

퍼지를 이용한 교량 안전도 평가의 보정계수 산정

Calculation Correction Factor of Bridge Capacity Using Fuzzy Sets Theory

○조원신* 박기태* 김상효** 황학주***
 Jo, Won Sin Pak, Ki Tai Kim, Sang Hyo Hwang, Hak Joo

ABSTRACT

The values of a linguistic variable are words, phrases, or sentences in a given language. For example, structural damage can be considered as a linguistic variable with values such as 'severely damaged', 'moderately damaged', which are meaningful classifications but not clearly defined. This paper is to evaluate reasonably the correction factor of bridge capacity with the aid of fuzzy sets theory. By using the above mentioned fuzzy measure, the concept of fuzzy integral and linear membership function can be defined. It is concluded that the fuzzy sets theory can be applied to determine reasonably the correction factor of bridge capacity.

1. 서론

현행 교량 내하력 평가기법에서는 노후정도를 고려치 않고 산정한 기본 내하력에 보정계수를 적용하여 공용하중을 산정하고 있다. 이러한 보정계수들은 현재 일본에서 적용하는 값을 그대로 이용하는 실정이므로 우리의 현 상황에 맞는 계수의 확립은 시급한 일이기도 하다.

현재 적용하고있는 보정계수는 물론 일본이나 우리나라에서도 오랫동안 검토한 실무경험자의 의견을 바탕으로 한 수치라 믿지만 현장에서 판단자의 주관성과 언어적 표현의 애매성은 보정계수를 산정하는데 있어 다분히 모호함을 내포하고 있다고 사료된다.

이에 본 연구에서는 교량에서 공용하중을 산정할때 고려하는 보정계수를 분석하고 그 중에 애매함을 포함하는 노면상태, 교통상태, 및 기타 조건에 관한 보정계수에 퍼지집합론을 적용하여 실무경험자의 의견을 보다 합리적으로 수렴시킨 수치를 산정하고자 한다. 퍼지집합론은 1965년 Zadeh에 의해 제안된 이후 연구자체는 1970년대 중반부터 시작하여 1980년대에 들어와서 실용화가 시작되었는데, 1971년 Brown과 Leonards는 공학분야에 처음으로 퍼지를 도입하였고, 1979년 Brown은 구조물의 안전성을 측정하는데 퍼지 이론을 고려하기도 하였다. (1)

1985년 Yao는 콘크리트의 균열정도로써 기존 구조물의 손상도 평가에 퍼지집합론을 도입하였다. (2)

본 연구에서는 먼저 교량의 노면상태에서 고려되는 요소들을 귀속도 함수(membership function)로 정량화하여 평가하였고, 교통 상태에서는 교통의 형태, 동행차량의 하중크기 그리고 운하중의 통과위치로 나누어 고려하고, 기타 조건에 대한 보정계수는 교량의 상판이나 하부의 구조적 상태등을 고려하고, 공용기대년수에 퍼지 이론을 적용하는 보다 합리적인 방안을 제시하려고 한다. 이에 따라 보정계수의 합리적인 수치화는 우리나라의 교량안전도 평가에서 공용하중을 산정할 때 좀 더 타당성을 제시할 것이라 사료된다.

2. 공용하중 산정시 고려하는 보정계수와 퍼지추론

현재 허용응력설계법에 의한 교량의 안전도 평가시 공용하중은 식 1(3)과 같이 구한 기본내하력에 여러가지 보정계수를 곱하여 판정하고 있다.

$$P = PCL \times K_s \times K_R \times K_t \times K_o \quad (1)$$

여기서,

$$PCL(\text{기본 내하력}) = 24 \times \frac{\sigma_a - \sigma_d}{\sigma_{24}}$$

σ_a : 주부재 사용재료의 허용응력
 σ_d : 사하중 응력

* 연세대학교 대학원 석사과정
 ** 연세대학교 토목공학과 조교수
 *** 연세대학교 토목공학과 교수

- 024 : DB - 24 하중에 의한 최대계산응력
- Ks : 응력보정계수
- Kr : 노면상태에 따른 보정계수
- Kt : 교통상태에 따른 보정계수
- Ko : 기타조건에 따른 보정계수

2.1 노면상태에 따른 보정계수에 대한 퍼지추론

먼저 노면상태에 따른 보정계수를 분석해 보면 교량의 요철, 박리, 및 차체의 진동에 따라 판단되는 4가지 값을 표 1(3) 과 같이 제시하고 있어 다소 모호함이 있다. 표 1의 내용을 분석하여 보정계수에 미치는 인자를 조사해 보면 표 2와 같이 요철, 박리, 차체의 진동 3가지 경우라 할 수 있다.

