

터널지반 평가의 객관화를 위한 퍼지추론시스템 연구

조만섭¹⁾, 김영석²⁾

Study on the Fuzzy Inference System for Objectivity of Ground Evaluation in Tunnelling

Man-Sup Cho and Young-Seok Kim

Abstract. This study has for its object to increase an objectivity of the observation result in the face mapping of tunnel and to suggest the reasonable support and reinforcement methods to be considered the rock properties. It was developed in this study to the tunnel stability evaluation system(prototype NFEST) to be used fuzzy set theory and neuro-fuzzy techniques, and this system was verified according to the reliability evaluation between the 36 learning data and the inferred results. When it summarized the results; (1) 12 evaluation items and ranges were proposed to be modified basis on the RMR which are well known to the domestic workers. (2) It was shown that correlation coefficient(|R|) between RMR_{inf} inferred by 12 items and RMR_{org} due to arithmetic total, RMR_{chk} due to subjective judgement of observer are relatively high relationship with each 0.83 and 0.79. (3) Inferred result of the total tunnel safety shows also a good relationship with RMR_{inf} (|R|=0.7) and the rock weathering(|R|=0.84).

KeyWords: Fuzzy set theory, NFEST, Rock classification(modified), RMR

초 록. 터널의 막장면 조사에서 조사결과의 객관성을 증대시키고, 지반특성에 적합한 지보패턴 및 보강공법을 제시하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 퍼지집합이론과 뉴로퍼지기법 등을 적용한 prototype의 터널 안정성평가 시스템(NFEST)을 개발하였고, 36개의 막장관찰자료들을 대상으로 신뢰성을 평가하여 비교적 만족한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구의 결과를 요약하면, (1) 터널 지반평가의 용이성을 위해 국내 기술자에게 익숙한 RMR분류를 근거로 12개 평가항목을 제안하였다. (2) 12개 평가항목에 의해 추론된 RMR_{inf}값과 산술합에 의한 RMR_{org}값 그리고 조사자의 주관적 판단에 의한 RMR_{chk}값 사이의 상관계수(|R|)는 각각 0.83과 0.79로 비교적 높은 상관성을 나타내었다. (3) 터널 막장면에 대한 종합적인 안정성은 RMR_{inf}(|R|=0.7)와 암반풍화정도(|R|=0.84)에서 비교적 양호한 상관성을 나타내었다.

핵심어: 퍼지이론, 터널지반평가시스템, 암반분류(수정안), RMR

1. 서 론

터널의 설계에는 지반조사의 기술적·수량적 한계와 부정확성(inaccuracy), 터널구간 지반평가의 애매성(fuzziness) 그리고 자료수집 과정의 오류(observer error) 등이 내재되어 있다. 그러므로 터널의 안정성과 경제성을 고려한 시공을 수행하기 위해서는 설계 시의 지반조사와 더불어 시공 중의 막장면 조사(face mapping)가 매우 중요하며, 막장면 조사결과에 따라 보조공법의 적

용 여부 및 지보패턴의 변경 등을 어느 정도 허용할 수밖에 없다. 그러나 大野와 清水(1990), 건설교통부 외(1999), 신 외(2000) 등은 조사자료의 부정확성과 지반의 비균질성 및 불연속성 등 미지의 파라미터들 때문에 기술자 및 전문가의 경험적인 지식과 주관적인 판단에 따라 암반분류 결과가 차이를 보일 수 있음을 지적하였다. 이러한 문제들을 최소화시키기 위하여 Yu와 Zeng(1983), Nguyen와 Ashworth(1985), 구 외(1994), 한국건설기술연구원(2000) 등은 RMR 간편법, 인공신경망, 퍼지이론등을 이용한 암반분류, 터널의 안정성 및 보강대책 등을 연구하였다. 그러나 이상의 연구사례들은 정량적인 조사(RQD, 절리면 간격 등)에 관련되는 개인적 오류에 대한 고려가 미흡한 것으로

¹⁾정회원, 공학박사, (주)유니백 제1사업본부 터널팀 차장
²⁾정회원, 공학박사, 전북대학교 공과대학 자원공학과 정교수
접수일: 2002년 7월 26일
심사 완료일: 2003년 1월 20일

파악되었다. 따라서 터널의 안정성을 평가함에 있어서 지반의 고유특성과 터널의 종단선형 등을 평가에 반영하고, 조사자의 주관성을 최소화시키기 위한 목적으로 본 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 먼저, 신 외(2000), Bieniawski(1984), 吉中 외(1989) 등의 국내외 문헌조사로부터 기존의 RMR분류를 기반으로 한 12개의 지반평가 조사항목 및 평가등급 안(案)을 제시하였다. 그리고 조사자의 개인적 오차를 보정하고, 최종 평가의 주관성을 최소화하기 위하여 퍼지집합이론을 적용하였다. 이와 함께 터널의 막장관찰 D/B시스템과 퍼지집합이론(뉴로-퍼지기법 포함)을 이용한 prototype의 터널지반평가시스템(NFEST; NeuroFuzzy Evaluation System of Tunnel face)을 제작하여 국내의 도심 및 산악 터널 시공자료들을 대상으로 본 시스템의 적용성을 평가해보았다.

2. 터널 암반평가 기준의 제안

1940년 중반부터 정량적인 암반평가 방법이 개발되어 왔는데 국내에서는 RMR분류를 기본으로 각 기관별 분류기준을 작성하여 사용하고 있으며, 국내에서 적용되는 암반분류는 강도특성, 절리특성 및 탄성파속도 등이 공통적인 조사항목으로 포함되어 있다. 실무용으로 사용될 수 있는 암반분류의 핵심 조건은 다음과 같다.

- 모든 지반에 적용할 수 있고, 구분기준이 객관적이며 또한 간편한 것.
- 설계에 필요한 암반의 물성치와 대응관계가 이루어져 있는 것.

2.1 터널 암반평가를 위한 조사항목(안)

본 연구에서는 터널의 막장관찰에서 사용되는 암반분류들의 주관성, 애매성, 복잡성 등을 최소화하고자, Bieniawski (1984), 吉中 외(1989), 신 외(2000) 등의 국내외 30여 가지 이상의 암반분류기법들을 참조하여 Table 1과 같이 터널 암반평가 조사항목을 개선하였다.

이들 12개의 조사항목은 해당 터널의 현황과 주변지반의 특성 등을 충분히 반영할 수 있고, 터널 안정성평가와의 상관성, 현장기술자들의 숙련도, 조사의 용이성 등을 고려하여 Bieniawski가 제안한 RMR분류의 항목 및 등급범위를 기초로 작성하였다.

Table 1에서 1~6번 항목은 막장면의 상태를 조사하여 해당 지반의 연경도를 평가하기 위한 조사항목들이며, 대부분 조사자의 육안관찰에 의한 항목으로 구성되어 있다. 여기에서 5와 6번 항목은 파쇄대 혹은 단층대가 존재하는 경우에 한정되며, 그 폭과 방향성에 따라 막장면 전,후의 안정성을 평가하기 위한 항목이다. 이후 7~10번까지는 RMR분류의 항목으로 절리특성 및 지하수 유입수량을 나타내었다. 11번과 12번은 터널지반의 arching effect를 반영한 것으로서 실내시험과 터널의 종단면도 상에서 간단하게 조사할 수 있는 항목들이며, 상부지반의 강도와 토피고에 따른 터널의 안정성을 판단하고자 하였다.

