

퍼지-베이즈 이론에 의한 기존구조물의 신뢰성평가모델

Reliability Assessment Models of Existing Structures by Fuzzy-Bayesian Approach

백 대 우* 이 증 빈** 박 주 원*** 강 수 경****
Baek, Dae-Woo Lee, Cheung-Bin Park, Ju-Won Kang, Su-Gyung

요 지

실제 구조물에 있어 확률, 통계 및 이론으로 구해진 랜덤성을 갖는 객관적 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 존재하기 때문에 현실적으로 랜덤성과 퍼지성을 동시에 고려한 신뢰성평가 즉, 안전성평가에 대한 퍼지이론의 도입이 필수 불가결하다. 따라서 본 연구에서는 기존 구조물의 객관적·주관적 불확실성을 동시에 고려한 신뢰성해석방법으로 베이즈의 의사결정이론에 퍼지이론을 병합한 퍼지-베이즈 신뢰성해석 알고리즘을 개발하여 건축구조물의 신뢰성평가 및 안전성평가에 적용하여 분석하였다.

핵심용어 : 퍼지-베이즈 이론, 퍼지집합, 건축구조물의 안전성 평가

Abstract

In this study, an attempt is made to apply the concept of fuzzy-bayesian theory to the integrity assessment of damaged structures. Uncertainty states are represented in terms of fuzzy sets which define several linguistic variables such as "very good", "good", "average", "poor", "very poor". etc. Especially, the concept of fuzzy conditional probability aids to derive a new reliability analysis which includes the subjective assessment of engineers without introducing any additional correction factors. The fuzzy concept is also used as reliability indexes for the condition assessment using the proposed models. The proposed fuzzy theory-based approach with the results of visual inspection and extensive field load tests are applied for the integrity assessment of a reinforced concrete building architecture.

Keywords : fuzzy-bayesian theory, fuzzy sets, the integrity assessment of a reinforced concrete building architecture.

1. 서 론

최근 백화점이나 아파트 등의 건축구조물이 사

용성의 차원을 넘어 붕괴되는 안전성 문제가 끊임없이 대두되고 있어 건축구조물의 안전성평가를 신뢰성있게 추정해야 할 필요성이 그 어느때

* 순천제일대학 건축설비과, 교수

** 성희원·순천제일대학 토목과, 교수

*** 조선대학교 토목공학과, 박사과정

**** 순천제일대학 건축설비과 산업기술연구소, 연구원

• 이 논문에 대한 토론을 1999년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

보다도 절실히 요구되고 있는 실정이며, 건축구조물의 안전성을 합리적으로 평가하기 위해서는 설계 및 시공과정 등에 포함된 여러 가지 불확실성의 영향을 정량적으로 파악할 필요가 있다.

지금까지의 구조물의 신뢰성해석은 확률, 통계 및 이론을 기초로 하여 파괴확률과 안전성지수 등의 척도를 사용해서 불확실성의 영향을 고려했다. 그러나 실제 구조물에 있어서는 확률, 통계 및 이론으로 구해진 랜덤성을 갖는 객관적 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 존재하기 때문에 현실적으로 랜덤성과 퍼지성을 동시에 고려한 신뢰성평가 즉, 안전성평가에 대한 퍼지이론의 도입이 필수 불가결한 것이다.

따라서 본 연구에서는 기존 구조물의 객관적·주관적 불확실성을 동시에 고려한 신뢰성해석방법으로 베이지의 의사결정이론에 퍼지이론을 병합한 퍼지-베이지 신뢰성해석 알고리즘을 개발하여 건축구조물의 신뢰성평가 및 안전성평가에 적용하고자 한다.

2. 퍼지이론에 의한 신뢰성해석

2.1 퍼지-베이지이론에 의한 신뢰성해석

퍼지-베이지 이론은 객관적 정보와 주관적 정보를 동시에 고려해야 하는데, 주관적 정보는 퍼지집합이론을 이용하여 해석할 수 있고, 객관적 정보는 베르누이(Bernoulli) 모델로 해석할 수 있다. 이 퍼지-베이지이론은 주관적 정보, 즉 주관적 매개변수를 포함한 베이지이론에 의한 사후확률을 계산하는 과정이다²⁾.

