

터널 시공 중 보강공법 선정용 퍼지 전문가 시스템 개발

Development of the Fuzzy Expert System for the Reinforcement of Tunnels during Construction

김 창 용* ¹	Kim, Chang-Yong	박 치 현* ²	Park, Chi-Hyun
배 규 진* ³	Bae, Gyu-Jin	홍 성 완* ⁴	Hong, Sung-Wan
오 명 렬* ⁵	Oh, Myung-Ryul		

Abstract

In this study, an expert system was developed to predict the safety of tunnel and select proper tunnel reinforcement system using fuzzy quantification theory and fuzzy inference rule based on tunnel information database. For this development, many tunnelling sites were investigated and the applied countermeasures were studied after building tunnel database. There will be benefit for the deciding tunnel reinforcement method in the case of poor ground condition.

The expert system developed in the study has two main parts, pre-module and post-module. Pre-module is used to decide input items of tunnel information based on the tunnel face mapping information which can be easily obtained in in-situ site. Then, using fuzzy quantification theory II, fuzzy membership function is composed and tunnel safety level is inferred through this membership function. Post-module is used to infer the applicability of each reinforcement methods according to the face level.

The result of the predicted reinforcement system level was similar to measured ones. In-situ data were obtained in three tunnel sites including subway tunnel under Han river. Therefore, this system will be helpful to make the most of in-situ data available and suggest proper applicability of tunnel reinforcement system to developing more reasonable tunnel support method without dependance of some experienced experts' opinions.

요 지

본 연구에서는 퍼지 수량화 이론과 퍼지추론 시스템을 기반으로 터널정보 데이터 베이스를 구축하여 터널 막장의 안전성 등급을 결정하고, 적절한 보강공법을 선정할 수 있는 전문가 시스템의 모형을 개발하였다. 국내·외에서 주로 사용하는 보강공법에 대해 지반의 지지력이 열악하여 터널의 시공 중 보강공법을 적용하였던 주요현장을 중심으로 보강공법과 지반 상황에 대한 데이터 베이스를 구축하여 세부적이고 합리적인 보강공법의 체계확립을 위한 기초를 마련하고자 하였다.

본 연구에서 개발한 전문가 시스템은 크게 두 가지 기능을 가진다. 전반부 모듈은 현장에서 조사하기 쉬운 막장 기록항목을 중심으로 터널정보 입력항목을 선정하고 퍼지 수량화이론 II를 이용하여 구성된 퍼지 소속도함수(membership function)를 통해 터널 안정성 등급을 결정한다. 후반부 모듈은 전반부 함수와 터널 안정성 등급에 따라 적절한 보강공법의 적용성을 추론한다. 개발한 시스템의 검증은 위하여 다양한 보강공법을 시공하였던 한강하저터널을 비롯한 국내·외 3곳의 터널 현장 자료를 이용하여 적용한 결과 실제 시행한 보강공법과 근접한 추론결과를 보였다. 정보화시공을 통해 터널 막장기록과

*1 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원
*2 정회원, 한국건설기술연구원 연구원
*3 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원
*4 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원
*5 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 토목공사팀 팀장

계측자료의 이용을 극대화하고 객관적인 기준의 부재로 인해 일부 전문가의 경험에만 의존하고 있는 국내 보강공법 시공 기술을 보다 발전시켜 합리적인 세부적인 보강공법을 제시하는데 도움이 되고자 하였다.

Keyword : Expert system, Fuzzy theory, Tunnel reinforcement, Tunnel construction, Safety evaluation

1. 서론

최근 산업발달과 함께 도시의 팽창과 지하급수적으로 늘어나는 인구와 교통·통신 수단의 증가에 의한 생활공간의 부족으로 인해 지하공간의 이용이 증가되고 있다. 이에 대한 결과로도심지 지하철과 경부 고속철도, 각종 도로 터널 및 전력구, 통신구 터널 등과 같은 많은 터널과 지하구조물의 건설이 이루어졌고, 현재 진행 중에 있다. 또한, 터널시공의 증가와 함께 터널 붕괴 사례도 늘어나면서 안정성 대책문제가 대두되고 있다. 세계적으로 발생된 터널 붕괴 사례를 종합해보면, 도심지역에서 발생된 사고가 전체의 67% 이상을 차지하고 있어서 각종 건물 및 구조물들이 산재해 있는 도심지구간에서의 터널 시공에 매우 세심한 주의를 기울여야 함을 보여주고 있다.

특히, 도심지역에서의 터널공사는 산악지역의 터널과는 달리 각종 지하시설물(상·하수도, 전력케이블, 송전설비 등)이 있고, 중요구조물 하부를 관통하거나 하저를 통과해야 하는 등의 난공사 구간이 도처에 산재해 있다. 따라서, 이러한 도심지에서의 지하철 터널붕괴는 곧 과대한 사유재산의 피해와 공공시설의 기능마비를 초래할 뿐만 아니라, 지하철 건설 자체의 공사비 증가와 공기지연을 유발시켜 막대한 국가적 손실을 초래하기 때문에 붕괴방지를 위한 최선의 대책들이 우선적으로 연구되어야 한다. 일부 전문가의 자문이나 시공사례를 통해 이뤄지고 있는 국내 터널보강공법에 대해서 체계적 분석 및 검토를 바탕으로 합리적인 시공이 이루어져야 할 것이다.

지반의 불확실성을 극복하고 예상하지 못한 다양한 사고를 방지하기 위한 시도로써 인공지능망이나 퍼지이론 등 인공지능과 전문가 시스템을 이용한 요소 기술들에 대한 연구가 지반공학 분야에서도 접목을 시도하고 있다(김창용 외, 1998, 이성원 외, 1999, Chikahisa 외, 1997).

본 연구에서는 불안정한 상황별로 보강공법체계를 분류하여 이를 통합할 수 있는 첨단 fuzzy 추론을 이용한 전문가 시스템의 모형을 개발함으로써 시공 상황에 대한 정보를 토대로 미래에 발생 가능한 불안정한 상황에 대한 대책공법을 제시하고자 하였다.

2. 전문가시스템 개발을 위한 이론적 연구

터널현장에서 시공되는 보강공법은 지반상태의 불확실성으로 인해 적용여부를 쉽게 결정할 수가 없다. 이러한 지반상황과 보강공법 적용의 애매 모호함을 퍼지추론을 적용하여 적절하게 표현함으로써 터널 기술자가 보강공법을 선정하는 과정에서 보다 적절한 결정을 내리는데 도움을 주고자 하였다(지하철건설본부, 1996). 이를 위해 각 터널조사 항목과 막장상태를 퍼지집합으로 표현하여 보강공법의 적용성 정도를 추론하고자 하였다.

퍼지이론의 적용을 위해서는 소속도 함수의 구성이 무엇보다 중요하다. 다양한 자료와 전문가의 의견을 종합하여 보다 객관적인 소속도 함수를 수립하여야 하지만, 시공 현장 정보와 숙련된 전문가의 부족으로 인해 소속도 함수를 만드는 데 어려움이 있었다. 퍼지 규칙을 만들기 위해서 필요한 전문가의 부재와 다양한 현장정보 수집의 어려움을 보완하기 위해 수량화이론Ⅱ를 본 시스템에 적용하였다. 수량화이론Ⅱ를 이용하여 질적인 자료에 수량화값을 부여해 소속도 함수를 구성하므로써 보다 객관적인 기준의 적용이 가능해졌다(이광형 외, 1995). 먼저, 질적변수인 막장의 상태를 외적기준으로 하고 터널정보 데이터베이스의 각 항목들이 설명변량으로 설정하여 질적 범주인 두가변수에 수량화값을 부여한 다음, 퍼지소속도함수를 구성하게 된다(Chikahisa 외, 1997).

