

구조시스템의 퍼지신뢰성해석 및 상태평가모델 Condition Assessment Models and Fuzzy Reliability Analysis of Structural Systems

이증빈¹⁾ 손용우²⁾ 박주원³⁾
Lee, Cheung-Bin Sohn, Yong-Woo Park, Ju-Won

ABSTRACT

It has become important to evaluate the qualitative reliability and condition assessment of existing structural systems in order to establish a rational program for repair and maintenance. Since most of the existing structural system may suffer from defect, corrosion and damage, it is necessary to account for their effects in fuzzy reliability analysis.

In this paper, an attempt is made to develop a reliability analysis for damaged structural systems using failure possibility theory. Damage state is specified in terms of linguistic variables using natural language information and numerical information, which are defined by fuzzy sets. Using a subjective condition index of failure possibility and information of the damage state is introduced into the calculation of failure probability. The subjective condition index of quantitative and qualitative analysis method is newly proposed based on the fuzzy set operations, namely logical product, drastic product, logical sum and drastic sum.

1. 서 론

구조시스템의 안전성을 합리적으로 평가하기 위해서는 설계와 시공과정 등에 포함된 여러 가지 불확실성의 영향을 정량적으로 파악하는 것이 필요하다. 지금까지 구조시스템의 신뢰성해석에서는 확률·통계이론을 기초로하여 파괴확률이나 신뢰성지수 등의 척도를 사용하여 불확실성의 영향을 고려할 수 있었다. 그러나 이러한 구조시스템에 대한 안전성평가의 문제점은 신뢰성해석방법으로 다룰 수 없는 불확실성의 범위가 매우 제한적이고, 구조시스템에 대한 정보들이 반드시 객관적인 통계자료로 주어지지 않는다는 데 있다.

실제로 구조시스템에는 객관적이고 정량적인 정보보다는 주관적이고 정성적으로 다루어져야 할 정보들이 더 많이 존재한다. 구조시스템에서 주관적인 정보의 한 실례로 구조시스템의 손상에 관한 정도를 나타내는 정보는 통계적인 자료로 나타내기 어렵기 때문에 전문가의 경험이나 공학적 판단에 의해 주관적으로 평가하므로서 상황에 따라서는 애매한 결과를 줄 수도 있다.¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

이러한 주관적이고 애매한 정보를 기존의 신뢰성해석에 도입하기 위해 퍼지집합이론을 이용하는데, 퍼지집합이론에서는 언어변수를 사용하여 이를 나타낸다. 언어변수란 정량적 또는 객관적으로 표현하기 어려운 정보를 객관화시키는 방법으로서 이를 계산에 적용하므로서 최종적으로 얻고자 하는 정보를 객관화시키는데 효율적으로 사용된다.

따라서 본 연구에서는 손상된 구조시스템의 파괴확률을 정량적 방법인 퍼지-베이지언론을 이용하여 산정하고, 이 사후파괴확률에 대응하는 파괴가능성에 기초한 주관적 상태지수의 계산 알고리즘을 퍼지기본연산과 확장원리를 이용하여 개발함과 동시에 구조시스템의 상태평가기준에 활용하는데 그 목적을 둔다.

- 1) 순천제일대학 토목과 교수
- 2) 순천제일대학 토목과 시간강사
- 3) 조선대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2. 퍼지신뢰성해석모델

퍼지이론에 의한 신뢰성해석모델은 기존 신뢰성해석을 확장한 방법으로서 수치정보로부터 확률상의 퍼지 집합이론과 베이즈의 의사결정이론을 병행한 퍼지-베이즈 신뢰성해석모델인 정량적 신뢰성해석 방법과 [0.1] 상의 퍼지집합이론을 이용하여 신뢰성에 대응하는 파괴가능성(Failure possibility)에 기초한 언어적 정보로부터 주관적 상태지수를 구하는 정성적 신뢰성해석방법으로 정의하였다.

