

터널 콘크리트 라이닝의 상태평가를 위한 퍼지추론기법 연구

이성원¹⁾ · 조만섭¹⁾ · 이광호¹⁾ · 이석원²⁾ · 배규진³⁾ · 안영기⁴⁾

A Study on Fuzzy Logic Method for the Assessment of Tunnel Concrete Lining

Sung-Won Lee, Mahn-Sup Cho, Kwang-Ho Lee, Seok-Won Lee,
Gyu-Jin Bae and Young-Ki Ahn

ABSTRACT There are many difficulties to the engineers in the assessment of tunnel safety. Consequently, objective assessment of concrete lining is hard even by the experts of tunnel assessment. Of several difficulties in the assessment of tunnel safety, in this study, tunnel concrete lining was focused and evaluated quantitatively and objectively using the Fuzzy theory which is generally considered to be appropriate for the assessment, control and judgment. T-FLAS 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 : fuzzy theory, fuzzification, state assessment, T-FLAS, rule base, concrete lining

초 록 터널의 안전진단시 관련기술자들이 겪는 어려움은 터널구조물의 안전성에 미치는 다양한 영향인자 만큼이나 많다. 때문에 안전진단의 최종결과로 대별되는 상태평가와 안전성평가에서는 터널 안전진단 전문가 또는 전문가관에서조차 객관적인 결과를 얻어내기가 어렵다. 본 연구에서는 애매함이 산재해 있는 터널구조물의 안전진단시 겪는 여러 가지 문제들 중 콘크리트 라이닝의 상태평가를 보다 정량적이고 객관적으로 수행하기 위하여 인공지능기법 중 진단, 제어, 의사 결정 등에 효과적인 방법으로 알려진 퍼지 추론 방법을 이용하여 해결해 보고자 시도하였다. 본 연구를 통해 퍼지추론을 이용한 평가시스템인 T-FLAS를 개발하고, 기존의 터널 안전진단 결과와의 비교를 통하여, 터널 안전진단에 퍼지추론 적용 가능성을 확인하였다

핵심어 : 퍼지이론, 퍼지화, 상태평가, T-FLAS, 규칙베이스, 콘크리트 라이닝

1. 서 론

최근 철도, 지하철, 도로, 수로, 통신구터널 등 기존 터널구조물의 노후화에 따른 콘크리트 라이닝의 균열, 백화, 누수 등의 증가로 인해 터널 구조물 및 인접 구조물의 안전진단에 대한 필요성이 증대하고 있다. 또한, 기존의 상태평가 및 안전성 평가 방식에 대한 문제가 대두되고 있으며, 기존의 주관적인 평가방식을 탈피하고, 보다 객관적이고 합리적인 터널의 안전진단 체계 및 평가 기준에 대한 필요성이 요구되고 있다.

예를 들면, 1995년도 이후 건설교통부에서 "시설물 안전관리에 관한 특별법"이 공포되면서 많은 터널 전문진단기관들(1999. 6. 1. 현재 213개)이 생겨나고 있으나, 체계

적인 안전진단 수행방식 및 평가 기준이 미흡하여 안전진단 후 진단 대상의 상태평가 및 안정성 평가를 일부 전문가들에 의해 주관적인 판단을 내려 그 결과를 그대로 등급으로 나누어 평가하고 있는 실정이다.

특히 건설교통부(1996)에서 발간한 세부지침 및 실무요령에서의 각 평가항목, 세부 조사 방법 및 평가기준이 기존에 외국에서 사용하고 있는 기준을 그대로 따르고 있어서 국내실정 및 각각 다른 현장상황에 맞는 평가항목, 세

- 1) 정회원, 한국건설기술연구원 연구원
 - 2) 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원
 - 3) 정회원, 한국건설기술연구원 기획실장
 - 4) (재)한국건설품질관리연구원 상임이사
- 원고접수일 : 1999년 10월 1일
원고 심사 완료일 : 1999년 11월 20일

부 조사방법 및 그에 따른 평가기준이 다소 미흡한 것으로 관련 전문가들에 의해 지적되어오고 있다. 따라서 현재 국내의 경우는 이러한 것들을 종합적으로 평가하여 터널의 안전성을 객관적으로 판단할 수 있는 안전진단 체계의 정립이 시급히 요구되고 있다.

또한 터널 안전진단시 라이닝의 균열, 누수, 손상 등의 변상이 발견된 경우, 사전조사와 외관조사시 얻어진 자료를 기본으로 하며, 또 변상의 원인을 확인하여, 그 주요인에 대한 등급 설정을 실시할 필요가 있다. 그러나, 실제에는 원인규명이 애매하여서 이상현상에 따른 적절한 등급으로의 대응을 할 수 없는 것이 많으며, 각 조사항목들을 종합하여 정확한 대표등급을 선정하기에는 많은 어려움이 있다. 이 때문에 현재 수행되는 안전진단에서는 현장기술자의 추론과정에 존재하는 여러 가지의 애매함을 평가할 수 있는 방법이 필요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 미지요소(unknown factor)가 산재한 터널구조물에 대하여 보다 정량적인 상태평가 및 안전성 평가기법을 개발하기 위하여, 인공지능 기법 중 퍼지(Fuzzy)이론을 이용한 T-FLAS(Tunnel-Fuzzy Logic Assessment System)를 개발하였다. 또한 T-FLAS의 타당성 검사를 위하여 ○○터널의 안전진단 자료와 비교 검토하여, 터널 안전진단에 퍼지 이론의 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 터널 구조물의 안전진단 수행체계 및 평가

2.1 국내 터널 안전진단 체계

국내의 터널 안전진단 체계는 건설교통부(1996)에서 발간한 “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침-터널편”에서 Fig. 1과 같이 제시하고 있는데, 최근 개정된 “시설물의 안전관리에 관한 특별법령집”(건설교통부, 1999)에 의하면 안전점검을 “정기점검”, “정밀점검” 및 “긴급점검”으로 구분하고 있다. “정기점검”은 반기별 1회 이상 수행토록 하고 있으며, “정밀점검”은 2년에 1회 이상을 실시토록 하며, 점검의 주기를 1996년에 제정된 법령에 비하여 다소 완화하여 시설물의 상태평가와 필요시 안전성평가를 포함하도록 하고 있다.

