

퍼지 이론을 이용한 터널 콘크리트 라이닝의 상태평가 Assessment of Concrete Lining Using Fuzzy Theory

이광호¹⁾, Kwang-Ho Lee, 배규진²⁾, Gyu-Jin Bae, 이석원³⁾, Seok-Won Lee, 이성원¹⁾, Sung-Won Lee, 조만섭¹⁾,
Mahn-Sup Cho,

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원(Researcher, Civil Eng. Research Div., KICT)

²⁾ 한국건설기술연구원 기획조정실 실장(Director, Planning & Coordination Dept., KICT)

³⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원(Senior Researcher, Civil Eng. Research Div., KICT)

SYNOPSIS : It has been recognized that the assessment of concrete lining is very uncertain and subjective depending on the engineers who are in charge. T-FLAS which was based on fuzzy theory was developed in this study for the quantitative and objective assessment of the concrete lining in tunnels. Based on the application of T-FLAS on the evaluated field data, it was shown that the assessment system using fuzzy theory(T-FLAS) can be the effective and objective method for the assessment of concrete lining.

Key Words : Concrete lining assessment, Fuzzy theory, T-FLAS, AI, Tunnel

1. 머리말

최근 지하철, 도로터널 등 기존 터널구조물의 노후화에 따른 콘크리트 라이닝의 균열, 백화 및 누수 등으로 인해 터널 구조물 자체의 안전성과 인접 구조물의 안전성 평가에 대한 많은 문제가 대두되면서 객관적이고 합리적인 터널의 안전진단 체계 및 평가 기준에 대한 필요성이 증대되고 있다.

국내의 경우는 1995년도 이후 건설교통부에서 “시설물 안전관리에 관한 특별법”이 제정되면서 많은 진단 기관들이 설립되어 건교부의 진단지침을 기준으로 안전진단을 수행하고 있으나, 현재까지는 진단 수행 및 평가에 대한 체계가 다소 미흡하여 각 진단기관마다 책임기술자 또는 전문가문위원들의 주관적인 판단에 의존하여 터널구조물의 상태 및 안전성이 평가되고 있는 실정이다. 예를 들면, 터널의 각종 손상에 대한 원인을 명확하게 규명하기 어렵고, 해당 손상에 대한 적절한 등급으로의 결정이 애매하며, 또한 각 조사항목들을 종합적으로 판단하여 대상터널의 정확한 등급을 선정하기에는 현재의 안전진단 체계로서는 많은 어려움이 따른다.

따라서 본 연구에서는 unknown factor가 산재한 터널구조물에 대하여 보다 정량적인 상태평가 및 안전성 평가기법을 개발하고자 퍼지 추론방법을 이용한 평가시스템(T-FLAS)을 개발하였고, 기존의 터널 안전진단 결과와의 비교를 통하여 본 시스템의 타당성을 검토하여 보았다.

2. 현 안전진단의 주요 문제점 분석

(1) 항목간 연계 분석 미흡

터널의 변상원인 규명을 위해 각각의 조사항목들에 대해서 연계성을 부여하여 분석하는 것은 반드시 필요

한 절차이다. 그러나 현행 터널의 안전진단 시에 여러 가지 진단 항목들 예를 들면, Schmidt hammer, 초음파 탐사, 철근탐사, 철근부식도 측정, 코아 압축강도, 염도 측정, 콘크리트 배합비, 수질조사, 투수시험, 균열조사, 누수조사, 손상조사 등을 조사하지만, 최종 평가단계에서 이들 항목들간의 상호 연계성 있는 분석이 미흡한 것으로 판단되었다.