2.1 퍼지-베이즈 신뢰성이론

기존의 신뢰성이론은 확률과 통계이론을 기초로 하여 파괴확률 또는 신뢰성지수를 계산하는 과정으로서 AFOSM, FOSM 및 총기대비용 최소화에 의한 최적신뢰성 방법 등이 있다. 문헌 ·5,8)과 같이 본 연구에서는 구조저항 R에 대한 손상요인의 주관적 정보가 구조시스템의 내하력에 영향을 준다고 가정하면, 저항 R과 하중효과 S에 대한 구조물의 한계상태를 파괴로 생각하고 실행가능한 대안의 집합을 $D=[D_1, D_2, \dots, D_j, \dots, D_m]$ 이라 하면 최적신뢰성설계의 대안식은 다음과 같이 된다.

$$E(D_j|B_j) = C_0(1 + k\beta^n)(D_j)[1 + \Phi(-\beta)(D_j|B_j)\tau] \Rightarrow \text{Min} \quad (1)$$

여기서, $P_f = \Phi(-\beta) =$ 파괴확률, $n =$ 안전율의 증가에 따른 곡선형

$$\tau = C_0/C_f = \text{초기비용과 파괴손실비용과의 비, } C_0 = \text{초기비용} (\beta=0 \text{일 때})$$

식(1)의 설계대안 D_j 의 파괴측에 대한 추정치인 사후파괴확률은 저항 R과 하중효과 S의 현장계측치에 대한 정량적정보 X로 부터 얻을 수 있다. 이 때 정량적정보 X를 구조물의 손상요인의 판정등급으로 하고 중요도지수(importance index)를 사용하여 안전측과 파괴측의 조건부확률을 대입하면 문헌 ·1,2,5)에서와 같이 i번째 매개변수의 사후파괴확률(예측파괴확률) P_f^i 와 사후신뢰성지수 β^i 는 다음과 같이 된다.

$$P_f^i = P(B_2|A_i) = \frac{C_f^i P_f^{i-1}}{C_f^i P_f^{i-1} + C_s^i (1 - P_f^{i-1})} \quad (2a)$$

$$\beta^i = -\Phi^{-1}(P_f^i) \quad (2b)$$

이 때, 안전측과 파괴측의 조건부확률은 소속도함수값 μ_{A_i} 와 조건부확률 누가함수 $P(x|B_j)$ 로 정리하면 각각 다음과 같이 된다.

$$\text{안전측 ; } C_s = P(A|B_1) = \sum_{x=0}^m \mu_{A_i}(x) P(x|B_1) \quad (3a)$$

$$\text{파괴측 ; } C_f = P(A|B_2) = \sum_{x=0}^m \mu_{A_i}(x) P(x|B_2) \quad (3b)$$

여기서, $P_f^i =$ i번째 매개변수의 파괴확률, $\Phi^{-1} =$ 표준정규분포함수의 역함수

$x =$ 손상요인의 판정등급, $B_1 =$ 안전측 매개변수, $B_2 =$ 파괴측 매개변수

$m =$ 손실요인수, $A_i =$ i번째 매개변수의 손실판정등급

2.2 파괴가능성에 의한 신뢰성해석

실제 구조시스템에 있어서는 수치정보로 표현하기 어렵고 인간오차나 시공중의 과오와 같이 전문가의 주관적판단 등 구조시스템에 내재되어 있는 손상요인이 다양하고 매우 많기 때문에 실질적으로 전문가의 경험적 판단아래 정성적으로 신뢰성평가가 이루어지는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 정성적 신뢰성해석 평

가기법개발에 관한 기초연구로서 그림-1과 같이 파괴가능성(failure possibility)이론을 도입하여 퍼지신뢰성 해석을 수행한다.⁴⁾

이 파괴가능성은 구조시스템의 신뢰성을 통일적으로 표현하는 척도로 정의할 수 있고 자연언어변수를 사용한 [0,1]상의 퍼지집합으로 표현된다. 이 때 파괴가능성의 소속도함수(membership function)는 최대 소속도함수의 등급이 주어진 매개변수 X_0 와 전문가의 공학적판단에 의해 주관적으로 표현되는 애매성 매개변수 m 으로 나타내면 다음과 같이 정의된다.