사상 A가 확률적으로 서로 독립이고 n개의 매개변수 $P(B_j | A_1, \dots, A_n)$ 로 주어진 경우에 멤버쉽함수와 조건부확률 누가함수로 나타내면 다음과 같이 확장할 수 있다.

$$P(B_j | A_1, \dots, A_n) = \frac{[\prod_{i=1}^n P(A_i | B_j)]P(B_j)}{\sum_{k=1}^n [\prod_{i=1}^n P(A_i | B_k)]P(B_k)} \quad (1)$$

따라서, 처음부터 i번째까지의 사상 A에 대한 사상 B_i의 사후확률 P(B_i)은 다음과 같이 된다.

$$P(B_i) = \frac{P(A_i | B_i)P(B_i^{-1})}{\sum_{k=1}^2 [P(A_i | B_k)P(B_k^{-1})]} \quad (2)$$

식 (2)는 $i=n$ 일 때의 식 (1)과 같고, 퍼지-베이지이론에 의한 사후확률이라 한다. 그리고 이 산형 확률변수인 경우 안전측과 파괴측의 조건부 확률은 다음과 같이 된다.

$$\text{안전측} : C_i^s = P(A/B_1) = \sum_{x=0}^m \mu_{A_i}(x)P(x/B_1) \quad (3a)$$

$$\text{파괴측} : C_i^f = P(A/B_2) = \sum_{x=0}^m \mu_{A_i}(x)P(x/B_2) \quad (3b)$$

여기서,

- x = 손상판정등급, B_1 = 안전측 매개변수
- B_2 = 파괴측 매개변수 m = 손상판정등급수
- A_i = i번째 매개변수의 손상판정등급

윗 식 (3)의 안전측의 조건부확률 C_i^s 와 파괴측의 조건부확률 C_i^f 를 식 (2)에 대입하면 i번째 매개변수의 사후파괴확률(예측파괴확률)은 다음과 같이 된다.

$$P_i^f = P(B_2/A) = \frac{C_i^f P_i^{-1}}{C_i^f P_i^{-1} + C_i^s (1 - P_i^{-1})} \quad (4)$$

이 때, P_i^f 는 사전파괴확률로서 총기대비용 최소화원칙을 이용한 신뢰성해석으로 구해진다.^{10),11)} 따라서 식 (4)의 i번째 매개변수의 사후파괴확률(예측파괴확률) P_i^f 과 사후신뢰성지수(예측신뢰성지수) β^i 의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\beta^i = -\Phi^{-1}(P_i^f) \quad (5)$$

여기서, P_i^f = i번째 매개변수의 파괴확률
 Φ^{-1} = 표준정규분포함수의 역함수

식 (5)의 퍼지-베이지이론에 의한 신뢰성지수 β^f 및 이에 대한 공칭안전율 n^f 는 구조물의 안전성

여부 및 보수·복구 등의 유지관리를 위한 대책수립의 판단지침으로 사용될 수 있다. 그리고 강도한계상태모형에 적용할 수 있는 저항 및 하중변수를 Ln-Ln형으로 가정할 때는 식 (5)를 이용하여 식 (6a)와 같이 나타낼 수 있고, 내구성한계상태모형에 적용할 수 있는 normal-normal형인 경우에는 식 (6b)와 같이 정리할 수 있다.

$$n' = \frac{\eta_s}{\eta_R} \exp[\beta' \sqrt{\Omega_k^2 + \Omega_s^2}] \quad (6a)$$

$$n' = \frac{\eta_s}{\eta_R} \left[\frac{1 + \beta' \sqrt{\Omega_k^2 + \Omega_s^2} - \beta'^2 \Omega_k^2 \Omega_s^2}{1 - \beta'^2 \Omega_k^2} \right] \quad (6b)$$

여기서,

η_R, Ω_R : 저항의 평균-공칭비와 변동계수

η_s, Ω_s : 하중의 평균-공칭비와 변동계수

이와 같이 산출된 공칭안전율은 허용용력 설계법에서 사용되는 재료안전율과는 달리 하중과 저항의 객관적 불확실량과 구조물의 실제 노후손상상태를 관측, 조사 등으로 현장계측한 주관적 불확실량을 동시에 고려한 안전율로서, 실무자가 이해하기 쉬운 퍼지-베이지이론에 의한 신뢰성지수를 구조건전성 평가의 개념으로도 사용될 수 있다.

