

퍼지의사결정을 이용한 RC구조물의 건전성평가

Integrity Assessment for Reinforced Concrete Structures Using Fuzzy Decision Making

박철수¹⁾ 손용우²⁾ 이증빈³⁾
Park, Cheol-Soo · Sohn, Yong-Woo · Lee, Cheung-Bin

ABSTRACT

This paper presents an efficient models for reinforced concrete 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 of which 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 everywhere continuous and smooth. Thus it can be seen that CART and ANFIS are complementary and their combination constitutes a solid approach to fuzzy modeling.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 의사결정은 구조물의 내구성 과 내하성(안전성)을 병행한 건전성 평가가 기본이 되어야 하는데, 현재 국내에서는 철근콘크리트 구조물에 대한 외관상태의 평가기준 이외에는 특별하게 구조물에 대한 성능을 판단할 수 있는 판단기준이 제시되어 있지 않다. 단지 구조물에 대한 내하력 평가를 위해 공용내하력을 제하시험 과 설계도면의 해석을 통해서 산출하는 과정만 존재할 뿐, 이에 대한 신뢰성도 많은 이유로 인해서 뚜렷하게 정립되어 있지 못한 실정이다. 선진 외국에서는 건전성에 대한 척도가 각 시스템 마다 차이가 있는데, 대표적인 의사결정의 척도로는 충분도지수(Sufficiency Rating), 상태평가(Condition Appraisal), 내하력(Load Rating)등을 구조물에 대한 건전성의 의사결정에 사용하고 있다. 그러나 무엇보다도 철근콘크리트 구조물의 보수·보강등의 유지관리를 위해서는 내구성 과 내하성을 동시에 고려한 건전성평가의 의사결정기준이 절실히 요구된다하겠다.

이러한 철근콘크리트 구조물에 대한 건전성의 의사결정을 평가함에 있어서 중요한 결정인자는 외관조사에 의한 상태평가와 중성화 및 염해에 의한 철근부식 그리고 콘크리트의 노후도등이 있다. 이 결정인자를 사용한 건전성평가의 의사결정이론에는 인공지능의 응용분야 들인 전문가시스템, 신경회로망, 퍼지이론 과 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 이용한 결정목구조의 건전성평가를 비교 분석하였다. 이 퍼지의사결정 이론을 토대로 한 건전성평가 모델로 철근콘크리트 구조물에 대한 보수·보강 및 교체 등을 판정하고, 구조물의 생애주기비용 평가에 필요한 잔유수명 과 보수·보강비에 대한 예측평가의 타당성 과 실용성을 검증하는데 그 목적이 있다.

2. 퍼지의사결정 이론

2.1 퍼지의사결정의 정식화

퍼지의사결정 모델은 인공지능의 응용분야 중 하나인 분류형 퍼지전문가시스템의 지식표현 형식인 결정목(Decision Tree: 분류목 또는 회귀목)구조 표현이 있다. 이 결정목구조는 철근콘크리트 구조물의 손상 과 진단등과 같이 어떤 대상을 인식하는 전문가시스템으로 이용할 수 있는데, 가끔 분류문제에 사용되는 경우에는 분류목(Classification Tree)구조라

- 1) 순천제일대학 토목과 교수
- 2) 순천제일대학 토목과 겸임교수 · 공학박사
- 3) 정회원 · 순천제일대학 토목과 교수 · 공학박사

하고 통계적 회귀문제에 사용될 경우에는 회귀목(Regression Tree)라고한다.
 두 개의 입력변수 x 와 y 그리고 출력변수 z 을 갖는 전형적인 이원화 회귀목구조는 그림-1(a)와 같고, 이원화 회귀목구조의 입력구역을 4개의 중복되지 않은 직사각형 영역으로 분배하여 나타낸 것이 그림-1(b)이다.
 따라서 그림-1(a)와 같이 결정목구조를 보통집합(Crisp Set)의 규칙으로 나타내면 식(1)과 같이된다.

