

퍼지근사추론에 의한 폐터널의 보강방식 선정

조만섭^{1)*}

Determination of Reinforcement Method for Abandoned Tunnel by Fuzzy Approximate Reasoning

Man-Sup Cho

Abstract It is studied to select the reinforcement method of an abandoned tunnel which are intersected under the new roadway line. In the various decision makings, the reasonability for the reinforcement method of an abandoned tunnel was estimated using the pair-wise comparison and the fuzzy approximate reasoning to simplify the process of survey research. And there is reflected all the qualitative and quantitative characterizations by investigation items. In order to select the reinforcement method of an abandoned tunnel, 4 characteristic factors of construction, economical efficiency, safety and maintenance were used. Using the simple survey research and pair-wise comparison matrix, the weight of 4 factors was decided. The fuzzy approximate reasoning was used to calculate the quantitative value of each factor. And then reflecting each weight to these results, the final reinforcement method of an abandoned tunnel could be determined.

KeyWords Fuzzy approximate reasoning, Decision making, Abandoned tunnel

초 록 본 논문에서는 신규 터널노선과 교차하는 폐터널의 보강방식을 결정하기 위하여 의사결정기법을 검토하였고, 여러 가지 의사결정기법들 중에서 설문조사의 과정을 최소화하고, 조사항목 별 정성적·정량적 특성을 모두 반영할 수 있도록 쌍대비교와 퍼지근사추론을 이용하여 폐터널의 보강방식에 대한 적정성을 평가하여 보았다. 폐터널 보강방식을 선정하기 위하여 4개의 주 요인들 즉, 시공성, 경제성, 안전성, 유지관리를 평가의 수단으로 사용하였고, 간단한 설문조사와 쌍대비교행렬을 이용하여 4가지 주 요인들의 가중치를 결정하였다. 퍼지근사추론은 4개의 주 요인별 평가점수를 산정하는데 사용되어졌고, 이 결과들에 가중치를 반영하여 최종적인 폐터널의 보강방식을 선정할 수 있었다.

핵심어 퍼지근사추론, 의사결정기법, 폐터널

1. 서 론

교량, 터널, 댐, 항만 등의 대규모 토목설계에 있어서 다양한 조사항목에 대하여 정량적인 조사결과와 더불어 정성적인 매개변수들이 많이 고려되고 있다. 이러한 결과들을 이용하여 결국에는 여러 가지 공법들 중 이들을 만족하는 가장 적합한 공법을 선정하기 위해 다양한 의사결정기법이 적용되고 있다. 일반적으로 의사결정을 위해서는 프로젝트의 독특한 환경을 동시에 고려해야 하며, 정량적인 접근방법을 통해서 체계적인 선택이 요구되고, 의사결정에 따른 리스크도 수반된다. 또한

공사비 및 구조적 안정성이라는 정량적 요소와 함께 시공의 편의성이라는 정성적 요소를 동시에 고려해야 하기 때문에 의사결정에서 더욱 많은 어려움이 존재한다고 할 수 있다.

즉, 의사결정과정은 이와 같은 3가지 평가기준을 동시에 만족되도록 해야 한다. 의사결정기법 중 가장 일반적으로 적용되고 있는 AHP(analytic hierarchy process, 계층화분석기법)는 1970년대 Thomas L. Saaty에 의해 처음 개발되었고, AHP는 우선 문제의 요소를 최종 목표, 평가기준, 대안의 순으로 계층을 구성하고, 평가기준을 중심으로 가중치(weight)를 산출하고, 각 대안의 중요도를 산출하여 가장 중요도가 높은 대안을 최적으로 선정하는 방법이다^{1,2)}.

국내에서는 의사결정을 위해서 대부분 도표식 분석을 이용하는데, 건설기술관리법시행령(2000)에 의한

¹⁾ 정회원, SK건설(주) 토목사업부문 Geotask Team 과장

*교신저자(Corresponding Author): mscho-d@skcc.co.kr

접수일: 2004년 7월 9일

심사 완료일: 2004년 8월 23일

VE(value engineering), LCC(life cycle cost) 등 건설 공법 선정에 대한 의사결정기법과 Risk Assessment가 사용된바 있다^{3,4)}.

본 논문에서는 국도 25호선의 4차로 선형개량공사 설계시 노선과 매우 인접하여 교차하는 페터널의 보강방식을 결정하고자 국내의 대표적인 관련 자료들을 검토하였는데, 대부분 지반조사 결과를 이용한 수치해석적인 방법으로 안전성을 평가하는 방식이 주로 이루어졌다⁵⁻⁶⁾. 따라서 수치해석적인 구조물의 안전성 평가뿐만 아니라 경제성, 안전성 및 시공의 편의성 등을 고려하여 페터널의 통과방안에 대한 의사결정을 수행하였다. 이를 위하여 설문조사 결과로부터 의사결정에 필요한 가중치 산정 시 쌍대비교(pair-wise comparison)를 적용하였고, 조사항목 별 정성적·정량적 특성을 반영할 수 있는 방법으로 퍼지근사추론(fuzzy approximate reasoning)을 이용하여 페터널의 보강방식에 대한 적정성을 평가하여 보았다.

2. 검토대상 터널의 현황 및 조사결과 요약

2.1 신규터널 및 페터널의 현황

본 연구의 검토대상 터널은 『경상북도 청도군~경산

시 남천면』 경계에 위치하는 남성현터널(2차로·단선 병렬)로서, 국도 25호선의 4차로 선형개량을 위해 설계되었다. 본 터널 노선의 종점부에는 조적식 단선 폐철도 터널(대천성공터널)이 하부에 약 15° 사방향으로 교차하고 있다. 페터널의 준공연도는 미상으로 석축과 상부 2~4단의 조적식 라이닝을 고려하면 약 1930년대 전후로 추정된다.

Fig. 1과 Fig. 2에는 검토대상 터널과 페터널의 교차현황도 및 횡단면도를 각각 나타내었다. 그림에서 페터널 갱문에서 신규 터널 종점부까지는 중단선형에 따라서 암반층 벤치발파 구간이며, 페터널 천단과 도로 기초부까지는 2.0 m~5.3 m(공동구 trench 터파기) 이격거리로 매우 근접되어 있다. 그리고 신규 터널 NATM의 종점부분에서는 약 7.3 m 이격되어 있으며, 사방향으로 교차하여 이들의 이격거리는 점차 증가하고 있다.