$$\mu(X) = \frac{1}{1 + 20 \times |X - X_0|^m} \quad (4)$$

여기서, X =주관적 상태지수, m =애매성계수(퍼지성계수)

따라서 구조시스템의 신뢰성에 대응하는 주관적 상태지수 X_0 는 전절 2.2의 식(2)인 사후파괴확률(예측파괴확률)을 사용하면 다음과 같이 표현된다.

$$X_0 = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/P_f^*))^3} \quad (5a)$$

$$k = \frac{1}{\log(1/P_f^*)} \quad (5b)$$

이 때, k 는 주관적 안전평가기준이고 목표파괴확률(P_f^*) 또는 목표신뢰성지수(β_0)의 값으로 산정된다. 또한 애매성계수 m 은 그림-1b에서와 같이 Dobois-Prade³⁾의 퍼지수개념을 이용하여 구한 퍼지확률에서 P_M/P_L , P_U/P_M 과의 비로 결정되는 함수로서 애매성의 언어변수와 함께 표현하면 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

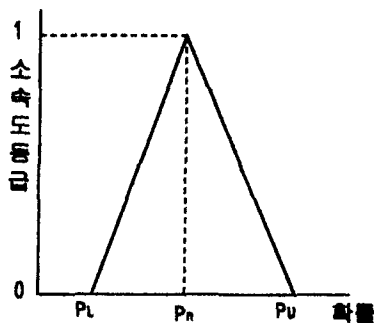


그림-1a 퍼지확률(Fuzzy probability)

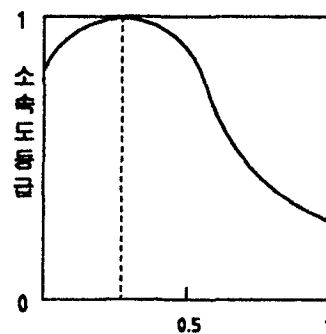


그림-1b 파괴가능성(Failure possibility)

위와 같은 퍼지신뢰성해석모델로 산정한 신뢰성해석결과를 다시 언어표현으로 전환시키는 과정을 언어근사법(Linguistic approximation)이라고 하는데, 본 연구에서는 Kaufuman⁶⁾의 해밍거리(hamming distance)의 개념을 도입하여 파괴가능성분석에 의한 주관적상태지수의 퍼지부분집합과의 해밍거리를 최소화하는 S내의 한 퍼지부분집합을 선택한다. A와 B가 집합 X의 퍼지부분집합이라 하면 A와 B간의 해밍거리는 다음과 같다.

$$d(A, B) = \sum_{i=x_i \in X} |\mu_A(X_i) - \mu_B(X_i)| \quad (6)$$

여기서, A=사전에측의 파괴가능성, B=해석결과의 파괴가능성
 $\mu_A(X_i), \mu_B(X_i)=x_i$ 에 대한 A, B의 소속도함수

그러므로 파괴가능성분석에 의해 도출된 퍼지집합을 $S_d^0=(S_{d1}^0, S_{d2}^0, S_{d3}^0, \dots, S_{dm}^0)$ 이라 하면, 여기에 근사되는 S내의 한 퍼지부분집합 S_d^* 은 다음과 같다.

$$S_d^* = \underset{d \in (1, 2, \dots, m)}{\text{Min}} \quad d(S_d^0, S_d) = \underset{d \in (1, 2, \dots, m)}{\text{Min}} \quad \sum_{i=1}^n |S_{di}^0 - S_{di}| \quad (7)$$

3. 구조시스템의 신뢰성해석과 상태평가기준

3.1 구조시스템의 신뢰성해석

확률적관점에서 취급되는 구조시스템은 직렬체계(Seriess system)와 병렬체계(Parallel system)로 형성되는데, 이러한 구조시스템의 퍼지신뢰성해석에 전문가의 주관이나 자연언어를 도입한 경우에는 최소 t-norm(격렬곱)에서 최대 t-norm(논리곱)까지의 범위나, 최소 t-conorm(논리합)으로 부터 최대 t-conorm(격렬합)까지의 범위인 기본퍼지연산에 대한 검토가 필요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 퍼지신뢰성해석에 대응하는 파괴가능성의 곱연산과 합연산을 퍼지집합의 확장원리를 사용하여 구조시스템의 퍼지신뢰성해석을 고찰하였다.