정밀안전진단은 상기의 점검들에서 발견하기 어려운 결함을 조사하기 위한 목적으로서 “정기진단”, “비 정기진단(긴급진단)” 등으로 구분할 수 있다. “정기진단”의 주기는 “시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령” 제 9조 2항과 4항에 의거하여 10년이 경과된 1종 시설물을 대상으로 5년에 1회 이상 정기적으로 수행토록 하며, 단 관리주체는 정밀안전진단을 실시한 시설물이 법 제 13조의 규정에 의한 안전점검 및 정밀안전진단 지침에 의한 평가결과 그 안전상태가 양호한 것으로 인정되는 경우에는 다음 1

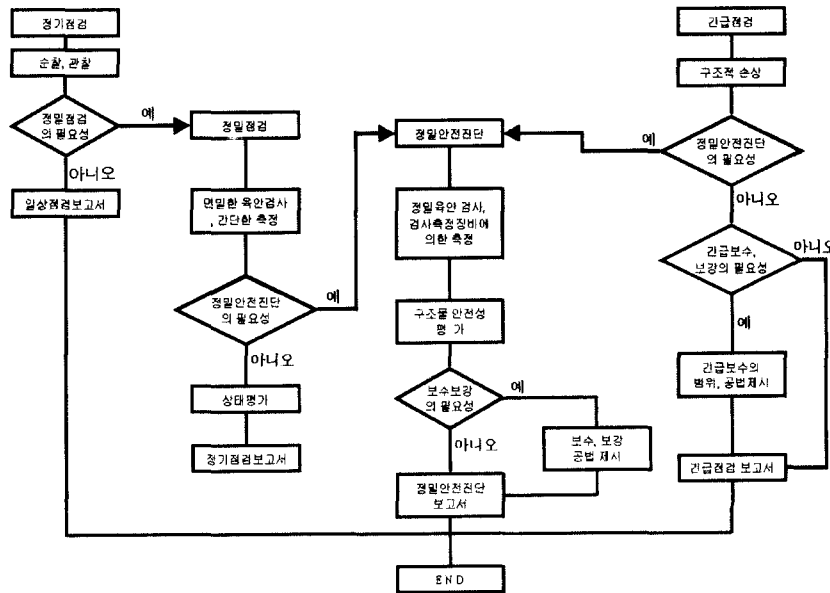


Fig. 1. Flow chart for the safety and in-depth inspection of tunnels in Korea¹⁾

Table 1. Examination items and standard grades for the assessment of tunnel state³⁾

상태등급 항목	A	B	C	D	E	
균열의 폭	미세균열		중간균열		대형균열	
	0.1 mm이하	0.1 ~ 0.2 mm	0.2 ~ 0.3 mm	0.3 ~ 0.7 mm	0.7 mm이상	
파손	없음	아주 경미한 상태	경미한 손상 (10cm ² 미만)	중간정도의 손상 (10cm ² 이상 ~ 30cm ² 미만)	극심한 손상 (30cm ² 미만)	
박리	없음	0.5 mm 미만	0.5 ~ 1.0 mm	1.0 ~ 25 mm	25 mm 이상 이거나 조골재 손실	
박락, 층분리	없음	경미한 상태	깊이 25 mm 미만 또는 직경 150 mm 미만	깊이 25 mm 이상 또는 직경 150 mm 이상	박락이 극심하여 즉시 보수를 요하는 상태	
누수	누수 부위가 없는 상태	누수 흔적이 있는 상태	균열사이로 약간의 누수가 있는 상태	균열사이로 누수가 많은 상태	균열사이로 물이 계속 떨어지는 상태	
품질상태	초음파속도 (m/sec)	4,500 이상	3,500 ~ 4,500	3,000 ~ 3,500	2,000 ~ 3,000	2,000 미만
	평가	매우 양호	양호 (정기적 관찰)	검사 필요 (지속적 관찰)	나쁨 (부분적 내부 결함, 보수보강 필요)	매우 나쁨 (부식, 내부결함, 다수 보강, 교체 필요)

회에 한하여 정밀안전진단을 실시하지 않을 수 있도록 하고 있다.

2.2 정밀안전진단 상태평가 기준

상태평가(state assessment)라 함은 "시설물 부재의 상태를 평가하는 행위(노후화와 결함의 정도 포함)"로서 외관조사, 비파괴 현장시험, 재료시험 등의 결과를 "안전점검 및 정밀안전진단 세부지침-터널편"에서 제시하는 평가 기준에 따라 터널의 상태를 평가하게 된다.

현재 안전진단시 터널의 상태평가를 하는 방법은 Table 1의 상태평가 기준을 기본으로 구간별로 각 조사항목을 종합하여 구간별 대표등급을 결정하고 있으며, 전체구간의 대표등급은 각 구간별 대표등급을 종합하여 결정하고 있다. 이러한 상태평가과정에서 여러 가지 애매한 상황이 발생하게 된다. 터널의 안전진단시의 모호함이란, 현장 조사자의 외관조사방도의 기입시 발생하는 모호함, 각 조사항목의 등급 설정시 모호함, 변상형태에 따른 원인규명의 모호함, 종합 등급 설정시의 모호함 등을 들 수 있다. 이러한 모호함에 대해, 본 연구에서는 경험이 풍부한 기술자가 실시하여온 안전진단의 실적을 데이터베이스화 하고, 그 데이터를 정리분석하고, 더욱이 대책효과가 향상되기 위한 검토를 하여, 경험이 없는 기술자가 진단중에 만날 수 있는 변상 등의 현상에 대한 적절한 등급의 선정이 가능하도록 하는 것을 목적으로 한다.

또한 터널 안전진단시 조사항목으로는 균열, 누수, 손상,

라이닝 강도 등으로, 이것들은 단위가 서로 다르고 각 항목들간의 상호 연계성이 애매하기 때문에 모든 조사항목을 동등하게 처리하거나 일원적으로 평가하는 방법을 사용할 수가 없다.

따라서 본 연구에서는 퍼지 논리를 터널 안전진단시 상태평가 시스템에 도입하여, 추출된 전문가의 지식 또는 기존 터널 안전진단의 실적을 IF-Then형식으로 규칙화하여 규칙베이스(rule base)를 구성하고 안전진단 요구가 발생할 때마다 현장상황에 맞는 적절한 규칙을 선택하고 평가하여 안전진단 결과의 객관성 및 평가결과의 추론근거를 제시하고자 한다. 본 연구에서는 여러 가지 외관조사 항목 중에서 Table 1에 나타난 바와 같이 터널의 상태평가 결과에 많은 영향을 미치는 균열, 누수, 박리, 박락, 콘크리트 강도 측정(Schmidt Hammer test)을 인공지능 시스템의 입력자료로 선정하였다.

3. 퍼지(Fuzzy) 이론

오늘날 자동화 시스템의 개발 증가 추세와 비례하여 인공지능 기술을 채용하고자 하는 사례가 증가되고 있어 이에 따라 보다 효과적인 인공지능 시스템을 개발, 적용하고자하는 필요성과 욕구가 급격히 증대되고 있다.

지금까지의 인공지능 개발 방법론은 인간 지능의 한 측면에 기초를 두고 진행되었다. 모호한 언어의 처리(퍼지이론), 뇌의 구조와 역학으로부터 영감을 얻은 모델에 대한

연구(신경망이론), 기호논리학에 기초한 전문가의 정보처리 모델에 관한 연구(전문가 시스템), 자연계의 진화에서 아이디어를 얻은 방법(유전자 알고리즘) 등을 예로 들 수 있다. 이들 각각의 방법들은 일부 분야에서 상당히 성공적으로 적용되고 있다.⁴⁾ 이들 중에서 퍼지이론은 주관적인 모호함을 처리하기에 적합한 도구로 알려져 있다.