2.1 퍼지 추론시스템 (Fuzzy inference system)

퍼지추론은 애매한 상태의 자료를 표현하기 위하여 공학분야를 중심으로 여러분야에서 적용하고 있다. 일반적인 집합과 다른 퍼지집합이라는 이론을 이용하여 불확실성을 나타내며 퍼지시스템의 진행과정은 그림 1과 같다(이광형 외, 1995). 입력자료를 소속도를 가지도록 퍼지화시킨 다음 퍼지규칙을 통해 퍼지추론을 수행한다. 마지막으로 추론한 값을 비퍼지화하여 결론을 도출하게 된다.

퍼지추론이란 "IF A is A THEN y is Y " (A, B 는 퍼지 집합)이 되는 규칙을 가진 경우, ' x is A '의 입력에 대해서 y 를 어

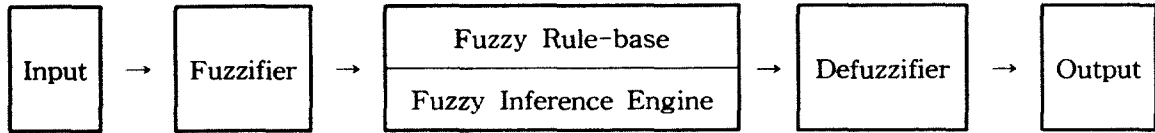


그림 1. 퍼지시스템 개략도

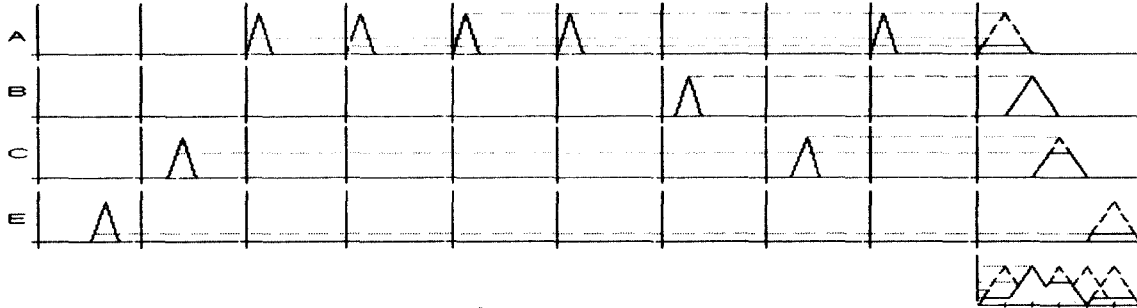


그림 2. 직접법의 추론 프로세스

떻게 추론하면 좋은가를 다루는 것이다. 퍼지추론(fuzzy reasoning)을 수행하는 데는 그 추론 규칙이 필요하다. 이 규칙은 IF-THEN 형식으로 표현되고, 일반적으로 전건부(前件部) 및 후건부(後件部)를 퍼지 명제형으로 표현한다. 이러한 추론규칙을 퍼지 IF-THEN 규칙이라고 칭한다. 추론 과정은 다음의 세 단계로 나눌 수 있다.

- (1) 주어진 입력에 대한 각 규칙의 전건부 적합도를 구한다.
- (2) (1)에서 구한 적합도를 기초로 각 규칙의 추론결과를 구한다.
- (3) 각 규칙의 추론 결과에서 최종적인 추론 결과를 구한다.

퍼지집합이론을 터널시공의 보강공법 선정에 적용하기 위해서는 조사 항목들의 특성과 항목간 상호 연관성을 고려하여 소속도 함수를 구하는 것이 가장 중요하다. 일반 집합은 원소가 그 집합에 포함될 가능성이 1과 0이지만, 퍼지집합의 경우에는 각 원소가 집합에 포함될 가능성(소속도)을 보다 다양하게 표현할 수 있다. 퍼지합성의 프로세스를 그림 2와 같이 나타낼 수 있다(이성원 외, 1997). 예를 들어, A항목의 경우 5개의 조건을 퍼지합으로 연산하여 가장 오른쪽에 소속도를 나타내었으며, A, B, C, E의 각 항목의 가장 오른쪽에 나타낸 퍼지합 결과를 퍼지곱으로 연산하여 오른쪽 가장 아래 합성한 결과를 나타내었다.

2.2 수량화 이론 II

수량화이론 II는 질적변수인 외적기준과 역시 질적변수인 설명변량을 모두 가변수를 이용하여 표현한 뒤, 외적기준 가변수들의 선형결합과 설명변량 가변수들의 선형결합 간의 상관계수를 최대화한다. 이 최적화를 통해 모든 질적 범주(category)에 수량화 값을 부여하게 된다(허명희, 1998).

수량화이론 II의 목적은 상관계수인 $\text{corr}(Y, X)$ 를 최대화하는 것이다. 여기서 Y는 외적기준 가변수들의 선형결합이고 X는 설명변량 가변수들의 선형결합이라고 하면, 이 가변수들의 선형결합인 Y와 X를 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 일반적으로, 이 식은 식(2)와 같은 최적화문제로 정식화된다.

$$\begin{aligned}
 Y &= a_1A1 + a_2A2 + a_3A3, \\
 X &= b_1B1 + b_2B2 + b_3C1 + b_4C2 + b_5C3 + \\
 &\quad b_6C4 + b_7D1 + b_8D2
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\max_{a, b} a' S_{12} b \quad \text{subject to} \quad a' S_{11} a = b' S_{22} b = 1 \tag{2}$$

여기서 a는 외적기준 가변수와 관련된 계수벡터이고 b는 설명변량 가변수와 관련된 계수벡터이다. 그리고 S_{12} 는 외적기준 가변수 군과 설명변량 가변수 군 사이의 공분

산행렬이다. 또한, S_{11} 은 외적기준 가변수 군내의 분산행렬, S_{22} 는 설명변량 가변수 군내의 분산행렬의 표기이다. 위의 예의 경우 a와 b는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$a = (a_1, a_2, a_3)', \quad (3)$$

$$b = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11})'$$

식(2)에서 S_{11} 은 (A1, A2, A3)의 3×3 분산행렬, S_{22} 는 (B1, B2, C1, C2, C3, C4, D1, D2)의 8×8 분산행렬, $S_{12} \equiv S_{21}'$ 는 이 두 변량군 사이의 3×8 공분산행렬이다. 이 최적화문제를 풀어보면 아래 식과 같은 해가 나온다(허명희, 1995). 두 특성방정식의 고유값, λ 는 식 (4)에 의해 구하고 그 중에서 가장 큰 공통 고유값을 λ_1 이라고 한다.

$$S_{11}^{-1/2} S_{12} S_{22}^{-1} S_{21} S_{11}^{-1/2} u = \lambda u, \quad (4)$$

$$S_{22}^{-1/2} S_{21} S_{11}^{-1/2} S_{12} S_{22}^{-1/2} v = \lambda v$$

식 (4)에서의 고유값 중 λ_1 에 결합된 단위길이의 고유벡터를 u_1, v_1 이라고 할 때, 우리가 얻고자 한 a와 b의 해는 식 (5)와 같이 주어진다.

$$a_1 = S_{11}^{-1/2} u_1, \quad b_1 = S_{22}^{-1/2} v_1 \quad (5)$$

3. Fuzzy 추론법을 이용한 터널 보강공법 선정용 전문가시스템

3.1 보강공법 선정용 전문가 시스템 구성

본 연구에서 개발한 터널 보강공법 선정용 전문가시스템은 크게 2단계로 구성되어 있다. 1단계, 전반부에서는 터널 주변 지반조건, 지하수, 절리, 지지력, 인접구조물 등으로 이루어진 터널 정보 D/B를 바탕으로 제 1 소속도 함수(fisrt membership function)를 구성한다. 2단계, 후반부에서는 터널 보강공법 D/B를 활용하여 각 터널의 등급에 따른 보강공법별 퍼지추론규칙(fuzzy inference rule)을 추론한다. 이 퍼지추론규칙은 터널 보강공법의 수량화값으로 형성한 터널 보강공법의 제 2 소속도 함수(second membership function)를 구성한다. 터널 정보 D/B를 바탕으로 구성된 1단계 소속도 함수를 통해 시공 현장의 터널 정보를 입력하여 터널의 안정성 등급을 결정한다. 다음, 이미