(2) 조사항목의 미흡

상기에서 언급한 조사항목들 이외에도, 터널이라는 특성을 고려하여 추가적으로 조사되어야 할 항목으로는 유해가스측정과 교통량 측정, 환기시스템 등을 들 수 있으며, 유해가스 측정을 통하여 교통량에 따른 공기 중의 CO_2 함량 등 콘크리트 라이닝의 열화에 영향을 미치는 가스의 분석 및 환기시스템의 적정성여부를 판단하여 필요시 환기시스템을 재 설계하고, 라이닝의 열화를 억제해야 할 것이며, 이를 통해서 터널의 수명기간이 연장될 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 구간별 등급 결정이 애매함

터널의 안전진단 수행 시에 측정 분할의 간격은 대부분 10m 간격으로 하고 있으며, 이 구간을 1 station으로 설정해서 각 조사항목별 평가등급을 기입하고 있는데, 일정한 등 간격으로 나누어져 있는 구간설정 방식으로는 2~3개구간에 걸쳐 연속되는 균열에 대한 표현이 어려우며, 같은 구간내의 여러 형상에 대한 균열을 종합하여 평가하는 데는 무리가 따르게 된다. 또한 라이닝의 상태가 좋은 구간을 여러 구간으로 나누어 불필요한 작업을 하게 되는 경우도 생길 수 있다. 그러므로 각각의 대표등급을 설정하게되는 현행의 구간설정 방식은 다소 비합리적인 방법으로 판단되며, 향후 이러한 문제의 해결을 위한 연구를 계속해서 추진해 나가야 할 것으로 판단된다.

(4) 대표등급 결정근거가 미흡

현재 안전진단 시에 대표등급을 결정하는 방법은 해당구간내의 각각의 진단항목들의 평가 등급을 종합하여 표시하게 되는데, 대부분 가장 낮은 평가등급으로 그 구간의 대표등급을 결정하는 것으로 분석되었다. 이러한 대표등급의 결정 방식으로는 평가결과에 대한 신뢰성 저하를 예견할 수 있는데, 예를 들어 “10m 구간 내에 폭이 0.7mm 이상인 균열이 하나라도 발견되고 나머지 사항은 별 문제가 없을 때” 현재의 평가방법으로는 그 구간의 균열에 대한 평가 등급은 E등급으로 결정되며, 평가등급 총괄표에서 대표등급을 결정지을 때 이 균열 조사 항목에 의해서 대표등급은 E등급에 가깝게 결정되게 된다. 이와 같은 문제점들로 인해 시설물의 안전진단은 진단 기관에 따라 다른 결과를 제시할 수 있게 된다.

이상과 같이 객관적인 평가결과의 신뢰성 저하를 해결하기 위한 방안으로, 최근 여러 연구자에 의해 교량, 옹벽 등의 구조물 상태 및 안전성 평가에 인공지능기법을 적용하는 연구가 진행 중에 있으며, 본 연구에서는 터널구조물을 대상으로 상태평가 및 안정성평가에 인공지능기법을 적용한 평가 시스템을 개발한 후 그 신뢰성을 검증하여 보았다.

3. 콘크리트 라이닝 상태평가에의 퍼지 이론의 적용

퍼지 관계는 두 가지 상태의 모호한 관계를 통상의 관계로 표현 가능하도록 하는 수단이며, 이러한 퍼지 관계에 있어 행렬과 그래프를 사용하여 포함, 교집합 및 합집합 등의 여러 가지 연산을 수행할 수 있기 때문에 시설물에 대한 손상상태의 부재별 평가가 가능하게 된다. 그리고 퍼지 집합에서 중요한 역할을 하는 퍼지 추론이라 함은 부정확한 전체의 집단으로부터 결론을 유추하는 과정을 말하는데, 이러한 근사 추론의 과정을 통해 손상구조물의 종합적인 평가를 도출할 수 있게 된다. 결론적으로 모호성을 다루는 기술자의 능력을 퍼지 이론으로 표현하고, 이를 컴퓨터에 인식시켜 공학에 이용할 수 있기 때문에 시설물의 안전진단평가에 퍼지 집합이론의 적용이 가능하게 된다.

3.1 기본이론(직접법을 이용한 퍼지 추론)

본 연구에서는 터널 안전진단의 각 부위별, 각 구간별 및 전체구간 대표등급을 결정하는데 직접법을 이용한

퍼지 추론의 방법을 적용하였다. 이러한 직접법에서 이용하는 퍼지 추론의 규칙은 IF - THEN의 형식으로 표현되며, 그 형식은 다음과 같이 표현될 수 있다(류성렬, 1995).