퍼지 이론은 퍼지니스(fuzziness)를 표현하는 퍼지집합(fuzzy set)과 퍼지논리 그리고 퍼지측도를 핵심으로 하는 이론체제를 말한다.⁵⁾

3.1 퍼지논리제어

퍼지 논리 제어는 작업자의 시스템에 대한 지식과 경험에 기초한 인간 판단 등의 애매성을 포함하는 제어 전문 지식을 언어적 제어 규칙으로 표현하고, 또 퍼지 추론을 통해서 컴퓨터에 실행될 수 있도록 한 것이다.

Fig. 2에서 보이는 것처럼 퍼지 제어는 입력 변수의 퍼지화(fuzzification), 퍼지 제어 규칙의 작성(rule base), 의사 결정(fuzzy inference), 비퍼지화(defuzzification)의 네가지 단계로 나누어 생각되어질 수 있다. 이 중에서 세 번째의 의사 결정 단계는 퍼지 추론 단계라고도 불리는데, 퍼지 제어의 핵심인 제어 행위를 위한 퍼지 집합을 결정하는 단계로 생각되어질 수 있다.⁶⁾

3.2 퍼지화(Fuzzification)

퍼지제어기는 퍼지논리를 응용하므로 하나의 명확한 값으로 측정된 입력변수 값도 적절한 퍼지값으로 바꾸어야 한다. 대체로 센서로부터 측정된 값의 영역(range)을 그대로 입력부의 퍼지변수 영역으로 사용하기보다는, 이를 퍼지연산에 편리하도록 미리 정해놓은 입력 퍼지변수의 전체집합으로 바꾸어주어야 한다. 결국 퍼지화의 작업은 전

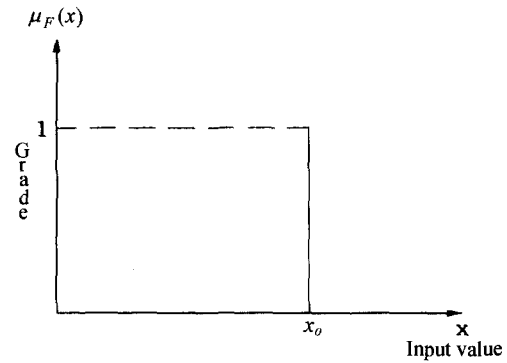


Fig. 3. Singleton method

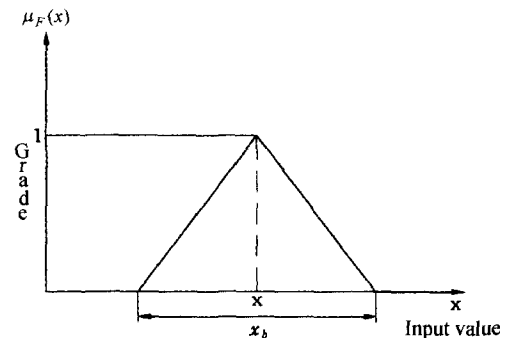


Fig. 4. Isosceles triangle Method

체집합에 따라서 적절히 크기를 변환(scale mapping)시키는 작업이 된다. 퍼지화 방법에는 Fig. 3의 싱글톤 방법 (singleton method)과 Fig. 4의 이등변삼각형 방법 (isosceles triangle method)등이 많이 쓰이고 있으며, 이 등변삼각형 방법은 삼각형의 꼭지점에 해당하는 영역의 값을 입력의 평균값으로 하고, 밑변의 넓이는 표준편차의 두배로 하는 방법이 많이 쓰인다.⁵⁾

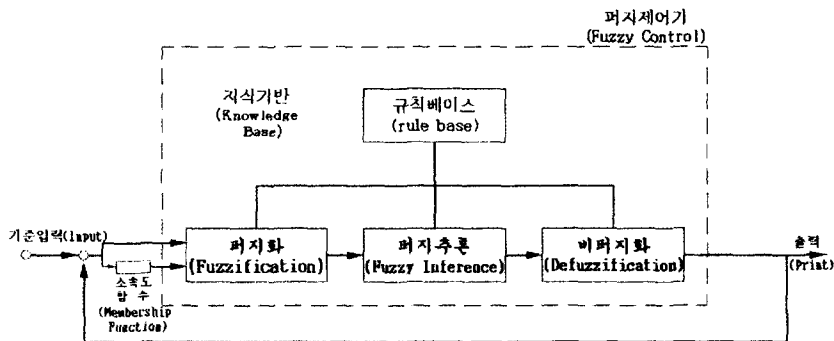


Fig. 2. Fuzzy logic control system

3.3 퍼지추론(Fuzzy Inference)

퍼지추론이란 알고 있는 인과관계로부터 새로운 사실을 유도하는 것이다. 퍼지추론에는 직접법, 간접법, 하이브리드(hybrid) 방법과 같이 크게 3가지의 분류가 있다. 직접법은 기존의 자료를 이용하여 퍼지관계를 생성하고 이 퍼지관계와의 합성을 통해서 결과를 추론하는 방법이며, 간접법은 전문가에 의해 퍼지규칙이 생성되고 이 생성된 퍼지규칙과의 합성을 통해 결과를 추론하는 방법이다. 또한, 하이브리드방법은 이들 두 가지의 혼합적인 방법을 말한다.

본 연구에서는 전문가의 지식을 통한 퍼지규칙의 생성이 현실적으로 어려워 기존의 터널 안전진단 자료를 이용하여 퍼지관계를 계산하는 직접법을 사용하였으며, 이중 계산과정이 비교적 간단하여 추론시간이 빠른 Mamdani의 방법인 max-min방법을 사용하여 프로그램을 구성하였다. 다음은 본 연구에서 이용된 퍼지추론과정에 대한 설명이다.

모델링하고자 하는 어떤 시스템을 다음과 같은 언어규칙(linguistic rule)으로 표현할 수 있다.

- If X is big and U is small, then Y is zero.
- also
- If X is medium and U is zero, then Y is big.
- also
- ...
- also
- If X is zero and U is zero, then Y is zero.

(1) x, μ, γ 을 각각 시스템의 상태와 시스템 제어, 시스템 출력의 유한집합이라 하면, 이들은

$$\begin{aligned} x &= \{x_i\} \subset (-\infty, \infty) \\ \mu &= \{\mu_i\} \subset (-\infty, \infty) \\ \gamma &= \{\gamma_i\} \subset (-\infty, \infty) \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 정의되고, 각각의 퍼지집합의 모임(family)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma(X) &= \{X \mid x \rightarrow [0,1]\} \\ \Gamma(U) &= \{U \mid \mu \rightarrow [0,1]\} \\ \Gamma(Y) &= \{Y \mid \gamma \rightarrow [0,1]\} \end{aligned} \quad (3)$$

예를 들면, X는 시스템 상태의 집합 x의 원소(시스템

의 여러 가지 상태)를 0에서 1사이의 소속정도 값에 사상(mapping)시키는 함수, 즉 퍼지집합이고, $\Gamma(X)$ 는 이러한 함수들의 모임이다.