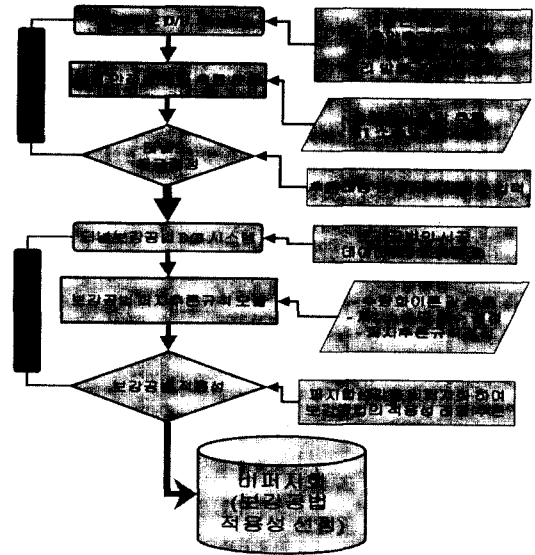


그림 3. 시스템의 각 모듈별 용도와 특징

구성한 퍼지추론규칙을 이용해 비퍼지화(defuzzification)하면, 각 보강공법별 적용등급이 결정된다.

3.2 터널정보 D/B 및 터널 안정성 등급 평가를 위한 전 반부 소속도 함수

터널 안정성에 미치는 영향인자를 크게 막장 관찰자료와 계측항목으로 구분하였다. 계측항목은 향후 수행할 세부 보강공법에 대한 연구에서 항목을 추가하기로 하고, 본 터널 보강공법 선정을 위한 프로토타입 전문가시스템을 구축하기 위하여 구성된 데이터베이스는 막장 관찰자료만을 포함하였다.

터널 안정성 등급 결정과 보강공법 선정을 위해 필요한 막장 관찰자료를 5가지 범주로 구분하여 현장에서 자료 수집이 용이한 최소 항목을 선택하였다. 5가지 범주는 터널의 막장상태, 절리, 지하수상태, 지지력, 인접구조물 등이다. 5가지 조건 중 막장상태는 천정부, 측벽부 및 풍화정도로 세분화하였고, 절리항목은 절리간격, 절리모양, 절리상태, 절리방향 등으로 구분하였으며, 지하수는 유입량과 투수계수로, 지지력은 단축압축강도와 상부하중으로 나누었다. 항목선정 기준은 전문가의 의견과 터널현장에서 수집 가능한 변수를 선정하였으며, 앞으로 현장에서 필요한 항목과 관련변수들을 데이터를 수집하면서 확장할 계획이다. 5가지 범주에서 프로토타입을 위한 데이터베이스의 항목은 일축압축강도, 풍화정도, 절리간격, 절리조건, 절리방향, 지하수조건 등 RMR 분류 기준과 같으며

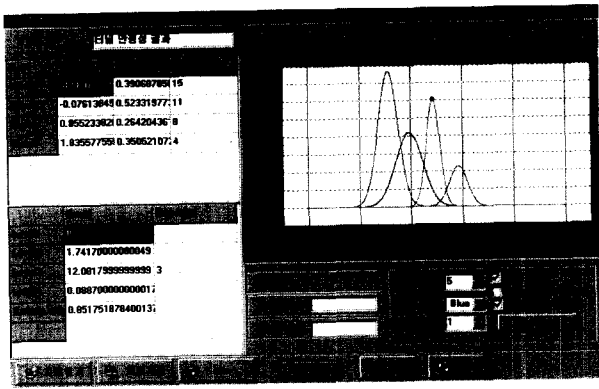


그림 4. 각 범주별 가중치와 터널 안전성 등급 추론

총 6개의 변수로 구성되어 있다.

6개의 항목은 현재 국내 각 현장에서 일반적으로 관찰되고 있는 RMR 항목으로 현장에서 쉽게 얻을 수 있는 점을 고려하여 선택하였다. 각 변수는 주의등급을 RMR 항목의 등급을 바탕으로 A, B, C, D의 4단계로 구분하였다. A등급은 “안정”, B등급은 “보통”, C등급은 “주의”, D등급은 “위험”을 나타낸다. 마찬가지로 방법으로 터널의 안정성도 같은 의미를 가지는 4단계의 등급으로 구분하였다. 표 1.에서는 6개 항목을 4단계로 구분한 등급에 대한 기준을 나타내준다.

소속도 함수는 수량화 이론 II를 이용하여 구한 범주의

표 1. RMR 분류를 바탕으로 한 터널 안전성 데이터베이스 항목의 등급기준

평점 분류항목	A		B	C	D		
	암석강도 (함마타격상태)	극경암 15	경암 12	연암 7	연암~풍화암 4	풍화암~풍화토사 2	
RQD	90~100%	75~90%	50~75%	25~50%	<25%		
	20	17	13	8	3		
불연속면	간격	>3m	1~3m	0.3~1m	500~300mm	<50mm	
		30	25	20	10	5	
	상태	경암-거침, 밀착신선	경암-약간 거침, <1mm, 약간 풍화	연암-약간거침, <1mm, 보통 풍화	심한풍화-Gouge<5mm	완전풍화(연한 Gouge 5mm이상, 절개면 간격 1~5mm)	
		25	20	12	6	0	
지하수조건	건조상태	습기인지	습윤(20~25 l/분)	벽면을 타고 물이 흐름	피입수, 압력상 태의 집중용수 (<125 l/분)		
	10	8	7	4	0		
불연속면의 방향	경사방향으로 굴진		경사와 반대로 굴진		주향이 터널축에 평행		경사가 0~10°
	45~90°	20~45°	45~90°	20~45°	45~90°	20~45°	
	0	-2	-5	-10	-12	-5	
암반평가	매우양호	양호A	보통	불량		매우 불량	
	100~81	80~61	60~41	40~21		<20	

수량화값과 샘플값(vector score)에 대한 정규분포 확률밀도함수로 구성하였다. 각 터널 안전성 등급의 평균과 표준편차와 빈도수를 나타내는 등급개수를 변수로 하는 식 (6)의 가우스 정규분포곡선식을 이용하여 오른쪽의 소속도 함수를 구성하였다. 그림 4에서 터널안전성 평가를 위한 소속도 함수와 터널정보 데이터베이스를 이용하여 추론한 터널의 등급을 보여준다.

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] \times n \quad (6)$$

여기서, μ : 평균, σ : 표준편차를 나타낸다.

3.3 터널 보강공법 D/B와 등급별 적합도를 위한 제 2 소속도함수

이 모듈은 보강공법에 관한 데이터베이스를 입력, 수정, 저장 및 관리한다. 현재 수집한 데이터를 바탕으로 막장면 슛크리트, 막장면 록볼트, 링컷, 기계굴착, 강관보강형 단 단 그라우팅, 막장 폐합, 굴진장 축소, 휘폴링 등의 항목만을 입력자료로 사용하였으며, 앞으로 다양한 항목의 추가

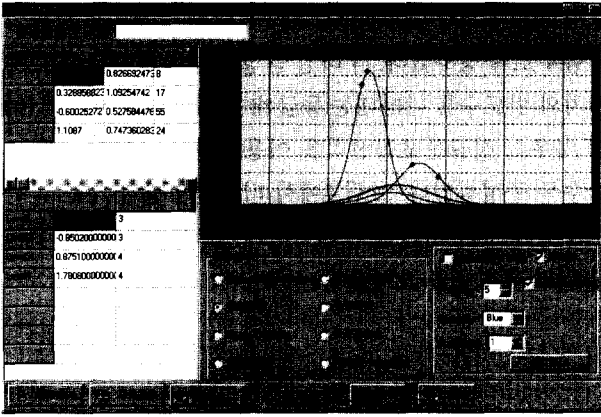


그림 5. 각 터널 보강공법별 터널 안정성 등급에 대한 퍼지추론관계

가 이루어질 예정이다.