본 터널의 원설계에서는 페터널 통과구간의 2차원 수치해석적 분석을 통하여 영향권을 약 20 m 이격된 지점까지 선정하였고, 페터널의 보강공법으로는 50 cm 무근콘크리트 라이닝과 잡석채움에 대해 비교하였으며, 시공성 및 경제성 등이 우수한 전자로 선정하였다. 그러나 페터널의 장래 활용계획 및 주변 지반조건, 페터널 안전진단 등 다양한 고려가 미흡하였고, 콘크리트

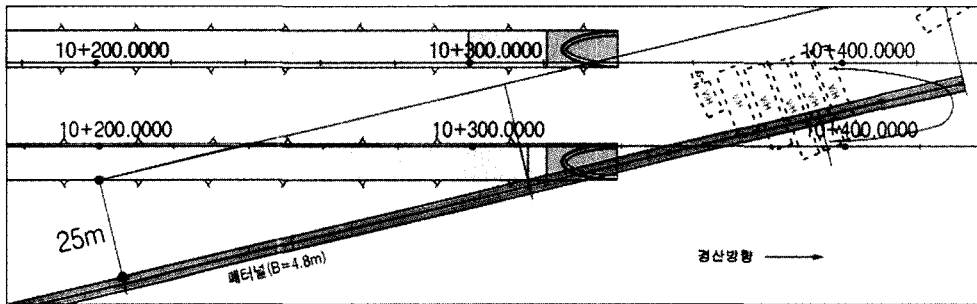


Fig. 1. Intersection layout of new tunnel and abandoned tunnel

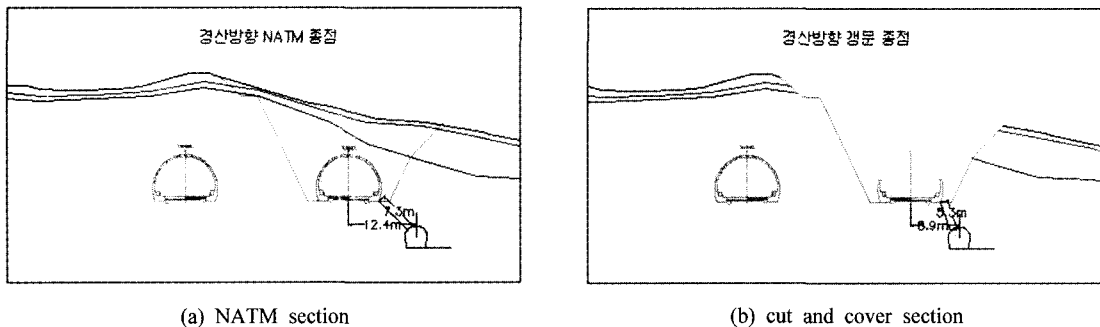


Fig. 2. Distances between the abandoned tunnel and new lane

라이닝으로 보강함에 따라서 운영 중 페터널의 안정성을 지속적으로 확보해야 하는 문제와 cut & cover 굴착을 위한 벤치발파 시 무진동 구간이 발생하여 경제성, 시공성이 다소 저하되는 문제점이 지적되었다.

2.2 페터널 주변 지반조사 결과

가. 지반조사

추가 시추조사는 4공을 실시하였고, 주변지반의 암종은 응회질 각력암, 안산암질 응회암, 화산암질 안산암이다. Table 1은 4개 시추공 중 페터널과 인접한 2개의 시추공별 터널 하부 1D구간에 대한 RMR분류를 실시한 것이며, 분포는 약 12~48값을 보이고 있다.

페터널과 인접한 경산방향 종점부 구간에서 실시한 전기비저항탐사 결과, 비저항이 약 36~554 Ωm으로 조사되었고, 페터널과 이격거리가 증가하면서 고비저항대를 통과하고 있다. Fig. 3(a)에는 『전기비저항 vs RMR 값』의 상관관계를 이용한 추정 RMR값의 분포를 나타내었고, 페터널과 약 2D이상(25 m)인 10+200지점부터 터널의 종점부로 진행할수록 RMR값이 급격하게 저하되고 있으며, 페터널과의 이격거리가 근접해 짐에 따라서 신규 터널의 안전성에 대한 문제가 제기 되었다. 병렬터널 횡방향에 대한 지반조건을 파악하기 위해 공내 탄성파탐사도모그래피를 2개의 시추공(ATB1-9와 ATB1-11)에 대해 수행하였고, Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이

경산방향 터널의 우측하부에 존재하는 페터널의 근접 구간 탄성파속도는 약 1.9~3.2 km/sec로 조사되어 III~VI등급의 분포를 나타내었다. 암반상태는 극경암~풍화암 등이 다양하게 나타나며, RQD도 17~78%로 매우 다양한 범위를 보였다. 특히 페터널과 경산방향 NATM 종점부가 교호하는 구간에서는 절리발달이 심한 상태로서 계곡부의 파쇄대 발생 가능성 등을 충분히 고려할 필요가 있다.

나. 페터널 안전성 평가(STA.10+040~10+440)

페터널과 근접·교차하는 신설 터널의 안전성을 확보하고, 위험요인과 페터널의 구조적 안정성 및 결함의 상태를 조사하기 위하여 정밀안전진단을 수행하였다. 안전진단 구간은 총 400 m에 대해 30 m씩 14 Span으로 구분하여 외관조사를 수행하였고, 간접 영향범위(210.0~400.0 m)구간에 대해서는 변상발생 여부에 중점을 두고 외관조사를 실시하였다. 정밀조사로서는 직접 영향범위(페터널 갭문 0.0~210.0 m)구간에 대해서 좌벽 3개소, 천단부 2개소에서 라이닝 배면 암반선 1.5 m까지 갭내시추를 실시하였으며, 이 시추공에서 내시경카메라 촬영을 실시하여 배면공동 여부를 파악하였다. 그리고 회수된 시추코어를 이용하여 RQD조사 및 강도특성시험을 실시하여 지반의 상태를 파악하였다. Table 2에는 지반조사, 갭내시추조사, 외관조사 결과를