- If $x < a$ and $y < b$, then $z = f_1$ (1a)
- If $x < a$ and $y \geq b$, then $z = f_2$. (1b)
- If $x \geq a$ and $y < c$, then $z = f_3$. (1c)
- If $x \geq a$ and $y \geq c$, then $z = f_4$ (1d)

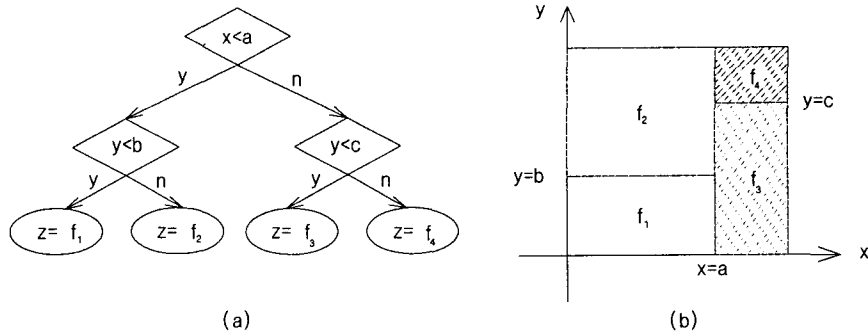


그림-1. 전형적인 결정목구조 및 영역

식(1)의 4개의 규칙을 퍼지집합(Fuzzy Sets)로 표현하면 Sugeno형의 퍼지추론시스템으로 바뀌면 된다. 결과적으로 퍼지의사결정 이론은 그림-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 구조동정 과 임의의 규칙을 전제한 부분을 퍼지화한 후에 파라메타를 조정하는 ANFIS의 영역인 파라메터동정으로 구성된다.

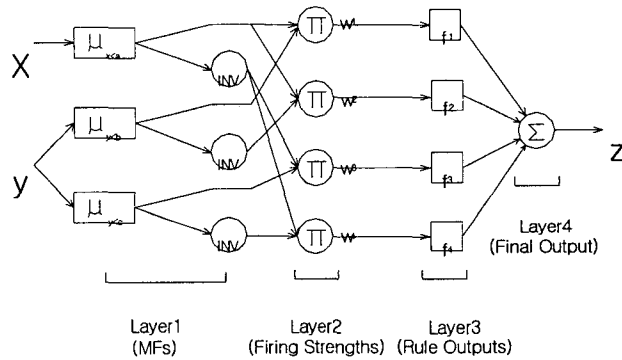


그림-2. 적응 뉴로-퍼지시스템 과 회귀목 구조

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 파라메타의 최적화를 위해서 구배감소 알고리즘을 사용하고 결론부 파라메타를 풀기 위해서 최소제곱법을 사용한다. 본 연구에서 사용하는 의사결정은 오차감소를 위한 두개의 상이한 알고리즘을 사용하기 때문에 훈련규칙을 Hybrid로 일컫는다. 이 때 결론부 파라메타 들은 최소제곱 알고리즘을 사용

하여 먼저 갱신되고, 조건부 파라미터 들은 오차들을 역전파시키는 방식으로 갱신된다.

2.2 철근콘크리트 구조물의 건전성평가 모델

철근콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 미치는 환경요인으로는 온도, 습도등 외기조건과 주변환경에 포함된 염분, 염화물, 이산화탄소 등의 유해물질 작용으로 구분할 수 있는데, 일반적으로 내구성은 구조물의 구성재료의 시간에 따른 열화 및 유해 환경에 대한 건전성을 의미한다. 그리고 내하성은 구조물에 작용하는 외적하중에 대해구조물이 보유하고 있는 내력의 정도를 나타내는 건전성을 의미한다. 따라서 철근콘크리트 구조물의 내구성과 내하성을 동시에 종합적으로 평가하는 안전성평가가 필요하게 되는데 철근콘크리트 구조물에 대한 건전성평가의 내용 및 흐름은 그림-3를 참조하면 된다.

3. 철근콘크리트 구조물의 손상도평가 모델

현행 철근콘크리트 구조물의 구조적 노후도 평가는 안전진단전문기관에 따라 경험적으로 이루어지고 있어 중요한 항목을 조사하지 않거나, 중요하지 않은 항목을 상세하게 조사하는 등 진단결과에 신뢰도를 저하시키는 원인이 되고 있다. 이러한 평가 항목은 보통 진단의 목적과 동기 및 유형에 따라 선정하여야 하며, 실무적용도 고려하여야 한다.