- 규칙 1 : IF c is $F_{\text{균열}A}$ & w is $F_{\text{누수}A}$ &...& b is $F_{\text{배면공동}A}$ THEN t is $F_{\text{대표}A}$
 규칙 2 : IF c is $F_{\text{균열}B}$ & w is $F_{\text{누수}B}$ &...& b is $F_{\text{배면공동}B}$ THEN t is $F_{\text{대표}B}$
 규칙 3 : IF c is $F_{\text{균열}C}$ & w is $F_{\text{누수}C}$ &...& b is $F_{\text{배면공동}C}$ THEN t is $F_{\text{대표}C}$ (1)
 규칙 4 : IF c is $F_{\text{균열}D}$ & w is $F_{\text{누수}D}$ &...& b is $F_{\text{배면공동}D}$ THEN t is $F_{\text{대표}D}$
 규칙 5 : IF c is $F_{\text{균열}E}$ & w is $F_{\text{누수}E}$ &...& b is $F_{\text{배면공동}E}$ THEN t is $F_{\text{대표}E}$

여기서, 각각의 진단항목인 균열, 누수, 재료분리, 박리 및 박락, 백태, 반발경도, 초음파, GPR, 배면공동에 관련된 퍼지 집합은 $F_{\text{균열}}, F_{\text{누수}}, \dots, F_{\text{배면공동}}$ 등으로 표시되며, 각 규칙들에 대한 적합도는 아래와 같다.

- 규칙 1의 적합도 : $W_A = \mu_{F_{\text{균열}A}}(c_0) \wedge \mu_{F_{\text{누수}A}}(w_0) \wedge \dots \wedge \mu_{F_{\text{배면공동}A}}(b_0)$
 규칙 2의 적합도 : $W_B = \mu_{F_{\text{균열}B}}(c_0) \wedge \mu_{F_{\text{누수}B}}(w_0) \wedge \dots \wedge \mu_{F_{\text{배면공동}B}}(b_0)$
 규칙 3의 적합도 : $W_C = \mu_{F_{\text{균열}C}}(c_0) \wedge \mu_{F_{\text{누수}C}}(w_0) \wedge \dots \wedge \mu_{F_{\text{배면공동}C}}(b_0)$ (2)
 규칙 4의 적합도 : $W_D = \mu_{F_{\text{균열}D}}(c_0) \wedge \mu_{F_{\text{누수}D}}(w_0) \wedge \dots \wedge \mu_{F_{\text{배면공동}D}}(b_0)$
 규칙 5의 적합도 : $W_E = \mu_{F_{\text{균열}E}}(c_0) \wedge \mu_{F_{\text{누수}E}}(w_0) \wedge \dots \wedge \mu_{F_{\text{배면공동}E}}(b_0)$

여기서, $\mu_{F_{\text{균열}A}}(c_0), \mu_{F_{\text{균열}B}}(c_0), \dots, \mu_{F_{\text{균열}E}}(c_0)$ 는 각각 퍼지 집합(fuzzy set) $F_{\text{균열}A}, F_{\text{균열}B}, \dots, F_{\text{균열}E}$ 의 c_0 에서의 등급(grade)을 나타낸다. 이들의 적합도를 후건부의 퍼지 집합에 반영시켜 개개 규칙의 추론결과를 다음과 같이 구한다.

- 규칙 1의 추론결과 : $\mu_{F_{\text{대표}A}}(t) = W_A \wedge \mu_{F_{\text{대표}A}}(t)$
 규칙 2의 추론결과 : $\mu_{F_{\text{대표}B}}(t) = W_B \wedge \mu_{F_{\text{대표}B}}(t)$
 규칙 3의 추론결과 : $\mu_{F_{\text{대표}C}}(t) = W_C \wedge \mu_{F_{\text{대표}C}}(t)$ (3)
 규칙 4의 추론결과 : $\mu_{F_{\text{대표}D}}(t) = W_D \wedge \mu_{F_{\text{대표}D}}(t)$
 규칙 5의 추론결과 : $\mu_{F_{\text{대표}E}}(t) = W_E \wedge \mu_{F_{\text{대표}E}}(t)$