2.2 암반평가 조사항목별 평가등급(안)

12가지 조사항목들에 대한 평가등급은 Table 2와 같이 data sheet를 작성하였고, 주로 육안관찰에 의존하는 현장특성을 반영하여 가능한 정성적인 평가등급으로 구성하였다. 또한 일부의 정량적 평가항목의 경우에도

Table 1. Proposed 12 input variables required to evaluate safety of tunnel.

investigation method	items	evaluated sub-results	main results
face mapping	1	number of different rocks	hardening of rockmass
	2	rock type	
	3	weathering	
	4	ratio of rock type	
	5	width of fracture/fault zone	effect of fracture/fault zone
	6	orientation of fracture/fault zone	
	7	joint spacing	effect of joint
	8	joint condition	
	9	orientation of joint	
	laboratory test	10	groundwater inflow
11		point load index	
12		overburden	

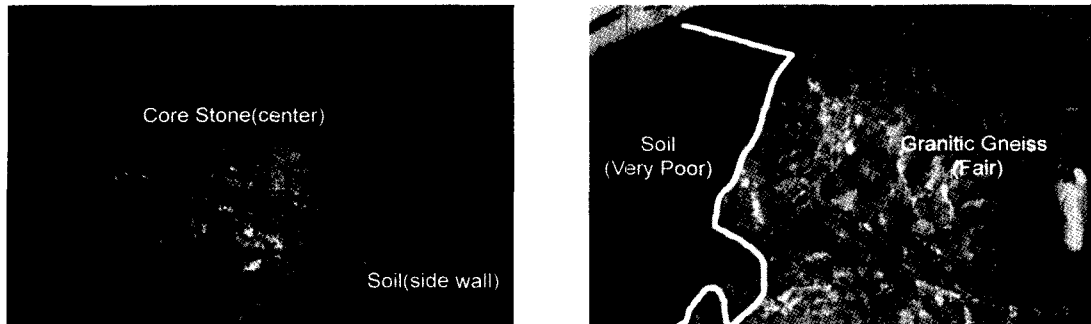


Photo. 1. Tunnel face consisting of soil and rock core(left) · granitic gneiss(right).

에매성을 충분히 반영할 수 있도록 하였다. 본 절에서는 RMR분류 이외에 추가로 제시한 5개 항목(안)들에 대하여 선정사유를 소개하고자 하며, 이들 제안된 항목들은 조사자 및 전문가들의 경험적 판단에 의해 평가에 반영되고 있는 것들로서 터널의 안정성과 이들과의 상관성은 추후 지속적인 보완이 필요하다.

(1) 암석종류 수(number of different rocks)

막장면 조사 시 대표암반 이외의 협재된 암반에 대해서는 주로 ‘특이사항(description)’에서 언급하지만, 현재까지의 암반분류기법에서 이런 상황을 정량적으로 평가하는 바는 없는 것으로 사료된다. 즉 Photo. 1의 경우와 같이 “2가지 이상의 암반종류 혹은 풍화정도가 극명하게 구분되는 경우”에 대하여는 조사자의 경험적 판단에 따라 해당 막장의 연경도를 표현하게 된다. 따라서 본 논문에서는 연(weathered)·경(hard)이 비교적 뚜렷한 2개 이상의 암반이 혼재하는 경우, Table 2의 (1)항과 같이 각각의 정도에 따라 평가등급을 부여하였다.

(2) 암석 명(rock type)

막장관찰 시 암석 종류에 대한 물리적, 역학적 특성을 반영하여 막장 안정성과 풍화정도를 결정하므로 암종을 불문하고 암질판정 결과를 데이터로 채택하는 것이 일반적이다.

그러나 “동일 막장에서 풍화특성이 상이한 2가지 이상의 암석이 혼재하는 경우”, 조사자의 주관적 판단에 오류가 발생할 수 있으며, 유지관리 시 이러한 특성이 누락될 수 있다. 따라서 암석 종류별 특성을 터널의 안정성 평가에 반영하기 위하여 「AFES」, 「서울지하철3,4호선분류기준」, 「전교부표준품셈」, 「일본도로공단」, 「일본국철」, 「Hook&Brown (1988)」, 「Deere&Miller(1966)」, 「菊地·齊藤(1966)」등의 국내외 암반분류기법에서 수록된

암석종류별 평가등급을 조사하였고, 그 예를 Figure 1에 나타내었다. 조사 결과로부터 약 36개의 암석 종류 중 국내지질에 적합한 18개를 선별하였고, Table 2의 (2)항과 같이 각 암석 종류별 평가 등급을 조사한 후 5개의 평가등급(안)을 작성하였다(조만섭, 2001).

(3) 암종별 분포율(ratio of rock types)

상기의 암석 명, 암석종류 수와 함께 각 암석의 종류별 분포율을 Table 2의 (4)항과 같이 조사대상으로 선정하였고, 막장면의 전체 면적 중 『암석 1』이 차지하는 비율과 『암석 2』가 차지하는 비율을 10~90%까지 각각 부여하도록 하였다. 그리고 암종별 분포 면적은 조사자의 주관적 견해가 많이 포함되는 항목이므로 각 평가등급을 상호 중첩되게 범위를 산정하였다.

(4) 파쇄대 폭과 방향성(width and orientation of fracture/fault zone)

터널 막장면의 안정성은 종합적으로 각 조사항목들을 평가해야 하는 상황이 있으며 또한 지하수 유입량이나 파쇄대 혹은 단층대 등 국부적으로 막장의 불안정 요인에 대한 중점적인 평가 및 보강이 필요한 경우가 있다. 본 연구에서는 시공 중 막장관찰에 의해 용이하게 판별할 수 있는 파쇄대(fracture zone) 혹은 단층대(fault zone)에 대하여 이들의 규모(폭)와 또한 터널 진행방향에 대한 파쇄대의 주향 및 경사에 따른 영향을 Table 2의 (5), (6)항과 같이 조사항목으로 선정하였다.

(5) 토피고(overburden)

국내외 터널 암반분류기법에서는 터널의 안정성에 대한 평가 요소 중 해당 구간의 토피고에 대한 정량적인 평가기준이 미흡한데, 한국건설기술연구원 등(1999)의 국내외 터널붕락 사례에서 토피고가 30 m이하인 구간에서 약 85%의 붕락사례를 나타내었다. 따라서 본

Table 2. Input data sheet from : Engineering classification of rock masses.

(1) Number of different rocks			rating	(2) Rock type						rating
include				igneous rock	metamorphic rock	sedimentary rock	soil	fracture zone		
LFF_	2 over rock types including 30cm over large-scale fault/fracture zone		1.0	very poor rock		graphite talc coal shale	sand clay	fault metamorphic weathered	1	
Set2_ SGouge	2 over rock types including 20cm less small-scale fracture and gouge		2.0	poor rock	intrusive	shale limestone sandstone			2	
Set2	2 rock types		3.0	fair rock		schist quartzite tuff			3	
Set1_ SGouge	single rock type and/or 20cm less small-scale fracture zone or gouge		4.0	good rock	rhyolite andesite granite	gneiss slate phyllite	conglomerate limestone		4	
Set1	single rock type		5.0	very good rock	diabase gabbro				5	

(3) Weathering		rating
Extremely W.	<ul style="list-style-type: none"> Rock texture is partly preserved, but grains have completely separated. Material crumbles under firm blow with a sharp end of a geological pick and can be peeled off with a knife. Completely weathered fault, shear and/or intrusive zone about 50cm over. 	1.0
Highly W.	<ul style="list-style-type: none"> Discoloration extends throughout the rock and the original texture of the rock has mainly been preserved, but separation of grains has occurred. The rock is broken small particle with heavy sound by geological hammer. 	2.0
Moderately W.	<ul style="list-style-type: none"> The rock is broken according to the joints by the geological hammer. Moderately weathered metamorphic and/or sedimental structures 	3.0
Slightly W.	<ul style="list-style-type: none"> The rock is largely broken according to the joints by the geological hammer. Slightly weathered and/or fresh sedimental structures 	4.0
Fresh	Unweathered/fresh rock.	5.0

(4) Ratio of rock type	(a) fresh		(b) weathered	value
	very small	10% less	(10% less)	(a)
small	10~50%	(10~50%)		
medium	30~70%	(30~70%)		
large	50~90%	(50~90%)	(b)	
very large	90% over	(90% over)	()	