3.1.1 정량적 해석방법

정량적 신뢰성해석은 전절 2.1의 퍼지-베이지이론에 의한 신뢰성해석이론을 이용한 객관적방법으로서 퍼지집합의 기본연산인 논리합과 격렬합을 사용하면 직렬체계의 신뢰성에 대응하는 파괴가능성의 주관적상태지수 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.^{3,4)}

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

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

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

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(5)를 이용하면 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

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

한편, 병렬체계의 퍼지신뢰성해석에서는 퍼지집합의 기본연산에서 논리곱과 격렬곱을 사용하게 되는데, 병렬체계의 신뢰성에 대응하는 정량적정보에 의한 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.

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

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

$$\text{여기서, } P_f = P_{f1} \times P_{f2} \quad (10c)$$

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(9)를 이용하여 계산되어 진다.

3.1.2 점성적 해석방법

정성적 신뢰성해석은 전절 2.2의 파괴가능성이론을 이용한 주관적 신뢰성해석방법으로 구조시스템을 구성하고 있는 구조요소의 손상요인 등이 주로 언어변량으로 표현되고 전문가의 주관에 기인되기 때문에 언어정보에 의한 신뢰성해석이 검토되어야 한다.

따라서 직렬체계의 퍼지신뢰성해석인 경우에는 식(8)의 수치파라미터를 파라미터 c 로 치환하면, 퍼지집합의 연산에 대한 파괴가능성의 전체 주관적상태지수 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.^{3,4)}

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

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

한편, 병렬체계의 퍼지신뢰성해석인 경우에는 식(10)의 수치파라미터를 파라미터 n 으로 치환하면, 정성적정보에 의한 X_0 는 각각 다음과 같이 정의된다.

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

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

3.2 퍼지이론에 의한 상태평가기준

지금까지 수행된 구조시스템의 안전도평가에서 실시한 외관조사의 상태평가 기준은 주로 경험적인 방법을 사용하였으나, 최근 들어서는 1996년 3월경 시설안전기술공단에서 구조시스템안전점검 및 정밀안전진단 세부지침을 마련하여 구조시스템 외관상태의 항목별 평가요령을 법제화시켰다.⁹⁾ 이 기준들은 주로 구조시스템에 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 이러한 외관조사의 결과는 실제적으로 구조시스템의 내하력평가시나 내구성 및 기능성을 판별하는데 적용되지 않고 유지관리를 위한 외관망도의 작성 또는 보수·보강의 근거로 사용되고 있는 경우가 대부분이다. 따라서 외관조사의 결과로부터 구조시스템의 노후등급을 산정하는 방법을 구체화하여 이러한 외관조사결과를 실제 내하력 산정시 반영하는 방안의 일환책으로 퍼지이론에 의한 상태평가기준을 나타내면 다음의 표-2와 같이 된다.

표-2 퍼지이론에 의한 구조시스템의 상태평가 기준

정량적 해석방법			상 태 기 준	정성적 해석방법	
손상도 등급	사후신뢰성 지수(β)	주관적상태 지수(X_0)		손상도 등급	
A	A1	5.0이상	건설당시의 상태	0.00	A
	A2	5.0 ~ 4.5	건설당시의 상태	0.00 ~ 0.05	
	A3	4.5 ~ 4.0	매우 양호한 상태(보수 불필요)	0.05 ~ 0.10	
B	B1	4.0 ~ 3.5	양호한 상태(보수가 필요할 수 있음)	0.10 ~ 0.20	B
	B2	3.5 ~ 3.0	비교적 양호한 상태(보수가 필요할 수 있음)	0.20 ~ 0.30	
C	C1	3.0 ~ 2.5	보통상태(경미한 보수가 필요할 수 있음)	0.30 ~ 0.45	C
	C2	2.5 ~ 2.0	한계상태(즉시 보수 또는 보강이 필요)	0.45 ~ 0.55	
D	D1	2.0 ~ 1.5	불량한 상태(즉시 보수 또는 보강이 필요)	0.55 ~ 0.70	D
	D2	1.5 ~ 1.0	심각한 상태(보수 또는 보강시 구조물 폐쇄)	0.70 ~ 0.85	
E	E1	1.0 ~ 0.5	위험한 상태(구조물 폐쇄, 보수 가능)	0.85 ~ 0.95	E
	E2	0.5 ~ 0.0	파괴 상태(구조물 폐쇄, 보수 불능)	0.95 ~ 1.00	
	E3	0.0이하	파괴 상태(구조물 폐쇄, 보수 불능)	1.00	