Table 1. RMR values of the core at an abandoned tunnel nearby

no.	depth(m)	UCS (kgf/cm ²)	RQD (%)	joint spacing (mm)	joint aperture & roughness	groundwater	adjusting of joint dir.	RMR
ATB1-10	11.0~20.0	250~1,000	16~54	6~25	>5 mm, 매끄러움~거침, 견고한충전물, <5 mm, 풍화	젖음	매우불리	12~34
ATB1-11	12.6~21.0	250~1,000	20~70	6~25	1~5 mm, 거침, 견고한충전물, <5 mm, 풍화	용출~축축함	매우불리~보통	21~48

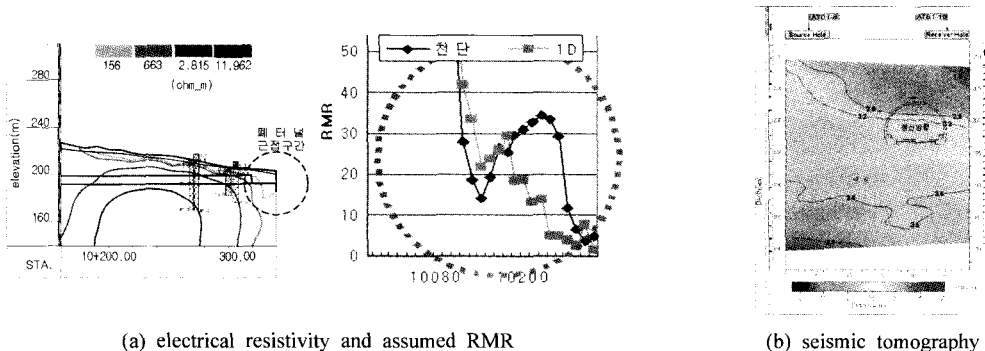


Fig. 3. Results of the geophysical prospecting and rock classification(RMR) at an abandoned tunnel nearby

요약하였고, Fig. 4는 갱내시추추상도와 페터널의 배면 공동 뒷채움 그라우팅 영역을 도시한 것이다.

페터널 주변의 기반암은 응회각력암과 화산력응회암으로 RQD가 17~50%이며, 다수의 불연속면이 발달하여 신규터널 시공 시 간섭이 예상된다. 특히 천단부 내시경 촬영 결과, 라이닝 배면에는 82.0~86.5 cm의 공동이 썩기 형태로 형성되어 있고, 각 Span별 상태등급은 [C~E등급]으로서 전체 [D : 0.55 ≤ F(0.62) < 0.75등급]으로 평가되었다. 여기서, [D등급]은 주요부재에 발생한 손상, 결함, 열화로 인하여 안전운행에 지장을 초래할 우려가 있어 사용제한을 검토해야 하며, 시급한 "보수·보강이 필요한 상태"이며, 만약 페터널을 현재 사용 중인 터널로 분류할 경우에는 "E 등급"에 해당된다.

다. 발파진동 영향 분석

페터널 인접 통과구간의 벤치굴착 및 터널굴착방식을

선정하기 위한 주요 요소로서 발파에 의한 진동영향을 포함할 수 있다. 페터널과 인접한 시추공(ATB1-11)을 대상으로 한 시추공 시험발파와 인근 안산암질암 터널에서 실시한 실규모 시험발파 결과로부터 다음 식 (1)과 같은 발파진동 추정식을 산정하였다. 참고로, Fig. 5는 터널단면에서 공당 최소장약량인 0.5 kg을 기준으로 추정식별 거리에 따른 발파진동속도를 도시한 것으로서 삼승근의 경우, 심발부보다 확대부에서 큰 경향을 보이고 있다.

$$V_{(95\%)} = 808.22 \left(\frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-1.9}$$

(실규모 시험발파, 심발부) (1)

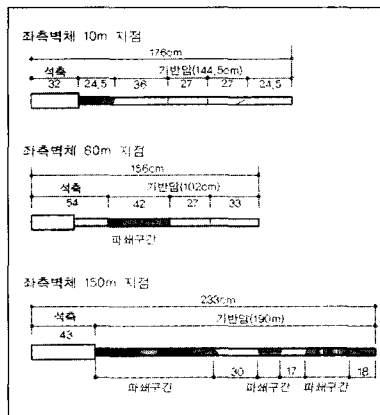
$$V_{(95\%)} = 259.84 \left(\frac{D}{3\sqrt{W}} \right)^{-1.69}$$

(시추공 시험발파)

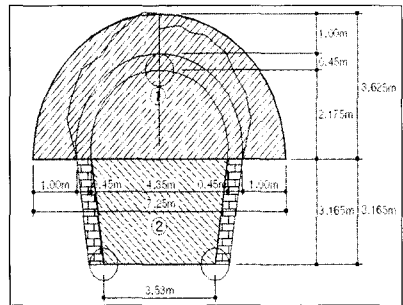
Table 2. Result of the state estimation for an abandoned tunnel

라이닝 단면	외관조사 결과	정밀안전진단 종합평가 (시설안전기술공단(안), 2001)							
		출눈 상태	누수	파손 및 손상	재질열화			결합점수 (평가등급)	라이닝 결합지수
					박리	층분리 및 박락	배태		
<ul style="list-style-type: none"> 하부 : 석축 1열 및 잡석, 콘크리트 채움 S.L. : 조적3~4열 천단 : 조적1~2열 	<ul style="list-style-type: none"> 천단부 파손 및 손상 : 49m² 벽체부 파손 및 손상 : 367m² 누수 : SPAN별 1/4 이상 지하수 흐름 및 젖은 상태 천단부 라이닝 배면공동은 82.0~86.5 cm로 터널 축을 따라서 연속적인 것으로 조사됨 	7.4	3	1.4	0.9	2.4	1	16.1 (D등급)	0.62

천공위치	코어길이 (cm)	천단배면 공동 (cm)	R.Q.D (%)	비중	일축압축강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	포어송비	시료상태	기반암
10.0 m (측벽)	176.5	-	78	2.25	366	530,000	0.14	절리포함	응회각력암
80.0 m (측벽)	154.0	86.5	50	2.60	546	620,000	0.18	절리포함	화산력 응회암
150.0 m (측벽)	233.0	82.0	17	2.61	665	440,000	0.16	무결함	화산력 응회암