(5) Width of F/F zone	value	
	very small width	0 ~ 100cm
small width	10 ~ 140cm	
medium width	30 ~ 170cm	
large width	60 ~ 190cm	
very large width	100 ~ 200cm	

(6) Orientation of F/F zones	value			

(9) Orientation of joints	value			

(7) Joint spacing	value		
	Soil	totally soil	1.0
Soil SBlock	soil and small blocks	2.0	
S Block	small blocks	3.0	
S LBlock	small and large blocks	4.0	
LBlock	large blocks	5.0	

(10) Ground water inflow	rating	
	Flowing	1.0
Dripping	2.0	
Wet	3.0	
Damp	4.0	
Completely dry	5.0	

(8) Joint condition	rating	
	Weak gouge	Soft gouge > 5mm thick or separation > 5mm continuous
Fair gouge	Slickensided surfaces or gouge < 5mm thick or separation < 5mm continuous	2.0
Plane	Slightly rough surfaces / Highly weathered wall	3.0
Rough	Slightly rough surfaces / Slightly weathered wall	4.0
Fresh Rough	Very rough surface / Unweathered / Unweathered wall rock	5.0

(11) Point load index(Is)	value	
	Very low	less 2
Low	2 ~ 4	
High	4 ~ 10	
Very high	10 over	

(12) Overburden	value	
	Very shallow	less 1D
shallow	1D ~ 2D	
moderate	2D ~ 4D	
high	4D ~ 6D	
very high	6D over	

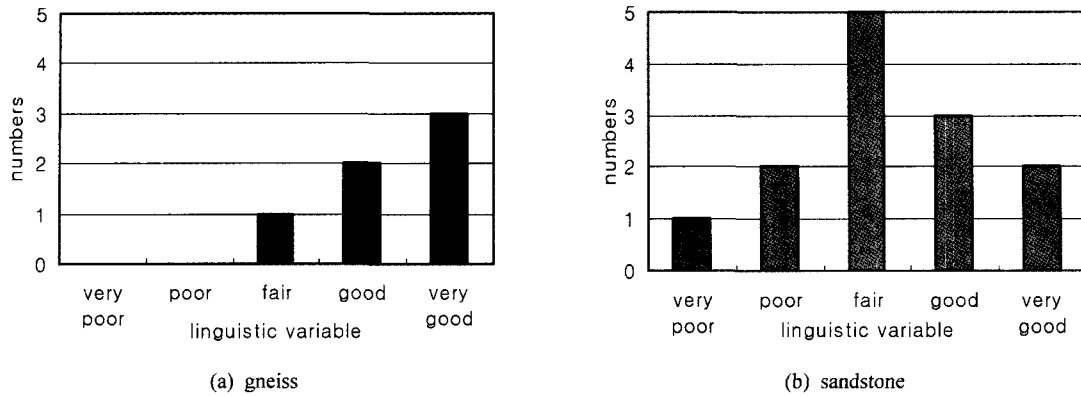


Figure 1. Examples of rating based on constituent rocks.

연구에서는 해당 구간의 토피고를 조사항목으로 선정하였고, 저토피구간(약 1~1.5D)부터 약 8D이상까지 5개 등급으로 구분하였다.

3. 퍼지집합이론 및 뉴로퍼지기법을 이용한 암반평가시스템 구축

본 연구에서는 Table 1과 2에서 제안한 12개의 터널 막장면 조사항목을 이용한 암반평가시스템을 구축하였고, 조사 및 평가단계에서 발생하는 애매함과 주관적 오차를 최소화시키기 위해서 퍼지집합이론 및 뉴로퍼지기법을 이용한 prototype의 평가시스템(NeuroFuzzy Evaluation System of Tunnel, NFEST)을 개발하였다.

3.1 Prototype NFEST의 개요

본 연구에서 개발한 prototype NFEST는 크게 3단계로 구성되어 있다. 제 1단계[D/B]에서는 터널종단 및 횡단노선 정보, 12개 막장면 조사항목, 터널주변 현황 등의 터널 정보를 D/B화한다. 그리고 제 2단계[inference]에서는 퍼지추론규칙(fuzzy inference rule)에 따른 해당 구간의 막장면 암반에 대한 평가결과를 출력한다(Appendix I, II). 추후 제 3단계[neuro-fuzzy training]에서는 D/B된 자료와 평가결과에 대한 전문가 검증을 수행하여 최적의 자료들을 선별한 후, 뉴로퍼지기법을 이용하여 각 조사항목들의 소속도함수와 소속도를 재선정하여 시스템의 정확성을 향상시키고자 한다. 본 프로그램의 D/B 시스템은 비주어리즘이므로 작

성하였고, 퍼지추론 시스템은 FuzzyTECH 5.31 professional version(INFORM GmbH, Germany)을 사용하였다.

3.2 Prototype NFEST의 암반평가 추론부

NFEST 추론부에서 적용한 퍼지집합이론은 애매한 상태의 자료를 표현하기 위하여 입력자료를 소속도를 가지도록 퍼지화시킨 다음 퍼지규칙을 통해 퍼지추론을 수행하게 되며, 마지막으로 추론한 값을 비퍼지화하여 결론을 도출하게 된다. 퍼지시스템의 진행과정은 Figure 2와 같다(이와 오, 1995).

Figure 3에는 NFEST의 퍼지추론부의 구조를 나타내었고, 크게 입력(input interfaces), 퍼지규칙(rule blocks), 출력(output interfaces)으로 구성되어 있다. 본 시스템의 12개의 입력항목과 6개의 출력항목에 대해 4~5개의 평가등급을 부여하여 총 119개의 소속도함수를 작성하였고, 입,출력 항목별 소속도함수는 Z-type (\backslash)과 Lambda-type(\wedge) 및 S-type(\surd)의 선형(linear shape)함수로 나타내었다. 각 항목들의 y-축에는 해당 등급의 소속도를 0~1까지의 실수로 결정하였으며, 또한 후전부의 비퍼지화를 위하여 Fast CoA (Fast Center of Area)를 사용하였다. NFEST의 추론부에서는 119개의 입,출력 소속도함수로부터 11개의 규칙블럭(rule block, RB)과 총 2,675개의 규칙들을 생성하였고, 여러 개의 입력항과 1개의 출력항이 연결고리를 이루고 있다. 가. 암종별 풍화도 추론RB: 터널 막장면의 암반종류와 풍화정도를 이용하여 암종별 풍화정도(극경암, 풍화