이상과 같은 과정을 통하여 각 규칙의 추론결과를 모아 다음과 같은 최종적인 추론결과를 얻을 수 있다.

$$\mu_{F_{\text{전체}}}(t) = \mu_{F_{\text{전체}A}}(t) \vee \mu_{F_{\text{전체}B}}(t) \vee \dots \vee \mu_{F_{\text{전체}E}}(t) \quad (4)$$

3.2 소속도함수(Membership Function)의 결정

그림 1은 균열조사에서의 소속도함수와 조사결과의 퍼지적 표현을 나타낸 예로서, 우측 그림은 균열 폭이 0.52일 때의 퍼지적 표현이며, 이때의 centroid는 x축의 C 등급에 가깝게 된다. 따라서 비퍼지화(defuzzification)에 의한 균열 0.52의 등급은 C등급으로 표현된다.

이와 같이 퍼지 집합이론을 콘크리트 라이닝의 상태평가에 적용하기 위해서는 조사 항목들의 특성과 항목 간 상호 연관성을 고려하여 소속도함수를 구하는 것이 가장 중요하다. 즉, 기존의 연구사례나 적용사례가 부족하여 추후 통계적인 방법과 전문가의 설문조사 그리고 터널의 설계자 및 유지관리자에 의한 주관적 견해

등을 통하여 소속도함수가 결정되어야 할 것이다.

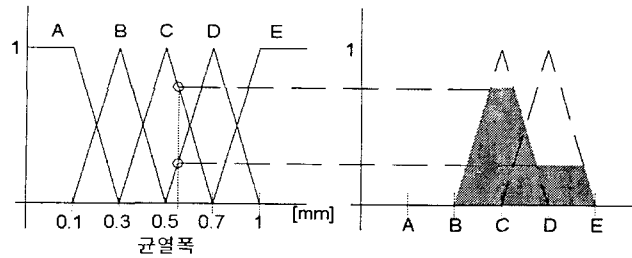


그림 1. 균열조사 결과의 퍼지적 표현 예

3.3 비퍼지화 과정(Defuzzification)

퍼지 근사 추론법의 최종적인 추론결과는 Li 와 Gupta(1995), Kruse et al.(1994) 등에 의해 제시된 여러 가지의 비퍼지화 과정(defuzzification)을 통하여 결정되어 지는데, 퍼지 집합인 $\mu_{F\text{전체}}$ 의 비퍼지화 과정 즉, 식 5의 중심점(centroid)을 구하는 방법이 가장 일반적으로 적용되고 있다.

$$\text{Centroid} : t_0 = \frac{\int \mu_{F\text{전체}}(t) t dt}{\int \mu_{F\text{전체}}(t) dt} \quad (5)$$

4. T-FLAS의 개발 및 적용성 평가

본 연구에서는 라이닝 상태평가를 위한 조사 항목별 연계를 부여하고, 종합판정 결과에 대한 근거를 퍼지 논리로 제시하며, 상태평가를 보다 체계적 및 자동적으로 수행할 수 있도록 상술한 퍼지 근사 추론법을 도입하여 터널 상태평가 자동화 시스템인 T-FLAS(Tunnel-Fuzzy Logic Assessment System)를 개발하였다.

4.1 시스템의 구성

본 연구에서 개발한 T-FLAS의 흐름도는 아래의 그림 2에 나타내었고, 상태평가의 종합적인 대표등급의 설정을 위하여 소속도함수에 의해서 결정된 퍼지 집합의 연산과정인 \wedge (Intersection, MIN 연산), \vee (Union, MAX 연산)을 이용하여 연산하는 기본적인 Fuzzy Logic을 이용하였으며, 향후 본 연구에 추가적으로 신뢰성 이론 및 다른 AI(Artificial Intelligence) 기법 등을 접목시켜 터널 안전진단 전문가 시스템으로의 발전 방향에 대한 연구를 수행할 계획이다.