2.2 퍼지시스템의 여용성에 의한 신뢰성해석

현재 널리 사용되고 있는 기존 구조물의 안전도 및 내하력의 평가방법은 가장 위험한 부재나 요소에 대해서 공칭안전도 및 내하력을 산정하는 재래적인 방법에 의존하고 있으나, 최근에 열화손상된 기존구조물의 잔류저항강도 및 손상정도를 평가하기 위하여 시스템 여용성의 개념과 이의 표현방법에 대한 다양한 연구가 시도되고 있다.

그러므로 체계신뢰성 지수에 의한 퍼지-베이지신뢰성해석의 결과는 기존구조물의 시스템 여용성과 잔류안전율의 확률론적인 척도로 매우 효율적으로 사용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (5)의 사후신뢰성지수에 의한 퍼지시스템의

여용성계수와 잔류안전율을 다음과 같이 정의하였다^{7)~9)}.

$$FSRF = \frac{\beta_s}{\beta_e} = \frac{\beta_{s,i}}{\beta_{s,i} - \beta_{s,d}} \quad (7a)$$

$$FSPI = \frac{\beta_s}{\beta_e} = \frac{\beta_{s,d}}{\beta_{s,i}} \quad (7b)$$

여기서,

FSRF = 퍼지시스템의 여용성계수

(부정정율 ; Fuzzy System Redundancy Factor)

FSPI = 퍼지시스템의 잔류안전율

(잔류저항강도계수 ; Fuzzy System Residual Factor)

β_s = 체계신뢰성지수

β_e = 초기 파괴요소의 신뢰성지수

$\beta_{s,i}$ = 요소신뢰성지수

$\beta_{s,i}$ = 원래상태의 체계신뢰성지수

$\beta_{s,d}$ = 손상상태의 체계신뢰성지수

3. 퍼지이론에 의한 상태평가 및 건전성평가

3.1 상태평가

지금까지 수행된 건축구조물의 안전도평가에서 실시한 외관조사의 상태평가 기준은 주로 경험적인 방법을 사용하였으나, 최근 들어서는 1996년 3월경 시설안전기술공단에서 구조물안전점검 및 정밀안전진단 세부지침을 마련하여 건축구조물 외관상태의 항목별 평가요령을 법제화시켰다¹²⁾. 그러나 이러한 기준들은 주로 구조물에 대한 유지관리 측면에서 일상점검시의 상태평가 기준으로 사용되고 있을 뿐, 전반적인 외관상태에 대한 평가와 항목별 기준과의 연계가 어려우며 상태평가 등급기준이 너무 포괄적이고 판정이 매우 애매하기 때문에 등급선정의 편차가 육안조사자에 따라 클 수 있다.

또한 미국 FHWA(미연방도로국)의 판정기준에서는 구조물에 대한 상부구조물의 상대평가를 $r=0\sim9$ 의 10단계 수치로 한 3등급 즉, 구조적으로 양호한 상태 ($r \geq 7$), 손상을 입은 상태 ($r = 4, 5, 6$), 심각하게 손상을 입었거나 잠재적으로

위험한 상태 ($r \leq 3$)로 분류하여 정량적으로 평가하고 있는데 반하여, 본 연구에서는 손상판정항목의 변화로 생기는 정성적이고 정량적인 불확실량을 내포하고 있는 외관조사, 비파괴시험 및 재하실험 등에서 얻어지는 각 손상판정항목에 따른 상태평가를 퍼지집합의 멤버쉽함수를 설정하여 정량적평가를 수행하였다.