이 상태에서 식 (1)의 언어규칙은 다음과 같은 형태의 퍼지관계(fuzzy relation)로 표현된다.

$$R : \Gamma(X) \times \Gamma(U) \rightarrow \Gamma(Y) \quad (4)$$

여기에서 \times 는 퍼지곱집합 연산자이고, \rightarrow 는 퍼지 조건 연산자이다.

다른 방법으로 표현하면 식 (1)의 i번째 규칙은 전체집합 $\Gamma(X) \times \Gamma(U) \rightarrow \Gamma(Y)$ 에서 정의된 퍼지관계 R_i 이고, 그 소속함수는

$$\mu_{R_i}(X, U, Y) = f_-(\mu_{\Gamma(X)}(X), \mu_{\Gamma(U)}(U), \mu_{\Gamma(Y)}(Y)) \quad (5)$$

이다. 시스템의 상태 X가 주어졌을 때, 출력 Y를 계산하기 위해서는 제어변수 U와 퍼지규칙 R, 그리고, 이들을 결합하는 합성 추론규칙(compositional rule of inference)이 사용된다.

$$Y = X \cdot U \cdot R \quad (6)$$

여기에서 \cdot 는 퍼지관계의 합성연산이다. 대부분의 제어에 필요한 실제 시스템에서는 시스템의 출력으로서 결정적인 하나의 값을 요구하므로, 식 (6)의 연산 결과인 퍼지집합 Y에서 하나의 값을 선택하는 비퍼지화(defuzzification) 방법이 사용된다. 그래서 결국 최종적인 결과, 즉 시스템의 출력은 식 (7)이 된다.⁷⁾

$$y = \text{defuz}(Y) \quad (7)$$

퍼지 관계방정식의 해를 구하는 방법으로 여러 가지 해석적인 방법들이 제안되어져 있다. 그러나 이들 해석적인 방법의 대부분은 주어진 퍼지 입 출력 데이터에 대하여 그들을 모두 정확히 만족하는 퍼지 관계 행렬이 존재한다는 가정에 기초하고 있기 때문에 퍼지이론을 실제상황에 적용하기는 쉽지않다. 왜냐하면, 퍼지이론이 적용되는 실제상황에서는 대부분이 부정확하고 애매한 전체집단에서 역시 부정확하고 애매한 결론을 유추하는 과정이기 때문에 주어진 퍼지 입 출력 데이터들 사이에 정확한 일관성

Table 2. Various methods of defuzzification^{10,11)}

번호	Defuzzifier Methods	비고
1	Center-Of-Gravity Method(COG)	$z_0 = \frac{\int z \cdot \mu_c'(z) dz}{\int \mu_c'(z) dz}$
2	Average of Maxima Method	$z_0 = (\sum_{j=1}^m z_j) / m$
3	Midpoint-Of-Maxima- Method	$z_0 = (z' + z'')/2$
4	Median Method	$h_i = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0)$
5	Height Method	$z_0 = \frac{h_1 \cdot z_1 + h_2 \cdot z_2 + \dots + h_n \cdot z_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}$
6	Maximal Height Method	$z_0 = z_j(\text{the maximal height})$
7	Area Method	$z_0 = \frac{S_1 \cdot z_1 + S_2 \cdot z_2 + \dots + S_n \cdot z_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$
8	Maximal Area Method	$z_0 = z_j(\text{the maximal height})$

이 있는 경우는 드물기 때문이다.⁸⁾

3.4 비퍼지화(Defuzzification)

추론의 결과로 생긴 퍼지 집합을 응용시스템에 적용하기 위해서는 비퍼지화 과정을 거쳐야 한다. 비퍼지화 전략의 목표는 퍼지집합을 가장 잘 대변할 수 있는 실수값을 찾아내는 것이라 볼 수 있다. 그러나 아직까지 비퍼지화 방법을 선택하는 체계적인 기준이 존재하지 않으며, 이러한 문제점은 이미 여러 논문에서 지적된 바 있다.⁹⁾

일반적으로 사용되고 있는 비퍼지화 방법은 Table 2에 정리하였으며, Fig. 5는 이들 중 가장 많이 사용되고있는 방법들을 비교한 것이다.

Fig. 5에서 MOM방식은 시스템이 과도상태(transient state)에 있을 때 좋은 성능을 보여주고, COG방식은 안정상태(steady state)에서 좋은 성능을 보인다. 또한 COG방식은 MOM보다 작은 평균제곱오차(mean square error)를 가진다. 일반적으로 COG방식이 가장 좋은 결과를 보

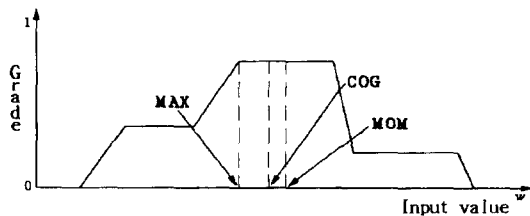


Fig. 5. comparison of defuzzification methods

이고 있기 때문에 가장 많이 사용되고 있다.⁸⁾ 본 연구에서 개발된 T-FLAS의 비퍼지화 방법으로도 COG의 방식을 기본으로 하고있다.

4. T-FLAS(Tunnel - Fuzzy Logic Assessment System)

4.1 T-FLAS의 구성

본 연구에서는 퍼지추론의 과정을 터널 라이닝 상태평

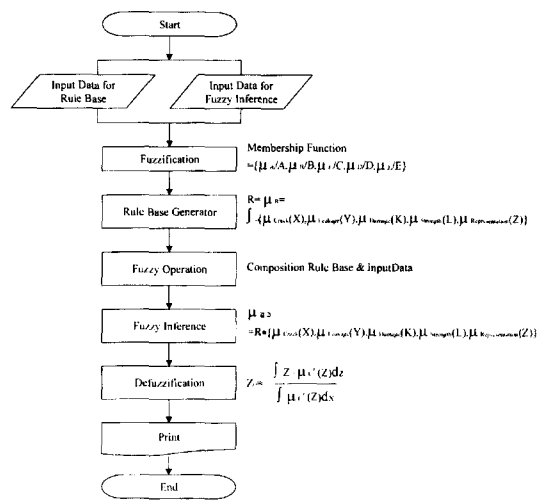


Fig. 6. Flow chart for T-FLAS

가에 이용한 T-FLAS를 개발하였다. T-FLAS는 안전진단 결과를 각 구간별 및 부위별로 평가할 수 있도록 하였고, 통계적 자료처리, 설문조사, 설계자 및 유지관리자의 주관 등에 의해 결정되는 소속도 함수를 이용하여 퍼지 연산을 수행할 수 있도록 구성되어 있으며, 본 연구에 적용된 퍼지화 방법은 Table 1의 진교부 상태평가 기준³⁾을 따른다. 참고로 퍼지화에 관련된 소속도함수의 결정은 현실적으로 가장 어려운 문제로, 기존의 진단자료와 추론결과와의 비교평가를 통하여 수많은 시행착오 끝에 최적의 퍼지화 방법을 결정하여야 할 문제이나, 이러한 작업은 기존의 진단자료 수집이 현재의 국내 실정(관련법규, 발주처 비공개 등)으로는 불가능하여 가장 일반적으로 사용되고 있는 이등변 삼각형의 모양을 변형하여 이용하였다.