표 1 노면상태에 따른 보정계수

노 면 상 태	Kr
약간의 요철이 있는 포장노면	1.00
포장에 다소의 박리가 있고 차량통과시 약간의 진동이 있는 경우	0.95
포장에 박리가 심하고 그 부분에서 차량통과시 차체에 진동이 많은 경우	0.90
포장파손이 심하여 차량통과시 차체의 진동이 극심한 경우	0.85

표 2 보정계수의 영향인자

인자	보정계수의 영향인자
Kr-1	요철
Kr-2	박리
Kr-3	차체 진동

위 보정계수의 영향인자를 토대로 퍼지관계의 합성법칙에 의거한 추론법을 이용하면 연속형의 퍼지변수는 귀속도 함수가 식 2(4)와 같은 삼각형으로 나타낼 수 있다.

$$A(x) = \frac{1}{a} (-|x-b| + a) \vee 0, \quad a > 0 \quad (2)$$

여기서, 파라미터 b는 모두 귀속도 함수의 등급이 1로 되는 x의 값이고, a는 귀속도 함수의 특성을 나타내는 값이라 할 수 있다.

또한, 귀속도 함수는 범종형으로 추론할 수

있으나, 최근에는 일반적으로 삼각형이 사용되고 있다. 이것은 삼각형 함수가 계산이 간편하고, 성능에 있어서 거의 차이가 없기 때문이다. (4)

본 연구에서는 '매우 작다' '작다' '중간이다' '크다' '매우 크다' 인 5가지 형태의 언어적 변수와 중요도에선 '작다' '중간이다' '크다' 인 3가지 형태의 언어적 변수로 분리한다.

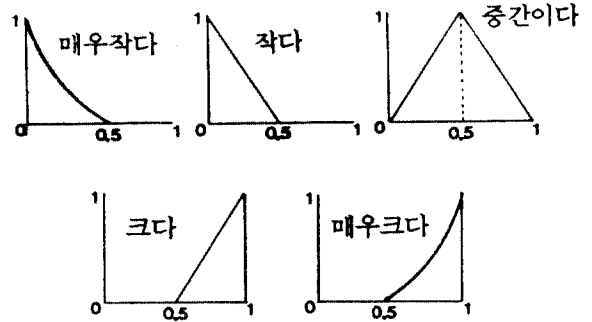


그림 1 언어적 귀속도 함수

연산에서는 Pj 와 Wj 의 영향을 동시에 고려하기 위하여 교집합이 사용되며 귀속도함수를 사용하여 정의하면 식 3(5)과 같고,

$$P_j \cap W_j = f \mu_{P_j}(u) \wedge \mu_{W_j}(w) / (u, w) \quad (3)$$

합성된 귀속도 함수는 식 4(5)의 max, min. 논리식을 사용해서 구한다.

$$\max. (\min. (\mu_{P_j}(u), \mu_{W_j}(w))) = \vee (\wedge (\mu_{P_j}(u), \mu_{W_j}(w))) \quad (4)$$

여기에서 \vee 와 \wedge 는 귀속도 간의 최대값과 최소값에 해당한다.

위와 같은 연산을 통해 구한 귀속도 함수는 그 대표가 되는 값을 찾기 위해 퍼지 인테그랄에 의한 평가를 실시한다. 예를 들어 실무 경험자의 판단으로 보정계수의 영향인자 즉, 요철, 박리, 차체 진동의 판정을 모두 '작다'와 중요도에선 각각 '작다' '중간이다' '크다'로 평가를 내리면 합성된 귀속도 함수는 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_{PT} = 1.0|0 + 0.8|0.1 + 0.6|0.2 + 0.4|0.3 + 0.2|0.4 + 0|0.5 + 0|0.6 + 0|0.7 + 0|0.8 + 0|0.9 + 0|1.0 \quad (5)$$