각 손상판정항목에 대응하는 손상판정 및 상태평가등급 A, B, C, D, E를 각각 very good(매우 양호), good(양호), average(보통), poor(불량), very poor(매우불량)와 같은 언어변수로 표현하고 멤버쉽등급으로는 very good:6-12, good:4-

12, average:2-8, poor:0-8, very poor:0-6의 수치로 나타낼 수 있다, 그리고 중요도지수는 매우 높음(1), 높음(2), 보통(3), 낮음(4), 매우낮음(5), 상관없음(6)로 표현하여 사용하였다¹⁰⁾. 따라서 구조물시스템의 상태평가기준은 각 손상판정항목에 따른 언어변수, 중요도지수 및 멤버쉽함수로 설정하여 퍼지-베이즈이론에 의해 구한 사후신뢰성지수와 이에 대응하는 강성저하율로 나타내며 표 1과 같이 된다.

한편, 구조시스템의 상태평가기준을 본 연구에서 제안한 퍼지시스템의 여용성과 잔류안전율로 나타내면 표 2와 같이 된다.

표 1 퍼지이론에 의한 구조시스템의 상태평가 기준

손상도 판정			상 태	FHWA기준		
손상도	신뢰성지수(β)	강성저하율		수치	r	
A	A1	5.0이상	1.0	건설당시의 상태	9	$r \geq 7$
	A2	5.0~4.5	0.95	건설당시의 상태		
	A3	4.5~4.0	0.90	매우 양호한 상태(보수 불필요)		
B	B1	4.0~3.5	0.85	양호한 상태(보수가 필요할 수 있음)	7	$r = 4, 5, 6$
	B2	3.5~3.0	0.80	비교적 양호한 상태(보수가 필요할 수 있음)	6	
C	C1	3.0~2.5	0.75	보통상태(경미한 보수가 필요할 수 있음)	5	$r = 4, 5, 6$
	C2	2.5~2.0	0.70	한계상태(즉시 보수 또는 보강이 필요)	4	
D	D1	2.0~1.5	0.65	불량한 상태(즉시 보수 또는 보강이 필요)	3	$r \leq 3$
	D2	1.5~1.0	0.60	심각한 상태(보수 또는 보강시 구조물 폐쇄)	2	
E	E1	1.0~0.5	0.55	위험한 상태(구조물 폐쇄, 보수 가능)	1	$r \leq 3$
	E2	0.5~0.0	0.50	파괴 상태(구조물 폐쇄, 보수 불능)	0	
	E3	0.0이하	0.45	파괴 상태(구조물 폐쇄, 보수 불능)		

표 2 퍼지시스템의 여용성에 의한 구조시스템의 상태평가 기준

손상도 판정			상 태	FHWA기준		
손상도	퍼지시스템의 여용성계수	잔류저항 계 수		수치	r	
A	A1	∞	∞	건설당시의 상태	9	$r \geq 7$
	A2	$\infty \sim 10.0$	1.0	건설당시의 상태		
	A3	10.0~5.0	0.9	매우 양호한 상태(보수 불필요)		
B	B1	5.0~3.333	0.8	양호한 상태(보수가 필요할 수 있음)	7	$r = 4, 5, 6$
	B2	3.333~2.5	0.7	비교적 양호한 상태(보수가 필요할 수 있음)	6	
C	C1	2.5~2.0	0.6	보통상태(경미한 보수가 필요할 수 있음)	5	$r = 4, 5, 6$
	C2	2.0~1.667	0.5	한계상태(즉시 보수 또는 보강이 필요)	4	
D	D1	1.667~1.428	0.4	불량한 상태(즉시 보수 또는 보강이 필요)	3	$r \leq 3$
	D2	1.428~1.25	0.3	심각한 상태(보수 또는 보강시 구조물 폐쇄)	2	
E	E1	1.25~1.111	0.2	위험한 상태(구조물 폐쇄, 보수 가능)	1	$r \leq 3$
	E2	1.111~1.0	0.1	파괴 상태(구조물 폐쇄, 보수 불능)	0	
	E3	1.0이하	0.0	파괴 상태(구조물 폐쇄, 보수 불능)		

3.2 건전성 평가

3.2.1 안전성 평가

손상요인의 정성적영향을 반영하고 검증 재하 실험에서 얻은 정량적 실용담비(실처짐비) K 와 실충격계수 i 를 명확하게 포함시킨 강도설계법에 의한 내하율(RF)과 내하력(P)는 다음과 같이 된다^{10),11)}.