Fig. 6은 T-FLAS에 적용된 알고리즘을 나타낸다.

4.2 입력변수(Input Parameter) 선정

터널 상태평가를 위한 조사항목으로는 균열, 누수, 손상, 라이닝두께, 강도, 중성화, 철근탐사 등이 있으나, 현재 국내 터널 안전진단 보고서는 관리주체에서 거의 대부분 대외비로 규정하여 관리하고 있어서, 이들 자료의 이용에 상당한 어려움이 따르고 있기 때문에 이의 조사항목 모두를 만족하는 기존의 진단자료를 얻기는 거의 불가능하여, 본 연구원이 보유하고 있는 ○○터널의 안전진단 자료를 이용, T-FLAS의 실현가능성 및 적용가능성에 대한 평가를 수행 하였다. 본 연구에서 시험 적용된 ○○터널에서는 상태평가로 균열, 누수, 박리, 박락 층분리, 반발경도를 이용하고 있어서 이들 조사항목을 입력변수로 선정하여 다른 현장의 자료와 비교하여 보았다.

4.3 소속도함수(Membership Function) 구성

입력변수들의 규칙베이스(rule base) 생성을 위해서는 입력 자료들의 퍼지화(fuzzification)가 필연적이다. 이를 위해서 각 입력 자료들의 소속도함수를 구성하여 퍼지화를 수행하여야 한다. 본 연구의 퍼지화에 이용한 소속도 함수는 다음과 같이 세가지로(식(8), Fig. 7, Fig. 8), 이등변 삼각형의 모양을 수정 변형하여 적용하였다. 향후 본 퍼지화의 내용은 터널 안전진단에 적합한 최적의 퍼지화 방안 강구를 위해 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다. 식 (8)은 규칙베이스의 생성을 위한 기존 자료의 퍼지화를 위한 소속도함수의 구성을 보여주고 있으며, Fig. 7은 시험적용터널의 외관조사망도의 조사항목에 대한 소속도함수의 구성을 보여주고 있다. 또한 퍼지추론을 위한 연산 결과 소속도함수의 구성은 Fig. 8과 같이 일반적으로 많이 이용되고 있는 이등변삼각형의 모양을 적용하였다.

$$\begin{aligned} \mu X_i(A) &= 0.75/0+1/1+0.75/2+0.25/3 \\ \mu X_i(B) &= 0.25/0+0.75/1+1/2+0.75/3+0.25/4 \\ \mu X_i(C) &= 0.25/1+0.75/2+1/3+0.75/4+0.25/5 \\ \mu X_i(D) &= 0.25/2+0.75/3+1/4+0.75/5+0.25/6 \\ \mu X_i(E) &= 0.25/3+0.75/4+1/5+0.75/6 \end{aligned}$$

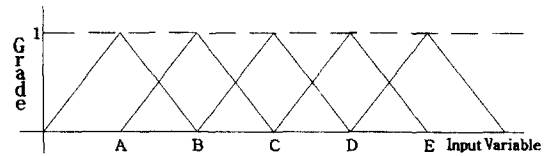


Fig. 8. Membership functions of results by fuzzy inference

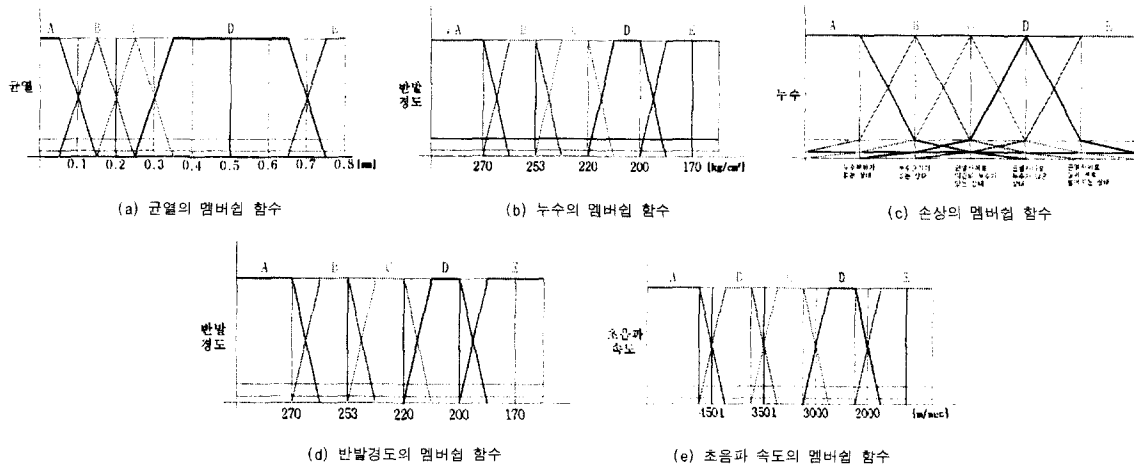


Fig. 7. Fuzzification of inspection items

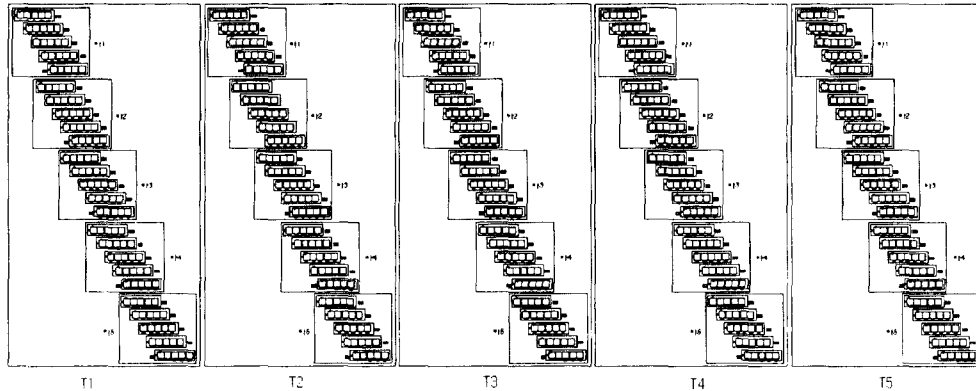


Fig. 9. Example of fuzzy relations(consisted of six-dimensional matrix)

4.4.1 규칙베이스 생성을 위한 퍼지관계의 연산

규칙베이스 생성을 위한 퍼지관계의 연산은 많은 시간이 걸리고, 입력 자료의 항목이 많을수록 계산해야할 행렬의 차원이 높아지기 때문에 많은 계산과정을 거쳐야하는 단점이 있다. 예로 입력 자료의 안전진단 항목이 3가지(예, 균열, 누수, 손상)의 경우 퍼지관계는 4차원 행렬로 표현되며, 5가지일 경우 Fig. 9와 같이 6차원 행렬로 퍼지관계(R)가 생성되어진다.