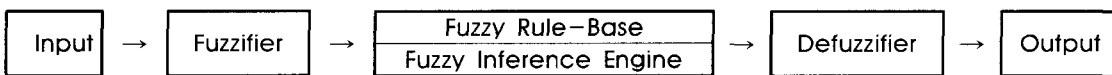
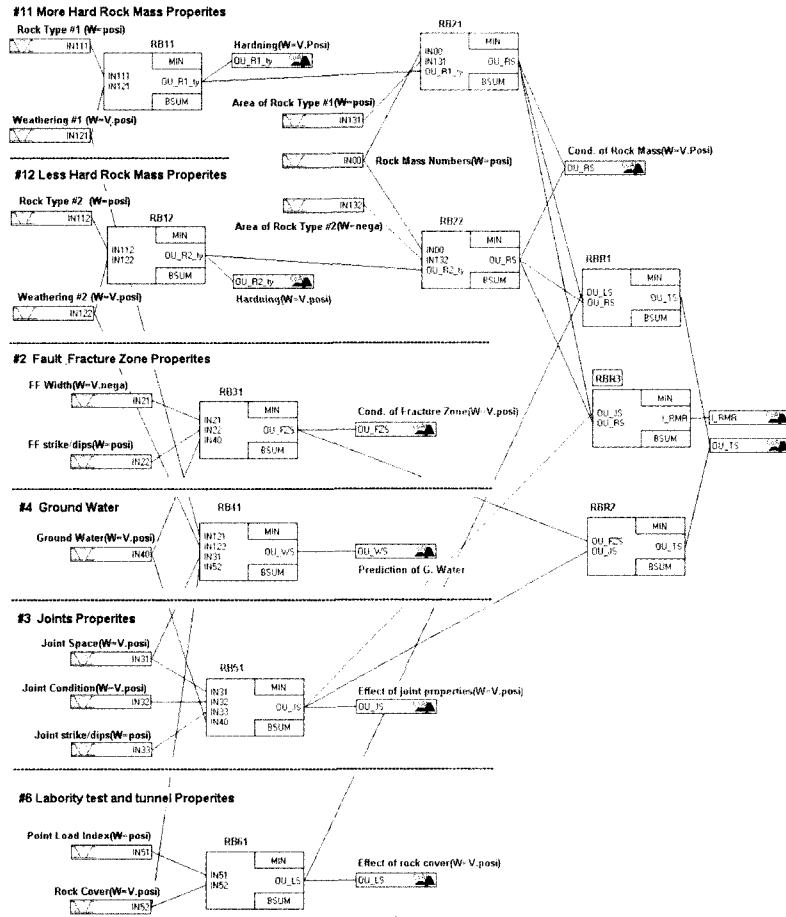


Figure 2. Typical procedures of a fuzzy logic system.

NeuroFuzzy Evaluation System of Tunnel Face

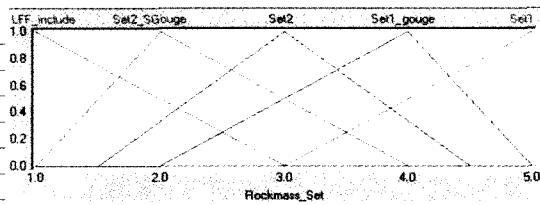


items	numbers
Input Variables (Total)	15
Output Variables	9
Intermediate Variables	0
Rule Blocks	11
Rules	2675
Membership Functions	119

Figure 3. Structures of a NFEST logic system.

(a) Number of different rocks

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
LFF include	linear	(1, 1)(3, 0)(5, 0)
Set2 SGouge	linear	(1, 0)(2, 1)(4, 0)(5, 0)
Set2	linear	(1, 0)(1.5, 0)(3, 1)(4.5, 0)(5, 0)
Set1 gouge	linear	(1, 0)(2, 0)(4, 1)(5, 0)
Set1	linear	(1, 0)(3, 0)(5, 1)



(b) Rock type 1, 2

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
VPoor Rock	linear	(1, 1)(4.5, 0)(5, 0)
Poor Rock	linear	(1, 0)(2, 1)(4.7, 0)(5, 0)
Fair Rock	linear	(1, 0)(1.1, 0)(3, 1)(4.9, 0)(5, 0)
Good Rock	linear	(1, 0)(1.5, 0)(4, 1)(5, 0)
VGood Rock	linear	(1, 0)(2, 0)(5, 1)

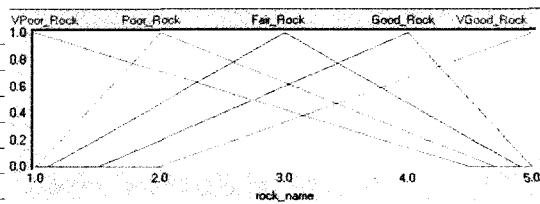
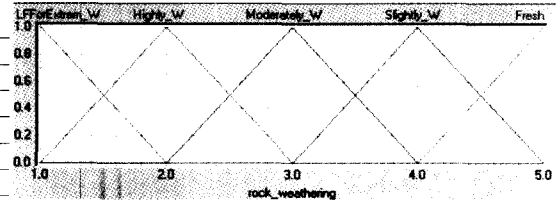


Figure 4. MBF and definition points of input variables.

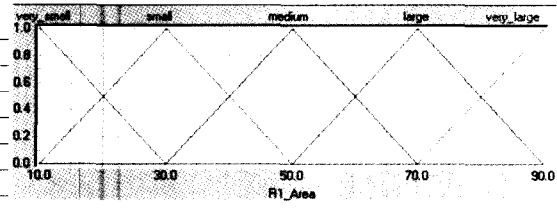
(c) Weathering 1, 2

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
LFForExtrem W	linear	(1, 1)(2, 0)(5, 0)
Highly W	linear	(1, 0)(2, 1)(3, 0)(5, 0)
Moderately W	linear	(1, 0)(2, 0)(3, 1)(4, 0)(5, 0)
Slightly W	linear	(1, 0)(3, 0)(4, 1)(5, 0)
Fresh	linear	(1, 0)(4, 0)(5, 1)



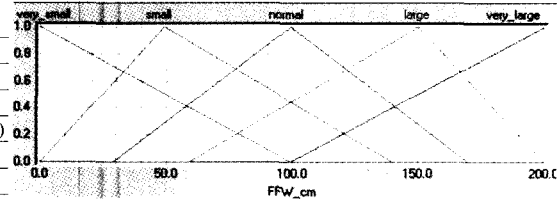
(d) Ratio of rock types 1, 2

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
very small	linear	(10, 1)(30, 0)(90, 0)
small	linear	(10, 0)(30, 1)(50, 0)(90, 0)
medium	linear	(10, 0)(30, 0)(50, 1)(70, 0)(90, 0)
large	linear	(10, 0)(50, 0)(70, 1)(90, 0)
very large	linear	(10, 0)(70, 0)(90, 1)



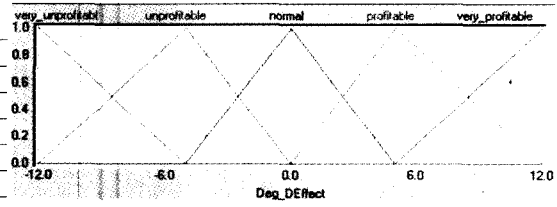
(e) Width of F/F zone

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
very small	linear	(0, 1)(99.5, 0)(200, 0)
small	linear	(0, 0)(49.3, 1)(139.7, 0)(200, 0)
normal	linear	(0, 0)(29.2, 0)(99.5, 0)(169.85, 0)(200, 0)
large	linear	(0, 0)(59.3, 0)(149.75, 1)(200, 0)
very large	linear	(0, 0)(99.5, 0)(200, 1)



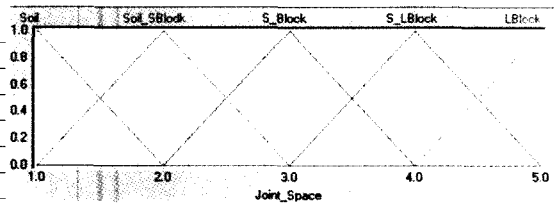
(f) Orientation of F/F zone

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
very unprofitabl	linear	(-12, 1)(-5, 0)(12, 0)
unprofitable	linear	(-12, 0)(-5, 1)(0, 0)(12, 0)
normal	linear	(-12, 0)(-5, 0)(0, 1)(5, 0)(12, 0)
profitable	linear	(-12, 0)(0, 0)(5, 1)(12, 0)
very profitable	linear	(-12, 0)(5, 0)(12, 1)



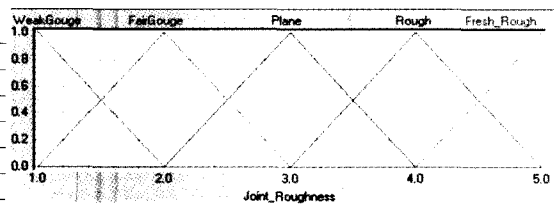
(g) Joint spacing

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
Soil	linear	(1, 1)(2, 0)(5, 0)
Soil SBlock	linear	(1, 0)(2, 1)(3, 0)(5, 0)
S Block	linear	(1, 0)(2, 0)(3, 1)(4, 0)(5, 0)
S LBlock	linear	(1, 0)(3, 0)(4, 1)(5, 0)
LBlock	linear	(1, 0)(4, 0)(5, 1)