각 보강공법은 적합도를 “1”, “2”, “3”, “4”의 4단계의 등급으로 구분하였다. 등급 “1”은 “필요 없음”, 등급 “2”는 “가급적 피함”, 등급 “3”은 “가급적 사용”, 등급 “4”는 “필요”를 나타낸다. 전반부 소속도 함수를 이용한 퍼지추론에서 추론한 터널 안정성 등급(level)에 따른 보강공법 적용 데이터베이스를 바탕으로 수량화이론을 이용해서 터널의 각 주의수준에 해당하는 각 보강공법의 적용수준을 추론하였다. 이때, 외부기준은 보강공법의 적합성 (applicability)이 되고, 설명변수는 터널의 주의수준이다. 전반부 소속도 함수와 같이 수량화이론 II분류를 활용하여 각 터널 안정성 등급에 대한 보강공법의 퍼지추론규칙을 찾는다. 각 변수의 등급별 수량화값도표에서는 터널 안정성 등급과 보강공법 적합성간의 상관계수와 편상관계수를 제시해 준다. 이 상관계수는 각 터널 안정성 등급과 각 터널 보강공법의 관계를 나타내는 지표로서 터널 보강공법에 따른 각 터널 안정성 등급정도를 나타내 준다. 전반부 소속도 함수의 소속도와 후반부 소속도함수로 구한 퍼지추론규칙을 이용해서 퍼지 합성값을 구하고 이 값을 비퍼지화하여 보강공법 적용등급을 추론한다. 이때, 비퍼지화는 센트로이드(centroid) 방법을 이용하였다(이광형 외, 1995). 그림 5에서는 각 공법별 소속도 함수를 구성하는 모듈이며, 표 2와 표 3은 각각 한강하저터널의 데이터베이스와 부산지하철의 데이터베이스를 이용하여 추론한 보강공법 퍼지추론규칙을 보여준다. 이 퍼지추론규칙은 막장의 주의레벨과 보강공법의 적합도 사이의 상관관계를 통해서 추론한다. 예를 들어, 표 2의 막장 슛크리트는 막장의 주의레벨 A, B, C, D에 대응하는 적합도가 각각 1, 3, 4, 4이다. 이는 막장의 주의레벨이 A일 때 가장 상관성이 높은 적합도는 1이라는 의미이다. 추론하고자 하는 막장에 대한

표 2. 한강하저터널의 퍼지추론규칙

공법종류	주의 레벨			
	A	B	C	D
막장 슛크리트	1	3	4	4
강관 보강형 다단 그라우팅	3	3	4	4
링 컷	1	2	4	4
기계식 굴착	1	2	4	4
막장폐합	1	3	4	4
L.W 그라우팅	2	4	1	4
굴진장 축소	1	3	4	4
휘폴링	1	4	4	4

표 3. 부산지하철의 퍼지추론규칙

공법종류	주의 레벨			
	A	B	C	D
막장 슛크리트	1	2	3	4
강관 보강형다단 그라우팅	1	2	2	4
링 컷	1	1	3	4
기계식 굴착	1	1	3	4
막장폐합	1	1	3	4
굴진장 축소	2	4	2	2

표 4. 일본 도로터널의 퍼지추론규칙

공법종류	주의 레벨			
	A	B	C	D
막장면 슛크리트	1	2	4	4
막장 볼팅	1	2	3	4
링 컷	1	1	2	3
기계식 굴착	1	1	3	3

각 주의레벨별 소속도가 추론규칙에 따라 적합도의 소속도로 전달된 다음, 적합도를 퍼지합성하여 공법의 최종 적합도를 찾아낸다.

4. 신뢰성 검증 및 현장적용

본 연구에서 개발한 시스템의 현장 적용가능성을 검증하기 위하여 국내·외 현장자료를 바탕으로 보강공법의 적합도를 추론하였다(지하철건설본부, 1993). 국외 자료로는 일본의 도로터널 현장정보(Chikahisa, 1997)를 사용하였으며, 국내 현장으로는 서울지하철 한강하저터널 5-00구간(우종태, 서강천, 1996)과 부산지하철 2-00공구의 터널자료를 사용하였다.

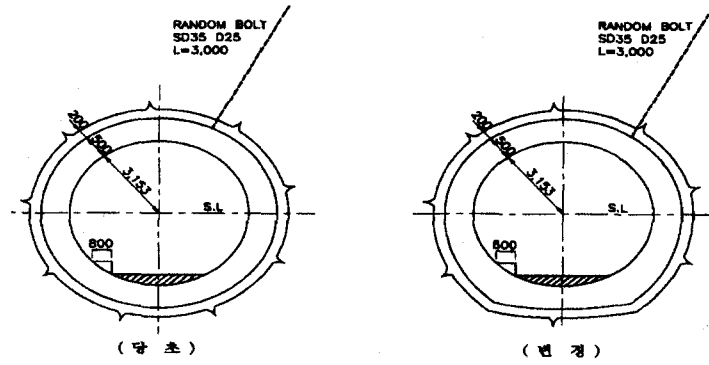


그림 6. 한강하저터널의 굴착단면도 (우종태:서강천,1996)

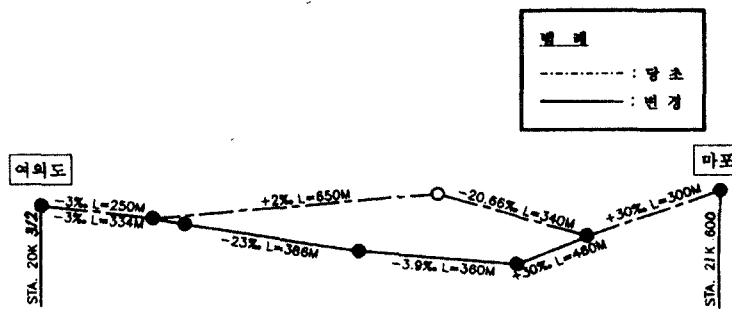


그림 7. 한강하저터널의 종단계획

4.1 신뢰성 검증을 위한 현장

한강하저부의 지반상태는 깊게 발달된 풍화대, 단층 및 파쇄대와 충전물을 협재하는 절리면의 발달 등 지질 구조적으로 심하게 교란되어 있어 공학적으로 매우 취약함을 보이고 있다. 특히, 마포측에서 여의도측으로 굴진하는 터널은 터널굴착 방향이 불연속면들의 경사방향과 대체로 반대방향(against dip)으로 낙반(direct tensile failure)의 발생 가능성이 컸다. 반대로 여의도측에서 마포측으로 굴진하는 터널은 불연속면들의 경사방향이 대체로 같은 방향(with dip)으로 안정적이었다. 터널을 굴착하기에 앞서 굴착전방의 지반상태를 확인하기 위해 막장관찰 조사, 선진수평 시추조사, 천공슬라임을 통한 지질조사, 실내토질시험 등을 실시한 후에 보강공법 및 굴착 패턴을 선정하여 시공한 현장이다(우종태, 서강천, 1996).

부산지하철 2-00공구는 교통이 번잡하고 많은 사람들이 밀집한 도심지를 통과하고 있다. 터널 갱도부근에서는 지반상태가 비교적 양호하였으나 시공 중 풍화암층으

로 이루어진 연약대로 인해 터널붕락의 발생 위험으로 일부구간에서는 링컷공법을 이용하였다. 또한, 막장의 상단부는 연암이 분포되어 있으며 하단부는 암반 사이에 토사가 분포하였다.

서울지하철 한강하저터널과 부산 지하철의 시공 중 막장 지질조사는 RMR 분류법(CSIR 기준)에 기초하여 작성하였으며 관찰항목은 암석의 강도(Hammer 타격시 반발력 등으로 확인)와 풍화의 정도, RQD(코어 암질지수), 불연속면의 간격, 불연속면의 상태, 지하수 조건 등 모두 5가지였다. 이러한 기본항목 외에 터널굴진방향과 불연속면의 방향성과의 관계를 고려하여 이들의 평점합계로서 암반평가가 이루어지며 그 외에 지질학적인 사항의 기록 및 지하수 용출상태 등을 기록하여 종합적인 막장관찰을 실시하였다.