4.2 T-FLAS의 입력모듈(Input Module)

그림 3은 본 시스템의 입력모듈로서 터널 안전진단의 상태평가 총괄표를 각 구간별 그리고 진단항목별로 구분하여 입력하며, 그림 3의 행(row)은 안전진단을 위해 구분한 대상 터널내의 구간들을 나타내고, 열(column)은 각각의 진단항목들을 나타낸다.

4.3 소속도함수(Membership Function)

입력 자료의 퍼지 집합 ;

$$\begin{aligned}
 \text{균열} &= \{ \mu_A/A, \mu_B/B, \mu_C/C, \mu_D/D, \mu_E/E \} \\
 \text{누수} &= \vdots \\
 \text{박리} &= \vdots \\
 &\vdots =
 \end{aligned}$$

여기서, $\mu_A, \mu_B, \dots, \mu_E$ 는 각 항목에서의 등급(grade)을 나타낸다.

T-FLAS에서는 입력자료가 각 부위별, 항목별 대표등급으로 상기와 같은 방식의 현장 조사자료에 의한 소속도함수는 의미가 없으며, 향후 T-FLAS에 이러한 현장 조사자료의 등급설정 부분이 추가되어야 할 것이며, 이러한 소속도함수의 결정은 통계적 처리, 전문가들의 설문조사, 설계자 및 유지관리자의 주관 등을 종합적으로 분석하여 신중히 결정되어야 할 것이다.

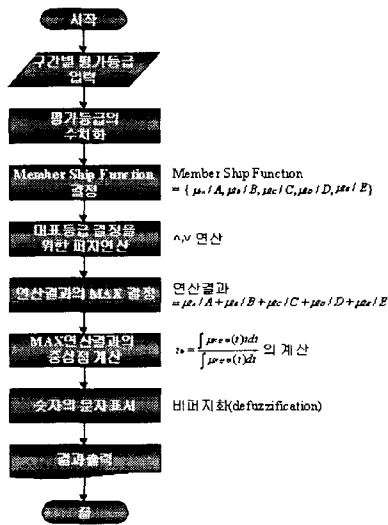


그림 2. 퍼지 추론에 의한 터널 상태평가의 흐름도

	1	2	3	4	5	6
1	A	B	C	D	E	C
2	A	B	C	C	E	E
3	A	C	E	E	A	A
4	A	A	B	C	C	C
5	C	C	C	C	D	D
6	C	B	A	C	D	A
7	A	A	A	B	A	A
8	A	A	A	A	A	A
9	B	A	A	C	B	A
10	A	A	A	A	A	A
11	A	D	A	A	E	E
12	A	A	A	A	A	A
13	A	A	A	A	A	A
14	A	B	B	A	A	A
15	A	A	A	B	A	A
16	A	A	A	A	A	A
17	A	A	A	A	A	A
18	A	A	A	A	A	A
19	C	B			B	B

그림 3. T-FLAS의 입력모듈

4.4 T-FLAS의 프로그램 실행 과정

그림 4(a)는 T-FLAS의 시작 화면을 나타내며, 그림 4(b)는 결과출력을 위한 메뉴를 보여주는 것으로 보기 메뉴를 이용하여 입력자료, 구간별 퍼지 연산, 퍼지 가중치분포, 멤버십 함수, 평가결과 등을 출력시킬 수 있도록 프로그램화되어 있다.



(a)



(b)

그림 4. T-FLAS의 시작화면 및 퍼지 추론에 의한 소 구간별 평가결과 메뉴

그리고 그림 5는 각 구간별 상태평가 결과를 퍼지 집합의 형식으로 나타낸 것으로 각 도표 안의 숫자는 해당 항목의 등급을 의미하고 있고, 그림 6의 구간별 fuzzy set window에서는 각 구간별 퍼지 집합을 예로서 보여주고 있으며, 1~ 6구간의 각 window에서는 퍼지 추론 결과의 예를 그래프 출력으로 보여주고 있다.