(a) RQD at abandoned tunnel



(b) the cave area at crown

Fig. 4. The results of core RQD and micro camera investigation at abandoned tunnel

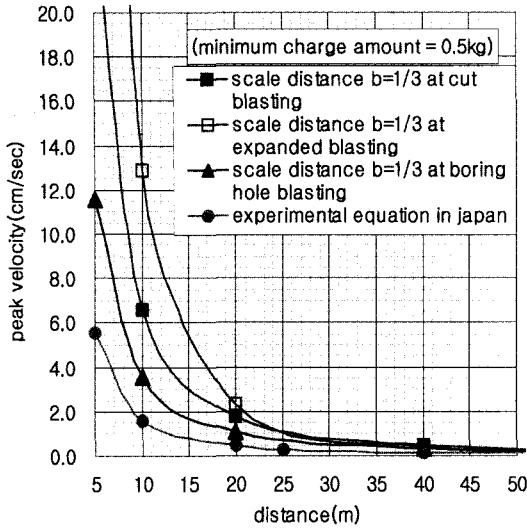


Fig. 5. Variation of the seismic velocity with distances

원설계 상에서의 페터널 무근 콘크리트라이닝(50 cm) 보강을 가정하여 건설교통부 『암발파설계 요령』 및 독일공업규격(DIN-4150)에 의거, 허용발파진동치를 1.0 cm/sec로 설정하였고, 이때의 허용발파진동에 만족하는 지발당 설계장약량을 구한 결과 0.034 kg으로 산출되었다. 이와 같이 최소 지발당 장약량 0.5 kg으로 설계할 경우, 무근 콘크리트라이닝의 허용진동치를 만족하기 위해서는 Fig. 6과 같이 터널구간(115 m) 및 벤치굴착구간(85 m)에 무진동발파가 필요한 것으로 파악되었다.

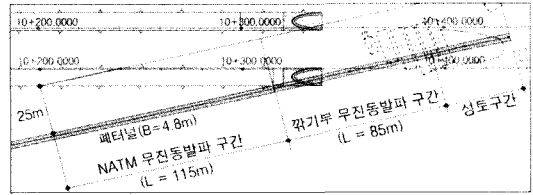


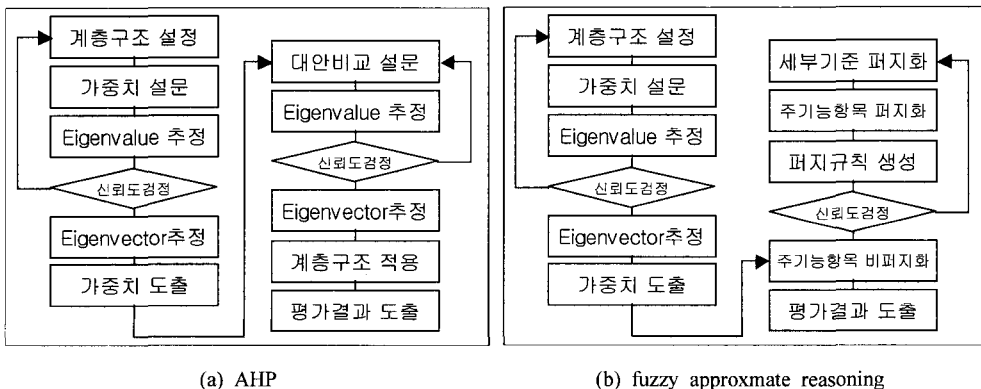
Fig. 6. The non-blast sections due to the criteria of peak velocity

3. 발파공법 및 지보방식 선정을 위한 의사결정시스템

3.1 의사결정시스템

지반공학 분야에서 적용된 바 있는 의사결정기법으로 Risk Assessment, 퍼지근사추론 등의 연구가 진행되어 왔다⁷⁻⁹⁾. 본 연구에서는 설문조사 과정을 최소화하고, 조사항목 별 정성적·정량적 결과들을 선정과정에 적용하며, 관련 전문가들의 의견반영 및 최적 대안을 작성하기 위한 근거를 제시하고자 쌍대비교와 퍼지근사추론을 이용하여 페터널의 보강방식에 대한 적정성을 평가해 보았다.

Fig. 7은 일반적인 AHP기법에 대한 흐름도와 본 연구에서 수행한 쌍대비교와 퍼지근사추론에 의한 의사결정방식의 흐름도를 각각 나타낸 것이다. 쌍대비교는 AHP, ANP, 퍼지적분 등에서 고유벡터(eigenvector)를 결정하는 과정이며 전문가의 의견으로부터 평가하고자 하는 주기능 항목들의 가중치를 구할 수 있다. 그리고 퍼지근사추론은 진단, 평가, 의사결정 등에 적용할 수 있는 인공지능기법으로서 정성적, 정량적인 조사자료들 및 주기능 항목들을 퍼지화하고, 퍼지관계를 통해 주기능 항목들을 소속정도를 추론하며, 다시 비퍼지화



(a) AHP

(b) fuzzy approximate reasoning

Fig. 7. Comparison of the decision making procedure

과정을 통해 주기능 항목별 정량적인 평가결과를 도출할 수 있다.

3.2 설문조사 및 가중치 도출

페터널과 근접·교차하여 통과하는 신규터널 설계에 있어서, 최적의 터널 굴착방식 및 벤치발파공법을 선정하기 위한 주기능 항목은 시공성, 경제성, 안전성, 유지관리성 등의 4개 항목을 들 수 있다. 본 연구에서는 상기의 4개 주기능 항목들이 터널 굴착방식 및 벤치발파공법을 선정하는데 미치는 영향을 가중치로 도출하기 위하여 17인의 전문가 및 실무자들로부터 9점 척도의 쌍대비교를 수행하였다.