3.1 철근콘크리트 구조물의 상태 평가

철근콘크리트 구조물의 상태평가는 철근콘크리트의 현재상태를 정량적으로 파악하기 위하여 실시하며, 평가방법은 크게 철근콘크리트의 외관상태를 평가하는 방법과 내하성능을 평가하는 방법으로 구분된다. 본 연구에서는 건설교통부에서 제정한 철근콘크리트 교량상태 판정기준을 적용하였고, 인공지능망을 이용한 상태평가 기법의 이론적 전개과정은 그림 4와 같다. 어떠한 외적요인에 의하여 대상구조물에 손상이 발생하게 되면 시스템 내의 동적 특성이 변화되며, 이러한 효과는 인공지능망으로 하여금 기존의 학습데이터 중 이와 유사한 특성을 갖는 데이터를 기억, 이 데이터에 의하여 학습받은 대표시스템을 처리하여 출력데이터를 생산하게 된다. 이러한 인공지능망의 특성을 이용하여 철근콘크리트 구조물 내에서 발생하는 손상정도를 감지하고 그 위치를 파악할 수 있게 된다.

3.2 철근부식 평가 모델

철근 부식은 철근 단면의 감소에 의한 저항모멘트의 저하, 부식면적의 확대에 따른 콘크리트와 철근의 부착파괴, 녹의 팽창압에 의한 피복 콘크리트의 박리나 박락 등의 손상을 유발한다. 이러한 철근부식의 직·간접적인 부식 영향인자도 부식이 진행된 철근콘크리트 부재의 내력저하를 정량적으로 평가하기 위하여 철근부식 길이, 위치 및 부식률 등을 주요 변수로 하여 각각의 변수가 내력에 미치는 영향을 비교 분석함이 필요하다. 본 연구에서는 철근부식이 주로 전면 균일부식을 일으키는 중성화에 의한 철근부식 모델과 주로 공식(pitting)에 의한 국부 부식을 발생시키는 염해에 의한 철근부식 모델로 나누어 분석한다.

3.2.1 중성화에 의한 철근부식

철근콘크리트 구조물은 내구적으로 반영구적이라는 가정 하에 극한강도설계법에서는 철근부식의 성능저하를 고려한 설계가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 그러나 Mori와 Ellingwood의 연구자료에 의하면 그림 5와 같이 콘크리트내에 매입된 철근의 평균부식률(Average Corrosion Rate) ν 는 약 50 $\mu\text{m}/\text{yr}$ 정도이다. 따라서 휨에 대한 공용년수에 따른 공칭저항 휨 강도와 부식철근의 단면적을 계산하는 식은 다음과 같이 된다.

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

$$A_s(t) = \frac{n\pi D_b^2}{4} \quad (t \leq T_I), \quad A_s(t) = n\pi [D_b - 2\nu(t - T_I)]^2/4 \quad (t > T_I) \quad (2b)$$

이 때, 철근의 평균부식률 ν 는 상태평가 값에 따라 달라지며, 상태평가가 C 등급이면 $\nu = 0.0039\text{cm}/\text{year}$, D등급이면 $\nu = 0.0064\text{cm}/\text{year}$, E등급이면 $\nu = 0.0089\text{cm}/\text{year}$ 이다. 한편, 진단에 대한 공용년수에 따른 공칭저항 전단강도와 부식철근의 단면적을 계산하는 식은 다음과 같이

된다.

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

$$A_r(t) = 2\pi D_s^2/4 \quad (t \leq T_I), \quad A_r(t) = 2\pi[D_s - 2\nu(t - T_I)]^2/4 \quad (t > T_I) \quad (3b)$$

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

3.2.2 염해에 의한 철근부식

염해에 의한 철근부식은 Stern-Gearry의 분극저항기법을 사용한 부식전위도(Corrosion Current Density) i_{corr} 로 계산된다. 이때 철근표면의 공식(pitting)의 최대 침투가 평균 침투의 4~8배 정도가 된다. 일반적으로 공식은 여러 가지 형태로 발생하는데 그림 5에서와 같이 공식이 반구형이라고 하면, 공용년수(t)에 따른 공식의 반경은 식 (4)과 같이 되고, 공용년수에 따른 부식된 철근의 순간면적 $A_s(t)$ 은 식 (5)와 같이 된다.

