

터널 막장안정성에 따른 보강공법 적용

Auxiliary Reinforcement Method for the Safety of Tunnelling Face



김창용*
Kim, Chang-Yong



박치현*
Park, Chi-Hyun



배규진*
Bae, Gyu-Jin



홍성완*
Hong, Sung-Wan



오명렬*
Oh, Myung-Ryul

Abstract

Tunnelling has been created as a great extent in view of less land space available because the growth of population in metropolitan has been accelerated at a faster pace than the development of the cities. In tunnelling, it is often faced that measures are obliged to be taken without confirmation for such abnormality as diverged movement of surrounding rock mass, growing crack of shotcrete and yielding of rockbolts. In this case, it is usually said that the judgments of experienced engineers for the selection of measure are importance and allowed us to get over the situations in many construction sites. But decrease of such experienced engineers need us to develop the new system to assist the selection of measures for the abnormality without any experiences of similar tunnelling sites. In this study, After a lot of tunnelling reinforcement methods were surveyed and the detail application were studied, an expert system was developed to predict the safety of tunnel and choose proper tunnel reinforcement system using fuzzy quantification theory and fuzzy inference rule based on tunnel information database. The expert system developed in this study have two main parts named pre-module and post-module. Pre-module decides tunnel information input items based on the tunnel face mapping information which can be easily obtained in-situ site. Then, using fuzzy quantification theory II, fuzzy membership function is composed and tunnel

*1 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

*2 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

*3 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

*4 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

*5 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 토목공사팀 팀장

safety level is inferred through this membership function. The comparison result between the predicted reinforcement system level and measured ones was very similar. In-situ data were obtained in three tunnel sites including subway tunnel under Han river. This system will be very helpful to make the most of in-situ data and suggest proper applicability of tunnel reinforcement system developing more reasonable tunnel support method from dependance of some experienced experts for the absent of guide.

Key words : Expert system, Fuzzy theory, Tunnel reinforcement, Tunnel construction, Safety evaluation,

요 지

터널 시공이 급격하게 증가되면서 터널 시공 중 발생하는 지반의 수렴하지 않는 거동과 슛크리트의 균열전파 및 록볼트의 항복과 같은 이상현상에 대해 특별한 기준 없이 대책을 마련해야 하는 경우를 종종 직면하게 된다. 이러한 경우, 여러 시공현장에서 문제들을 극복하는데, 숙련된 전문가의 판단이 중요하게 여겨졌으나, 전문가 확보와 경제적인 문제로 인해서 비슷한 시공현장의 경험 없이도 이상현상에 대한 대책을 선정하는데 도움을 줄 수 있는 새로운 시스템의 개발이 필요하게 되었다. 본 연구에서는 터널 시공 중 적용된 보강공법의 현황을 파악하고, 국내외의 구체적인 사례를 분석하였다. 또한, 터널 막장의 안전성 등급을 결정하고, 적절한 보강공법의 선정을 위해 퍼지 수량화 이론과 퍼지추론 시스템을 기반으로 터널정보 데이터베이스를 구축하여 전문가시스템의 모형을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 전문가 시스템은 크게 두 가지 기능을 가진다. 전반부 모듈은 현장에서 조사하기 쉬운 막장 기록항목을 중심으로 터널 정보 입력항목을 선정하고 퍼지 수량화이론 II를 이용하여 구성한 퍼지 소속도 함수(membership function)를 통해 터널 안정성 등급을 결정한다. 후반부 모듈은 전반부 함수와 터널 안정성 등급에 따라 적절한 보강공법의 적용성을 추론한다. 개발한 시스템의 검증에 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 계측자료의 이용을 극대화하고 객관적인 기준의 부재로 인해 일부 전문가의 경험에만 의존하고 있는 국내 보강공법 시공기술을 보다 발전시켜 합리적인 세부적인 보강공법을 제시하는데 도움이 되고자 하였다.