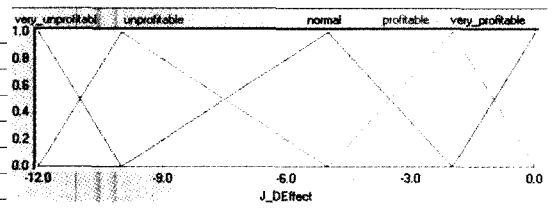
(h) Joint condition

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
WeakGouge	linear	(1, 1)(2, 0)(5, 0)
FairGouge	linear	(1, 0)(2, 1)(3, 0)(5, 0)
Plane	linear	(1, 0)(2, 0)(3, 1)(4, 0)(5, 0)
Rough	linear	(1, 0)(3, 0)(4, 1)(5, 0)
Fresh Rough	linear	(1, 0)(4, 0)(5, 1)



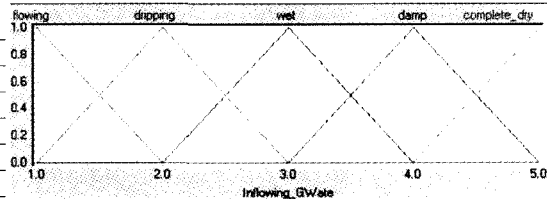
(i) Orientation of joint

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
very unprofitabl	linear	(-12, 1)(-10, 0)(0, 0)
unprofitable	linear	(-12, 0)(-10, 1)(-5, 0)(0, 0)
normal	linear	(-12, 0)(-10, 0)(-5, 1)(-2, 0)(0, 0)
profitable	linear	(-12, 0)(-5, 0)(-2, 1)(0, 0)
very profitable	linear	(-12, 0)(-2, 0)(0, 1)



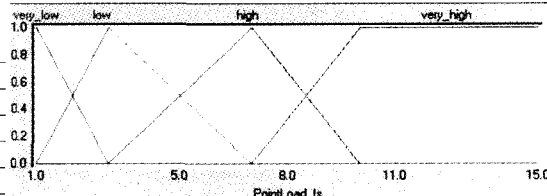
(j) Groundwater inflow

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
flowing	linear	(1, 1)(2, 0)(5, 0)
dripping	linear	(1, 0)(2, 1)(3, 0)(5, 0)
wet	linear	(1, 0)(2, 0)(3, 1)(4, 0)(5, 0)
damp	linear	(1, 0)(3, 0)(4, 1)(5, 0)
complete dry	linear	(1, 0)(4, 0)(5, 1)



(k) point load index

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
very low	linear	(1, 1)(3, 0)(15, 0)
low	linear	(1, 0)(3, 1)(7, 0)(15, 0)
high	linear	(1, 0)(3, 0)(7, 1)(10, 0)(15, 0)
very high	linear	(1, 0)(7, 0)(10, 1)(15, 1)



(l) Overburden

Term Name	Shape/Par.	Definition Points (x, y)
Less D1	linear	(0, 1)(2, 0)(8, 0)
D2	linear	(0, 0)(2, 1)(4, 0)(8, 0)
D4	linear	(0, 0)(2, 0)(4, 1)(6, 0)(8, 0)
D6	linear	(0, 0)(4, 0)(6, 1)(8, 0)
Over D8	linear	(0, 0)(6, 0)(8, 1)

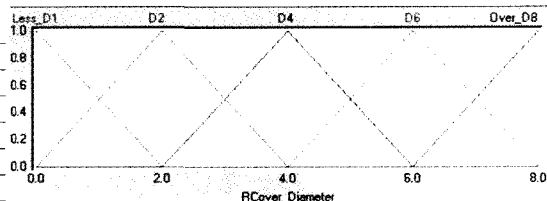


Figure 4. continued.

- 토 등)를 재평가한다. 또한 이 출력 값들과 해당 암종 수량 및 암종별 분포면적을 이용하여 막장의 강도특성을 평가.
- 나. 파쇄대 영향 추론RB: 파쇄대 및 단층대와 터널의 굴착방향, 규모, 지하수 유입량 등을 고려하여 막장면의 안정성을 독립적으로 평가.
- 다. 지하수 유입량 추론RB : 지하수의 유동특성과 상관성이 높은 암반의 풍화정도, 절리면 간격, 토피고를 이용하여 지하수 유입량 추정.
- 라. 절리특성 추론RB : 절리군의 발달 및 절리면 상태, 지하수 영향 등을 고려한 막장면 안정성 평가.
- 마. arching effectRB : 터널에 작용하는 arching effect를 평가할 수 있도록 상부 토피고와 암반 강도특성, 지하수 유입량을 이용하여 상부지반의 arching effect를 평가.
- 바. RMR값 추론RB : RMR분류의 6개 조사항목과 비교적 상관성이 높은 항목들을 위주로 RMR값을 추론.
- 사. 종합평가 추론RB : 가. ~ 마. 항의 결과를 이용한 해당 막장면의 종합적인 터널의 안정성을 평가.

배와 조(2001)는 퍼지집합이론과 뉴로퍼지기법의 신뢰성 검증은 RMR분류의 평가점수(rating) 및 항목별 실제 측정값들이 제시된 총 46개의 현장자료를 이용하여 분석하였다. 이 신뢰성 검증결과를 요약하면, 산술적

RMR값과 추론에 의한 RMR_FU, RMR_NF값의 상관 계수(R)가 각각 0.96과 0.95로서 비교적 높은 상관성을 나타내었다.

4. Prototype NFEST의 신뢰성 검증

NFEST의 신뢰성을 검증하고자 서울지하철 O-OO공구 및 평택-이동간 OO터널의 총 36개 자료를 수집하여 face mapping 및 암반분류 기록, 작업 공정표, 작업일지 등으로부터 12개의 입력변수를 추출하였고, 조사자 평가결과와 NFEST의 추론결과를 비교하였다.

수집자료 중 서울지하철 O-OO 공구는 단선병렬 터널구간으로 도심지 특성상 비교적 2D ~ 4D의 토피고를 가지고 있고, 기반암은 편암과 편마암류가 주류를 이루지만 대부분 풍화가 진행되어 시추조사 결과 '연-풍화암', '풍화암'의 암반으로 분류되었다. 그리고 평택-이동간 OO 터널은 2차선 도로터널로서 50 m 이상의 토피고를 가지는 산악터널이다. 터널 주변의 모암은 호상편마암 및 화강편마암이며, 대부분 연암, 풍화암, 풍화도로 단층파쇄대 및 절리간격이 매우 조밀한 파쇄대가 터널의 종방향 축을 따라 분포하고 있는 것으로 조사되었다.

Table 3에는 수집된 36개의 조사자료 예를 나타내었고, RMR분류 6개 항목 및 산술적 RMR값(RMRorg)

Table 3. Examples of data sheet of the NFEST.