시스템의 검증을 위해 사용된 해외터널 자료인 일본의 도로터널은 퇴적암인 지반에서 90m²의 막장면적으로 굴착되는 2차선 고속도로이다. 이 터널은 자립할 수 없는 파쇄된 막장으로 인해 여러 가지 대책 보강공법이 필요하였

고 실제 시공하였던 터널이다. 이상 현상이 발생한 현장에서, 막장자립도 향상을 위해 채택하거나 계획한 4가지 대책공법은 막장 슛크리트, 막장 볼트, 링켓, 기계식 굴착이다. 터널의 자료는 전체길이 1310 M의 구간 중 500 M의 구간에 대해 조사한 131개의 막장자료이다(Chikahisa H.; Matsumoto K.; Nakahara H.; and Tsutsui M., 1997).

4.2 현장별 주요 보강공법 및 현안

한강 하저부의 지질상태는 깊게 발달된 풍화대, 단층 및 파쇄대, 충전물을 협재하는 절리면의 발달 등 지질구조적으로 심하게 교란되어 있고 공학적으로 매우 취약한 지반상태를 보여 터널을 굴착하기에 앞서 굴착전방의 지질상태를 확인하고 지반보강을 시행하였다. 전방의 지반상태를 확인하기 위하여 수평선진 시추(core boring)방법을 사용하였으며 L.W 그라우팅으로 지반보강하고 상부 굴착면 파쇄절리 봉합과 소규모 낙반 방지를 위한 강관 보강형 다단 그라우팅공법의 작업을 실시하였다. 파쇄대에서는 기계굴착(road header, ITC) 방법을 사용하였다(우종태; 서강천, 1996).

부산지하철은 지반, 입지조건 및 주변환경 등 제반여건을 고려한 후 우레탄을 사용하여 지반을 강화하고자 하였다. 그러나 예상보다 지질상태가 좋지 않고, 풍화대, 단층 및 파쇄대 등으로 교란되어 있어 강관보강형 다단 그라우팅을 이용한 보강공법으로 전환하여 막장의 안정성을 확보하였다. 지반상태가 열악하였던 일부구간에서는 링켓 분할공법을 채택하였고, 막장상황에 따라 막장면 슛크리트공법과 인버트 설치 등을 통한 막장폐합으로 막장붕락을 방지하였다. 또한, 막장상황에 따라 구간별로 굴진장을 변화시켰다.

4.3 구간별 현장 적용성 평가

본 연구에서 개발한 시스템의 신뢰성을 검증하기 위하여 위에서 소개한 국내의 2개 현장과 국외의 터널현장의 터널 보강공법 데이터베이스를 이용하였다. 한강하저터널 검증에서 사용한 터널 보강공법 데이터베이스 변수는 모두 8가지 항목이다. 8가지 변수는 막장 슛크리트, 강관 보강형 다단 그라우팅, 링켓, 기계굴착, 막장폐합, L.W 그라우팅, 굴진장 축소, 휘폴링으로 현장의 시공에서 사용했던 보강공법을 바탕으로 선택하였다. 부산지하철의 경우는 6가지 공법으로 데이터베이스를 구성하였다. 막장안정을 위해 사용했던 주된 방법인 6가지 항목으로는 막장 슛크리트, 강관 보강형 다단 그라우팅, 링켓, 기계굴착, 막장폐합, 굴진장 축소가 해당된다.

일본의 도로터널의 검증에는 막장에서 사용한 4가지 대책공법을 이용하여 터널대책공법 D/B를 구축하였다. 여기서 사용한 4가지 항목은 막장 슛크리트, 막장볼트, 링켓, 기계굴착으로 이 터널에서 사용했던 주요 보강공법을 선정하였다. 국내·외 보강공법 적용 사례에서도 볼 수 있듯이 본 시스템을 위한 보강공법 항목 선정은 현장에서 많이 적용하고 있는 보강공법들을 대상으로 하였다.

4.4 터널 시공 중 보강공법의 예측 결과

한강하저터널 검증을 위해 현장의 시공에서 사용했던 보강공법을 근거로 모두 8가지 항목변수를 선정하여 보강공법 데이터베이스를 구성하였다. 터널정보 D/B를 구축하는데 사용하였던 104개의 터널현장 자료를 제외한 나머지 29개의 막장자료를 입력데이터로 이용하여 추론한 터널 안정성 등급과 보강공법의 적합도를 실제현장에서 사용하였던 자료와 비교하였다. 한강하저터널에서 사용된 8

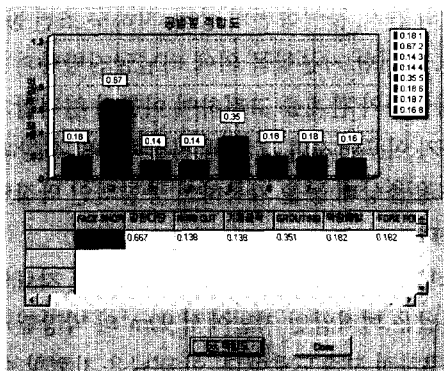


그림 8. 제 40막장에 대한 각 공법의 적합도

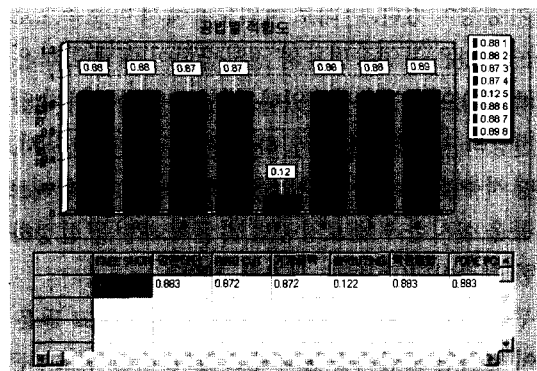


그림 9. 제 60막장에 대한 각 공법의 적합도

표 5. 한강하저터널의 막장별 퍼지추론 결과

막장 번호	1	2	3	4	5	6	7	8
제1 소속도 함수에서의 소속도								
주의레벨 A	0.96	0.09	0.81	0.78	0.64	0.93	0	0
주의레벨 B	0.04	0.91	0.19	0.22	0.36	0.07	0.98	0.01
주의레벨 C	0	0	0	0	0	0	0.02	0.99
주의레벨 D	0	0	0	0	0	0	0	0
퍼지추론결과								
막장 슛크리트	0.18	0.63	0.35	0.36	0.43	0.23	0.67	0.88
강관 보강형 다단 그라우팅 공법	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.88
링 컷	0.14	0.33	0.22	0.22	0.27	0.16	0.34	0.87
기계식 굴착	0.14	0.33	0.22	0.22	0.27	0.16	0.34	0.87
L.W 그라우팅	0.35	0.74	0.41	0.42	0.47	0.37	0.86	0.12
막장폐합	0.18	0.63	0.35	0.36	0.43	0.23	0.67	0.88
굴진장 축소	0.18	0.63	0.35	0.36	0.43	0.23	0.67	0.88
휘폴링	0.16	0.78	0.31	0.33	0.42	0.2	0.89	0.89

가시 보강공법의 적용성을 추론한 결과 막장면 슛크리트, 링컷, 기계굴착, 막장폐합, 굴진장축소, 휘폴링 공법은 터널 안정성에 높은 상관성을 보였으며, 강관 보강형 다단 그라우팅, L.W 그라우팅 공법 등은 터널 안정성 등급과 낮은 상관성을 보였다. 낮은 상관관계를 보인 항목은 지반의 상태가 매우 열악했던 현장의 상황이나 시공의 어려움으로 인해서 막장의 상태에 따라 변화를 주기보다는 안전성을 많이 고려하여 시공한 것으로 추정된다. 표 4에서는 한강 하저터널의 데이터베이스에 포함시키지 않은 8개 막장에 대한 추론결과를 비교해서 보여주고 있다. 그림 8은 표 4의 1번 막장에 대해 추론한 각 공법의 적합도값을 보여주고 있다. 1번 막장의 터널 안정성 등급이 가장 높은 A에 해당되기 때문에 강관 보강형 다단 그라우팅과 L.W 그라우팅을 제외한 모든 공법들의 적용성이 낮게 나타나고 있다. 그림 9는 표 4의 8번째 막장에 대해 추론한 각 공법의 적합도값을 나타낸다. 8번째 막장의 안정성 등급이 C이기 때문에 L.W 그라우팅 항목을 제외한 모든 공법의 적합도가 높은 값을 보인다. 강관 보강형 다단 그라우팅, L.W 그라우팅 공법이 막장의 안정성과 적합도에서 한강하저터널의 지반상태가 매우 열악하여서 막장의 상태의 변화와 상관없이 보수적인 시공을 했기 때문으로 추정된다.

