

# 터널건설공법 선정을 위한 의사결정기법의 개선방안 연구

## A study on the improvement in decision making analysis for the selection of tunnel construction method

박준경\*1, 전성권\*2, 김영근\*3, 허은녕\*4

Park, Jun-Kyung · Jun, Sung-Kwon · Kim, Young-Keun · Heo, Eun-Nyeong

### Abstract

Recently, for the purpose of choosing reasonable and economical construction, the decision making analyses, such as VE (Value Engineering) and LCC (Life Cycle Cost), are generally performed. But, these methods have some limitations for the application to subway tunnel construction method. So, the AHP (Analytical Hierarchy Process) analysis is applied to determine relative importance for obtaining objectivity in quantitative analysis. And, the LCSC (Life Cycle Social Cost) method is developed to account for the social loss and risk by tunnel construction. From the case of the subway ○○ lot, those methods are very useful to decision making analysis. And, in that case, both quantitative and qualitative analysis appraisalment, the drilling and blasting method is evaluated useful alternative proposal in comparing with the cut and cover method.

**Keywords** : VE and LCC analyses, AHP analysis, LCSC method

### 요 지

지하철 터널의 합리적인 건설공법 채택을 위해 최근 건설공법의 선정에 적용되고 있는 VE 및 LCC기법의 문제점을 분석하여 개선안을 도출하고자 정성적인 분석에 있어서 AHP기법을 통한 가능한 여러 대안들간의 상대적 중요도를 결정하는 방식으로 객관성을 확보하고자 하였다. 또한, 정량평가에 있어서는 경제적인 터널구조물 건설을 목적으로 설계단계에서 기존 LCC 기법에서 고려하지 못하는 건설공사에 따른 사회적 손실을 비용으로 환산하는 LCSC 평가기법을 제안하였다. 실제 지하철 ○○공구에 적용사례를 통해 그 효용성을 검증하였으며, 검토결과 해당 공구에서는 정성평가 및 정량평가 항목 모두에서 개착공법 보다는 터널공법의 채택이 합리적인 대안으로 평가되었다.

**주요어** : VE 및 LCC 기법, AHP기법, LCSC 기법

\*1 정회원, (주)삼보기술단 대리

\*2 정회원, (주)삼보기술단 과장

\*3 정회원, (주)삼보기술단 지반부 이사

\*4 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수

## 1. 서론

전통적으로 건설공법의 선정은 기술성 및 직접적인 건설비용의 평가위주로 이루어져 왔으나, 최근 정부는 건설사업 타당성에 대한 객관성의 확보 및 진행과정의 비효율 요인 제거를 통한 생산성 및 효율성 향상을 위하여 공공사업 효율화 종합대책 자료집 (1999)을 발간하고 설계의 경제성 검토 등을 포함하는 건설기술관리법 시행령 (2000)을 발표하였다. 이러한 노력에 의해 국내에서는 VE (value engineering), LCC (life cycle cost) 등 건설공법 선정에 대한 의사결정 기법의 도입이 시도되고 있으나, 현재의 의사결정기법만으로는 국민소득향상 및 환경인식 변화에 따라 급격하게 증가하고 있는 건설공사에 따른 사회적인 손실 (교통체증, 소음, 먼지, 진동 등으로 인한 환경적 피해)이나 비용 (social cost) 등 사회적인 요인들을 충분히 고려하지 못하고 오로지 터널공사로 인해 발생하는 경제적 비용만을 산정하고 있다.

이러한 문제점은 지역주민 불편이 가중되어지는 현상으로 나타나 궁극적으로 건설사업에 대한 여론악화 및 이미지의 훼손으로 이어지고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 AHP (analytical hierarchy process) 정성평가에 의한 합리적인 건설공법의 선정기법을 제시하고, 또한, 지하철터널의 건설과정에서 발생하는 사회적 비용을 고려한 건설공법선정 의사결정기법의 개선안을 제시하였다. 터널건설공법결정시의 지하철 ○○공구 설계적용사례를 통하여 경제적인 터널구조물 건설방법을 제안하고자 하였다.

## 2. 기존 의사결정모형의 고찰 및 문제점 분석

### 2.1 기존 설계단계의 VE 평가방법론 고찰

설계의 경제성 검토의 수단으로서 최근 많이 논의되고 있는 것으로는 VE와 LCC분석이 있다. VE는 미국과 일본 등에서는 이미 오래 전부터 실시되고 있는 것으로서, 현재는 제도화되어 정착 단계에 있으며, 많은 성과를 거두고 있는 것으로 평가되었다. 국내에서는 이미 1980년대 중반부터 도입이 시도되어 시공단계에는 성과가 나타

나고 있지만, 적용효과가 큰 기획, 설계단계에서는 아직 적용되지 못하고 있는 실정이다. LCC분석도 최근 많이 연구되고 있으며, 총 생애비용을 고려한다는 측면에서 기존의 단순 초기 공사비 비교에 의한 경제성 검토보다는 합리적인 접근 방법으로 평가되고 있다.