4.4.2 규칙베이스로부터의 추론과정 연산

T-FLAS에서의 추론 과정은 전문가가 직접 구성하는 퍼지관계와 기존자료의 학습을 통한 퍼지관계의 구성으로 나뉘어질 수 있으며, 본 연구에서는 기존 진단자료의 학습을 통해서 퍼지관계를 구성하도록 프로그래밍(programming)되어 있다. 본 연구에서 개발된 T-FLAS에서 대표등급을 추론하는 계산 과정은 식 (4)의 퍼지관계(R)과 시험적용 ○○터널 외관조사망도로부터 얻어지는 입력변수와의 합성으로 이루어진다.

$$\mu_{\text{대표등급}} = (\mu_{\text{균열}} \cap \mu_{\text{누수}} \cap \mu_{\text{손상}} \cap \mu_{\text{망도}}) \circ R \quad (9)$$

식 (9)에 의해 T-FLAS에서 추론된 구간별 대표등급($\mu_{\text{대표등급}}$)의 퍼지집합을 얻을 수 있다. 이 퍼지집합을 비퍼지화하여 최종 대표등급을 추론하게 된다. 참고로 Fig. 10은 전문가에 의해 미리 구성된 퍼지관계와 입력자료에 의해 추론하는 과정을 표현한 것이다.

4.5 비퍼지화(Defuzzification)

본 연구에서는 COG(Center of Gravity)를 비퍼지화방법의 기본으로 하였으나, 추론결과와 비교분석한 결과 약간의 오차가 발생하여, 오차를 최소화시키도록 등급간격을 일부 수정하여 적용하였다. 다음 식 (10)은 본 연구에 적용된 COG를 수학적으로 표현한 것이다.

$$\text{Centroid} = \frac{\int z \cdot \mu_T'(z) dz}{\int \mu_T'(z) dz} \quad (10)$$

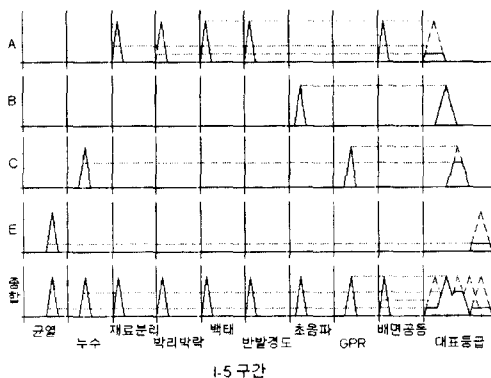


Fig. 10. Process of fuzzy inference by rule base^[2]

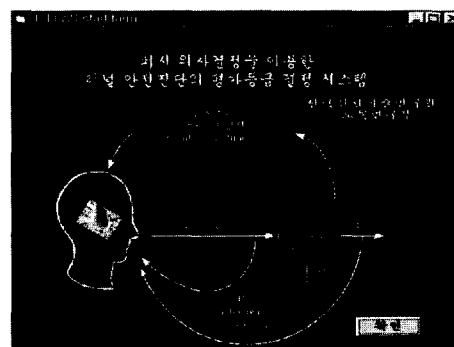


Fig. 11. Start window of T-FLAS

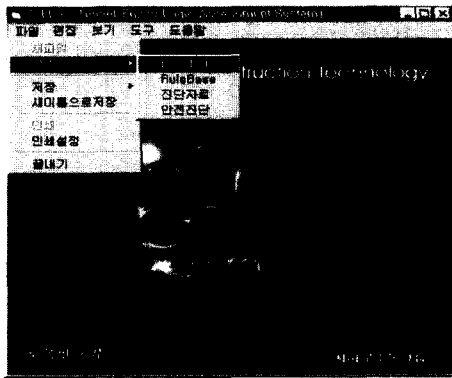


Fig. 12 Input process for construction of rule base

비퍼지화는 퍼지화와 마찬가지로 퍼지이론에 있어 가장 중요하고 어려운 문제이기 때문에, 향후 어떠한 방법이 터널 상태평가에 가장 적합한 비퍼지화의 방법인가를 찾는 연구가 지속적으로 추진되어야 할 것으로 판단된다.

5. T-FLAS의 실행결과

Fig. 11은 본 연구에서 개발된 T-FLAS의 초기 화면이며, Fig. 12는 규칙베이스(rule base)을 위한 기존 자료의 입력과정을 나타내는 것이다. T-FLAS의 검증을 위해 ○○도로터널의 안전진단 자료를 시험적용하였다. 입력자료는 20개의 구간에 각각 해당되는 상태평가의 기본적인 항목으로 균열, 누수, 손상, 반발경도의 값을 구간별 평가등급으로 하여, "if (전건부) then (후건부)"로 구성되는 퍼지규칙의 전건부로 입력하고, 네가지의 진단항목을 종합한

Table 3. Verification of rule base through back data

Station	규칙기반을 위한 지층자료					퍼지 추론	추론결과 대표등급 (T-FLAS)
	균열	누수	손상	경도	대표 (전문가)		
1	A	A	A	A	A	⇒	A
2	A	A	A	B	A		A
3	A	A	A	C	B		B
4	A	A	A	D	C		C
5	B	A	A	A	B		B
6	B	A	A	B	B		B
7	B	A	A	C	C		C
8	B	A	D	B	C		C
9	C	A	A	B	C		C
10	C	A	A	C	C		C
11	C	A	B	B	C		C
12	D	A	A	B	C		C
13	D	A	A	C	C		C
14	D	A	A	E	D		D
15	D	A	B	C	D		D
16	D	C	A	B	D		D
17	D	C	B	C	D		D
18	D	C	B	E	D		D
19	D	C	E	C	D		D
20	D	C	E	D	D		D

각 구간별 대표등급을 후건부에 입력하여 20개구간의 대표등급들로 퍼지규칙을 생성하였으며, 그 내용은 Table 3의 좌측열에 표시되어 있다.