4. 적용해석에 및 고찰

4.1 구조시스템의 해석에

본 논문에서 제안한 파괴가능성에 대한 구조시스템의 신뢰성해석과 상태평가의 타당성을 검증하기 위하여 그림 -2와 같이 부시스템 A, B의 직렬 및 병렬체계를 대상으로 하였다.

전절 3.1.2의 정성적 해석방법을 사용하여 직렬체계의 파라미터가 $c=2.5, 1.3$ 및 0.85 로 변화하고, 병렬체계의 파라미터가 $n=2.9, 2.05$ 및 1.0 으로 변화할 때의 파괴가능성에 의한 주관적 상태지수 X_0 를 각각 산정한 결과를 그림 -3, 4에 보여주고 있다.

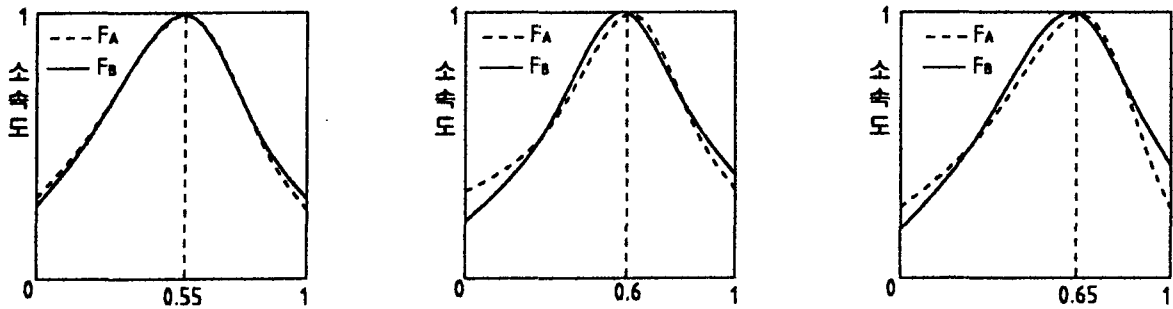


그림-3 직렬시스템 전체의 Failure possibility

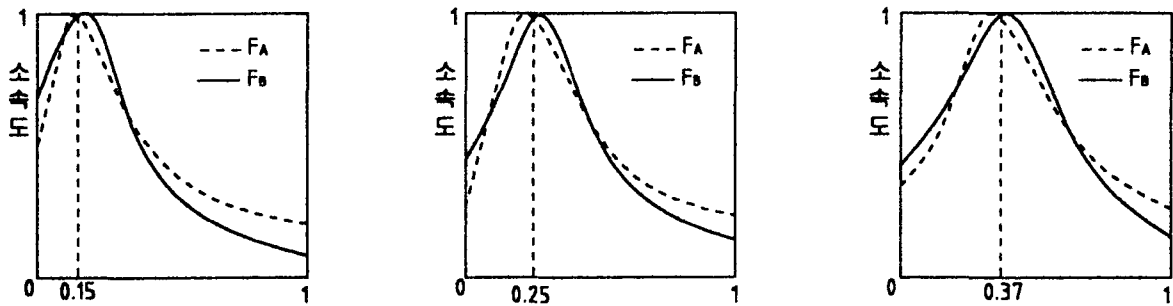


그림-4 병렬시스템 전체의 Failure possibility

따라서 각각의 직렬체계와 병렬체계의 상태평가를 분석한 결과와 계량경제학에서 사용하고 있는 불확실성 하의 의사결정기준 및 언어변수의 표현을 비교·고찰하여 표-3, 4에 정리하였다. 이 때 X_0 는 목표파괴확률 $P_0=1.35 \times 10^{-3}$ (신뢰성지수 $\beta_0=3.0$)과 부시스템 A의 파괴확률 $P_f^i=6.21 \times 10^{-3}$ ($\beta^i=2.5$), 부시스템 B의 $P_f^j=1.35 \times 10^{-3}$ 의 값으로 계산하였다.

표-3 직렬체계의 상태평가와 언어변수표현

파라미터 c	X_0	상태평가 등급	전문가의 의사결정기준	언어변수의 표현
2.5	0.55	C2	낙관적 평가	시스템의 상태는 한계상태이고, 이 평가의 애매성은 중간정도이다.
1.3	0.60	D1	중간적 평가	시스템의 상태는 불량한 상태이고, 이 평가의 애매성은 중간정도이다.
0.85	0.65	D1	비관적 평가	시스템의 상태는 불량한 상태이고, 이 평가의 애매성은 중간정도이다.