쌍대비교법에 의해 얻어지는 비대칭행렬에서의 최대 고유치(eigenvalue, λ_{max})와 고유벡터를 멱승법(power method)으로 구하여 고유벡터로부터 동일 계급간의 가중치를 산출하였다⁸⁾. 그리고 최대고유치, 행렬 수, RI (무작위지수), CI(일관성지수)를 이용하여 식 (2)와 같이 CR(일관성비율)을 산출하고 신뢰성을 검증하였고, 쌍대비교의 신뢰성은 CR이 0.1이하인 경우 쌍대비교가 적합성이 있는 것으로 인정하고, CR이 0.15 이상인 경우 쌍대비교를 다시 수행할 것을 권장하고 있다¹⁰⁾.

Table 3에는 본 연구에서 수행한 설문조사 내용 및 답변 예와 17개의 응답자료 중 분석과정에서 신뢰도 검정을 위해 일관성 비율(consistency ratio, CR) 산정을 통하여 정합성이 없는 자료는 제외한 12개 답변을 분석하여 가중치를 산출한 결과를 나타내었다.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)} \times \frac{1}{RI} \tag{2}$$

여기서,

CR : Consistency Rate

RI : Random Index

numbers(n)	3	4	5	6	7	8
RI	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41

CI : Consistency Index, $(CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)})$

3.3 퍼지근사추론

신규터널과 페터널의 근접·교차구간에 대하여 통과방안 수립을 위해 조사를 수행하였는데, 이들 중 지반등급, 페터널의 상태, 페터널과의 이격거리, 발파진동속도 등의 조사결과를 이용하여 주기능항목 즉, 시공성, 안전성, 경제성, 유지관리성들에 대해 정량적인 평가를 수행하고자 퍼지근사추론을 적용하였다. 이를 위해 각종 조사항목별 세부기준들과 주기능 항목들에 대해 임의의 소속도(degree of support, 1.0)를 가지도록 퍼지화(fuzzifier) 시킨 다음 퍼지규칙(fuzzy rule)을 통해 언어변수의 퍼지추론(fuzzy inference)을 수행하게 되며, 추론된 결과를 비퍼지화(defuzzifier)하여 최종적으로 연구목적에 필요한 4개 주기능 항목을 정량적으로 도출하게 된다. 퍼지근사추론의 진행과정은 Fig. 8과 같다.

Fig. 9에는 퍼지근사추론을 위해 작성된 퍼지추론부의 구조를 나타내었고, 『페터널의 안전성평가』, 『대상구간 지반평가(RMR값)』, 『신규노선과 페터널과의 이

Table 3. The content of survey research and the results of eigen value, and eigen vector calculated by the pair-wise comparison

<p>◆ 설문대상의 현황</p> <p>신규로 건설되는 4차선 도로터널 하부에 약 15°로 사교하는 폐철도터널(단선, 60년 이상)이 위치하고 있습니다. 페터널과의 최소이격거리는 약 4 m 내외이며, 신규터널의 환산직경으로 2D 이내에 포함된 페터널 영향범위는 약 200 m 정도입니다. 본 구간의 지반조건은 RMR 40이하이며, 응회질 각력암, 안산암질 응회암, 화산질 안산암입니다.(단, 페터널의 장래 활용가능성이 낮은 편임)</p>		<p>◆ 답변 예)</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>시공성</td> <td>안전성</td> <td>경제성</td> <td>유지관리성</td> </tr> <tr> <td>시공성</td> <td>1</td> <td>5</td> <td>1</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>안전성</td> <td>1/5</td> <td>1</td> <td>1/5</td> <td>1/2</td> </tr> <tr> <td>경제성</td> <td>1</td> <td>5</td> <td>1</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>유지관리성</td> <td>1/3</td> <td>2</td> <td>1/7</td> <td>1</td> </tr> </table>			시공성	안전성	경제성	유지관리성	시공성	1	5	1	3	안전성	1/5	1	1/5	1/2	경제성	1	5	1	7	유지관리성	1/3	2	1/7	1
	시공성	안전성	경제성	유지관리성																								
시공성	1	5	1	3																								
안전성	1/5	1	1/5	1/2																								
경제성	1	5	1	7																								
유지관리성	1/3	2	1/7	1																								
<p>◆ 설문내용</p> <p>페터널의 보강방법과 연계하여 신규터널의 굴착방법 등을 선정해야 하는데, 귀하께서는 설계 시 고려해야 할 기준 즉, 시공성, 경제성, 안전성, 유지관리성에 대해 어떤 기준에 가중치를 높게 주어야 하는지를 표명하시면 됩니다.</p>																												
일관성비율(CR)	0.04	0.14	0.06	0.09	0.09	0.06	0.09	0.13	0.09	0.02	0.1	0.02	기하평균	정규화														
최대고유치(λ_{max})	4.12	4.38	4.17	4.24	4.25	4.15	4.23	4.34	4.23	4.05	4.27	4.06																
고유벡터 (Eigen vector)	시공성	0.78	0.72	1	0.78	0.79	1	0.18	1	0.6	0.67	0.21	0.73	0.313														
	경제성	1	1	0.63	1	0.9	0.46	0.55	0.08	0.55	1	0.38	1	0.71														
	안전성	0.15	0.22	0.21	0.37	0.33	0.33	0.15	1	0.15	0.4	1	0.41	0.39														
	유지관리	0.23	0.85	0.75	0.86	1	0.26	0.33	0.11	0.33	0.26	0.26	0.7	0.49														

격거리(D)』, 『발파진동속도(지발당 최소장약량 0.5 kg 을 적용할 경우』 등을 입력자료로 사용하여 관련 문헌 으로부터 구한 평가등급을 기준으로 퍼지화하였다. 그 리고 입력항목 중 『페터널의 안전성평가』는 부분적 퍼 지추론한 결과인데, 입력자료로는 페터널 라이닝의 상 태평가결과(결합지수), 라이닝 배면공동 규모, 갱내시추 코어로부터 구한 RQD값을 퍼지화하였다.

본 연구에서의 퍼지근사추론 시스템은 3개의 규칙블 러크(rule block)으로 구성되어 있으며, 총 1,375개의 규 칩이 생성되었다. 규칙블럭 #1은 페터널의 상태평가와 상 세조사 결과로부터 종합적인 페터널의 안정성을 평 가하고, 규칙블럭 #2와 #3은 본 검토대상 구간의 다양 한 조건을 바탕으로 시공성, 안전성, 경제성, 유지관리 성을 평가한다. Table 4에는 퍼지근사추론을 위한 입, 출력자료의 특성과 소속도함수를 나타내었으며, Table 5

에는 퍼지관계를 구성하기 위한 입력자료와 출력자료 사이의 상관성을 보여주고 있다.