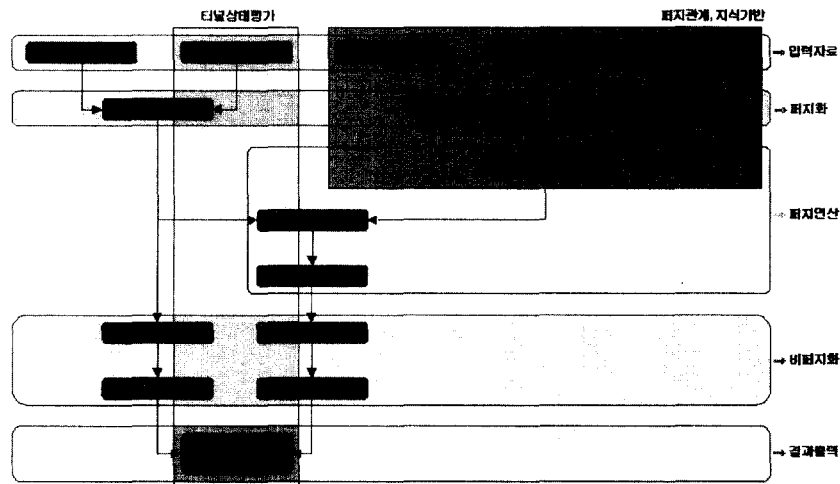


Fig. 13. Process of state assessment of tunnels by fuzzy theory

Table 4. Contents of appearance inspections sheet

No	구간	균열	누수	박리	박락	경도	대표	No	구간	균열	누수	박리	박락	경도	대표
1	665~705(우)	0.2	A	A	A	302	B	21	185~225(좌)	0.4	A	A	A	248	C
2	665~705(좌)	0	A	A	A	223	B	22	225~255(좌)	0.7	A	A	A	269	C
3	705~745(좌)	0	A	A	A	228	B	23	255~305(중)	0.3	A	B	A	220	C
4	705~745(우)	0.2	A	A	A	253	B	24	305~345(중)	0.2	A	C	A	220	C
5	745~785(좌)	0	A	A	A	277	A	25	345~385(좌)	0	A	A	A	244	A
6	785~825(좌)	0.3	A	A	A	236	C	26	385~425(좌)	0.01	A	A	A	240	A
7	785~825(우)	0	A	A	A	203	C	27	425~465(중)	0.5	A	B	A	220	C
8	825~865(좌)	0.7	C	D	E	244	D	28	465~505(좌)	0.01	A	A	A	240	A
9	825~865(우)	0.6	C	E	D	220	D	29	505~545(좌)	0.2	A	A	A	269	B
10	865~905(좌)	0.3	A	A	A	231	C	30	545~585(좌)	0.01	A	A	A	261	A
11	905~945(좌)	0.2	A	D	C	269	C	31	585~625(좌)	0.5	A	B	A	232	D
12	905~945(우)	0.4	C	B	A	220	D	32	585~625(우)	0.5	A	A	A	228	D
13	945~985(좌)	0.4	A	A	A	240	C	33	625~665(우)	0.3	A	A	A	232	C
14	985~25(우)	0.3	A	B	A	252	C	34	665~705(좌)	0	A	A	A	240	A
15	25~65(좌)	0.4	C	A	A	239	D	35	665~705(좌)	0	A	A	A	220	A
16	25~65(우)	0.4	A	A	A	228	C	36	745~785(우)	0.6	A	A	A	195	D
17	65~105(우)	0.5	A	B	A	235	D	37	785~825(우)	0	A	A	A	240	A
18	105~145(좌)	0.1	A	A	A	230	C	38	825~865(중)	0	A	A	A	228	B
19	105~145(중)	1.5	A	A	A	244	D	39	865~905(좌)	0	A	A	A	236	A
20	145~185(좌)	0.3	A	A	A	261	C	40	905~945(우)	0	A	A	A	294	A

기존의 자료를 이용하여 퍼지규칙을 생성하고, 실제의 현장자료를 입력하여 미리 생성된 퍼지규칙과의 합성을 통하여 각 구간별 대표등급을 추론하게 된다. 이와 같은 방법에 의해서 실제 진단자료를 입력하여 각 구간별 대표 등급을 추론하여 보았으며, 터널 안전진단에 퍼지 이론의 적용가능성을 확인할 수 있었다. Fig. 13은 퍼지 이론을 적용한 터널의 상태평가 과정을 보여준다.

5.1 규칙베이스(Rule Base)의 검증

본 연구에서 적용된 규칙기반에 의한 추론이 제대로 이루어지는지에 대한 검증의 과정으로, 규칙기반 생성에 이용된 기존의 진단자료를 다시 T-FLAS에 입력하여 추론 결과를 출력하여 보았으며, 그 내용은 Table 3의 우측열에 표시하였다. Table 3의 좌측열은 앞서 설명했듯이 규칙기반을 생성하기 위한 입력자료이고, 우측열은 이들 자료에 의해 생성된 규칙기반과의 합성으로 추론된 결과를 표시한 것으로, 구간번호와 전건부의 입력자료, 그리고 가장 우측의 값들이 추론된 대표등급이다. 추론된 대표등급

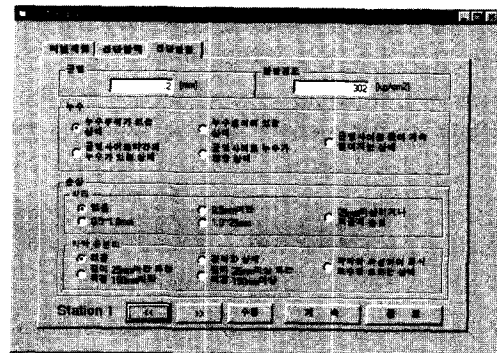


Fig. 14. Input window of in-situ inspection data

이 입력자료의 대표값과 완전히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 생성된 규칙기반은 기존 입력자료들사이의 퍼지관계임을 확인할 수 있었다.

5.2 퍼지(Fuzzy) 추론 결과와 현장 자료와의 비교 검토

T-FLAS에 입력시키는 방법은 ○○터널 안전진단 보고

Table 5. Comparisons of results between in-situ inspection and T-FLAS

구간	진단결과		구간	진단결과	
	현장 진단 결과	Fuzzy 추론 결과		현장 진단 결과	Fuzzy 추론 결과
1	B	B	21	C	C
2	B	A	22	C	D
3	B	A	23	C	D
4	B	B	24	C	C
5	A	A	25	A	A
6	C	C	26	A	A
7	C	C	27	C	D
8	D	D	28	A	A
9	D	D	29	B	B
10	C	C	30	A	A
11	C	C	31	D	D
12	D	D	32	D	C
13	C	C	33	C	C
14	C	C	34	A	A
15	D	D	35	A	A
16	C	C	36	D	D
17	D	D	37	A	A
18	C	B	38	B	A
19	D	D	39	A	A
20	C	C	40	A	A
통계	총 진단구간 : 40, 오차구간 : 8				

서의 외관조사망도의 내용을 분석하여 입력하였으며, 입력 변수로는 균열, 누수, 박리, 박락, 반발경도를 이용하였다. 대상 터널은 연장 약 1.3km, 2차선 난형의 도로터널로서 총입력 진단구간은 외관조사망도에 표기가 애매한 구간을 제외한 40개의 구간에 대하여 결과를 추론하였다.