표-4 병렬체계의 상태평가와 언어변수표현

파라미터 c	X_0	상태평가 등급	전문가의 의사결정기준	언어변수의 표현
2.9	0.15	B1	낙관적 평가	시스템의 상태는 양호한 상태이고, 이 평가의 애매성은 적다.
2.05	0.25	B2	중간적 평가	시스템의 상태는 비교적 양호한 상태이고, 이 평가의 애매성은 적다.
1.0	0.37	C1	비관적 평가	시스템의 상태는 보통상태이고, 이 평가의 애매성은 중간정도이다.

4.2 조합체계의 해석에

그림-5와 같이 구조시스템이 직렬과 병렬체로 조합된 경우, 즉 조합체계의 피지신뢰성해석과 이에 대한 상태평가를 수행한 결과를 도시하면 시스템전체의 파괴가능성은 그림-6과 같이 된다.

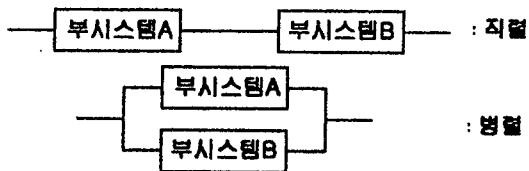


그림-2 직렬 및 병렬시스템

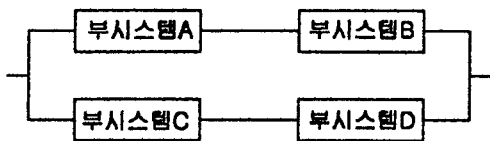


그림-5a 해석대상의 시스템

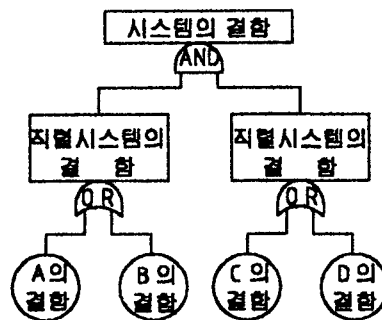


그림-5b 결함수 Diagram

그림-6은 시스템 전체의 파괴확률 $P_f^i=4 \times 10^{-6}$ 로 하고 목표파괴확률이 (a) $P_0=3.98 \times 10^{-4}$, (b) $P_0=4.71 \times 10^{-5}$, (c) $P_0=2.86 \times 10^{-6}$ 로 변화할 때, 파괴가능성의 주관적 상태지수를 각각 $X_0=0.20, 0.34, 0.52$ 로 산정하여 도시한 것이다.

따라서 표-2의 상태평가기준에 의해 시스템 전체의 상태평가를 언어변수로 표현하여 평가하면 (a)는 「시스템의 상태는 양호하고, 이 평가의 애매성은 적다」, (b)는 「시스템의 상태는 보통이고, 이 평가의 애매성은 중정도이다」, (c)는 「시스템의 상태는 한계상태이고, 이 평가의 애매성은 중정도이다」로 된다.