이상의 퍼지근사추론 시스템을 이용하여 페터널이 4 개의 주기능항목들에 미치는 영향을 추론하고자 페터 널 갱문에서부터 약 200 m까지의 구간에 대하여 각 입 력항목별 조사를 실시하였고, 그 입력자료는 Table 6에 나타내었다. 입력항목은 터널의 굴착방식에 따라 『발파 공법』과 『무진동공법』으로 구분하였고, 검토대상 구간 (STA.10+200~10+440)에 대해 약 50 m 간격으로 각 각의 주기능항목들에 대한 평가를 수행하였다.

평가과정은 각 위치에 따른 결과를 도출한 다음, 주기 능 항목별 평균치에 Table 3의 기준치를 곱하여 100점 기준으로 정규화 시킨 후, 이 결과를 토대로 터널의 굴착 방식에 대한 선정안을 제시하였다. Table 7에는 설문에 의한 기준치를 반영한 최종결과를 나타내었고, Fig. 10

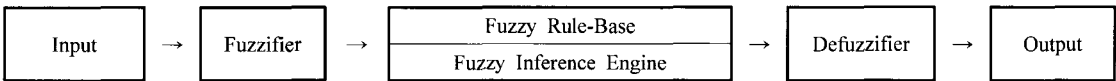
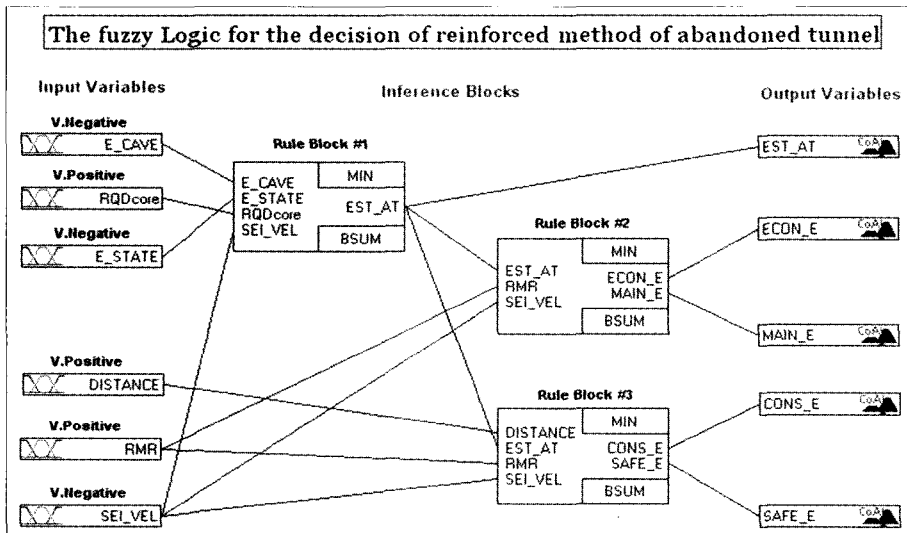


Fig. 8. Procedure of the fuzzy approximate reasoning system



Input Variables		Output Variables	
E_CAVE	라이닝 배면공동	EST AT	페터널 안전성평가
RQDcore	갱내시추코어 RQD	ECON_E	경제성 평가
E_STATE	라이닝 결합지수	MAIN_E	유지관리성 평가
DISTANCE	페터널과의 이격거리	CONS_E	시공성 평가
RMR	Rock Mass Rating	SAFE_E	안전성 평가
SEI_VEL	발파진동속도		

Items	Numbers
Input Variables	6
Output Variables	5
Rule Blocks	3
Rules	1,375
Membership Functions	51

Fig. 9. Structure of fuzzy inference for evaluation of the factors

Table 4. Linguistic variables and membership function

variables (Unit)		linguistic variables of membership function	Min	Max	membership function
input	배면공동 E_CAVE (Real Number)	very_small, small, medium, large, very_large	1	5	
	RQDcore (%)	very_poor, poor, normal, good, very_good	0	100	
	상태평가 E_STATE (F)	A, B, C, D, E	0	1	
	RMR (Value)	very_poor, poor, normal, good, very_good	0	100	
	이격거리 DISTANCE (Times by Dia.)	zero, close, far	0	5	
	발파진동 SEI_VEL (cm/sec)	very_low, low, criteria, high, very_high	0	2	
output	페터널 안정성평가 EST_AT (Real Number)	very_poor, poor, normal, good, very_good	0	100	
	시공성 CONS_E (Real Number)	very_low, low, medium, high, very_high	0	100	
	안전성 SAFE_E (Real Number)	very_low, low, medium, high, very_high	0	100	
	경제성 ECON_E (Real Number)	very_low, low, medium, high, very_high	0	100	
	유지관리성 MAIN_E (Real Number)	very_low, low, medium, high, very_high	0	100	

Table 5. The correlation between the input and output variables

input variable \ output variable	scale of cave	RQD of core	defective index of lining	
safety of abandoned tunnel	Very Negative	Very Positive	Very Negative	

input variable \ output variable	safety of abandoned tunnel	distance	Rock Mass Rating	peak velocity
characteristic construction	Very Positive	Very Positive	Very Positive	Very Positive
economical efficient	Very Positive	-	Very Positive	Very Positive
safety	Very Positive	Very Positive	Very Positive	Very Negative
characteristic maintenance	Very Positive	-	Very Positive	Very Negative

Table 6. Input variable data for inference of the fuzzy approximate reasoning by the stations

input variables		station	NATM			cut & cover	Bench	embedding	
			10+200	10+250	10+300	10+350	10+400	10+440	
safety of abandoned tunnel	scale of cave (E_CAVE)	D&B	Medium(3)	Medium(3)	Large(4)	Large(4)	Medium(3)	-	
		non-blast	Medium(3)	Medium(3)	Large(4)	Large(4)	Medium(3)	-	
	RQD of core (RQDcore, %)	D&B	* ¹⁾ (60)	(30)	17	50	(60)	78	
		non-blast	(60)	(30)	17	50	(60)	78	
	defective index of lining (E_STATE)	D&B	0.62	0.35	0.35	0.88	0.73	0.62	
		non-blast	0.62	0.35	0.35	0.88	0.73	0.62	
	DISTANCE (times by diameter)		D&B	2.0	1.4	0.75	0.2	0.2	-
			non-blast	2.0	1.4	0.75	0.2	0.2	-
Rock Mass Rating		D&B	25	34	12	4	4	-	
		non-blast	25	34	12	4	4	-	
peak velocity (SEI_VEL, cm/sec)		D&B	1.757	3.461	12.917	54.49	54.49	-	
		non-blast	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	

※ Note : *¹⁾ The value of brackets() is supposed from the result of site investigation.