여기에서 퍼지분포함수를 식 6(5)과 같이 정의하여 그림 2 과 같이 도시할 수 있다.

$$H\mu_{PT}(X_r) = \sum_{i=1}^r \mu_{PT}(X_i) / \sum_{i=1}^n \mu_{A}(X_i) \quad (6)$$

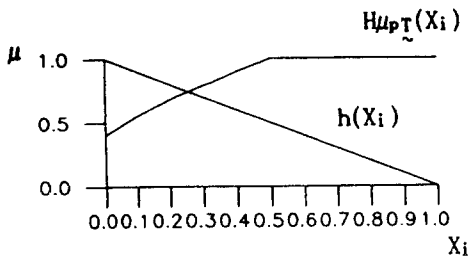


그림 2 퍼지인테그랄에 의한 귀속도함수의 평가

또한, 그림 2 에서 $h(X_i)$ 는 식 7(5)과 같이 가정하였다.

$$h(X_i) = 1 - X_i \quad (7)$$

이와같이 퍼지인테그랄은 다음 식 8(5)과 같이 수행된다.

$$\int h(X) g = \bigvee_{i=1}^n [h(X_i) \wedge H\mu_{pT}(X_r)] \quad (8)$$

2.2 교통상태에 따른 보정계수에 대한 퍼지추론

교통상태에 대한 보정계수는 교통형태와 통행차량의 하중크기, 운하중의 통과위치, 그리고 과적차량의 빈도수를 고려해볼 때 x 를 통행량(대), y 를 혼입률(%)이라 놓고 교통형태는 $x > 15000$, $x < 5000$ 일 때, 통행차량의 하중크기는 $y > 35$, $y < 15$ 일 때 비퍼지하고, $5000 \leq x \leq 15000$, $15 \leq y \leq 35$ 에서는 퍼지니스가 존재하여 식 9 와 식 10 과 같은 귀속도 함수로 모형화 하였다. (8)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < 5000 \\ 0.0001(x-5000), & 5000 \leq x \leq 15000 \\ 1, & x > 15000 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_B(y) = \begin{cases} 0, & y < 15 \\ 0.05(y-15), & 15 \leq y \leq 35 \\ 1, & y > 35 \end{cases} \quad (10)$$

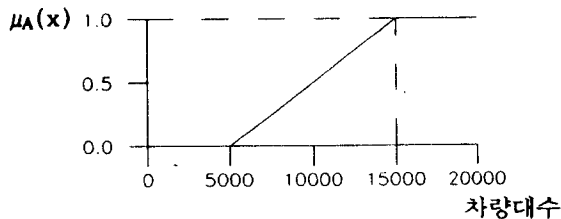


그림 3 교통형태의 퍼지모형

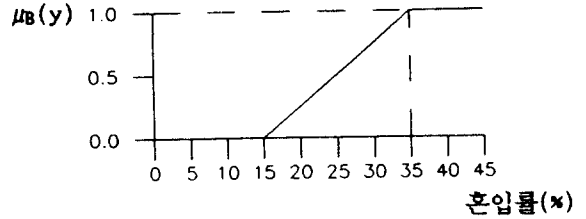


그림 4 통행차량 하중크기의 퍼지모형

운하중의 통과위치는 대상교량의 차선폭과 거더의 위치에 따라 임의의 거더의 설계모멘트와 실제 차량이 주행하는 모멘트의 비로 판별하였다. 실제로 교량 횡단면의 재하위치를 여러번 바꾸어 모멘트의 비를 분석해 본 결과, 최소 모멘트 비를 0.800, 최대 모멘트 비를 0.900으로 추정하여 모형화 하였다.

$$M_a/M_d(0.900) \geq a \geq M_b/M_d(0.800) \quad (11)$$

a : 대상 교량의 모멘트 비
 M_a/M_d : 최대 모멘트 비
 M_b/M_d : 최소 모멘트 비

$$\mu_a(Z) = \begin{cases} 0, & x < 0.800 \\ 10(Z-0.8), & 0.800 \leq x \leq 0.900 \\ 1, & x > 0.900 \end{cases} \quad (12)$$

과적차량의 빈도수는 조사자료가 거의 결여되어 있으므로, 경험자의 모호한 판단으로 접근할 수 밖에 없는 문제이다. 이에 본 연구에서는 경험자의 판단을 언어적 함수화하여 귀속도함수의 대표값을 연속적인 형태에서 찾아볼 수 있다. 판단자의 언어적 표현을 '매우크다' '크다' '중간이다' '작다' '매우작다' 의 5가지 변수로, 중요도는 '크다' '중간이다' '작다' 로 놓고 귀속도함수를 그림 1 과 같은 형태로 나타내었다.