부산지하철의 경우는 6가지 보강공법으로 데이터베이스를 구성하였다. 링컷, 기계굴착, 막장폐합은 터널의 안정성과 비교적 높은 상관성을 가지지만, 막장면 슛크리트, 강관 보강형 다단 그라우팅, 굴진장 축소 항목은 터널 안정

표 6. 부산지하철의 막장별 퍼지추론 결과

Sample 번호	10	65	75	90	180
제1 소속도 함수에서의 소속도					
주의레벨 A	0.001	1.0	0	0	0
주의레벨 B	0.998	0	0.999	0.999	0
주의레벨 C	0.001	0	0.001	0.001	0.999
주의레벨 D	0	0	0	0	0.001
퍼지추론결과					
막장 슛크리트	0.33	0.11	0.33	0.33	0.56
강관 보강형 다단 그라우팅 공법	0.44	0.11	0.44	0.44	0.33
링 컷	0.11	0.11	0.11	0.11	0.67
기계식 굴착	0.11	0.11	0.11	0.11	0.67
막장폐합	0.11	0.11	0.11	0.11	0.67
굴진장 축소	0.89	0.44	0.89	0.89	0.44

성 등급과 낮은 상관성을 보였다. 낮은 상관성을 갖는 공법은 터널상태에 따라 다양한 보강공법을 적용하기보다는 안전성을 고려하여 보수적인 측면에서 시공한 것으로 보인다. 표 5에서는 부산지하철터널 데이터베이스에 포함시키지 않은 6개 막장에 대한 퍼지추론 결과를 보여준다.

해외의 자료로서 이용한 일본의 도로터널은 전체 길이 1310m 중 500m 구간에 대해 조사한 131개의 막장자료 중

표7. 일본도로터널의 막장별 퍼지추론 결과

막장 번호	1	2	3	4	5
제1 소속도 함수에서의 소속도					
주의레벨 A	0	0	0	0.10	0.36
주의레벨 B	0	0.11	0.25	0.85	0.64
주의레벨 C	0	0.89	0.75	0.14	0
주의레벨 D	1.0	0	0	0	0
퍼지추론결과					
막장면 슛크리트	0.89	0.72	0.62	0.54	0.31
막장 볼팅	0.89	0.62	0.57	0.39	0.31
링 컷	0.67	0.33	0.32	0.30	0.12
기계식 굴착	0.67	0.62	0.56	0.31	0.12

38개의 자료를 임의로 선택하여 터널 정보 D/B를 구축하였으며, 터널 정보 입력항목으로는 국내 현장과 동일하게 구성하였다. 표 7은 일본의 도로터널 보강공법 적합성의 검증에 사용한 5개 막장의 추론결과이다. 터널 안정성 등급과 각 공법과의 상관계수를 통해 터널 안정성 등급과 보강공법의 시공관계를 비교한 결과 각 공법과 터널 안정성 등급의 상관계수는 높은 수치를 나타내었다. 이러한 결과는 막장에 안정성에 적절한 보강이 이루어지고 있음을 말해준다.

5. 전문가시스템을 이용한 추론결과의 고찰

각 현장의 터널 정보 데이터베이스를 이용하여 막장 안정성과 막장계측 항목과의 상관계수 및 편상관 계수를 살펴보았다. 두 계수는 각 터널변수와 터널 안정성 등급과의

관계를 나타내는 지표로서 상관계수의 경우는 터널 안정성 등급에 따른 각 터널변수들의 등급정도를 나타내 주며, 편상관계수는 다른 변수를 고정하였을 때, 터널 안정성 등급에 대한 각 터널변수의 효과를 말해준다.

그림 10은 한강하저터널의 각 터널 변수와 터널 안정성 등급에 대한 상관계수 값과 편상관계수 값을 비교하여 보여준다. 일축압축강도, 풍화정도, 절리간격, 절리 상태는 터널 안정성 등급과 높은 상관성을 보이고 있으며, 절리방향과 지하수는 낮은 상관계수값을 보인다. 이러한 상관계수값들은, 일축압축강도와 풍화정도(RQD), 절리간격, 절리상태가 막장의 등급과 비슷한 값을 가지고 있고, 절리방향과 지하수는 등급과 크게 일치하지 않는다는 의미를 가진다. 한강하저터널의 시공당시 매우 중요한 변수였던 지하수 항목이 막장 안정성과 낮은 상관성을 보인 이유는 비교적 낮은 지하수상태에서도 안전성을 고려하여 보수적인 보강을 했기 때문인 것으로 추측한다. 편상관계수값은 일축압축강도, 절리상태, 절리간격, 절리방향, 풍화정도, 지하수의 순서로 나타났다. 편상관계수값이 높은 순으로 막장 안정성에 미치는 영향이 크므로 일축압축강도와 절리상태, 절리간격 항목이 막장 안정성 등급에 영향이 큰 인자였음을 추론할 수 있다. 그림 11은 한강하저터널의 막장 안정성과 보강공법과의 상관계수를 보여준다. 막장면 슛크리트, 링컷, 기계굴착, 막장 폐합, 굴진장 축소, 휩폴링은 막장 안정성 등급과 매우 높은 상관관계를 보이고 있다. 그러나, 강관 보강형 다단 그라우팅 공법과 L.W 그라우팅은 막장 안정성과 낮은 상관관계를 가진다. 높은 상관관계를 보이는 항목들은 본 연구의 기준으로 볼 때 막장 안정성에 적합한 합리적인 시공을 시행하였다고 볼 수 있다. 강관 보강형 다단 그라우팅 공법과 L.W 그라우팅이 낮은 상관관