주요어 : 전문가 시스템, 퍼지이론, 터널보강, 터널시공, 터널 안정성

1. 서론

최근 서울지하철 제 1, 2기 시공에 이어서 제 3기 지하철 발주가 이루어지고 있는 시점에서 국내 업체에도 그동안 많은 터널설계 및 시공 경험이 축적되어 왔다(지하철 건설본부, 1994). 특히, 지하철의 경우 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 도심지역의 지하철 터널붕락은 곧 과대한 사유재산의 피해와 공

공시설의 기능마비를 초래할 뿐만 아니라, 지하철 건설 자체의 공사비 증가와 공기지연을 유발시켜 막대한 국가적 손실을 초래하기 때문에 붕락방지를 위한 최선의 대책들이 우선적으로 연구되어야 하고, 이를 위해서는 기존의 사례들에 대한 체계적 분석 및 검토를 요구하고 있다. 또한, 전 세계적으로 발생된 터널 붕락 사례를 종합해 보면, 도심지역에서 발생된 사고가 전체의 67%이상을 차지하고 있어서 각종 건물 및 구조물들이 산재해 있는 도심지구간에서의 터널 시공에 매우 세심한 주의를 기울여야 함을 보여주고 있다(HSE, 1996).

본 연구에서는 국내외적으로 적용하고 있는 터널 보강

공법시공 사례들을 조사·분석하고, 아울러 이와 연계하여 불안정한 상황별로 보강공법체계를 분류하여 이를 통합할 수 있는 fuzzy 추론을 이용한 전문가 시스템 모형을 개발함으로써 시공 상황에 대한 정보를 토대로 미래에 발생 가능한 불안정한 상황에 대한 대책공법을 제시하고자 하였다.

2. 국내외 터널 보강공법 적용 현황

국내외 터널 보강공법 적용사례를 분석하기 위해서 국내에서 발표된 보강공법 적용사례와 일본 및 이탈리아 등 문헌에 보고된 많은 사례들에 대해서 그 적용 추이를 터널 용도별로 그리고, 보강공법별로 비교·분석하고 국내

표 1. 국내 주요 터널 보강공법 적용사례

주요공법	적용 사례	목적
약액주입 공법	<ul style="list-style-type: none"> 경부고속전철 6-00공구(우레탄) 서울지하철 6-00공구 Route6(우레탄) 서울지하철 5-00공구(우레탄, S.G.R) 서울지하철 5-00공구 (우레탄) 서울지하철 6-00공구 13k-300,320,340,390 서울지하철 6-00공구 14k-598,603,608,614,620,630,640 서울지하철 6-00공구15k-430(갱내,지상) 과천선 00공구 9km-10km 서울지하철 5-00공구(우레탄,S.G.R), 안양천(packer grouting, root milk grouting, 갱내(SGR), 지상grouting) 	지반개량, 차수, 막장 자립, 막장부 여굴방지, 지하수과다 유입 차단
휘폴링 공법	<ul style="list-style-type: none"> 서울지하철 7-00공구 25k-121 서울지하철 7-00공구 26k-570 서울지하철 6-00공구 13k-300,320,340,390 서울지하철 6-00공구 14k-160 서울지하철 6-00공구 18k-620,19k-990,480 (선별적) 서울지하철 6-00공구 25k-430,460 과천선 00공구 9km-10km 서울지하철 5-00공구 	막장자립, 천단부위의 진행성 여굴방지, 전방지반 선행보강, 크라운부 보강
강관 보강형 다단 그라우팅공법	<ul style="list-style-type: none"> 서울지하철 7-00공구 47k-010 서울지하철 6-00공구 14k-598,603,608,614,620,630,663 서울지하철 6-00공구 15k-430 분당선 00공구 10k-560,590 	천단보강, 단층 파쇄대 및 파쇄절리의 변위발생 억제, 상부 굴착면의 안정확보, grouting에 의한 차수효과 증대, 터널천단 보호
파이프루프 공법	<ul style="list-style-type: none"> 서울지하철 5-00(mini pipe roof) 서울지하철 7-00공구 24k-806 서울지하철 5-00공구 부산 황령산 터널 전포동 서울지하철 5-00공구 	막장안정, 상재하중, 투수계수가 낮은 점토성 지반, 지반 이완의 방지, 굴착면의 붕락 및 유출방지, 크라운부 보강
동결공법	<ul style="list-style-type: none"> 서울지하철 5-00 공구 	차수, 지반개량
강섬유 보강 슛크리트	<ul style="list-style-type: none"> 서울지하철 6-00공구 19k-990 	지반개량
제트그라우팅	<ul style="list-style-type: none"> 지하철 5호선 00공구(갱문, 수평 jet grouting) 	지반개량, 지반이완 방지
M.I.P	<ul style="list-style-type: none"> 서울지하철 5-00공구(concrete pile) 	차수

에서 향후 적용되어야 할 보강공법 분류 기준 및 선정기준 등을 도출하기 위한 조사·분석 연구를 수행하였다.