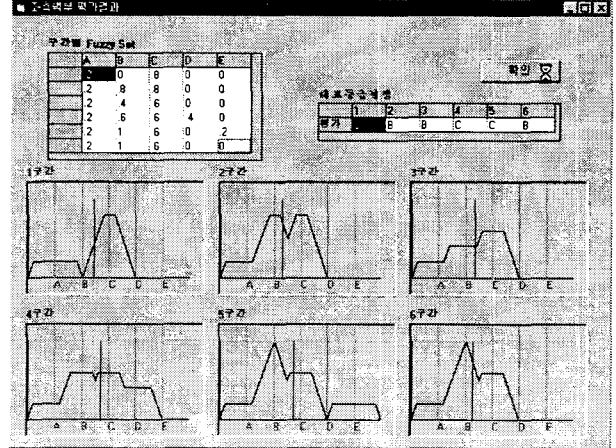
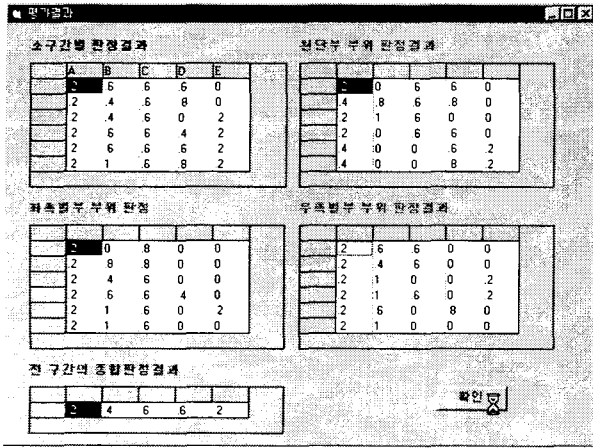


그림 5. 퍼지 추론에 의한 평가결과의 퍼지 집합 화면

그림 6. 좌측벽부 대표등급 결정 예제 화면

4.5 T-FLAS 프로그램의 시험적용

국내 B터널 I구간의 안전진단 상태평가 결과와 본 연구에서 개발한 T-FLAS 프로그램의 수행 결과를 상호 비교·검토하기 위하여 표 1에서 제시한 결과를 동일하게 입력자료로 사용하였고, 이 입력 값들과 소속도함수로 구성되어진 퍼지 집합의 연산을 실시하였다. 참고로 표 1의 입력자료는 기 완료된 B터널 I구간의 상태평가 결과이며, 동일한 조건에서의 비교를 위하여 T-FLAS의 입력자료로 사용하였다.

표 1. 시험적용 터널의 I 구간 상태평가 등급

구 분		I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	
유 안 조 사	균열	좌측벽부	A	B	C	D	E	C
		천단부	A	B	C	C	E	E
		우측벽부	A	C	E	E	A	A
	누수	좌측벽부	A	A	B	C	C	C
		천단부	C	C	C	C	D	D
		우측벽부	C	B	A	C	D	A
	재료 분리	좌측벽부	A	A	A	B	A	A
		천단부	A	A	A	A	A	A
		우측벽부	B	A	A	C	B	A
	박리 및 바락	좌측벽부	A	A	A	A	A	A
		천단부	A	D	A	A	E	E
		우측벽부	A	A	A	A	A	A
백태	좌측벽부	A	A	A	A	A	A	
	천단부	A	B	B	A	A	A	
	우측벽부	A	A	A	B	A	A	
콘크리트조사 (반발강도)	좌측벽부	A	A	A	A	A	A	
	천단부	A	A	A	A	A	A	
	우측벽부	A	A	A	A	A	A	
콘크리트조사 (초음파탐사)	좌측벽부	C	-	B	-	B	B	
	천단부	D	-	B	-	A	-	
	우측벽부	B	-	B	-	B	B	
타면조사 (라이닝누계)	좌측벽부	C	C	A	A	C	A	
	천단부	-	-	-	D	D	-	
	우측벽부	-	-	-	-	-	-	
공동조사 (배면공동)	좌측벽부	A	C	A	A	A	A	
	천단부	A	A	A	A	A	A	
	우측벽부	A	A	A	A	A	A	
총 합 평 가		C						

4.6 T-FLAS Program의 수행

퍼지 근사 추론을 터널의 안전진단 상태평가에 적용하기 위해서는 전술한 바와 같이 각각의 진단항목들을 종합하여 해당구간의 대표등급을 결정해야 하기 때문에 각 진단항목별 퍼지 집합의 명제들을 \wedge (Intersection)으로 연결하고, 연산된 각각의 의사결정 결과를 \vee (Union)에 의해서 최종적인 퍼지 집합을 결정하였다.