에는 퍼지근사추론 시스템에 의한 위치별 평가결과를 도시한 것이다.

검토대상 구간의 다양한 조사자료를 토대로 페터널의 안전성을 평가해 본 결과, 구간별로 약 25~50점(D~C 등급)의 평가치를 보이고 있기 때문에 페터널의 안전성이 매우 저하된 상태라고 판단된다. 이러한 조건 하에서 터널 및 벤치굴착 방식을 선정하기 위해 일반 발파공법과 무진동공법을 비교한 결과, 일반 발파공법의 경우 시공성과 경제성이 약 50~64점으로 높지만 안정성과 유지관리성이 약 8~37점으로 낮게 나타났다.

무진동공법의 경우, 유지관리성이 50~75점으로 매우 높게 나타났으나 시공성, 경제성, 안전성이 약 8~54점으로 모두 낮게 나타났다. 특히 안전성은 무진동공법을 적용하고 있지만, 현재 상태의 지반조건 및 터널 간

이격거리가 매우 작기 때문에 비교적 낮은 값을 나타내었다.

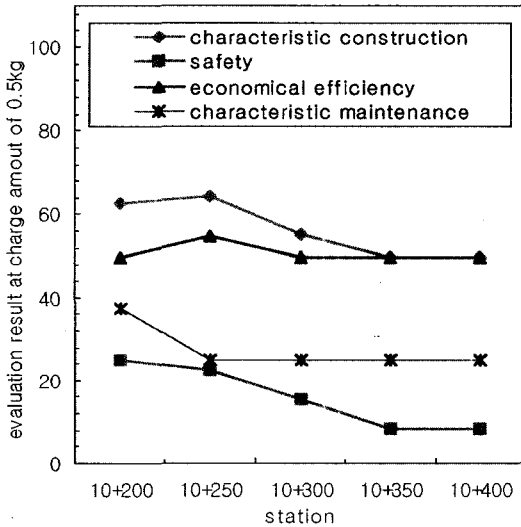
이상의 결과로부터 퍼지근사추론에 의한 굴착방식 선정은 무진동공법보다 발파공법이 더 효율적인 것으로 조사되었다. 이 결과로부터 추가능향목들에 대한 가중치를 곱하여 100점 만점으로 정규화한 결과, 발파공법의 경우는 평가치가 증가하였지만 무진동공법의 경우는 환산점수가 오히려 저하된 결과를 보이고 있으므로, 본 연구에서는 페터널과 교차하는 신규노선에 대해 일반 발파공법을 적용하는 것이 타당한 것으로 판단하였다. 단, 원설계 상에서 제시한 폭 50 cm 무근 콘크리트 라이닝으로 페터널을 보강하는 경우에는 최소 지발당 장약량인 0.5 kg/m²로 적용하여도 콘크리트라이닝의 허용발파진동치 1.0 cm/sec을 크게 초과하는 것으로 나

Table 7. The total result of evaluation of factors due to the fuzzy approximate reasoning

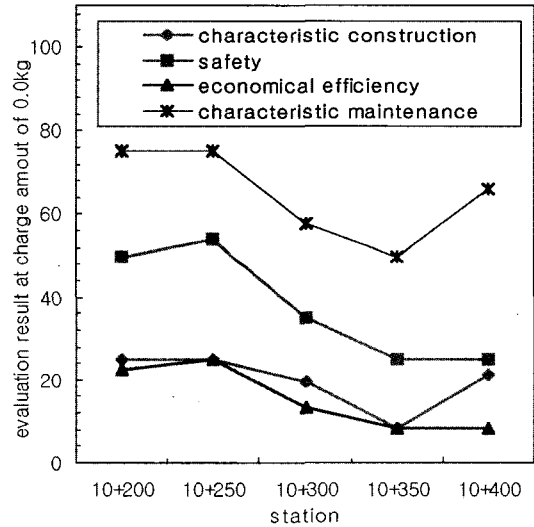
factor	station	10+200	10+250	10+300	10+350	10+400	avg.	sum of avg.	normalization (× weight)	total
	drill & blast	construction	62.7	64.3	55.3	50	50	56.5	37.7	
economical		50	55	50	50	50	51.0	15.6		
safety		25	22.2	15.4	8.3	8.3	15.9	2.8		
maintenance		37.3	25	25	25	25	27.5	5.8		
non-blast	construction	25	25	20.9	8.3	21.4	20.2	34.9	6.3	31.5
	economical	22.6	25	13.1	8.3	8.3	15.5		4.7	
	safety	50	54.2	34.7	25	25	37.8		6.4	
	maintenance	75	75	65.1	50	66	66.2		14.1	

※ Note : The degree of safety assesment to the abandoned tunnel

10+200	10+250	10+300	10+350	10+400	total degree
49.996	50	31.48	24.998	41.068	D~C



(a) drill and blast



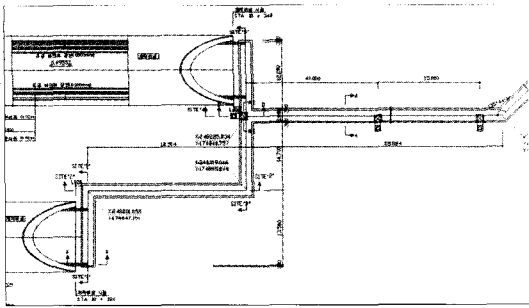
(b) non-blast

Fig. 10. The results of evaluation according to excavation methods regard to the stations