$$\rho(t) = 0.0116(t - T_I)i_{corr}R \quad (4)$$

여기서, $R = 4 \sim 8$

$$A_s(t) = \frac{\pi D_o^2}{4} - A_1 - A_2 \quad (\rho(t) \leq \frac{\sqrt{2}}{2} D_o)$$

$$A_s(t) = A_1 - A_2 \quad (\frac{\sqrt{2}}{2} D_o < \rho(t) \leq D_o) \quad A_s(t) = 0 \quad (\rho(t) > D_o) \quad (5)$$

$$\text{여기서, } A_1 = \frac{1}{2} \left[\theta_1 \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 - a \left| \frac{D_o}{2} - \frac{\rho(t)}{D_o} \right| \right] \quad A_2 = \frac{1}{2} \left[\theta_2 R(t)^2 - a \frac{\rho(t)^2}{D_o} \right]$$

$$a = 2\rho(t) \sqrt{1 - \left[\frac{\rho(t)}{D_o} \right]^2} \quad \theta_1 = 2\text{arc sin} \left(\frac{2a}{D_o} \right) \quad \theta_2 = 2\text{arc sin} \left[\frac{a}{\rho(t)} \right]$$

3.3 콘크리트의 노후도 평가모델

철근콘크리트(RC) 구조물의 내구성과 직결되는 노후화(Deterioration)는 일반적으로 철근콘크리트 구조물의 외부환경적인 요인과 내부의 재료적인 성질에 의해서 시간이 경과함에 따라 구조성능이 지속적으로 저하되는 특징이 있다. 이러한 노후도는 구조성능을 평가함에 있어서 철근콘크리트 구조물의 실제적인 차량통행능력을 판단할 수 있는 내하력과 달리 종합적인 건전성을 평가하는데 있어서 가장 중요한 결정요소가 된다. 하지만 국내에는 콘크리트 구조물에 대한 노후도 평가를 객관적으로 진행시킬 수 있는 축적된 자료가 부족하기 때문에 노후도의 개념을 정립하는데 있어서도 정확한 판단 기준을 갖기가 힘들다. 본 연구에서는 Frangopol 등이 개발한 공용년수에 따른 초기저항모멘트의 구조성능이 매년 0.4~0.8% 감소하는 노후율 개념을 도입하여 잔류저항모멘트의 구조성능 $M_r \cdot \text{age}(t)$ 을 평가모델로 사용하면 다음과 같이 된다.

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

여기서, M_m = 원래의 저항모멘트의 구조성능, t = 공용년수, α_r = 콘크리트의 노후율

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

4. 철근콘크리트 구조물의 보강설계이론 및 손상검출

4.1 휨보강 설계이론

철근콘크리트 구조물의 내구성과 내하력을 증대시켜주기 위한 보수·보강에 관련된 다양한 기술이 개발, 적용되고 있으나 아직 보강설계 기법이 정립되어 있지 않은 상황이다. 특히 감소된 내구성을 회복시켜주거나 내하성 증가를 요할 때 가장 많이 사용되는 방법이 부착식 보강공법이나 현재 사용되고 있는 부착식 보강공법이나 현재 사용되고 있는 부착식 보수공법의 설계법이 체계적으로 이루어져 있지 않은 상태이므로 보강설계이론과 손상검출에 따른 보강공법이 개발되어져야 한다. 본 연구에서는 손상된 철근콘크리트의 내구성 회복을 위한 보강설계이론과 내하력증가를 위한 보강설계이론을 정립시켜 손상검출의 산정식을 유도하였다.

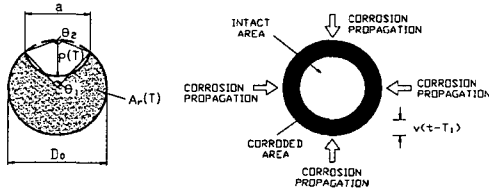


그림 5. 철근의 평균부식률

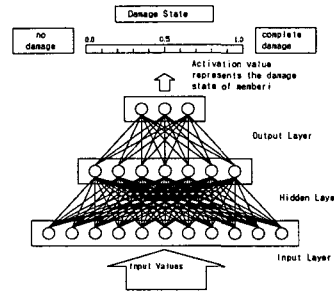


그림 4. 구조물의 손상평가를 위한 신경망의 개념도

4.1.1 내구성 회복의 보강설계

철근콘크리트 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 잔류저항계수 C_{ra} 라 하면 식 (8)과 같이 되고, 보강후 원부재의 공칭저항모멘트 M_{rb} 와 보강후 원부재의 보강저항모멘트 M_{ra} 의 비를 보수·보강 후의 잔류저항계수 C_{rb} 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 재산정된 중립축을 적용하여 산정한 모멘트 분량과 보강재가 가지고 있는 추가저항모멘트 분량을 더한 것으로 그 모멘트 분량의 합이 극한저항모멘트보다 커야하므로 식 (10)으로 나타낼 수 있다. 또한 내구성 회복의 보강설계와 마찬가지로 내하력 증가에 의한 보강전의 잔류저항계수 C_{ra} 은 식 (8)을 사용하고, 보강후의 잔류저항계수 C_{rb} 은 식 (9)를 사용하면 된다.