이러한 과정들을 I-5구간에 대해 예로서 설명하면, 상태조사 항목별 대표등급의 결정과정은

$$F_{\text{균열}(I-5)} = \{0/A + 0/B + 0/C + 0/D + 0.2/E\}$$

$$F_{\text{누수}(I-5)} = \{0/A + 0/B + 0.6/C + 0/D + 0/E\}$$

$$\vdots$$

이 되며, I-5구간의 퍼지 집합에 의한 최종 대표등급의 결정은 다음과 같다.

$$F_{I-5} = F_{\text{균열}(I-5)} \wedge F_{\text{누수}(I-5)} \wedge \dots \wedge F_{\text{배면공동}(I-5)}$$

$$= \{\mu_A/A + \mu_B/B + \dots + \mu_E/E\}$$

$$= \{0.2/A + 1/B + 0.6/C + 0/D + 0.2/E\}$$

즉, 그림 7과 같이 각각의 등급에 대하여 횡방향으로는 \wedge (Intersection)의 연산을 실시하고, 대표등급의 종방향으로는 \vee (Union)의 연산을 실시하여 면적의 중심(centroid)을 구하여 대표등급으로 결정하게 된다.

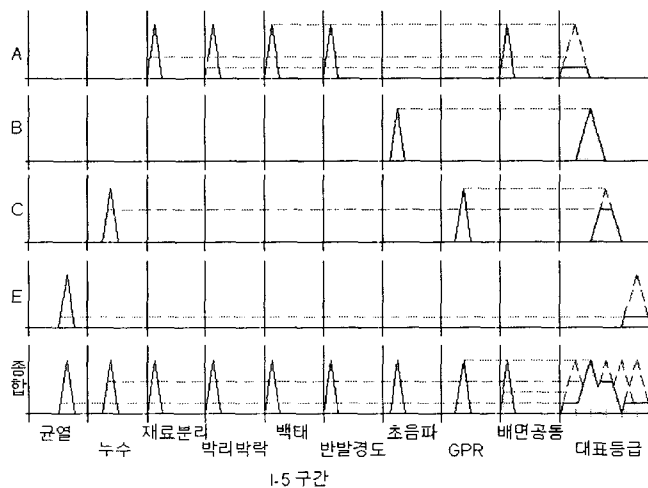


그림 7. B터널 I-5구간의 퍼지 연산 과정

4.7 출력 모듈(Module)

이상과 같이 각 구간에 대한 퍼지 연산 $\vee F_{\text{선제}}$ 와 비퍼지화(defuzzification)에 의해서 대표등급이 결정되며 (그림 8), T-FLAS에 의해 평가된 최종결과는 그림 9에 제시한 바와 같이 “C 등급”으로 결정되어졌다. 이 결과는 최종 평가등급에 따라 “보조부재에 손상이 있는 보통의 상태”를 나타내며, 전문가의 경험과 주관적 판단에 의해 결정된 표 1의 결과 “C 등급”과 동일한 결과를 보여 주고 있다.