	암종수	암석명		연경도		면적		파쇄폭	파쇄방향
variables	in00	in111	in112	in121	in122	in131	in132	in21	in22
in_001	5	4	1	2	1	10	90	0	0
in_002	5	4	1	2	1	10	90	0	0
in_003	4	1	1	1	1	10	90	3	0
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
in_036	4	4	2	3	1.5	65	35	0	0

	절리수	절리상태	절리방향	지하수	점하중	토피고		RMRorg	RMRchk
variables	in31	in32	in33	in40	in51	in52			
in_001	1	1	0	5	2	3		22	40-20
in_002	1	2	-12	4	2.5	3		15	40-20
in_003	1	2	-12	4	2	3.1		15	40-20
:	:	:	:	:	:	:		:	:
in_036	3	1	0	3	1	2.8		29	40-20

그리고 조사자의 경험적 판단에 의해 결정된 경우 즉, 막장면에 2종 이상의 암반이 노출되었거나 혹은 지하수의 유입이 없는 단층대 등과 같이 산술적인 RMR값보다 낮은 등급을 부여하게 된 경우의 RMR값(RMRchk) 등을 조사하였다. 막장면 관찰에 의한 조사결과 중 정성적 조사결과와 경우, 막장상태에 해당되는 평가등급을 각 평가등급에 부여된 점수로서 기입하였고, 정량적으로 측정 혹은 판정이 가능한 조사결과는 직접 측정되어진 수치로서 기입하였다. 또한 점하중 지수는 막장관찰자료에 명시된 압축강도를 환산하여 가능한 유사한 범주의 값으로 입력 값을 설정하였고, 해당 구간의 토피고는 종단면도를 이용하여 추정하였다.

4.1 NFEST의 추론대상별 특성(Figure 3 참조)

- 가. RMR_{inf}값에 대한 추론: RMR분류에서의 6개 조사항목과 비교적 관련성이 높은 NFEST의 조사항목들을 이용하여 해당 막장면에 대한 RMR_{inf}값을 추론하여 보았다.(※참고: RMR_{org}는 막장관찰일지의 산술합에 의한 RMR값이며, RMR_{chk}는 막장관찰자가 산술합과 별도로 지반특성을 주관적으로 판단하여 선정한 RMR값이다.)
- 나. 종합연경정도(total weathering) 추론: 조사자로부터 제시된 막장면 암반의 RMR 연경분류(극경암, 경암, 연암, 풍화암, 풍화토)를 퍼지추론에 의한 결과와 상호 비교하여 보았다.
- 다. 절리면 안정성(joint safety): 터널에서의 절리면 특성과 절리면의 따라 유입되는 지하수에 기인한 막

- 장면의 안정성을 추론해 보았다.
- 라. 지하수 유입수량 추정 추론: 막장면 암반의 풍화도, 절리면 간격, 토피고의 3가지 항목을 이용하여 터널 내 지하수 유입수량을 퍼지추론에 의해 예측하였다.
- 마. 종합 막장면 안정성평가 추론: 각 막장면에 대한 종합적인 안정성을 추론한 결과와 종합연경도(total weathering), 절리면안정성(joint safety), 파쇄/단층대 안정성(F/F zone safety), 지하수 예상 유입량(inflow groundwater)들을 상호 비교하여 보았다.

4.2 prototype NFEST 추론결과 분석

(1) RMR값에 대한 추론결과

Figure 5는 RMR_{inf}값과 RMR_{org}값 및 조사자의 경험적 판단에 의해 부여된 RMR (RMR_{chk})값의 상관성을 나타낸 그림으로서, 추론된 RMR_{inf}값과 RMR_{org}, RMR_{chk}값 사이의 상관계수는 각각 0.83와 0.79로 비교적 양호한 상관성을 나타내었다. 즉, 본 연구에서 제안한 암반분류 항목과 평가등급을 이용하여 막장면의 복잡한 지질상태를 퍼지추론한 경우에도 기존의 RMR분류에 의한 RMR_{org}값 및 RMR_{chk}값들과 비교적 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 Figure 6에는 상기의 3개 비교 값들에 대한 평균 오차율을 그래프로 나타낸 것이며, RMR_{inf}값과 RMR_{chk}값의 오차율은 19.3%, RMR_{inf}값과 RMR_{org}값의 오차율은 16.1%로 조사되었다. 즉, 조사자의 경험적 판단에 의해 작성된 RMR_{chk}값의 상관계수는 RMR_{org}값에 비하여 다소 저하되었지만, 전체 막장의 상태를 고려한 RMR_{chk}값과 퍼지추론에 의한

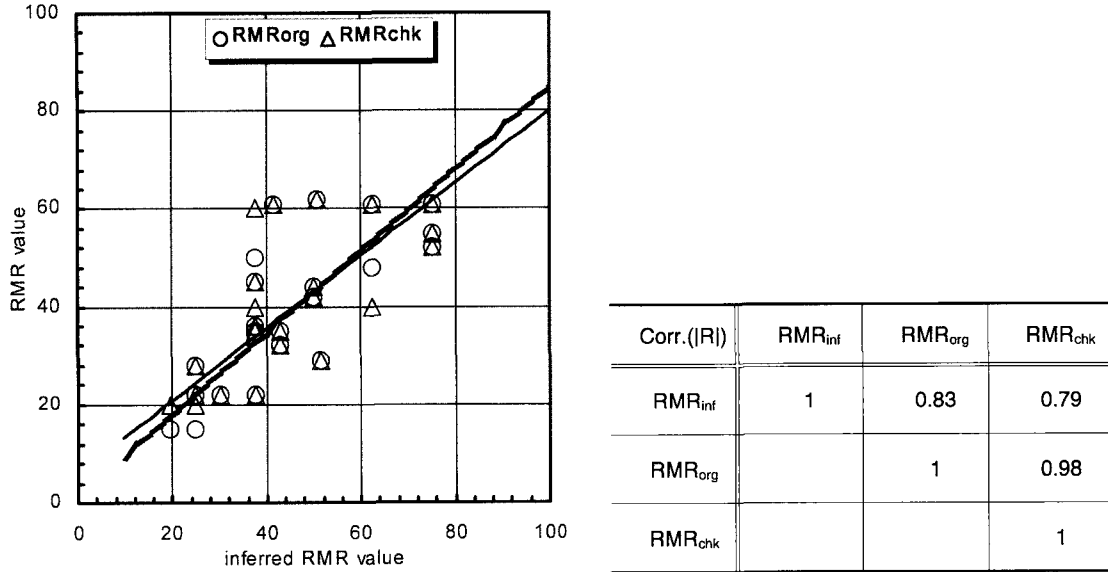


Figure 5. Comparison between inferred and original RMR values.

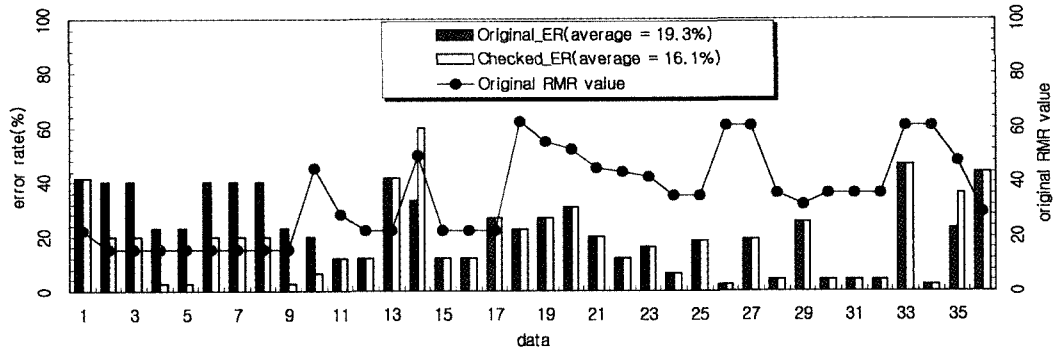


Figure 6. Error rate of inferred and original RMR values.

RMR_{inf}값이 비교적 적은 오차율을 나타내고 있다.

오류가 누적된 것으로 사료된다.