국내의 경우 수집된 현장 자료 및 문헌보고 자료를 토대로 터널의 보강공법의 적용현황과 적용공법을 분석하였으며, 국외의 경우는 주로 문헌에 보고된 사례를 기반으로 적용현황과 적용공법을 분석하였다. 각 적용공법은 국내의 도로설계편람(1999)과 일본의 지오프론트 연구회 분과회(안)(1996)에서 소개된 보강공법 분류표를 참고하였다.

국내의 적용사례는 국내 터널 보강공법 분류표를 바탕으로 국내 현장에서 시공되었던 보강공법을 조사하였다. 표 1은 터널 보강공법을 주요 공법별로 분류하고, 각 적용사례와 보강공법 적용목적을 보여주고 있다. 가장 많은 적용사례를 보인 공법이 약액주입 공법이고, 휘폴링 공법, 강관 보강형 다단 그라우팅 공법, 파이프 루프 공법 순으로 적용되었다. 이외에도 동결공법, 강섬유 보강 슛

크리트, 제트 그라우팅, 앵커, M.I.P 등 특수한 공법들도 활용되고 있는 것으로 조사되었다.

국외 터널 보강공법의 적용실태를 파악하기 위해서 이탈리아에서 시공되었던 터널 보강공법 적용사례와 일본에서 시공되었던 사례를 조사하여 분석하였다(연재강좌 소위원회, 1995a, 1995b, 1999a, 1999b). 이탈리아의 경우, 천단부 안정대책으로 가장 많이 사용된 공법은 주입식 휘파일링(2) 공법이며, 고압분사식 휘파일링(1) 공법과 파이프루프 공법과 충전식 휘파일링 공법 순으로 적용되었다. 지보공 하부 안정대책으로는 레그파일(2) 공법이 가장 많이 사용되었다. 일본의 경우, 천단부 안정대책으로 가장 많이 적용된 공법은 주입식 휘파일링(1) 공법을 주로 사용하고 있고, 파이프루프 공법과 고압분사식 휘파일링(1) 공법이 적용되었다. 지보공 하부 안정대책으로는 지보공 하부 보강 볼트 공법을 가장 많이 적용하여, 이탈리아의 경우와 다른 경향성을 보여 주었다.

표 2. 지반조건별 보강공법 적용비율-96년 일본(사토 히사시, 1996)

보강공법 종류		기호	경암	연암 (암없음)	연암 (암있음)	경암+ 연암	암 +GS	암+C	모래· 자갈	사질토	점성토		계	비율 (%)
보강 공법 A	휘폴링	FP	126	57	12	65	33	16	4	5	0	13	331	33.8
	막장면록볼트	FB	17	13	7	10	6	4	1	1	0	7	66	6.8
	막장면스크리트	FC	50	22	9	29	17	10	2	2	2	12	152	15.2
	휘파일링	PP	29	15	5	19	14	7	1	3	0	11	104	10.6
	wing rib	FW	9	3	4	11	4	5	1	1	0	4	42	4.3
보강 공법 B	파이프루프	EP	13	9	1	17	6	2	0	1	0	2	51	5.2
	봉지볼트	H	3	6	2	5	3	2	0	0	0	2	23	2.4
	딤웰	WD	3	1	1	2	1	1	0	1	0	2	12	1.2
	월포인트	W	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	4	0.4
	배수보링	WB	32	11	2	14	7	2	2	1	0	4	75	7.7
	배수 갭	WT	3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	6	0.6
	막장약액주입	FG	13	4	5	16	7	4	0	1	0	5	55	5.6
	약액주입	G	16	6	0	20	10	0	0	0	0	6	58	5.9
계			315	149	48	206	111	53	11	16	2	68	979	100
NATM현장수		A											637	
적용 현장수		B											503	
적용비율(%)		B/A											79.0	