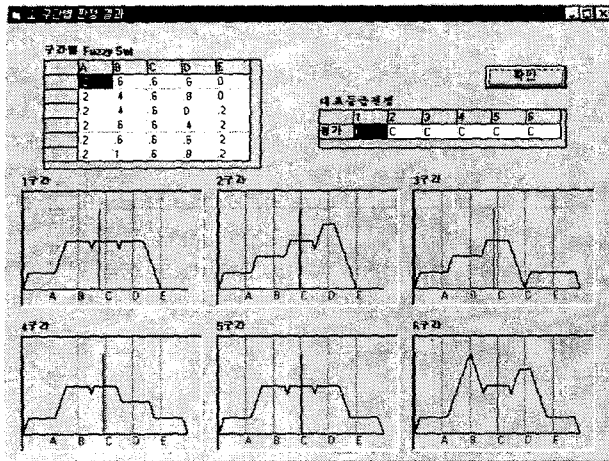


그림 8. 소 구간별 평가 결과의 출력

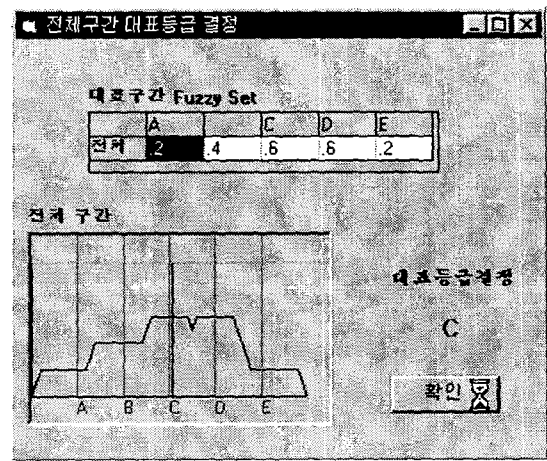


그림 9. 전체구간 대표등급 결정

5. 맺음말

콘크리트 라이닝의 상태평가에 대해 객관적이고 통계적인 평가방법을 적용하기 위하여 본 연구에서는 퍼지 집합이론을 적용한 T-FLAS(Tunnel-Fuzzy Logic Assessment System)를 개발하였고, 실제 터널 안전진단 수행결과와 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 많은 모호성과 불확실성이 내재된 터널 안전진단에 있어, 현 상태와 안전성에 대한 정량적 및 정성적 평가를 수행할 수 있고, 보다 합리적인 결론을 추론할 수 있을 것으로 사료된다.
- (2) 조사자의 특성을 랜덤성(randomness)으로 반영함과 동시에 조사자의 주관적인 관점을 모호성(fuzziness)으로 지양할 수 있기 때문에 보다 체계적이고 객관적인 안전진단 수행을 가능하게 할 수 있을 것이다.
- (3) 점검 항목별, 부위별 손상정도와 분석이 가능하며, 보수·보강 부위와 순위 결정이 도출되어 보다 합리적인 보수·보강계획을 수립할 수 있을 것이다.

이와 같이 본 연구에서 개발한 T-FLAS는 소속도함수(membership function)의 적절한 구성에 따라 상태 평가 항목의 증가 혹은 축소에 대하여 비교적 객관적인 결과를 제시할 수 있고, 부위별, 구간별 및 전체 평가를 수행할 수 있으며, 입력 및 출력과정 그리고 가시화 과정을 window 상에서 처리할 수 있으므로 현장 근무자가 보다 용이하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이상의 과정은 안전진단 현장에서 실무자들에 의해 이미 조사되어진 일부의 자료를 토대로 분석한 것으로 안전진단 보고자료의 공개에 관한 제도적 개선이 요구되며, 향후 합리적인 안전진단 체계 및 평가를 위하여 다음의 사항들에 대한 지속적인 연구가 요망된다.

- (1) 주요 변상인자를 대표적으로 선정하는 방법에 대한 연구
- (2) 조사 구간을 2개 이상 포함하여 발생한 변상의 경우의 평가 방법
- (3) 최종 상태평가 등급의 세분화와 평가기준의 정량적 그리고 선형적 등급의 연구
- (4) 터널의 사용목적, 굴착공법, 종·횡단면 상의 위치, 배수방식, 지리적 위치 등에 따라 터널의 안전성에 미치는 중요도를 차별화해야 할 것임

참고문헌

1. 류성렬(1995). "C 언어에 의한 실용 퍼지". 도서출판 세화, pp. 84~92.
2. Li, H. and Gupta, M.(1995), "Fuzzy Logic and Intelligent Systems", Kluwer Academic Publishers, pp. 8~11.
3. Kruse, R., Gebhardt, J. and Klawonn, F.(1994), "Foundations of Fuzzy Systems", John Wiley & Sons, pp. 172~174.