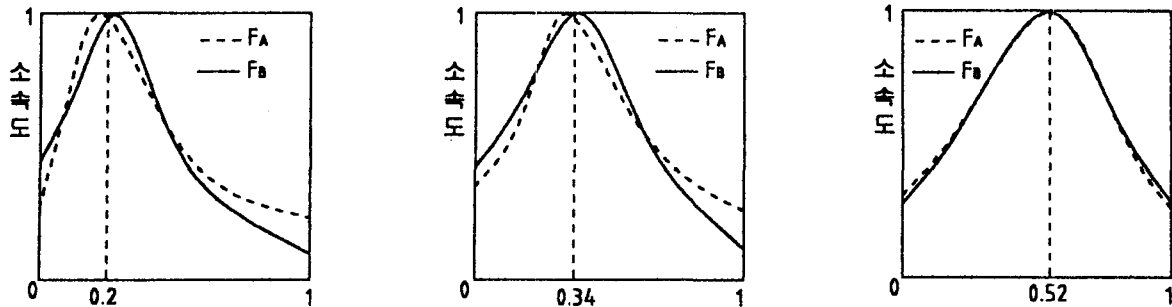


그림-6 해석결과에의 Failure possibility

한편, 시스템의 상태평가를 의사결정분석기준의 측면에서 보면 (a)는 낙관적인 평가이고, (b)는 중간적인 평가이고, (c)는 비관적인 평가라고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 구조시스템의 합리적인 퍼지신뢰성해석모형에 대해 제시하였고, 구조시스템의 상태평가에 관한 기초연구의 일환으로 파괴가능성에 의한 퍼지신뢰성방법을 실제 직렬체계와 병렬체계에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 제시한 구조시스템의 퍼지신뢰성해석모형은 향후 건설구조물의 상태평가 및 안전성평가와 건전성평가를 위한 모형으로 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 본 연구에서 수치예로 적용한 파괴가능성(Failure possibility)에 의한 신뢰성방법은 구조시스템에 내재된 다양한 손상요인을 언어학적 변량으로 취급하고, 파괴가능성의 곱연산과 합연산을 파라미터화함으로써 전문가의 주관적 판단을 보다 정확히 도입할 수 있었다.
- 3) 본 연구에서 제시한 곱연산과 합연산은 각각 최소 t-norm에서 최대 t-norm까지, 최소 t-conorm에서 최대 t-conorm까지 확장·적용할 수 있으므로 구조시스템의 상태평가를 가장 낙관적인 평가에서 가장 비관적인 평가에 대응하는 모델화로 시도하였다.

참 고 문 헌

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. 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. Onisawa, T., "Fuzzy reliability analysis using natural language information and numerical information", Proc. of the 4th IFSA congress, Brussels, Vol.Engineering, 1991, pp.163-166.
4. 鬼澤武久 : システムの事故の定性的表現とその信頼性解析, 日本ファジィ學會誌, Vol.2, No.2, 1990, pp.231-245.
5. 이증빈, 백대우, 박주원, 강수경, "퍼지-베이지언 이론에 의한 기존구조물의 신뢰성평가모델", 순천공업전문대학 학술연구구성비지원 연구보고서, 1998.3.
6. 이증빈, 박주원, 장영부, "퍼지근사추론법에 의한 손상구조물의 건전도평가시스템개발", 한국구조물진단학회 봄학술발표논문집, 제2권 제1호, 1998.5. pp.41-48
7. 정철원, 이증빈, 나기현, 박주원, "Fuzzy-Bayesian에 의한 RC도로교의 신뢰성 및 안전도평가", 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 제1권 1호(통권1집), 1997년, pp.31~36.
8. 이증빈, 손용우, 박주원, "충기대비용 최소화에 의한 RC부재의 안전도평가", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제7권 제2집, 1994, pp.152~159.
9. 건설교통부, "안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량)", 1996.3.