표 3. 일본 NATM 터널에서 보강공법 적용 추이

			86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
1	보강 공법 A	휘폴링	164	164	245	244	233	238	267	315	429	435
		막장면 슛크리트(spraying mirror)	51	49	48	72	89	92	63	70	124	152
		막장면 록볼트(mirror bolt)	35	26	29	47	34	43	35	39	50	66
		지보공 지지면적확대(wing rib)	0	0	0	0	0	0	18	20	32	42
		소계	250	239	322	363	356	373	383	444	635	695
2	보강 공법 B	약액주입공법(chemical grouting)	64	66	82	91	90	90	78	98	107	13
		수(水)대책공법	60	58	58	77	65	73	60	81	103	97
		봉지볼트	14	12	23	31	33	27	25	22	28	23
		파이프루프	28	17	55	55	48	56	50	49	55	51
		기타	18	18	21	18	14	10	16	10	23	17
소계	184	171	239	272	250	256	229	260	316	301		
3	보강공법 적용수		434	410	561	635	606	629	612	704	951	996
4	NATM 현장수		388	429	534	521	501	526	532	525	658	637
5	보강공법 적용 현장수		237	232	334	350	328	355	380	404	482	503
6	보강공법 적용비율(%)		61	54	63	67	66	68	71	76	73	79
7	NATM 현장의 보강공법수		1.12	0.96	1.05	1.22	1.21	1.20	1.15	1.34	1.45	1.56
8	산악터널 NATM화 비율(%)		57	68	75	79	77	83	84	83	84	86

(주) 수(水)대책공법은 배수공, 배수 boring, deep well, well point 공법의 합계, 기타는 산사태 방지 갭, 차단벽, 공기공법 등

표 2는 96년 NATM 터널에서 지반조건에 따라 적용한 보강공법 분포를 보여주며, 보강공법 분류는 전반적으로 보강공법 A와 보강공법 B로 분류하고 좀 더 세분화된 분류방식이 적용되고 있음을 알 수 있다. 보강공법 A는 현장에서 사용하는 설비·기계·재료 등을 그대로 사용할 수 있는 것으로, 굴착 후 보강공사의 시공이 완료되기까지 막장면의 자립을 유지하는 공법이며, 보강공법 B는 시공 중에 사용되는 기계설비로는 대체할 수 없어서 새로운 설비나 재료 등을 사용하여 안정성을 도모하는 경우의 공법을 의미한다. 전체적인 적용비율은 휘폴링 공법이 가장 많이 적용되었으며, 막장면 슛크리트, 휘파일링, 배수보링, 약액주입 공법, 파이프루프 공법 순으로 적용되고 있고, 비교적 타설 길이가 긴 휘파일링 공법의 사용빈도가 높아지고 있다. 또한, 일괄적으로 분석을 하였던 수대책 공법을 좀 더 세분화하여, 웰, 웰포인트, 배수보링, 배수 갭 등으로 분류하고 이들에 대한 사례를 첨가시키고 있는

것이 특징적이다. 특히, 현장의 장비나 재료 등을 사용하는 보강공법 A의 적용비율이 매우 큰 것으로 나타나서 현장의 상황에 적합하고, 현장에서 즉각적으로 대응할 수 있는 보강공법들을 선호하는 경향성이 두드러지게 나타나고 있다.

국내와 국외의 보강공법 적용사례를 비교해 볼 때, 국외의 경우 특히, 일본의 경우는 매우 세부적으로 보강공법을 분류하고, 이에 대한 사례 등도 지속적으로 분석하고 있는 반면(사토 히사시외, 1994, 1996), 국내에서는 아직까지도 체계화된 보강공법 적용사례에 대한 통계 분석이나 연구가 미흡함을 확인할 수 있었다. 표 3.은 최근 일본 내에서 시공된 NATM 터널을 대상으로 적용된 보강공법과 보강공법 적용건수, 터널 현장수 등, 주로 보강공법의 적용 추이를 통계적으로 조사·분석한 결과로서 1986년부터 1995년까지 10여년 동안 일본 내에서 시공된 NATM 터널 중 보강공법이 적용된 추이를 보여주고 있

다. 대체적으로 10년 동안 터널 현장 수 증가비율에 비해서 보강공법을 적용한 터널 현장 수 증가비율이 훨씬 앞서고 있고, 아울러 적용된 보강공법의 종류도 더욱 더 많아지고 있음을 알 수 있다.

1986년에 가장 많이 적용되었던 보강공법은 휘폴링, 약액주입 공법, 수대책공법, 막장면 슛크리트, 막장면 록볼트 순이었지만, 1995년에는 휘폴링, 막장면 슛크리트, 수대책공법, 막장면 록볼트 순으로 바뀌고 있고, 평균적인 보강공법의 적용 수도 많아지고 있다. 이러한 결과는 다양한 보강공법의 적용을 통한 기술 발전으로 인해 보다 효과적이고 경제적인 보강공법들이 적용되고 있음을 보여준다.