본 연구에서 시험적용된 터널의 안전진단 자료중 외관조사망도의 내용을 Table 4에 정리하였으며, 누수, 박리, 박락 및 층분리의 경우는 건설교통부(1996)의 "안전점검 및 정밀 안전진단 세부지침-터널편"에 의해 표기의 편의상 A, B, C, D, E의 등급으로 각각 표기하였다. Fig. 14는 T-FLAS에서의 입력 윈도우로 진단자료의 입력형식을 보여준다.

T-FLAS에 의한 퍼지추론 결과는 Table 5에 정리하여 터널의 안전진단 결과와 비교하여 보았으며, 그 결과 전체 40개의 시험 적용 구간 중에서 8개의 구간에서 대표등급이 한 등급 정도의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

이러한 오차는 안전진단자료의 퍼지화 과정에서 발생하는 오차, 비퍼지화 과정에서의 오차, 일괄되지 않은 전문

가의 판단에 따른 오차 등에 의한 것으로 판단된다.

이와 같은 오차를 줄일 수 있는 방법으로는 전문가의 설문조사 등을 통한 안전진단 항목의 퍼지화 방법연구, 전문가의 지식을 직접 이용하여 규칙기반을 생성하는 방법에 대한 연구, 많은 현장자료의 추론 및 전문가의 검증 등을 통한 최적의 비퍼지화 방법 결정에 대한 연구 등을 들 수 있다.

향후 이러한 연구는 지속적으로 추진되어야 할 필요가 있다고 판단되며, 특히 퍼지규칙 생성을 위하여 입력하는 기존의 자료는 일괄된 전문가의 판단에 의한 자료이어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론 및 전망

본 연구에서는 터널 안전진단의 결과를 객관적이며 합리적인 평가결과로 추론하는 모형에 대하여 제시하였고, 인공지능을 이용한 터널안전진단 건전도 평가에 관한 연구를 수행하였다. 특히 퍼지이론의 추론기법을 터널 안전진단의 상태평가에 적용함으로써 진단과 평가의 애매함을 극복해 보고자하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 개발된 T-FLAS를 터널 상태평가에 적용하여 터널 안전진단에 퍼지 이론의 적용 가능성을 확인하였다.
- 2) 퍼지이론의 적용으로 터널 상태평가에 이용되는 복잡한 전문가의 추론과정을 퍼지관계로 묘사할 수 있었다.
- 3) 퍼지추론 결과와 실제 진단 자료와 20%정도의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 오차는 퍼지이론의 다양한 적용방법에 대한 연구와 보다 신뢰성있는 자료의 수집 분석을 통해 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 지식베이스가 되는 터널 진단자료 데이터 베이스의 활용에 의해서 과거의 경험이 풍부한 터널 기술자의 진단 경험을 다른 기술자도 용이하게 활용할 수 있다는 것이 T-FLAS의 장점이라고 할 수 있다.
- 5) 터널안전진단에 가장 적합한 퍼지이론의 이용을 위해서는 퍼지화, 퍼지규칙의 수학적 정의, 문장간의 연결자 and의 수학적정의, 규칙간의 연결자 also의 수학적 정의, 퍼지관계 합성 연산자의 수학적정의, 비퍼지화 연산자의 정의 등에 대한 지속적인 연구가 필요하다.
- 6) 퍼지화, 퍼지관계 생성, 비퍼지화 방법선택 등에 인공신경망(Neural Network) 등의 다른 인공지능기법을 이용하여 추론할 수 있는 인공지능 기법의 통합방법론에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

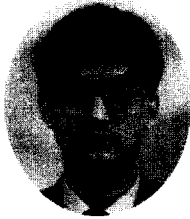
사 사

본 연구는 (재)한국건설품질관리연구원의 연구비지원에 의해 이루어진 연구결과로서, 관련자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 1996, 안전점검 및 정밀 안전진단 세부지침 - 터널편, 시설안전기술공단, 121p.
2. 건설교통부, 1999, 시설물의 안전관리에 관한 특별법령집, 50p.
3. 시설안전기술공단, 1997, 안전점검 및 정밀안전진단 실무요령(터널편), 308p.
4. 이광형, 1995, 퍼지 유전자 통합 지능형 시스템 개발 환경, 과학기술처, 128p.
5. 김형섭, 1992, 공기 조화를 위한 다층 퍼지 제어에 관한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원, 60p.
6. 박성훈, 1996, 퍼지 로직 알고리즘을 이용한 차량 구동력 제어, 석사학위논문, 한국과학기술원, 82p.
7. 송운선, 1991, 퍼지 조건연산자의 비교연구 : 엘리베이터 시스템에 응용, 석사학위논문, 한국과학기술원, 44p.
8. 전명근, 1993, 전문가 지식에 의한 퍼지 규칙베이스의 표현방법과 양방향 근사추론에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원, 116p.
9. 김영달, 1992, 범용 퍼지 하드웨어의 설계 및 구현, 석사학위논문, 한국과학기술원, 52p.
10. Li, H. and Gupta, H., 1995, Fuzzy Logic and Intelligent System, Kluwer Academic Publishers, U.S.A., 8~11.
11. Kruse, R., Gebhardt, J. and Klawonn, F., 1994, Foundations of Fuzzy Systems, John Wiley & Sons Ltd., England, 172~174.
12. 한국건설기술연구원, 1998, 터널의 안전진단 체계정립 및 균열 자동측정 시스템 개발(I), (재)한국건설품질관리연구원, 288p.

이 성 원



1991년 인하대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1993년 인하대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사

Tel: 0344-910-0226

E-mail : swlee@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물연구
그룹, 연구원

조 만 섭



1991 전북대학교 자원공학과, 공학사
1993 전북대학교 대학원 자원공학
과, 공학 석사
1996 전북대학교 대학원 자원공학
과, 박사과정 수료

Tel : 0344-910-0522

E-mail : mscho@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물연구
그룹, 연구원

이 광 호



1995년 인하대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1997년 인하대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사

Tel: 0344-910-0231

E-mail : khlee2@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물연구
그룹, 연구원

이 석 원



1989년 고려대학교 공과대학 토목공
학과, 공학사
1991년 고려대학교 대학원 토목공학
과, 공학석사
1998년 Georgia Institute of Technology
토목환경공학과, 공학박사

Tel : 0344-910-0230

E-mail : slee@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물연구
그룹, 선임연구원

배 규 진



1980년 국립경북대학교 농공학과,
공학사
1982년 연세대학교 대학원 토목공학
과, 공학석사
1990년 연세대학교 대학원 토목공학
과, 공학박사

Tel : 0344-910-0092

E-mail : gjbae@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 기획조정실장

안 영 기



1969년 조선대학교 토목과
1989년 서울산업대학교 토목공학과,
공학사
1992년 한양대학교 대학원 토목공학
과, 공학석사

Tel : 02-563-9063

E-mail : kcqr@kcqr.co.kr

현재 (재)한국건설품질관리연구원 상임이사