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

여기서, M_{ra} = 보강후 원부재의 공칭저항모멘트

4.2 손상도 및 건전성 판정기준

손상되지 않은 철근콘크리트 구조물의 보강전후의 모멘트의 증가율은 손상된 철근콘크리트 부재의 보강전후의 모멘트 증가율과 서로 비례하므로 보강후 손상된 원부재의 공칭저항모멘트와 손상되지 않은 원부재의 공칭저항모멘트의 비인 손상계수(Damage Factor)는 다음과 같이 된다.

$$\text{보강 전 : } D_{fb} = 1 - 2.15(1 - R_f) \cdot \frac{M_{rd}}{M_{rb}} = 1 - 2.15(1 - R_f) \cdot C_{rb} \quad (11a)$$

$$\text{보강 후 : } D_{fa} = 2.15(R'_f - 1) \cdot \frac{M_{ra}}{M_{rb}} = 2.15(R'_f - 1) \cdot C_{ra} \quad (11b)$$

여기서, R_f = 보강전의 내하율, R'_f = 보강후의 내하율

식 (11)는 내구성과 내하성을 동시에 고려한 함수로서 철근콘크리트의 상태평가로 철근콘크리트 구조물의 손상을 정량적으로 평가할 수 있기 때문에 철근콘크리트 구조물의 손상검출에 매우 효율적이다. 따라서 철근콘크리트 구조물의 손상도평가와 건전성평가에 따른 판정기준과 그 대책기준은 표 1과 2와 같이된다.(표 1은 지면상 생략)

표 2. 철근콘크리트 구조물에 대한 건전성 평가 및 대책기준

판정등급	판정구분	건전성평가			대책
		내하성	내구성	건전성	
A	매우양호	$X > 1.0$	$Y > 1.0$	0.9	문제없음
B	양호	$X \geq 0.75$	$Y \geq 0.85$	0.7	추적조사요(부분 보수)
C	보통	$X \geq 0.75$	$Y < 0.85$	0.5	보수요
D	불량	$X < 0.75$	$Y \geq 0.55$	0.3	보강요
E	매우불량	$X < 0.75$	$Y < 0.55$	0.1	교체

4.3 보수비 예측평가모델

철근콘크리트 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. 그러나 일반적으로 철근콘크리트 구조물의 각 부재가 현재의 통행하중이나 자중 등에 대한 저항성이 부족할 경우에는 이를 증가시키기 위한 공법으로서 보강공법을 사용하며, 부재의 저항능력 회복을 목표로 하지 않고 자연환경에 대한 내구성 확보가 목적인 경우에는 보수공법이 사용된다.

현재 매우 많은 종류의 보수·보강공법이 시행되고 있으나 보수 또는 보강공사 후에 얻어지는 효과에 관한 연구는 대부분 부재시험이나 재하시험에 의해 철근콘크리트 구조물의 역학적 거동이나 내하력의 증가에만 초점이 맞추어져 있으며, 이 또한 부재시험을 통하여 보수전후의 역학적 거동의 파악이나 성능회복 정도를 파악하고 있는 수준이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 제시하고 있는 보수·보강공법의 효과를 토대로 각 공법의 보수효과 즉 손상회복 효과를 정량화하여 보수비 예측평가를 개발한다. 보수효과의 정량화는 보수전과 후의 공칭저항모멘트와 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 전철의 철근부식 평가와 콘크리트의 노후화 평가에 따라 달라지는데, 보수비 예측모델 평가에 필요한 M_{ra} , M_{rb} 의 값과 보수비용을 보수효과로 표현하면 식 (13) 및 식 (14)과 같이 된다.