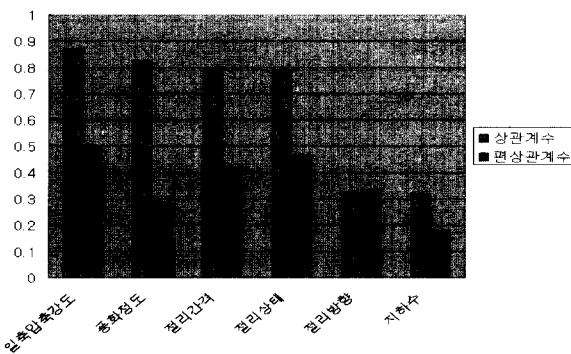


그림 10. 한강하저터널의 막장 안정성 등급과 막장관찰 항목과의 상관계수 및 편상관계수

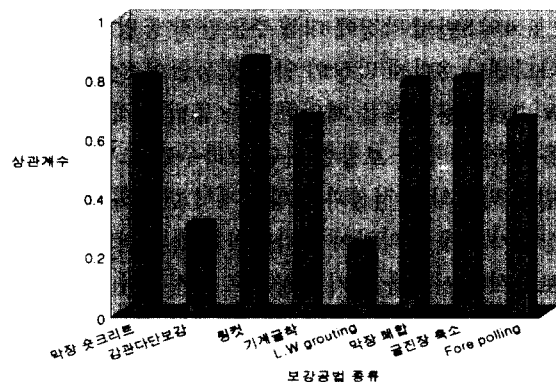


그림 11. 한강하저터널의 막장 안정성과 보강공법과의 상관계수



그림 12. 부산지하철의 터널 안정성 등급과 막장관찰 항목과의 상관계수 및 편상관계수

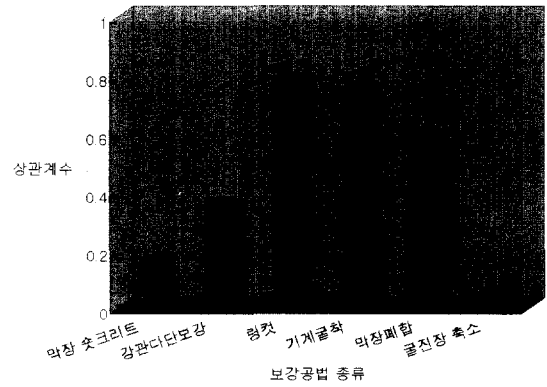


그림 13. 부산지하철의 막장 안정성과 보강공법과의 상관계수

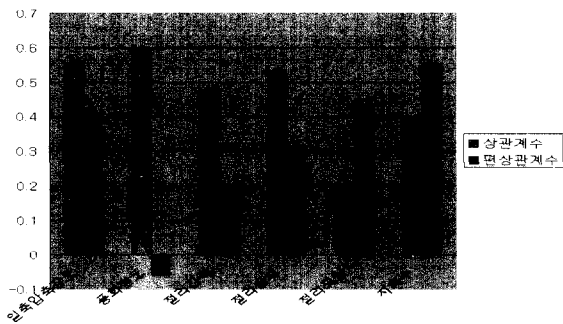


그림 14. 국외터널의 막장 안정성 등급과 막장관찰 항목과의 상관계수 및 편상관계수

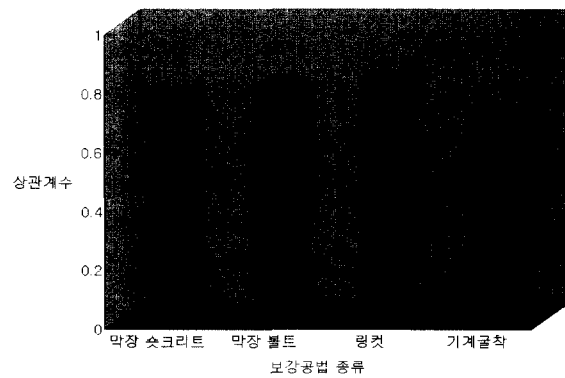


그림 15. 국외터널의 막장 안정성 등급과 보강공법의 상관관계

계를 보인 이유는 한강하저터널의 취약한 지반상황으로 인해 막장의 상태의 변화에 크게 상관없이 보수적인 시공을 한 결과로 보여진다.

부산지하철 터널의 각 터널 변수와 터널 안정성 등급에 대한 상관계수 값과 편상관계수 값을 그림 12에서 비교하여 보여준다. 일축압축강도, 풍화정도, 절리간격, 절리조건, 지하수 항목은 터널 안정성 등급과 높은 상관성을 가지고 있지만, 절리방향은 낮은 상관관계이다. 절리상태에 대해서 매우 높은 편상관계수 값을 가지므로 이 현상의 터널 안정성 등급은 절리의 상태에 영향을 받게 됨을 알 수 있다. 각 변수들이 터널안정에 영향을 미치는 정도는 절리상태, 지하수, 터널의 간격, 일축압축강도, 절리모양, 풍화정도의 순서이다. 그림 12는 부산지하철 ○○공구의 터널 안정성 등급과 터널 보강공법과의 상관관계를 보여준다. 링컷과 기계굴착, 막장폐합의 경우는 터널 안정성 등급과 비교적 높은 상관관계를 보이지만, 막장스프리트, 강관보강형 다단 그라우팅 공법, 굴진장 축소 항목은 매우 낮은 상

관성을 보이고 있다. 터널 시공상황에 따라 다를 수가 있겠지만, 상관계수가 높은 항목은 본 연구에서 사용한 터널 안정성 등급의 기준에 비례하는 경제적인 시공을 하였다는 사실을 말해주며, 상관계수가 낮은 항목들은 터널 안정성 보다는 시공의 편의성이나 안정성 측면을 강화한 보수적인 시공의 가능성이 크다고 볼 수 있다.

일본 터널자료의 터널 안정성 등급과 막장관찰항목과의 상관계수와 편상관계수를 그림 14에서 보여준다. 일축압축강도와, 풍화정도, 절리상태 및 절리간격은 높은 상관성을 보이고 있으며, 절리모양과 지하수는 비교적 낮은 영향을 보이고 있다. 반대로, 편상관계수는 지하수가 가장 큰 값을 보이고 있으므로 이 현상은 막장 안정성 등급이 지하수에 매우 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다. 그림 15.1에서는 일본 현장에서 시공했던 보강공법과 터널 안정성 등급과의 상관관계를 보여준다. 4가지 공법 모두가 높은 상관관계를 보이고 있어 막장의 상태에 따른 합리적인 시공이 이루어졌음을 짐작할 수 있다.

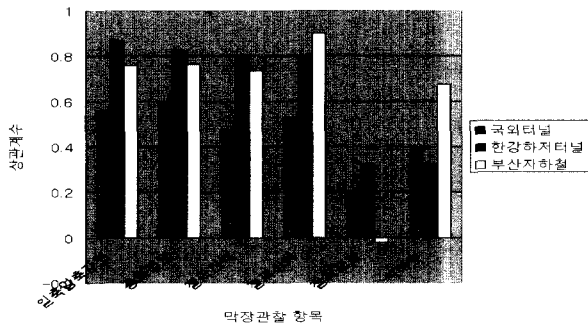


그림 16. 각 현장의 막장 안정성 등급과 관찰항목과의 상관계수 비교

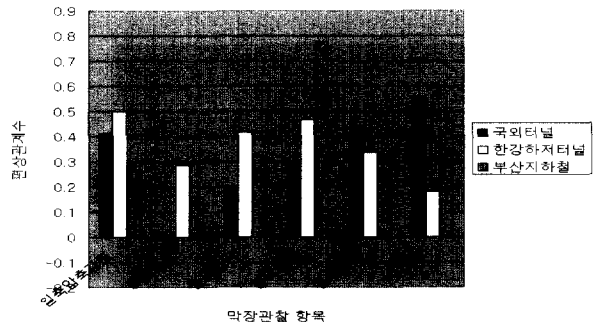


그림 17. 각 현장의 막장 안정성 등급과 관찰항목과의 편상관계수 비교

그림 16에서는 세 현장의 막장 안정성 등급과 막장 관찰 항목들과의 상관관계를 비교하여 보여준다. 현장에 따라 차이가 있지만, 일축압축강도, 풍화정도(RQD), 절리간격, 절리상태는 모든 현장에서 비교적 높은 상관성을 보이고 있다. 이에 비해 절리모양(절리방향)은 낮은 상관관계를 나타낸다. 부산지하철의 경우는 지하수 항목이 다른 현장에 비해 높은 상관성을 보이고 있다. 그림 17은 각 현장의 막장 안정성 등급과 막장관찰항목들과의 편상관계수를 비교하여 보여준다. 편상관계수는 각 현장마다 다른 값을 보여준다.