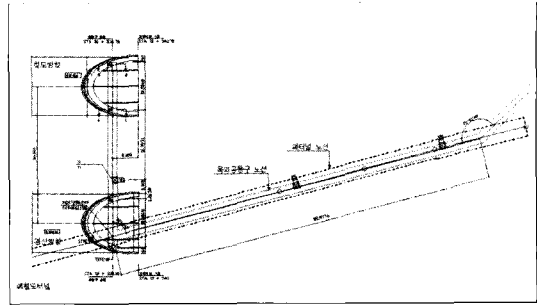
타났다. 또한 발파의 정밀도 및 발파효율 등을 고려하면 최소 지발당장약량 0.5 kg의 적용은 시공성이 극히 저하될 수 밖에 없다. 따라서 터널 및 벤치의 굴착방식은 일반 발파공법을 적용할 경우에 더욱 발파효율이 증대되고 시공성 및 경제성을 만족할 수 있으며, 폐터널의 안전성 확보 및 장래 유지관리의 필요성을 줄이기 위하여 폐터널 보강공법으로 충전재를 이용하는 방법이 보다 타당한 것으로 판단된다. 그리고 기존의 복잡한 설문조사 결과를 위주로 하는 AHP, ANP, 퍼지적분 등의 의사결정시스템에 비하여, 간소화된 설문조사와

퍼지근사추론을 이용하는 의사결정방식이 보다 합리적인 것으로 사료된다.

참고로, 원설계의 폐터널 보강공법에 비해 Fly Ash 혹은 석분토를 이용한 충전공법의 개략 공사비가 약 56.6% 증가되는 것으로 조사되었다. 하지만 일부 NATM 구간 및 벤치구간에서 무진동 굴착을 일반발파공법으로 전환하고, Fig. 11과 같이 폐터널의 일부 구간을 터널 옥외공동구로 활용함에 따른 공사비 저감(약 90%) 및 공기단축 등의 효과가 더 큰 것으로 조사되었다.



(a) original design



(b) alternative design

Fig. 11. Because the drill and blast was selected as an excavation method of new lanes nearby the abandoned tunnel, the reinforcement with some parts of it was designed with the method of filling up fly-ash and concrete. And the other part could have designed by the external concrete box in 2.0 m×2.0 m

4. 결 론

본 논문에서는 신규 터널노선과 근접·교차하는 페터널의 통과방안을 결정하기 위하여 의사결정기법을 도입하였다. 설문조사 과정을 최소화한 주기능 별 쌍대비교 및 다양한 특성들의 정성적·정량적 조사결과를 모두 반영할 수 있도록 퍼지근사추론을 제안하였고, 페터널의 보강방식에 대한 적정성을 평가하여 보았다. 페터널 보강방식을 선정하기 위하여 시공성, 경제성, 안전성, 유지관리성을 주기능 항목으로 사용하였고, 상기의 4가지 주기능 항목들을 이용한 통과방안 선정결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 관련분야 전문가들의 설문조사 결과로부터, 쌍대비교를 통해 주기능 항목들의 가중치를 도출하였고, 각각 시공성 = 0.313, 경제성 = 0.306, 안전성 = 0.169, 유지관리성 = 0.212로 나타났다.
- 2) 정성적·정량적 입력자료들로부터 퍼지근사추론을 이용하여 4가지 주기능 항목에 대한 평가를 수행한 결과, 신규터널 및 벤치굴착 시 발파공법을 적용할 경우에는 시공성·경제성이 비교적 높게 나타났으며, 무진동발파공법을 적용할 경우에는 유지관리성이 비교적 높게 나타났다.
- 3) 페터널 근접·교차 구간에 대한 4가지 주기능 항목의 위치별 평균값에 가중치를 곱한 결과, 발파공법을 적용한 경우가 무진동 굴착공법에 비해 높은 평가결과를 나타내었다.
- 4) 본 검토대상 구간에서는 신규 터널 및 벤치굴착공법과 같은 일반 발파공법이 우수한 것으로 판명되었으며, 페터널의 보강을 위해서는 신규 노선의 안전성

과 장기적인 유지관리의 필요성 등을 고려하여 플라이애쉬 혹은 석분토 등을 이용한 충전공법이 적합한 것으로 사료되었다.

참고문헌

1. 조성훈, 오판기, 강희정, 1998, 서비스물류시설의 입지의사 결정에 관한 연구, 대한설비관리학회 논문집, 3.1, 67-80.
2. www.utm.edu/~dtracy/mgt730/AHP.Doc, The Analytic Hierarchy Process(AHP).
3. 김용일, S.R., Hencher, 윤영훈, 조상국, 2002, Determination of the Construction Method for Young Dong Tunnel by Risk Assessment, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 4.1, 13-25.
4. 허은영, 유창식, 박준경, 진성원, 김영근, 2002, 사회적 비용을 고려한 지하철 터널건설공법의 의사결정기법 연구, 대한토목학회 2002년도 학술발표회 논문집, 39-42.
5. 신중호, 신희순, 선우춘, 박찬, 2002, 광산지역 도로 터널링에 있어 폐갱도가 터널 안정성에 미치는 영향 평가, 터널기술, 한국터널공학회논문집, 4.2, 123-133.
6. 장명환, 양형식, 정소걸, 2000, 폐광지역을 통과하는 고속철도터널의 안정성 평가, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 10, 95-402.
7. 원제무, 손기복, 1998, 퍼지근사추론을 이용한 교통수단 선택모형 구축, 대한교통학회지, 16.1,99-110.
8. 이철규, 오주삼, 조윤호, 2002, 퍼지적분에 의한 국토에서의 ITS 구축 우선순위 결정방안, 대한토목학회논문집, 22.3-D, 471-481.
9. www.fuzzytech.com/e/e_ft4bf3.html, Fuzzy Application Library/Business and Finance Applications/Creditworthiness Assessment.
10. Saaty, T. L., 1980, The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill Book Co.

조 만 섭

1991년 전북대학교 자원공학과 공학사
1993년 전북대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2001년 전북대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 02-3700-7326

E-mail: mscho-d@skec.co.kr

현재 SK 건설(주) 토목사업부문 Geotask
팀 과장