그림 1은 10년 동안의 각 터널 보강공법별 적용비율을

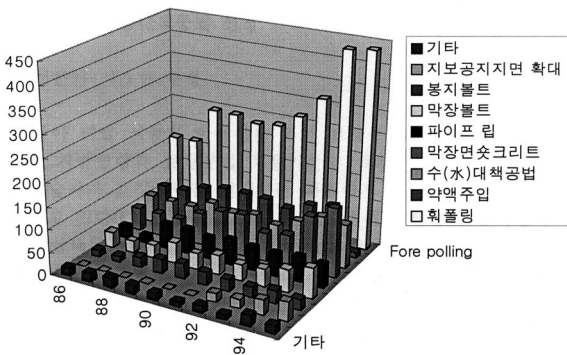


그림 1. 일본 터널 보강공법의 이용 변화(1986~1995)

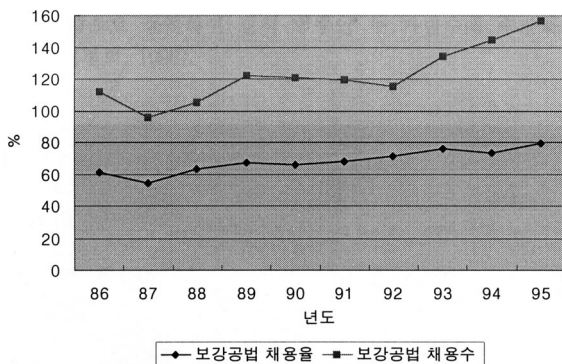


그림 2. 일본의 보강공법 적용율과 적용한 보강공법 수의 변화

비교해 본 결과이며, 그림 2는 10년 동안 터널 보강공법을 사용한 현장의 변화와 사용한 터널 보강공법 개수의 변화를 보여준다. 주로 현장에 있는 장비나 재료 등을 사용하는 보강공법 A의 증가 비율이 보강공법 B에 비해 뚜렷하게 높게 나타나고 있어서 현장에서 바로 활용 가능한 보강공법을 선호하고 있음을 알 수 있다. 터널 보강공법 적용비율은 전체 터널현장에 대한 터널 보강공법 적용 현장의 비를 백분율로 나타낸 것이고, 적용 개수는 전체 터널 현장 수에 대한 터널 보강공법 적용 수의 비를 백분율로 표현한 것이다. 시간이 지나면서 보강공법의 적용수도 많아지고 보강공법의 종류도 많아지고 있음을 쉽게 알 수 있다. 이러한 사실은 일본 터널 시공 현장에는 다양한 보강공법들이 적용되고 있고, 이와 함께 보강기술과 시공기준이 세분화되고 있다는 사실을 말해 준다.

이와 같이 일본의 보강공법이 지반의 상황에 따라 다양하게 세분화되고 있는 반면, 국내에서 보강공법을 선정하는 방법은 과거의 시공경험에만 의존하여 상대적으로 단순한 실정이다. 따라서, 보다 합리적인 보강공법의 선정과 적용을 위해서 지반자료와 시공정보를 이용한 터널보강공법 선정용 시스템의 개발이 요구되고 있다.

3. 퍼지 전문가시스템을 이용한 보강대책공법 선정

3.1 보강공법 선정용 전문가 시스템 구성

위에서 조사한 바와 같이 터널 시공의 안정성을 위한 보강공법의 선정에 있어서 합리적인 조치의 필요성이 요구되고 있으며, 지반상황과 보강공법 적용기준의 애매 모호함을 퍼지추론을 적용하여 적절하게 표현함으로써 터널 기술자가 보강공법을 선정하는 과정에서 보다 적절한 결정을 내리는데 도움을 주고자 하는 시도가 진행되고 있다(Chikahisa, 1997). 본 연구에서도 터널의 붕락방지과 안정성확보를 위해 각 터널조사 항목과 막장상태를 퍼지

집합으로 표현하여 보강공법의 적용성 정도를 추론하는 전문가 시스템을 구축하기 위한 단계로서 그림 3.에서 보여주는 프로토타입 퍼지추론 시스템을 개발하였다.

퍼지이론의 적용을 위해서는 소속도 함수의 구성이 무엇보다 중요하다. 다양한 자료와 전문가의 의견을 종합하여 보다 객관적인 소속도 함수를 수립하여야 하지만, 시공현장 정보와 숙련된 전문가의 부족으로 인해 소속도 함수를 만드는데 어려움이 있었다. 퍼지 규칙을 만들기 위해서 필요한 전문가의 부재와 다양한 현장정보 수집의 어려움을 보완하기 위해 수량화이론Ⅱ를 본 시스템에 적용하였다. 수량화이론Ⅱ를 이용하여 질적인 자료에 수량화 값을 부여해 소속도 함수를 구성하므로써 보다 객관적인 기준의 적용이 가능해졌다(Watada, 1982). 먼저, 질적변수인 막장의 상태를 외적기준으로 하고 터널정보 데이터베이스의 각 항목들이 설명변량으로 설정하여 질적 범주인 두 가변수에 수량화값을 부여한 다음, 퍼지 소속도 함수를 구성하게 된다(허명희, 1998).