(2) 2종 이상의 암반이 포함된 막장면의 연경도 추론결과

(1)의 추론된 분석결과와 함께 NFEST의 퍼지추론에 대한 신뢰성을 다른 항목으로 검증해 보고자, face mapping에 나타난 암종 수와 분포 비율, 연경도를 재분석하여 막장면의 연경도를 퍼지추론에 의한 결과와 비교하여 Table 4에 나타내었다. 대부분 관찰자가 face mapping한 막장면의 연경도와 비교적 근사하게 추론되어 있으나, 일부 자료에서는 조사자의 판단에 의한 등급보다 추론된 평가등급이 상대적으로 상이한 경우가 있었다. 이것은 대부분 지하수의 평가로부터 기인된 것으로 사료되며, 또한 NFEST의 입력을 위한 재분석 등의 2차

(3) 지하수 유입수량 추론 결과

막장면 암반의 풍화도, 절리면 간격, 토피고의 3가지 항목을 이용하여 터널내 지하수 유입수량을 퍼지추론에 의해 예측한 결과, Figure 7에 나타난 바와 같이 퍼지추론에 의한 예측결과와 실제 막장면에서의 지하수 상태가 매우 상이하게 나타났다. 즉, 추론된 결과들에서는 터널내 유입수량이 대부분 많은 결과로 나타났으며, 이에 대한 원인으로는 조사자의 표기 오류(지하수의 유입에 의해 하반이 침수 및 작업차량의 이동 곤란: '습기 인지') 및 NFEST 분석항목 미흡(우기 및 건기 시의 강수량 등)에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 추후 지하

Table 4. Compare inferred with original weathering.

sample no.	Rock types		Weathering		Ration of Rock types		Data from face mapping		Result of NFEST (inferred weathering)	
	1	2	1	2	1	2	weathering	RMRorg	1	2
in_641	4	1	2	1	10	90	연, 풍암 / 풍화토	22	38.326	8.338
in_602	4	1	2	1	10	90	풍화암 / 풍화토	15	38.326	8.338
in_600	1	1	1	1	10	90	풍화토	15	8.338	8.338
in_597	1	1	1	1	10	90	풍화토	15	8.338	8.338
in_596	1	1	1	1	10	90	풍화토	15	8.338	8.338
in_580	4	1	2	1	20	80	풍화토	15	38.326	8.338
in_548	4	1	2	1	55	45	풍화암 / 풍화토	15	38.326	8.338
in_545	4	1	2	1	50	50	풍화암 / 풍화토	15	38.326	8.338
in_538	3	1	2	1	30	70	풍화암 / 풍화토	15	37.068	8.338
in_525	3	3	3	3	90	10	연, 풍암	45	48.648	48.648
in_522	3	1	2	2	60	40	연, 풍암	28	37.068	24.998
in_516	1	1	1	1	50	50	연, 풍암	22	8.338	8.338
in_498	3	1	3	2	85	15	연, 풍암	22	48.648	24.998
in_489	3	1	3	1	90	10	연암	50	48.648	8.338
in_481	1	1	1	1	50	50	연암 / 풍화암	22	8.338	8.338
in_477	1	1	1	1	50	50	연, 풍암 / 풍화암	22	8.338	8.338
in_474	3	1	3	1	35	65	연, 풍암 / 풍화암	22	48.648	8.338
in_456	3	1	3	2	80	20	연, 풍암 / 풍화암	62	48.648	24.998
in_785	4	4	3	2	50	50	연암 / 풍화암	55	57.236	38.326
in_769	4	1	3	2	50	50	연암 / 파쇄대	52	57.236	24.998
in_697	4	1	2.5	1	80	20	연, 풍암 / 파쇄대	45	44.998	8.338
in_693	4	1	3	1	85	15	연, 풍암 / 파쇄대	44	57.236	8.338
in_689	4	1	2.5	1	85	15	연, 풍암 / 파쇄대	42	44.998	8.338
in_616	4	1	2.5	1.5	45	55	연, 풍암 / 파쇄대	35	44.998	19.446
in_613	4	1	2.5	1.5	65	35	연, 풍암 / 파쇄대	35	44.998	19.446
in_323	4	2	3	1.5	75	25	연, 풍암 / 파쇄대	61	57.236	23.042
in_320	4	2	3	2	80	20	연, 풍암 / 파쇄대	61	57.236	29.166
in_207	4	1	2.5	1.5	48	52	연, 풍암 / 파쇄대	36	44.998	19.446
in_191	4	1	3	1	65	35	연, 풍암 / 파쇄대	32	57.236	8.338
in_186	4	2	3	1.5	50	50	풍화암 / 파쇄대	36	57.236	23.042
in_184	4	2	3	1.5	70	30	풍화암 / 풍화토	36	57.236	23.042
in_182	4	2	3	1.5	75	25	풍화암 / 풍화토	36	57.236	23.042
in_179	4	2	2.5	1.5	55	45	연, 풍암 / 파쇄대	61	44.998	23.042
in_176	4	2	3	1	45	55	연암 / 파쇄대	61	57.236	17.902
in_133	4	4	3.5	3.5	50	50	보통 / 연암	48	59.998	59.998
in_114	4	2	3	1.5	65	35	연암 / 풍화암	29	57.236	23.042

수의 유동특성과 상관성이 높고 특히 막장면 혹은 터널 주변에서의 조사가 용이한 항목(예를 들면, 상시 지하수위 측정결과, 월별 강수량 등)을 추가로 선정하면, 보다 신뢰성 있는 퍼지추론이 가능할 것으로 판단된다.

(4) 종합 막장면 안정성평가 추론 결과

조사에 사용된 터널의 각 막장면에 대한 종합적인 안정성을 퍼지추론한 결과를 Table 5에 나타내었다.

각 요소결과들과 종합적인 안정성 추론결과는 종합연

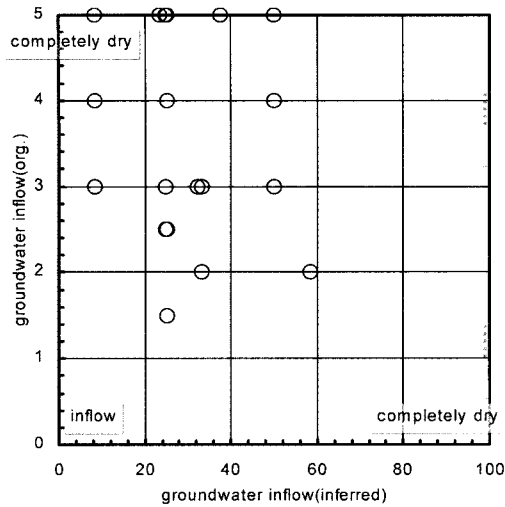


Figure 7. Comparison between inferred and original inflow groundwater condition.

경도 및 추론된 RMR_{inf}값을 제외하고는 대부분 0.5이하의 상관계수를 나타내었고, 특히 파쇄(단층)대의 영향이 가장 적게 나타났다. 이는 NFEST가 중급이하 막장관찰자들의 숙련도를 고려하여 각 평가등급별 소속도함수의 중첩범위가 크게 작성하였기 때문에 막장조사 시 발생하는 애매함을 본 시스템에서 보정해 줄 수 있는 장점이 있다. 그러나 소속도함수 중첩의 영향으로 IF-THEN 조건문이 증가되고, 따라서 부적합한 관계에 대한 등급이 누적되어 평가결과에 반영된 것으로 판단된다.