$$RF = \frac{\phi M_n - \gamma_a M_D}{\gamma_l M_i (1+i) K} \quad (8a)$$

$$P = RF \times P_r \quad (8b)$$

여기서

M_n = 공칭 (휨, 전단) 강도

M_D = 공칭사하중효과

M_i = 공칭활하중효과

P_r = 설계하중

한편, ϕ , γ_a , γ_l 은 저항 및 하중안전계수로서 본 연구에서는 실용성을 고려하여 철근콘크리트표준시방서의 안전규정에 따라 휨에 대해서는 $\phi=0.85$, $\gamma_a=1.4$, $\gamma_l=1.7$ 을 적용하였고 전단에 대해서는 $\phi=0.7$, $\gamma_a=1.4$, $\gamma_l=1.7$ 을 각각 적용하였다.

이 때, 퍼지집합이론에 필요한 멤버쉽함수를 설정하기 위한 단면의 공칭저항강도 M_n 은 다음과 같이 된다.

$$M_n = k_1 l_1 A_s \sigma_s \left(d - \frac{1}{2} \frac{k_1 A_s \sigma_s}{0.85 \sigma_{ck} b} \right) \quad (9)$$

여기서,

A_s = 주철근량 (단면적)

σ_s = 철근의 항복점 강도

b = 압축 플랜지의 유효폭

d = 유효높이

σ_{ck} = 콘크리트의 압축강도

k_1 = 철근 부식에 의한 철근 단면적 감소에 관한 유효계수

k_i = 콘크리트 균열 등에 의한 강도저하에 관한 유효계수

위의 식(9)에서 A_s , d , σ_{ck} , b 는 정략적인 설계도면의 값과 실측값을 사용한다. k_1 , k_i 는 정성적인 외관조사에 따른 구조 부재별의 손상항목(균열, 파손, 박리, 누수, 백태 등)별 판정등급의 멤버쉽함수의 값을 좌우하는 유효계수이다.

따라서 퍼지신뢰성 이론에 입각한 안전성 평가시의 저항감소계수는 현장적용의 실용성을 고려한 외관조사 상태평가 결과에 따른 대표값으로 제안하면 표 3과 같이 된다^{10),11)}.

3.2.2 사용성 평가 (내구성 평가)

다음의 표 4에서와 같이 외관조사에 의한 상태평가의 손상도 및 보정계수값을 이용하고 실용담비(실처짐비) K 와 실충격계수 i 를 고려한 개선된 식으로 제안하면 다음과 같이 된다^{10),11)}.

$$DF = \frac{\phi k_o M_n - \gamma_a M_D}{\gamma_l M_i (1+i) K} \quad (10)$$

표 3 구조시스템의 손상 상태에 따른 내하율 및 저항감소계수

손상등급	퍼지등급	내하율	저항감소계수 (ϕ)
A	Very Good	1.0 이상	0.95
B	Good	1.0~0.75	0.85
C	Average	0.75~0.57	0.75
D	Poor	0.57~0.25	0.70
E	Very Poor	0.25 이하	0.65

표 4 외관조사에 의한 손상도 및 보정계수

손상등급	퍼지등급	손상도 (강성저하율)	k_o 값
A	Very Good	1.1 이상	1.1
B	Good	1.1~0.85	1.0
C	Average	0.85~0.65	0.88
D	Poor	0.65~0.45	0.80
E	Very Poor	0.45이하	0.70

여기서, ϕ , γ_a , γ_b , M_n , M_b , M_t 은 안전성 평가시의 계수와 같다.

본 연구에서 제시한 구조시스템의 건전성 평가 기준은 첫째 구조물의 실제 노후손상 정도를 고려한 외관조사에 의한 상태평가, 둘째 내하율을 이용한 안전성평가 및 셋째 강성저하율을 이용한 사용성평가로서 크게 3부분으로 나누어 진다. 따라서 퍼지이론에 의한 구조시스템의 건전성 평가 기준은 표 5와 같이 된다.