그림 3. 터널시공 중 보강공법 선정용 전문가 시스템 모형

본 연구에서 개발한 터널 보강공법 선정용 전문가시스템은 크게 2부분으로 구성되어 있다. 그림 4.에서 보여주듯이 전반부에서는 터널 주변 지반조건, 지하수, 절리, 지지력, 인접구조물 등으로 이루어진 터널 정보 D/B를 바

탕으로 막장의 안정성을 나타내는 제 1 소속도 함수(firsr membership function)를 구성한다. 후반부에서는 터널 보강공법 D/B를 활용하여 각 터널의 등급에 따른 보강공법별 퍼지추론 규칙(fuzzy inference rule)을 추론한다. 이 퍼지추론 규칙은 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 시공현장의 터널정보를 입력하여 터널의 안정성 등급을 결정한다. 다음, 이미 구성된 퍼지추론 규칙을 이용해 비퍼지화(defuzzification)하면, 각 보강공법별 적용등급이 결정된다(Chikahisa, 1997).



그림 4. 터널 안정성 영향인자 데이터베이스 입력 모듈

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

터널 안정성에 미치는 영향인자를 크게 막장 관찰자료와 계측항목으로 구분하였으며, 본 터널 보강공법 선정용을 위한 프로토타입 전문가시스템을 구축하기 위하여 구성된 데이터베이스는 막장 관찰자료만을 포함하였다.

터널 안정성 등급 결정과 보강공법 선정을 위해 필요한 막장 관찰자료를 5가지 범주(category)로 구분하여 현장에서 자료 수집이 용이한 최소 항목을 선택하였다. 5가지 범주는 막장의 풍화상태, 절리, 지하수상태, 지지력, 인접 구조물 등이다. 5가지 조건 중 막장상태는 천정부, 측벽부 및 풍화정도로 세분화하였고, 절리항목은 절리간격, 절리모양, 절리상태, 절리방향 등으로 구분하였으며, 지하수는 유입량과 투수계수로, 지지력은 일축압축강도와 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 분류기준과 같으며 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.

3.3 터널 보강공법 D/B와 등급별 적합도를 위한 제 2 소속도 함수

이 모듈은 보강공법에 관한 데이터베이스를 입력, 수정, 저장 및 관리한다. 현재 수집한 데이터를 바탕으로 막장면 슛크리트, 막장면 록볼트, 링컷, 기계굴착, 강관보강형 다단 그라우팅, 막장 폐합, 굴진장 축소, 휘폴링 등의 항목만을 입력자료로 사용하였으며, 앞으로 다양한 항목의 추가가 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 퍼지추론 규칙을 찾는다. 각 변수의 등급별 수량화값 도표에서는 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 소속도 함수로 구한 퍼지추론 규칙을 이용해서 퍼지 합성값을 구하고 이 값을 비퍼지화하여 보강공법 적용등급을 추론한다. 이때, 비퍼지화는 센트로이드(centroid) 방법을 이용하였다(이광형 외, 1995).

3.4 현장 적용성 평가

본 연구에서 개발한 시스템의 신뢰성을 검증하기 위하여 국내의 2개 현장과 국외의 터널현장의 보강공법자료를 이용하였다. 한강하저터널 검증에서 사용한 보강공법 자료의 변수는 모두 8가지 항목이다. 8가지 변수는 막장 슛크리트, 강관 보강형 다단 그라우팅, 링컷, 기계굴착, 막장폐합, L, W 그라우팅, 굴진장 축소, 휘폴링으로 현장의 시공에서 사용했던 보강공법을 바탕으로 선택하였다(우종태, 서강천, 1996). 부산지하철의 경우는 6가지 공법으로 데이터베이스를 구성하였다. 막장안정을 위해 사용했던 주된 방법인 6가지 항목으로는 막장 슛크리트, 강관 보강형 다단 그라우팅, 링컷, 기계굴착, 막장폐합, 굴진장

축소가 해당된다.