5. 결 언

터널의 막장면 조사에서 조사자의 주관성을 객관화시키고, 지반특성에 적합한 표준지보패턴 및 보강공법의 결정에 합리적인 근거를 제시하기 위한 목적으로 퍼지 집합이론과 뉴로퍼지기법 등을 적용한 prototype의 터널 안정성평가 시스템(NFEST)을 개발하였다.

prototype NFEST의 신뢰성 검증을 위하여 국내 터널 현장에서 조사된 36개의 막장관찰자료들을 대상으로 평가를 수행하여 보았다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 터널 지반평가의 객관화와 조사의 용이성, 평가항목의 다양화 등을 위해 국내 기술자에게 익숙한 RMR 분류에 추가하여 평가항목 12개를 제안하였고, 조사 시간의 최소화를 위하여 가능한 정량적 기준보다는 정성적 기준으로 평가항목을 작성하였다.
- 2) 개발된 prototype NFEST의 신뢰성 검증결과, 추론된 RMR_{inf}값과 산술합에 의한 RMR_{org}값 그리고 조사자의 주관적 판단에 의한 RMR_{chk}값 사이의 상관계수는 각각 0.83과 0.79로 비교적 양호한 상관성을 나타내었다. 그리고 평균 오차율은 각각 19.3%와 16.1%로서 RMR분류의 평가등급과 상이하게 구성된 NFEST를 이용하여도 막장면의 RMR값을 추론하는 것이 가능한 것으로 사료된다.
- 3) NFEST의 암종별 연경도 추론 결과, 대부분 조사자가 제시한 막장면의 연경암 분류에 근사하게 추론되었다. 특히 각기 풍화정도가 상이하게 혼재한 막장면의 경우, 암종에 따른 연경정도, 본포 면적 등의 평가항목을 적용함으로써 조사자의 주관성을 객관화 시킬 수 있었다.
- 4) 터널의 각 막장면에 대한 종합적인 안정성을 퍼지추론한 결과, 각 요소결과들과 종합적인 안정성 추론 결과는 약 0.7~0.5이하의 낮은 상관계수를 나타내었다. 이와 같은 원인들로는 조사자료의 신뢰성, NFEST의 입력을 위한 재분석에 의한 2차 오류가 누적된 것으로 판단된다.

이상과 같이 퍼지집합이론을 이용한 prototype NFEST로부터 RMR값의 산정 및 지반의 연경정도를 평가한 결과는 만족할 수 있으나, 지하수의 유입량 예측 등의 추론결과들은 지속적인 보완이 필요한 것으로 나타났다. 그리고 향후에는 터널의 안정성을 평가할 수 있는 신뢰할 만한 예측결과와 새롭게 제안한 5개 평가항목들에 대해 퍼지-신경망이론을 적용, 평가항목 별 등급(소속도함수)을 작성하고자 하며, 이러한 과정을 통해 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

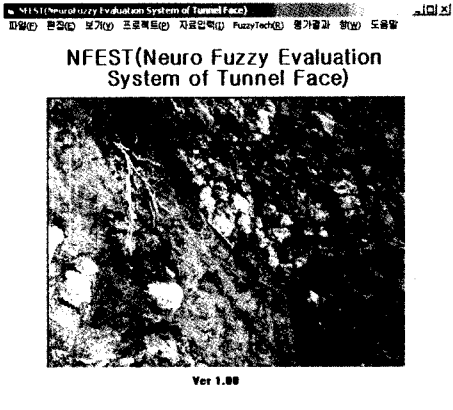
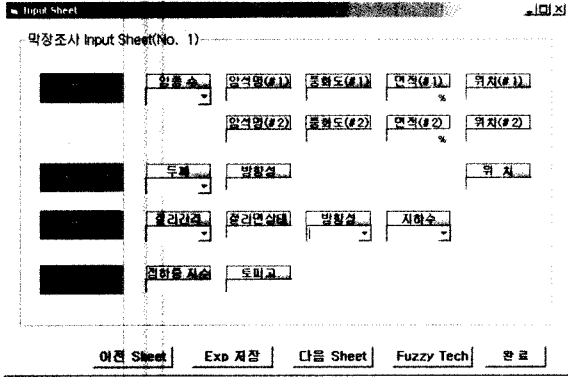
1. 구호본, 배규진, 문홍동, 홍성완, 1994, RMR 분류법의 국내 적용성 평가, 한국지반공학회 가을학술발표회, 209- 216.
2. 류성렬, 1995, C언어에 의한 실용퍼지, 도서출판 세화, 84-92.

Table 5. Correlations for element outputs and total safety evaluation.

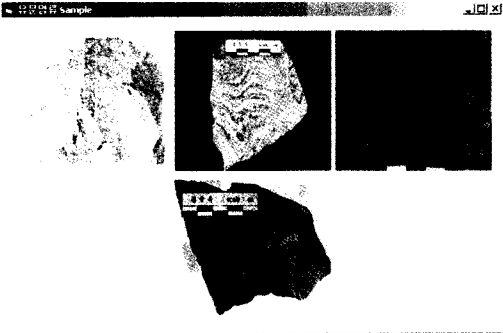
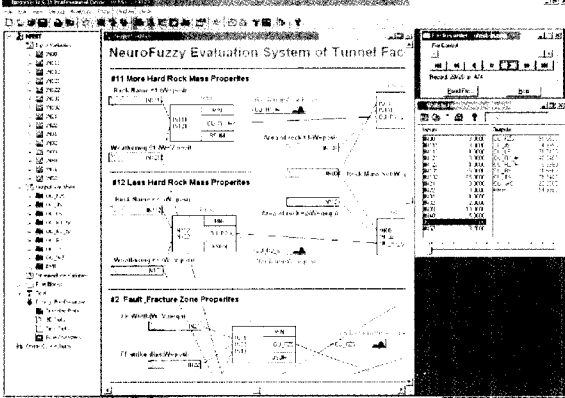
Corr.(R)	F/F zone safety	joint safety	total weathering	groundwater inflow	RMR _{inf}	RMR _{org}	RMR _{chk}
tunnel safety	0.38	0.47	0.84	0.57	0.70	0.54	0.50

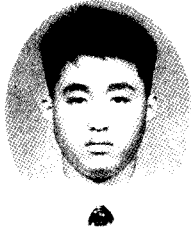
3. 배규진, 조만섭, 2001, 퍼지집합이론 및 뉴로-퍼지기법을 이용한 RMR 값의 추론, 한국암반공학회지, Vol.11, No.4, 289-300.
4. 신희순, 선우춘, 이두화, 2000, 토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류, 구미서관.
5. 이광형, 오길록, 1995, Fuzzy 이론 및 응용 I, II, 흥릉과학출판사.
6. 조만섭, 2001, 뉴로퍼지기법을 이용한 터널지반의 평가, 전북대학교 박사학위논문, 91-109.
7. 한국건설기술연구원, 1999, 고속전철 교량/터널구조 및 유지관리시스템 개발(터널부분), 1단계보고서, 73-138.
8. 한국건설기술연구원, 2000, Fuzzy 추론을 이용한 터널 보강공법 선정용 Expert System 개발(1), 연구보고서, 건기연 2000-113, 103-195.
9. Nguyen, V. U. and E. Ashworth, 1985, Rock mass classification by fuzzy sets, Proc. 26th US Symposium on Rock Mechanics, Vol.1, 26-28, 937-945.
10. Yu, T. Z. and P. Z. Zeng, 1983, Classification system of fuzzy sets for rock engineering, Proc. Int. Symposium on Engineering Geology and Underground Construction 1, Lisbon, 2.1-2.9.
11. Z. T. Bieniawski, 1984, Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, *A.A. Balkema*.
12. 大野研, 清水則一, 1990, 地盤工學へのファジィ理論の應用, 日本ファジィ學會誌 2.3, 300-312.
13. 吉中龍之進, 櫻井春輔, 菊地宏吉, 1989, 岩盤分類とその適用, 岩盤工學體系(1), 土木工學社.

Appendix I

<p>NFEST - beginning window</p> 	<p>NFEST - input data sheet</p> 
--	---

Appendix II

<p>NFEST - selection windows of rock types</p> 	<p>FUZZYTECH - inference procedure and results</p> 
--	---



조 만 섭

1991년 전북대학교 공과대학 자원공학과
공학사

1993년 전북대학교 공과대학 자원공학과
공학석사

2001년 전북대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 02-3485-3533

E-mail: mscho66@cricmail.net

현재 (주)유니백 제1사업본부 터널팀
차장



김 영 석

1965년 전북대학교 공과대학 광산학과
공학사

1967년 전북대학교 공과대학 채광야금
학과 공학석사

1986년 전남대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 063-288-0022

E-mail: kys2360@moak.chonbuk.ac.kr

현재 전북대학교 공과대학 자원공학과
정교수