한편, 퍼지시스템의 여용성에 의한 구조시스템의 건전성 평가기준은 표 6과 같이 된다.

4. 적용 예 및 고찰

4.1 통계적 불확실량 대상

퍼지이론에 의한 구조 신뢰성 방법에서는 저항 및 하중관련 램덤변량들의 불확실량을 합리적으로 추정하는 것이 매우 중요한 문제이다. 따라서 불확실량에는 구조 안전성에 영향을 미칠 수 있

는 객관적 불확실량을 포함하여야 하며 표본자료와 통계적 해석에 관한 변동량뿐만 아니라 추정 오차 또는 모델링오차, 불확실한 정보로 인한 오차 등 주관적 불확실량도 포함하여야 한다.

본 연구에서는 저항과 하중효과에 관련된 기본 램덤변량의 대부분은 국내외의 관련문헌^{10),11)}을 참조하여 표 7과 같이 건축물평가에 대한 저항 및 하중의 불확실량으로 사용하였다.

4.2 대상구조물 및 외관조사

본 연구의 대상 건축물은 문헌¹³⁾과 같은 4층 철근콘크리트 라멘구조형식으로서 각 층의 슬래브 상·하단, 종·횡거더, 기둥, 벽체(내·외측), 기초와 바닥판 및 마감재의 8가지 구조부재로 구분하고 외관조사 판정기준에 따라 건축물의 열화를 표기하였다.

외관조사는 예비외관조사시에 관찰된 각 층의 부재별 철근부식과 노출, 콘크리트의 파괴부 및

표 5 퍼지이론에 의한 구조시스템의 판정기준

판정 등급	건전성 평가				구조상태
	상태평가		안전성평가	사용성평가	
	신뢰성지수	공칭안전율	내하율	강성저하율	
A	$\beta > 4.0$	$n > 2.0$	$RF > 1.0$	$DF > 1.1$	매우 안정
B	$4.0 < \beta < 3.0$	$2.0 < n < 1.6$	$1.0 < RF < 0.75$	$1.1 < DF < 0.85$	안정
C	$3.0 < \beta < 2.0$	$1.6 < n < 1.3$	$0.75 < RF < 0.57$	$0.85 < DF < 0.65$	안전도 및 내하력 부분상실
D	$2.0 < \beta < 1.0$	$1.3 < n < 1.0$	$0.57 < RF < 0.25$	$0.65 < DF < 0.45$	안전도 및 내하력 상실
E	$\beta < 1.0$	$n < 1.0$	$RF < 0.25$	$DF < 0.45$	불안정

표 6 퍼지시스템의 여용성에 의한 구조시스템의 판정기준

판정 등급	건전성 평가				구조상태
	상태평가		안전성평가	사용성평가	
	여용성계수	잔류저항계수	내하율	강성저하율	
A	$FSRF > 5.0$	$PI > 0.8$	$RF > 1.0$	$DF > 1.1$	매우 안정
B	$5.0 < FSRF < 2.0$	$0.5 < PI < 0.3$	$1.0 < RF < 0.75$	$1.1 < DF < 0.85$	안정
C	$2.0 < FSRF < 1.428$	$1.6 < n < 1.3$	$0.75 < RF < 0.57$	$0.85 < DF < 0.65$	안전도 및 내하력 부분상실
D	$1.428 < FSRF < 1.111$	$0.3 < PI < 0.1$	$0.57 < RF < 0.25$	$0.65 < DF < 0.45$	안전도 및 내하력 상실
E	$FSRF < 1.111$	$PI < 0.1$	$RF < 0.25$	$DF < 0.45$	불안정

표 7 건축물에 대한 통계적 불확실량

구분		평균 공칭비	변동 계수	확률 분포형	
저항	휨	보	1.12	0.16	대수 정규분포
		슬래브	1.12	0.16	대수 정규분포
		확대기초	1.12	0.18	대수 정규분포
	전단	보	1.09	0.17	대수 정규분포
		슬래브	1.09	0.17	대수 정규분포
		확대기초	1.09	0.19	대수 정규분포
압축	띠기둥	1.05	0.17	대수 정규분포	
	나선기둥	1.05	0.17	대수 정규분포	
중하중	고정	보, 기둥	1.05	0.10	정규분포
		슬래브	1.05	0.24	정규분포
		확대기초	1.05	0.10	정규분포
	적재	보, 기둥	1.20	0.26	극치분포
		슬래브	1.20	0.35	극치분포
		확대기초	1.20	0.26	극치분포

슬래브 하단콘크리트의 중성화 등을 중점적으로 조사하였고, 본관건물 전체에 걸쳐 열화상태를 조사하였다.