본 연구에서 검증에 사용했던 세 현장의 추론결과를 통해 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다. 먼저, 국내에서 막장야장으로 사용하고 있는 RMR 항목들과 막장 안정성 등급과의 상관계수 및 편상관계수를 조사하였을 때 몇 가지 항목에서는 공통적인 관계를 보였지만, 현장마다 많은 차이를 보이고 있다. 특히, 편상관계수의 값이 상이하게 나타남으로써 각 현장마다 막장의 안정성에 영향을 미치는 인자가 다르다는 것을 밝혀냈다. 이러한 사실은 막장야장에서 사용하는 항목들에 대한 보다 깊은 연구를 통해 현장에 따라 중요한 영향을 미치는 변수를 고려하여 보강공법을 시공해야 할 필요성을 제기한다. 현재, 도심지 지하철시공의 경우 주변의 구조물에 대한 영향인자를 무시할 수 없다. 주변의 구조물의 의한 영향이나 도심지 천층터널의 경우 중요한 변수로 작용하는 상부압 등의 항목의 영향에 대한 연구를 통해 RMR 항목 외에도 터널 안정성에 중요한 영향을 미치는 이러한 항목을 막장야장에 포함시켜야 한다.

두 번째로, 막장 안정성과 시공한 보강공법과의 상관관계를 통해 막장의 안정성과 상관없이 시공되고 있는 항목들을 발견하였다. 특히, 국내현장에서 적용했던 보강공법

의 경우 국외 현장에서 시공하였던 보강공법보다는 낮은 상관성을 보인 항목이 많았다. 현장의 특수한 상황이나 다른 요인을 고려하여 시공하였을 수도 있지만, 안전을 위해 지나친 보강을 했거나 보강의 기준이 불분명하여 경제적인 시공을 하지 못했을 가능성이 크다. 이러한 사실로 볼 때 국내에서도 합리적인 보강공법을 위한 세부적인 기준에 대한 연구가 필요하다.

6. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 퍼지 수량화 이론과 퍼지 추론 시스템을 기반으로 터널 정보 데이터베이스를 구축하여 터널 현장의 안전성을 분석하고, 적절한 보강공법을 선정할 수 있는 프로토타입 전문가시스템을 개발하였다. 인공지능을 이용한 정보화시공을 통해 터널 막장기록과 계측자료의 이용을 극대화하고 객관적인 기준의 부재로 인해 일부 전문가의 경험에만 의존하는 국내 보강공법 기술을 보다 발전시켜 합리적이고 세부적인 보강공법을 제시하는데 도움이 되고자 하였다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 퍼지 수량화 이론과 퍼지 추론 시스템을 바탕으로 터널 정보 데이터베이스를 구축하여 터널 현장의 안전성을 분석하고 적절한 보강공법을 선정할 수 있는 프로토타입 전문가시스템을 개발하였다.
- (2) 개발한 시스템의 검증을 위하여 다양한 보강공법을 시공하였던 한강하저터널을 비롯한 국내·외 3곳의 터널 현장에서 적용한 결과 실제 시행한 보강공법과 근접한 추론결과를 보였다.
- (3) 국내에서 막장 관찰기록 항목으로 사용하고 있는

RMR 분류 인자들과 터널 안정성과의 상관계수 및 편 상관계수를 비교하였을 때 몇 가지 항목에서는 공통적인 관계를 보였지만, 현장마다 많은 차이를 보였다. 편 상관계수의 값을 통해 각 현장마다 터널 안정성에 영향을 미치는 인자가 다르게 나타난 사실은 막장에서 관찰하는 항목들에 대해 현장마다 다르게 적용할 필요성을 말해 준다.

(4) 터널 막장 안정성과 시공한 보강공법과의 상관관계를 통해 막장의 안정성과 상관없이 시공되고 있는 항목들을 발견하였다. 국내현장에서 적용했던 보강공법의 경우 국외 현장에서 시공하였던 보강공법보다는 낮은 상관성을 보인 항목이 많았다.

본 연구를 토대로 하여 프로토타입 프로그램을 현장에서 적용 가능한 시스템으로 발전시키고 국내 각 현장의 터널정보 데이터베이스를 확장하기 위한 향후 주요 연구분야로는 다음과 같은 항목을 예상한다.

- (1) 터널 안정성 영향 인자의 확대 및 데이터베이스 확장 : 토피, 주변 구조물 등 중요 터널 변수의 연구와 국내 지역별 터널 정보 데이터베이스 축척 및 보강공법 정보의 분석
- (2) 보강공법 기준의 체계화 : 보강공법별 세부 적용 기준의 확립
- (3) 전문가 시스템 성능 향상 : 인터넷을 통해 현장적용이 가능한 시스템 구축

감사의 글

이 논문은 1999년 한국과학기술평가원의 주관하는 국가지정연구실사업비와 삼성물산(주) 건설부분의 연구지원비에 의하여 연구하였으며, 현장지원 등 연구개발에 협조해 주신 삼성물산(주) 건설부분에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. 김기태(1998), 인공지능의 기법과 응용, 기한재, pp. 157 ~ 179
2. 류성렬(1995), C언어에 의한 실용퍼지, 도서출판 세화, pp. 84 ~ 92
3. 배규진, 김장용, 신휴성, 문현구(1998), 터널 굴착현장에 인접한 지상 구조물의 안전성 평가용 전문가 시스템의 개발(I), 한국지반공학회지, 제14권, 제12호, pp. 107 ~ 123
4. 서울특별시 지하철건설본부(1996), (주)대우엔지니어링, 5-18공구 시공감리 종합보고서, pp. 658 ~ 711
5. 우종태, 서강천(1996), 한강 하저터널 지반 분석 및 보강공법, pp. 243
6. 이광형, 오길록(1995), Fuzzy 이론 및 응용 I, II, 홍릉과학출판사, pp. 1-1 ~ 2-32, 7-1 ~ 7-30 이상 I 권, 2-3 ~ 2-46 이상 II 권
7. 이성원, 조만섭, 이광호, 이석원, 배규진, 안영기(1999), 터널 콘크리트 라이닝의 상태평가를 위한 퍼지추론기법 연구, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제 9권, 제 4호, pp. 337 ~ 349
8. 지하철건설본부(1993), 터널의 설계 · 시공현황 및 개선방안, pp. 3 ~ 225
9. 한국건설기술연구원(1998), Neural Network을 이용한 터널 설계 적정성 평가용 Expert System 개발(I), 삼성물산(주) 건설부분 수탁연구보고서, p. 291
10. 한국건설기술연구원(1999), Neural Network을 이용한 터널 설계 적정성 평가용 Expert System 개발(II), 삼성물산(주) 건설부분 수탁연구보고서, pp. 137 ~ 157
11. 허명희(1998), 수량화방법 I · II · III · IV, 자유아카데미, pp. 31 ~ 60, pp. 7 ~ 100
12. 허명희(1995), 행렬의 이해와 계산, 자유아카데미, pp. 51 ~ 70
13. Chikahisa, H., Matsumoto, K., Nakahara, H. and Tsutsumi, M.(1997), Measurement Control Method and Expert System for Tunneling by Fuzzy Set Theory, Environmental and Safety Concerns in Underground Construction, Lee, Yang & Chung(eds), Balkema, Rotterdam, pp. 261 ~ 266
14. Fairhurst, C. and Lin, D.(1985), Fuzzy Methodology in Tunnel Support Design in Research and Engineering Applications in Rock Masses(ed. Ashworth, E.), Proc. 26th U.S. Rock Mechanics Symposium, Accord MA: International Publishers Service Inc., pp. 269 ~ 278
15. Watada, J., H. Tanaka & K.Asai(1982), Fuzzy Quantification theory type II. J. Measurement of Action, 9(2) pp.24 ~ 32
16. Watada, J., Tanaka, H. and Asai, K.(1982) A Heuristic Method of Hierarchical Clustering for Fuzzy Intransitive Relations, "Recent Development in Fuzzy Sets and Possibility Theory" edited by R.R. Yager, Pergamon Press Inc.
17. Yamagata, S., H. Chikahisa, S. Kurosaka, Y. Arai & H. Nakahara(1989), Development of measurement control system for tunneling. Tobishima Eng. Report, 40, pp.103 ~ 1171

(접수일자 2000. 8. 21)