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

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

여기서, M_{rtp} = 보수·보강후 철근부식에 의한 공칭저항강도, M_{agep} = 보수·보강후 콘크리트 노후화에 의한 공칭저항강도
 M_{rt} = 보수·보강전 철근부식에 의한 공칭저항강도, M_{age} = 보수·보강전 콘크리트 노후화에 의한 공칭저항강도

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

여기서, γ = 모델파라미터(매개변수), a_{rep} = 교량구조물의 교체(개축) 비용

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

$$\text{라 멘 교 } a_{rep} = 10656,901 \times L^{0.58198} \times W^{0.54829} \quad (15a)$$

$$\text{슬래브교 } a_{rep} = 3477,219 \times L^{0.65895} \times W^{0.80350} \times H^{0.25906} \quad (15b)$$

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

여기서 L, W 및 H = m 단위의 교장, 교폭 및 교고

4.4 철근콘크리트 구조물의 노화예측 모델

보수·보강 공법에 의해 철근콘크리트 구조물의 손상도가 향상되면 철근콘크리트의 잔여수명도 증가하게 되며, 잔여수명의 증가량은 철근콘크리트 구조물의 손상예측모델과 손상도의 노화예측을 위해서는 대상 구조물의 손상모델이 필요하게 된다. 본 연구에서는 잔유저항계수, 내하율 및 손상계수를 이용한 공용년수에 따른 철근콘크리트 구조물의 노화예측모델을 다음과 같이 나타내었다.

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

여기서, S_L = 내하성(내하율)에 의한 평균건전도, S_D = 손상도(손상계수)에 의한 평균건전도

S_R = 내구성(잔유저항계수)에 의한 평균 건전도, $a_L, a_D, a_R, b_L, b_D, b_R$ = 정수

또한 철근콘크리트 구조물의 경과년수와 내하성의 평균건전도의 함수인 내하율, 내구성의 평균건전도의 함수인 잔유저항계수 및 손상도의 평균건전도의 함수인 손상계수를 이용하면 보수·보강전후의 잔여수명을 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

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

5. 적용 예 및 고찰

5.1 대상 구조물의 일반사항

대상 철근콘크리트 구조물의 개요는 표 3에 제시된 바와 같이 철근콘크리트 T형교량이며 설계하중은 DB-13.5인 2등교량이다. 본 연구에서 제안한 인공지능을 이용한 외관상태평가를 수행한 결과 대상구조물의 상태평가등급은 output a = 0.6044로 건설교통부안의 C등급에 해당되는 값으로 추정되었고, 보강재는 섬유보강 에폭시판넬(FREP)을 사용하였다.

표 3. 대상구조물의 제원과 일반사항

교량위치	전라남도 담양군 고서면 문향리 (지방도 887호선상)	
시공년도	1974년	설계하중
교량제원 및 물성치 (외측주형)	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	
구조해석 및 재하시험 결과치	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	

5.2 건전성 및 잔여수명예측 평가

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 손상도와 건전성의 해석 결과를 검증하기 위하여 표 4에서와 같이 철근콘크리트 T형 교량에 있어 기존의 외관 육안검사와 현장재하시험의 측정결과로 건전성 및 잔여수명예측 결과를 분석하였다.

표 4. 대상구조물의 건전성 및 잔여수명 예측 결과

구 분	보강 전 평가모델			보강 후 평가모델			
	외관상태	콘크리트 노후화	철근부식	외관상태	콘크리트 노후화	철근부식	
건전성	내구성(잔류저항계수)	0.8736	0.8920	0.8853	1.2901	1.3232	1.3165
	내하성(내하율)	0.8442	0.8775	0.8654	1.5998	1.6587	1.6465
	손상도(손상지수)	0.7073	0.7651	0.7437	1.6610	1.8738	1.8300
	내하력	11.3962	11.8462	11.6825	21.5841	22.3920	22.2283
잔여수명	내구성(잔류저항계수)	7.4293	7.6693	7.5824	25.0031	25.4431	25.3546
	내하성(내하율)	7.6373	7.9743	7.8529	22.4872	22.9438	22.8524
	손상도(손상지수)	9.2317	10.1923	9.8437	22.7138	24.7518	24.3455

표 4의 건전성은 3가지 방법 즉 잔류저항계수, 내하율 및 손상지수에 의한 건전성을 FREP 보강제를 사용하여 보강전과 보강후로 분석한 결과 보강전에는 모든 결과 값이 1.0이하로 내구성과 내하성을 상실하였으나, 보강후의 모든 결과값이 1.0이상으로 내구성과 내하성이 회복되었다. 이와 같이 철근콘크리트 구조물에 대한 성능지수는 철근콘크리트 구조물의 개축과 성능개선을 판정할 수 있는 주요 결정요소라 할 수 있다. 철근콘크리트 구조물의 외관상태를 통해서 판단할 수 있는 철근콘크리트 구조물의 손상도는 철근콘크리트 구조의 노후화의 정도를 판단할 수 있는 중요한 단서가 되기는 하지만 철근콘크리트 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 손상도(손상지수)에 의한 건전성평가가 수행되어야 한다. 또한 잔여수명도 3가지 방법으로 분석한 결과 보강전의 잔여수명이 약 8년에서 보강후의 잔여수명이 약 23년 정도 연장되었다. 대상구조물의 잔여수명 예측시에 필요한 내구성과 내하성의 회복효과계수는 표 5의 값을 사용했다.