4.3 상태평가 및 고찰

다음의 표 8은 건축물의 상태평가를 퍼지-베이즈에 의한 신뢰성해석과 시스템여용성 해석방법으로 비교·분석한 결과이다. 표 8에서와 같이 신뢰성지수(BETA)와 시스템여용성(FSRF)의 판정등급이 언어변수로 같게 나타남을 볼 때 시스템여용성방법이 노후손상된 기설구조물의 상태평가에 매우 효율적으로 사용될 수 있다고 사료된다.

4.4 건전성평가 및 고찰

다음의 표 9는 건축물에 대한 부재별의 상태 및 건전성평가의 결과를 보여 주고 있으며, 퍼지-베이즈에 의한 값으로서 노후손상된 기설구조물의 보수, 복구 및 유지관리에 있어서 최적의 판단자료를 제공하기 위한 실제적인 안전성 및 사용성 평가방법으로서 매우 실용적이고 효율적으로 사용될 수 있다고 본다.

또한 표 9의 값은 주관적이고 정성적인 정밀의 관조사와 객관적이고 정량적인 현장계측(재시험, 비파괴시험 등)의 결과를 토대로하여 산정한

표 8 외관조사에 의한 건축물의 상태평가결과

구분	부재별	구조세목								문헌·13)
		슬래브 상단	슬래브 하단	중 횡 거더	기둥	벽 체 (외 측)	벽 체 (내 측)	기초 및 바닥판	마감재	
BETA	수치	2.95	2.87	3.43	4.41	4.53	4.60	3.63	2.99	B
	판정등급	C1	C1	B2	A3	A2	A2	B1	C1	
FSRF	수치	2.43	2.35	3.18	8.46	10.56	12.38	3.64	2.49	B
	판정등급	C1	C1	B2	A3	A2	A2	B1	C1	

표 9 건축물에 대한 부재별의 상태 및 건전성평가 결과

구분	부재별	구조세목															
		슬래브 상단		슬래브 하단		중 횡 거더		기둥		벽 체 (외 측)		벽 체 (내 측)		기초 및 바닥판		마감재	
안전성 평가	β	2.95	C1	2.87	C1	3.43	B2	4.41	A3	4.53	A2	4.53	A2	3.66	B1	2.99	C1
	n'	1.77	B	1.74	B	1.94	B	2.36	A	2.42	A	2.45	A	2.02	A	1.78	B
사용성 평가	β	2.31	C2	2.97	C1	3.55	B1	4.59	A2	4.71	A2	4.91	A2	3.65	B1	3.23	B2
	n'	1.68	B	1.93	B	2.17	A	2.68	A	2.75	A	2.87	A	2.21	A	2.03	A

표 10 건축물에 대한 중·횡거더의 건전성평가 결과

구분 \ 내용	부재력			안전성평가						사용성평가					
	M_n	M_d	M_i	β		n'		RF		β		n'		DF	
중·횡거더	36.85	9.455	4.727	3.43	B2	1.94	B	1.70	A	3.55	B1	2.17	A	1.70	A

값으로서 건축물시스템의 전반적이고 종합적인 평가기준을 언어변수로 표현할 수 있으므로 기존 내하력평가의 기준보다 훨씬 체계적이고 합리적인 평가방법이라고 사료된다.

다음의 표 10과 같이 건축물의 중·횡거더도 교량시스템과 같이 부재력의 변화에 따라 건전성평가를 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 구조물의 객관적·주관적 불확실성을 동시에 고려한 신뢰성해석 방법으로 베이지의 의사결정이론에 퍼지이론을 병합한 퍼지-베이지 신뢰성해석 알고리즘을 개발하여 건축구조물의 신뢰성평가 및 안전성평가에 적용·분석하여 보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 기존 확률론적 개념으로 다루기가 곤란하고 모호한 주관적 불확실량을 포함하는 실무기술자의 경험과 판단을 체계적으로 반영하는 합리적인 기존 구조물시스템의 건전성평가 모형을 제안하였다.