일본의 도로터널의 검증에는 막장에서 사용한 4가지 대책공법을 이용하여 터널대책공법 D/B를 구축하였다. 4가지 항목은 막장 슛크리트, 막장볼트, 링컷, 기계굴착으로 이 터널에서 사용했던 주요 보강공법이다. 국내의 보강공법 적용 사례에서도 볼 수 있듯이 본 시스템을 위한 보강공법 항목 선정은 현장에서 많이 적용하고 있는 보강공법들을 대상으로 하였다(Chikahisa, 1997).

한강하저터널에서 사용된 8가지 보강공법의 적용성을 추론한 결과 막장면 슛크리트, 링컷, 기계굴착, 막장폐합, 굴진장축소, 휘폴링 공법은 터널 안정성에 높은 상관성을 보이며, 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 4는 한강하저터널의 막장별 퍼지추론 결과이다.

표 4. 한강하저터널의 퍼지추론 결과

막장번호	1	2	3	4	5	6	7	8
제1소속도 함수에서의 소속도								
주의레벨A	0.96	0.09	0.81	0.78	0.64	0.93	0	0
주의레벨B	0.04	0.91	0.19	0.22	0.36	0.07	0.98	0.01
주의레벨C	0	0	0	0	0	0	0.02	0.99
주의레벨D	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
링컷	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,W그라우팅	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

부산지하철의 경우, 링컷, 기계굴착, 막장폐합은 터널의 안정성과 비교적 높은 상관성을 가지지만, 막장면 슛크리트, 강관 보강형 다단 그라우팅, 굴진장 축소 항목은 터널 안정성 등급과 낮은 상관성을 보였다. 낮은 상관성을 갖는 공법은 터널상태에 따라 다양한 보강공법을 적용하기보다는 안전성을 고려하여 보수적인 측면에서 시공한 것으로 보인다. 표 5.에서는 부산지하철의 막장별 퍼지추론 결과를 보여준다.

일본 도로터널의 안정성 등급과 각 공법과의 상관계수를 통해 터널 안정성 등급과 보강공법의 시공관계를 비교한 결과 각 공법과 터널 안정성 등급의 상관계수는 높은 수치를 나타내었다. 이러한 결과는 막장의 안정성에 적절한 보강이 이루어지고 있음을 말해준다.

표 4에 나타난 한강하저터널의 추론 결과를 보면, 제1막장의 경우 막장의 안정성 소속도가 주의레벨A는 0.96, 주의레벨 B는 0.04, 주의레벨 C와 D는 0으로 나타나 안정함을 보여준다. 이 막장에 대해 추론한 보강공법의 적용성은 각각 막장 슛크리트 0.18, 강관보강형 다단 그라우

표 5. 부산지하철의 퍼지추론 결과

Sample 번호	10	65	75	90	1
제1소속도 함수에서의 소속도					
주의레벨A	0.001	1.0	0	0	0
주의레벨B	0.998	0	0.999	0.999	0
주의레벨C	0.001	0	0.001	0.001	0.999
주의레벨D	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
링컷	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

우팅 0.67, 링컷 0.14, 기계식 굴착 0.14, L.W 그라우팅 0.35, 막장폐합 0.18, 굴진장 축소 0.18, 휘폴링 0.16이 된다. 막장이 안정하므로 다른 항목들은 낮게 나타났지만, 강관보강형 다단 그라우팅과 L.W 그라우팅은 비교적 높게 나타났다. 이는 한강하저터널 시공시 막장변화에 따라 보강정도를 변경하지 않고 안전을 위해 일정한 보강을 했기 때문으로 사료된다.

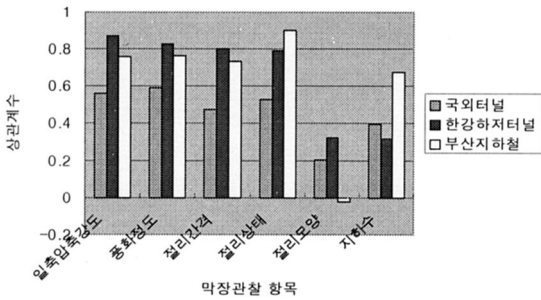


그림 5. 각 현장의 막장 안정성 등급과 관찰항목과의 상관관계수 비교

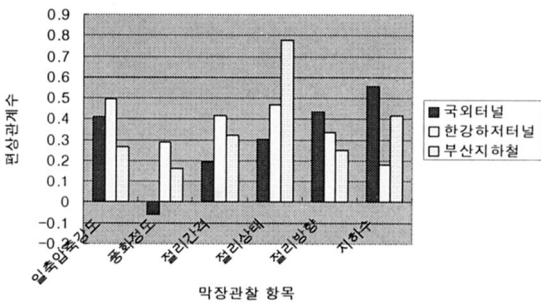


그림 6. 각 현장의 막장 안정성 등급과 관찰항목과의 편상관계수 비교

그림 5.에서는 세 현장의 막장 안정성 등급과 막장 관찰항목들과의 상관관계를 비교하여 보여준다. 현장에 따라 차이가 있지만, 일축압축강도, 풍화정도(RQD), 절리