표 5. 내구성 및 내하성의 회복효과계수

구 분	건 전 성		
	내구성(잔류저항계수)	내하성(내하율)	손상도(손상지수)
보수·보강전	0.3	0.5	1.0
보수·보강후	0.7	1.1	1.1

5.3 철근콘크리트 구조물의 노화예측평가

현재 건설교통부의 상태평가시스템은 철근콘크리트 부재의 현재의 손상도는 파악할 수 있지만 장래의 노화진행 정도는 예측할 수 없다. 이에 본 연구에서는 철근콘크리트 구조물에 대한 건전성을 나타내는 지표로서 내하성(내하율)과 내구성(잔류저항계수) 및 손상도(손상지수)의 3가지로 분류하여 각각의 공용년수에 따른 값들을 나타내면 그림 6과 같이 되며, 콘크리트 노후화와 철근부식에 대한 보수·보강전후의 건전성평가 지표인 파괴안전계수, 잔류저항계수, 내하율 및 손상지수로 나타낸 것으로 장래의 건전성평가를 예측할 수 있다.

그림 7는 공용년수에 따른 보수·보강전후의 잔여수명예측을 나타낸 것으로 잔류저항계수, 내하율 및 손상지수에 의한 잔여수명이 외관상태, 콘크리트 노후화 및 철근부식의 경우 거의 비슷하게 나타나고 있다. 따라서 철근콘크리트 구조물의 공용수명은 적절한 보수·보강을 수행함에 따라 성능이 뚜렷하게 개선될 뿐만 아니라 철근콘크리트 구조물의 공용년수를 연장시킬 수 있으며, 또한 예방적인 보수·보강을 시행할 경우에는 과도한 결함이 노출된 후에 보수·보강을 실시하는 경우보다 공용수명을 보다 연장시킬 수 있고, 공사수행도 훨씬 수월하게 됨을 알 수 있다.

그림 8는 공용년수에 따른 노화예측평가를 나타낸 것으로서 보수·보강전과 보수·보강후의 노화예측에 필요한 잔류저항계수, 내하율 및 손상지수의 값이 일반적으로 철근콘크리트 수명이 오래될수록 노화현상이 급속히 진행되고 있음을 입증하고 있다. 그리고 잔류저항계수의 노화예측곡선이 내하율의 노화예측곡선보다 더 완화곡선이 된다. 이는 잔류저항계수의 곡선식은 3차식을 사용하는데 반하여 내하율의 곡선식은 4차식을 사용했기 때문이다. 이와 같이 손상된 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 진

행되어져야 할 것으로 사료된다.