예를 들어 중요도는 '중간이다' 로 판정하고, 경험자의 판단이 '크다' 로 표현되었다면 식 4 에 의해 연속적인 퍼지변수에서 그림 5 와 같은 합성을 하여 무게중심으로서 대표값을 산정한다. (4)

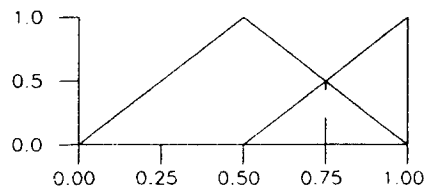


그림 5 합성된 귀속도 함수

2.3 기타 조건에 따른 보정계수에 대한 퍼지추론

기타 조건에 대한 보정계수에서 고려할 점은 상부구조물 각 부재의 부식 및 손상과 하부구조의 영향을 들 수 있고, 교량의 장래 공용기대년 수도 고려되어야 할 것이다. 표 3과 같이 교량을 이루고 있는 중요한 요소, 즉 상판, 빔, 교좌장치, 교대, 교각의 손상정도를 각각 조사한 다음 세부평가하여 등급을 구하고, 그 손상 정도로서 귀속도함수를 모형화할 수 있다.

앞 2.1 절의 그림 1 과 같은 언어적 변수로 나누고, 예를 들어 중요도는 작다, 손상정도는 중간이다, 등으로 판정하여 합성한 결과는 그림 6 의 연속적인 형태에서 찾을 수 있다.

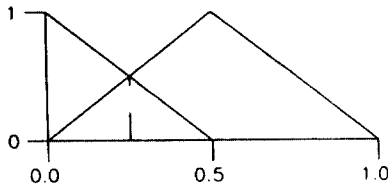


그림 6 합성된 귀속도 함수

공용기대년수에 대한 보정계수는 L을 계산된 잔존수명(년)이라 놓고, $L > 20$, $L < 5$ 의 비퍼지한 단계와 $5 \leq L \leq 20$ 의 퍼지한 부분을 나누어 선형 귀속도 함수를 퍼지한 부분에 적용하였다.

$$\mu_c(L) = \begin{cases} 0, & L < 5 \\ 1/15(L-5), & 5 \leq L \leq 20 \\ 1, & L > 20 \end{cases} \quad (13)$$

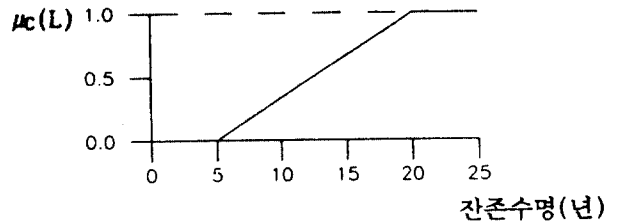


그림 7 추정잔존수명의 퍼지모형

표 3 구조물의 평가기준 및 등급(9)

조사 내용	평가 항목	세부평가 내용 및 등급	등급
구조물상태 및 안전성	구조물상태	상판 구부, 미세한 균열 및 파손 구부, 미세한 균열 및 파손 구부, 파손 및 부식 전면적 부식 및 파손	A B C D E
		빔 균열 및 파손이 없는 상태 미세한 균열이 약간 있는 상태 미세한 균열이 전면에 있는 상태 전면적인 균열, 파손, 부식 및 과도한 처짐	A B C D E
		교좌장치 매우 양호 양호 보통 불량 매우 불량	A B C D E
		교대 교대의 균열 및 파손이 없는 상태 교대의 균열이 약간 있는 상태 구부, 균열 및 파손 전면적인 균열, 파손, 심한침식 및 부식	A B C D E
		교각 교각의 균열 및 파손이 없는 상태 교각의 균열이 약간 있는 상태 구부, 균열 및 파손 전면적인 균열, 파손, 심한침식 및 부식	A B C D E

표 4 등급에 대한 손상도의 언어적 표현

등급	언어적 표현
A	매우 작다
B	작다
C	중간이다
D	크다
E	매우 크다

3. 적용사례 및 결과분석

앞에서 제시한 기법의 타당성을 검토하기 위해 다음과 같은 3가지 경우에 대하여 보정계수를 분석해 보고자 한다.