2) 기존 내하력평가와 비교해 볼 때 다양한 정밀외관조사 및 현장제척조건을 반영하고 기존 구조물시스템에 대한 점검항목별 또는 부재별의 판정등급 및 중요도지수를 언어변수로 표현할 수 있어 퍼지이론을 이용한 건전도평가가 보다 실용적인 방법이라 사료된다.

3) 기존 철근콘크리트구조물의 건전도평가시에는 내하력에 의한 안전도평가뿐만 아니라 손상도에 의한 사용성평가도 함께 수행하여 종합적으로 판단해야 할 것으로 사료된다.

4) 퍼지이론에 의한 기존 구조물시스템의 상태평가기준은 추후에 손상도와 강성저하율의 관련

연구가 점차 확대되고 자료가 누적됨에 따라 보수 및 보강의 정량적인 판정기준으로도 활용될 수 있다.

5) 퍼지-베이지이론에 의해 계산된 잔류저항계수 및 강도저하율을 이용하고 퍼지관계이론에 심 각도계수, 범위계수 및 노출정도계수 등을 도입하여 상태평가 및 건전도평가를 확장 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 '97년도 순천제일대학 학술연구조성비 지원에 의한 연구결과의 일부이며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Lee, C. B., and Park, J. W., "Reliability Analysis Based on Fuzzy-Bayesian Approach", Proc. of ICCCBE-VII, Vol.1, 1997, pp. 589~593.
2. Chou k. C., and Yuan, J., "Fuzzy-Bayesian approach to reliability of existing structures", *Journal of the structural division*, ASCE, Vol.119, No.11, 1993, pp.3276~3290.
3. Itoh, S, and Itagaki, H., "Application of fuzzy-bayesian analysis to structural reliability", Proc. of ICOSAR '89, ASCE, New York, N. Y., 1989, pp.1771~1774.
4. Ayyub, B. M., & Eldukair, Z.(1989). "Safety assessment methodology for construction operations." Proc. of ICOSAR '89', ASCE, New York, N.Y., pp.771~778.
5. Hadiporiamo, F. C.(1989). "damage assess-

- ment based on repairability criterion," Proc. ICOSSAR '89, Vol. 3, ASCE, New York, N. Y.
6. Itoh, S., and Itagski, H.(1989). "Application of fuzzy-bayesian analysis to structural reliability." Proc. of ICOSSAR '89, ASCE, New York, N. Y., pp.1171~1774.
 7. Kritzler, R. W. & Mohammadi(1992), "Probabilistic Evaluation of Redundancy of Bridge Structures," 6th ASCE Specialty Conf. on Probabilistic Mechanics & Structural and Geotechnical Reliability, in Denver, Colorado from July 8 through 10 of 1992, pp.156~159, 1992.
 8. Moses, F. & Fu, G.(1989), "Probabilistic Concepts of redundancy and Damage Tolerability," 5th International Conference on Structural Safety & Reliability (ICOSSAR '89), San Francisco, Calif., USA, pp.967~974., 1989.
 9. Salmon, C. G. & Johnson, J. E.(1990), *Steel Structures*. Harper & Row, Publisher, New York., 1990.
 10. 정철원, 이증빈, 나기현, 박주원., "Fuzzy-Bayesian에 의한 R.C도로교의 신뢰성 및 안전도평가", 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 제1권 제1호(통권1집), 1997년, pp.31~36.
 11. 이증빈, 손용우, 박주원., "충기대비용 최소화에 의한 R.C부재의 안전도평가", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제7권 제2집, 1994, pp.152~159.
 12. 건설교통부, "안전진단 및 정밀안전진단세부 지침(건축물)", 1996. 3.
 13. 이리중학교, "이리중학교 구조안전진단 보고서", 1996. 7.

(접수일자 : 1998. 9. 3)