간격, 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 6.을 통해서 각 현장의 막장 안정성 등급과 막장관찰항목들과의 편상관계수를 비교한 결과 편상관계수는 각 현장마다 다른 값을 보이는 것으로 나타났다.

4. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 국내외 터널 보강공법의 기준과 적용현황을 분석하여 세부적이고 합리적인 보강공법의 체계 확립을 위한 기초를 마련하고자 하였다. 또한, 합리적인 보강공법을 적용하기 위한 대안으로서 퍼지 수량화 이론과 퍼지 추론 시스템을 기반으로 터널 정보 데이터베이스를 구축하여 터널 현장의 안전성을 분석하고, 적절한 보강공법을 선정할 수 있는 프로토타입 전문가시스템을 개발하였다. 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) 국내외 터널 보강공법의 기준과 적용현황을 분석하여 세부적이고 합리적인 보강공법의 체계 확립을 위한 기초를 마련하고자 하였다.
- (2) 퍼지 수량화 이론과 퍼지 추론 시스템을 바탕으로 터널 정보 데이터베이스를 구축하여 터널 현장의 안전성을 분석하고 적절한 보강공법을 선정할 수 있는 프로토타입 전문가시스템을 개발하였다.
- (3) 개발한 시스템의 검증을 위하여 다양한 보강공법을 시공하였던 한강하저터널을 비롯한 국내외 3곳의

터널현장에서 적용한 결과 실제 시행한 보강공법과 근접한 추론결과를 보였다.

본 연구를 토대로 전문가시스템을 현장에서 적용하기 위해서는 국내 각 현장의 터널정보 데이터베이스로 축적하고 세부적인 보강공법에 대한 기준의 정립에 대한 연구가 선행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 삼성물산(주) 건설부분의 연구지원비와 1999년 한국과학기술평가원의 주관하는 국가지정연구실 사업비에 의하여 연구하였으며, 현장지원 등 연구개발에 협조해 주신 삼성물산(주) 건설부분에 심심한 감사의 뜻을 표한다.

참고 문헌

1. 대덕공영(주)(1995), 서울지하철 5호선 5-18공구 한강하저터널 막장 지반조사, pp.113
2. 사토 히사시, 다나카후지오(1994), "터널공사의 현황, 터널과 지하(일본)" 제 25권 11호, pp. 61 ~ 66
3. 사토 히사시, 다나카후지오(1996), "터널공사의 추이와 현황, 터널과 지하(일본)" 제 27권 12호, pp. 53 ~ 63
4. 「응용지질학」 연재강좌 소위원회(1999), "터널기술자를 위한 응용지질학입문(7)", 터널과 지하(일본) 제30권 9호, p. 72
5. 「응용지질학」 연재강좌 소위원회(1999), "터널기술자를 위한 응용지질학입문(8)", 터널과 지하(일본) 제30권 10호, p. 76
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. 「주입식 long 선진공법 입문」 연재강좌 소위원회(1995), "주입식 long 선수공법 Fore Polling 입문(1)", 터널과 지하(일본) 제26권 3호, pp. 73 ~ 79
8. 「주입식 long 선진공법 입문」 연재강좌 소위원회(1995), "주입식 long 선수공법(Fore Polling) 입문(최종회)", 터널과 지하(일본) 제26권 9호, pp. 75 ~ 81
9. 서울특별시 지하철건설본부(1994), 제 2기 서울지하철 터널 및 시공감리 종합보고서, pp. 530
10. 허명희(1998), 수량화방법 I · II · III · IV, 자유아카데미, pp. 31 ~ 60, pp. 7 ~ 100
11. Chikahisa, H., Matsumoto, K., Nakahara, H. and Tsutsui, 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
12. HSE(1996), Safety of New Austrian Tunnelling Method(NATM) Tunnels, pp. 15~28
13. Watada, J., H. Tanaka & K.Asai(1982), "Fuzzy Quantification theory type II." J. Measurement of Action, 9(2) pp.24 ~ 32.