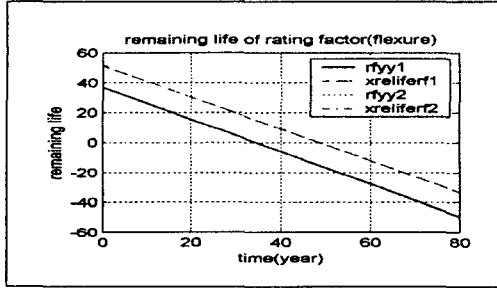


그림 6. 보수·보강전후의 내하성과 내구성 및 손상도값

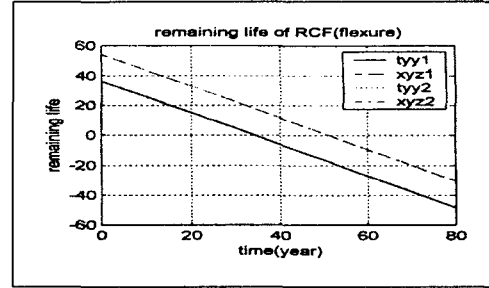


그림 7. 공용년수에 따른 보수·보강전후의 잔여수명예측결과

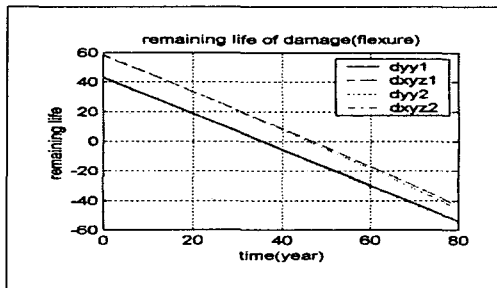


그림 8. 공용년수에 따른 보수·보강전후의 노화에측평가결과

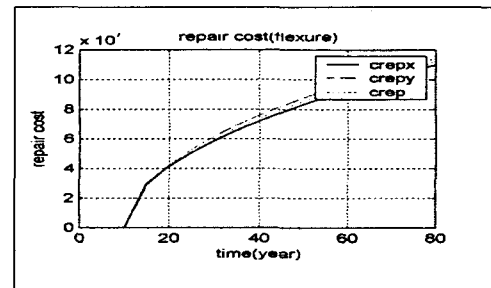


그림 9. 보수·보강전후의 보수비용예측평가결과

또한 본 연구 대상구조물에 있어서 건전성에 대한 노화예측 곡선식중에서 b_i 상수값은 표 6와 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 본 연구에서 개발한 건전성에 대한 노화예측모델은 지금까지 개발된 철근콘크리트 유지관리시스템의 잔여수명예측과 노후화모델에 적용하지 못한 단점을 보완할수 있는 것으로 판단된다.

표 6. 건전성에 대한 노화예측 곡선식의 b_i 상수값

구 분	보 강 전			보 강 후		
	외관상태	콘크리트 노후화	철근부식	외관상태	콘크리트 노후화	철근부식
내구성(잔류저항계수)	1.1447	1.1417	1.1428	1.0980	1.0955	1.0960
내하성(내하율)	1.1846	1.1776	1.1801	1.0975	1.0940	1.0946
손상도(손상지수)	1.4138	1.3826	1.3936	1.1762	1.1562	1.1599

5.4 보수비용 예측평가 결과

건전성에 대한 노화예측 곡선식을 이용하여 외관상태, 콘크리트 노후도 및 철근부식에 의한 보수비용을 비교한 것이 그림 9이다. 그림 9에서 공용년수가 증가함에 따라 보수비용이 급격하게 변화함을 볼 때 보수비용의 최적시점 선정이 무엇보다 중요하고, 이와 같은 보수비용은 보수·보강 공법을 선정함에 있어 보수·보강 우선순위를 결정함에 유효할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 보수·보강공법에 FREP 보강재를 사용하였는바 손상회복을 위한 보수효과 (e_{rep})는 0.4312(43.12%)이고, 예측보수비용은 1.1857×10^8 원으로 나타났다.

6. 결론

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

- (1) 기존의 철근콘크리트에 대한 유지관리를 위한 의사결정은 철근콘크리트 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 철근콘크리트 구조물의 증가에 따라 상대적으로 부족한 기술자들만 철근콘크리트 구조물에 대한 효과적인 유지관리를 실시하기 어려운 실정이므로 본 연구의 건전성 평가시스템모델을 이용함으로써 보다 효율적인 철근콘크리트 유지관리 뿐 만 아니라 생애주기비용예측을 수행할 수 있다.
- (3) 본 연구에서 개발한 건전성 평가시스템 및 보수비용 예측평가모델은 실제 개축비용자료를 바탕으로 회귀분석방법에 의해 개발되었기 때문에 철근콘크리트 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. M.T, Ei-Mihilmy and W.T, Tedesco, “Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates,” Journal of Structural Engineering, Vol. 126, No.6, June, 2000, pp. 684~691.
5. M. Ayaho, K. Mon'yoshi, A.Yukio and M. Masato, “Development of Bridge Management System (BMS)” VI-34, 91-106, No. 560, 1997. 3, pp. 91~106.
6. D.V. val and R.E. Melchers, “Reliability of Deteriorating RC Slab Bridge,” Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 12, December, 1997, pp. 1638~1644.
7. D.M. Frangopol, Kai-Yung Lin, and A.C. Estes, “Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures,” Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No.10, October, 1997, pp. 1390~1401.
8. D.M. Frangopol, Kai-Yung Lin, and A.C. Estes, “Reliability of Reinforced Concrete Girders under Corrosion Attack,” Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No.3, March, 1997, pp. 286~297.