표 5 노면상태에 대한 판정

영향인자	판 정 도		
	경우1	경우2	경우3
요철 바닥 차체진동	작다 작다 작다	작다 크다 작다	크다 크다 크다

표 6 교통상태에 대한 판정

교통 상태	경우1	경우2	경우3
대상구도의 일일교통량(대)	약17000	약10000	약4000
대상교량의 혼입률(%)	약 40	약 20	약 10
운하중 통과위치	0.885	0.873	0.810
과적차량	크다	중간이다	작다

표 7 기타조건에 대한 판정

구조물 상 태	중요도	손 상 도		
		경우1	경우2	경우3
상판 압입 교좌장치 교대 교각	크다 크다 작다 중간이다 중간이다	작다 작다 작다 작다 작다	중간이다 중 작다 작다 크다	크다 크다 크다 중간이다 크다
추정잔존수명(년)		24.1	12.3	4.3

노면상태에 대한 보정계수는 언어적합수를 이산적인 퍼지변수로 놓고, 퍼지인테그랄을 수행하여 귀속도함수의 대표값을 결정하고, 교통상태와 기타조건에 대한 보정계수는 퍼지모형과 연속적인 퍼지변수의 합성에서 대표값을 결정하면 표 8 과 같다.

표 8 산정된 보정계수의 결과값

경우	k_r	k_t	k_o
경우1	0.970	0.820	0.933
경우2	0.937	0.901	0.894
경우3	0.865	0.983	0.853

결과를 분석하여 보면 전반적으로 외관조사와 교통특성조사의 결과가 합리적으로 반영되는 것을 알 수 있으며, 보정계수의 결정에 고려되는 여러가지 복합적인 인자들에 대한 조사결과와 차등이 체계적으로 반영되고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

1) 본 연구에서 개발된 알고리즘은 기존 확률론으로 다루기 힘들었던 모호한 주관성을 교량의 안전도 평가에 있어 보다 체계적으로 반영되었다.

2) 퍼지 논리를 근거로하여 산정된 값과 기존의 모호한 판단값은 물론 차이가 있기 마련이나 실무경험자가 내린 판단의 모호함을 퍼지변수로 반영하여 산정된 수치는 좀 더 합리적이라 사료된다.

3) 수치계산의 결과에서 알 수 있듯이 귀속도함수에 있어 대집합의 변화는 산정된 결과에 영향을 미치므로, 이는 실제 안전도 평가에 적용된 교량의 상태를 관찰해 온 실무경험자의 의견으로서 조정되어야 할 것이다.

5. 참고문헌

1. Brown, C.B., "A Fuzzy Safet Measure", J. of Engineering Mechanics Div., Vol.105, No.EM5, ASCE, 1979.
2. Yao, J.T.P., "Damage Assessment of Existing Structures", J. of Engineering Mechanics Div., Vol.109, No. 6, ASCE, 1980.
3. 건설부 국립건설 시험소, 교량내하력 조사(구조물 안전진단 연구), 1987, pp.42-43.
4. 菅野道夫, Fuzzy Control System, 대영사, 1990, pp. 76-84.
5. Kenji ikejima, Dan M. Frangopal, Kappyo Hong, Fuzzy Sets Techniques with Applications, University of Colorado, Boulder, 1987, pp.19-24.
6. Yao, J.P.T., Safety & Reliability of Existing Structures, Great Britain at the Pitman Press, Bath, 1985, pp.62-72.
7. 한국건설기술연구원, 도로교 설계하중의 확률론적 분석, 1991, pp.42-43.
8. 건설부, 도로교표준시방서, 1985, pp.13-14.
9. 건설부, 교량관리전산화, 1990, pp.22-23.
10. Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets", Fuzzy Sets and Applications, 1987.
11. 이승열, Fuzzy 집합론을 이용한 철근 콘크리트보의 최적설계, 연세대학원 대학원 석사학위논문, 1991
12. 엄정국, 퍼지이론, 전영사, 1991 pp.37-49.