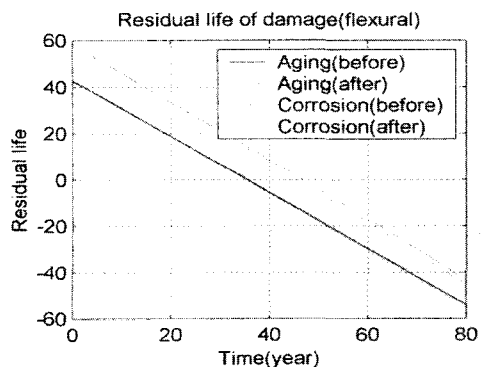


Fig. 12 The estimated residual life before & after rehabilitation by D_f

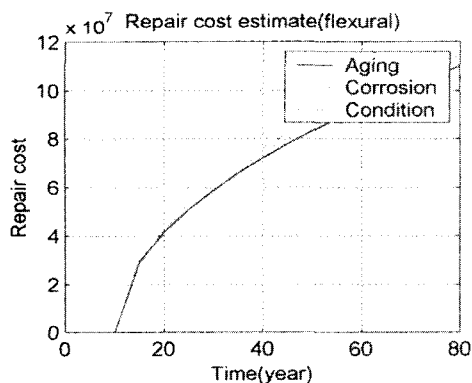


Fig. 13 The result of estimated rehabilitation fee

5. 한국도로공사, “교량유지관리 시스템의 개발 및 운용,” 1999.
6. Hines, J., “Fuzzy and Neural Approaches in Engineering,” WILEY INTER · SCIENCE, 1997.
7. Jang, J-S.R., Sun, C.T., Mizutani, E., “Neuro-Fuzzy and Soft Computing,” PRENTICE HALL, 1997.
8. Val, D. V., and Melchers, R. E., “Reliability of Deteriorating RC Slab Bridge,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 12, December, 1997, pp.1638~1644.
9. Mori, Y., and Ellingwood, B. R., “Maintaining Reliability of Concrete Structures II: Optimum Inspection/Repair,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No.3, 1994.3, pp.846~862.
10. Frangopol, D. M., Lin, K-Y., and Estes, A. C., “Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No.10, October, 1997, pp.1390~1401.
11. Frangopol, D. M., Lin, K-Y., and Estes, A. C., Reliability of Reinforced Concrete Girders under Corrosion Attack,” *Journal of Structural Engineering*, VOL.123, No.3, March, 1997, pp. 286~297.
12. Miyamoto, A., Kushida, M., Adachi, Y., and Matsumoto, M., “Development of Bridge Management System(BMS),” *Journal of Structural Engineering* (in Japanese), VI-34, No. 560, 1997.3, pp.91~106.

요 약

본 연구에서는 분류·회귀목-적용 뉴로 퍼지추론 시스템을 사용하여 교량 구조물에 대한 유용한 모델을 제시하였다. 퍼지결정목은 데이터집합의 입력영역이 서로 다른 영역으로 분류되고 하나의 부호나 값으로 나타내지며 데이터 정점에서 특정화시키기 위한 활동영역으로 할당되기도 한다. 분류문제로 사용되는 결정목은 가끔 퍼지결정목이라고 불려지는데, 각 최종점은 주어진 특정백터의 예측등급을 나타낸다. 회귀문제에 사용되는 결정목을 가끔 퍼지회귀목이라고 하는데, 이 때 최종점 영역은 주어진 입력백터의 예측 출력 값을 상수나 방정식으로 나타낼 수 있다. 분류·회귀목은 관련된 입력값을 선택하여 입력구역에서 분류할 수 있는 반면에 적용 뉴로 퍼지추론 시스템은 회귀문제를 수정하고 이들의 회귀문제를 보다 연속적이면서 간략하게 만들 수 있음을 주목해야 한다. 따라서 분류·회귀목과 적용 뉴로 퍼지추론 시스템은 서로 상보적인 것이며, 이들의 조합은 퍼지모델링을 위해 실질적인 근사식으로 구성된다.

핵심용어 : 건정성, 회귀목-적용 뉴로 퍼지추론 시스템, 퍼지의사 결정