VE는 일반적으로 적용되고 있는 다른 원가절감의 수단과는 수행절차와 효과에 있어서 매우 상이하며, VE의 정의에 그 차이점이 잘 나타나 있다. VE는 제품의 품질과 신뢰도를 유지하면서 제품의 효율을 제고하는 조직접근법으로서, 비용과 품질의 양 측면에서 대안을 평가하는 합리적인 평가 시스템을 통해 대안을 평가하는 방법이다. 일반적으로 VE는 대체로 정적이며, 또한 기업 중심의 평가체계여서 공공사업 평가 및 기술관련 위험들을 제대로 반영하지 못한다는 한계를 지니고 있다.

VE는 “최저의 생애주기비용으로 최상의 가치를 얻기 위한 목적으로 수행되는 기능분석을 통한 대안창출의 노력으로, 여러 전문분야의 협력을 통하여 수행되는 체계적인 과정”으로 정의할 수 있으며, 그 특징을 다음과 같은 다섯 가지 핵심용어로서 나타낼 수 있다.

#### (1) 생애주기 비용

건설공사에 있어서는 초기의 건설비용, 공용중 유지관리비용 및 수명 이후의 해체비용을 포함한 모든 비용을 의미한다.

#### (2) 가치

가치는 객관적이거나 절대적인 것이 아니고, 상대적인 것이며, 인정하는 사람의 입장이나, 장소, 동기 등에 따라 달라질 수 있는 것으로서, 반드시 최적의 가치만을 의미하지는 않으며, 적정안에 머무르지 않도록 하는 것이 VE에서 추구하는 가치이다.

#### (3) 기능

문제의 대상이 갖는 무형의 기능을 파악하는 과정을 통하여 대안을 창출하며, 이러한 기능중심의 사고방법이 다른 원가절감방법과 구분되는 VE의 특징이다.

#### (4) 여러 전문분야의 협력

VE는 대상사업의 각 분야에 전문지식을 가진 팀에 의해 수행되며, 팀의 리더는 조정역할을 하게 된다.

#### (5) 체계적인 과정

VE는 시작과 끝이 명확한 체계적인 절차가 있으며, 이

표 1. VE에 의한 가치향상 방법

$V = \frac{F}{C}$ V : 가치 F : 필요한 기능 C : 생애주기비용	구분	V	F	C	
	비용 절감	①	↑	↑	↓
		②	↑	→	↓
	가치 향상	③	↑	↑	→
④		↑	↑	↗	

에 따라 수행하게 된다.

VE에 의한 가치향상 방법은 비용과 기능을 중심으로 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 표에서 ①, ②는 비용을 절감 하므로써 가치를 향상시키는 방법이며, ③, ④는 비용이 다소 증가하더라도 기능의 향상을 통하여 가치를 향상시키는 방법이다.

설계 단계는 공사 비용의 결정에 대단히 중요한 영향을 미치며, 현장에서의 시공활동을 제약하는 조건이 대부분 결정되는 단계로 품질 등에 미치는 영향도 적지 않다. 따라서 프로젝트의 초기단계 (기획, 설계)에서 최적화 및 합리화가 이루어져야 시공단계에서의 최적화도 가능하다. 이 단계에서 실시하는 VE를 설계 VE라고 하며, 미국에 정착된 설계단계에서 발주자 주도로 이루어지는 VE의 적용 예를 분석하면, VE 적용효과가 가장 높은

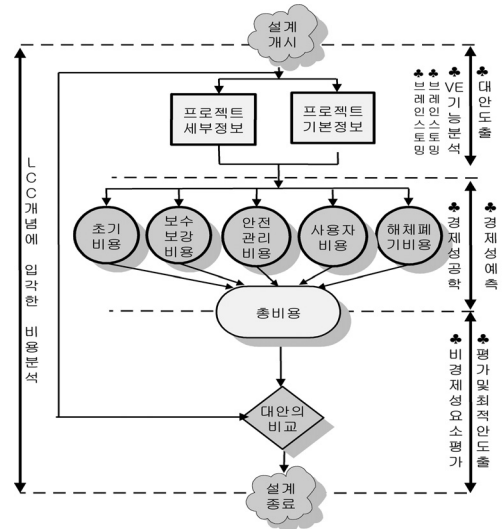


그림 6. LCC를 고려한 설계 VE의 흐름 (Kirk and Dell' Isola, 1995)

것으로 나타나 있다. 설계 VE의 목표는 사업의 예산내에서 건설사업비를 지출함에 있어 최대의 생애주기 가치 (life cycle value)를 추구하는 것이며, 향상된 가치는 각각의 사업에 따라 다양한 방식으로 나타날 수 있다.

표 2. VE 추진절차

	추진단계	적용기법	내용
준비	·오리엔테이션 미팅 및 VET팀 선정		·VE 추진팀 구성
	·과업의 요구조건 분석	·품질모델다이아그램	·설계, 시공, 유지관리 등 각 분야의 참여자들(PM급 20명) 간의 합의를 통해 발주자 및 사용자의 성능요구와 기대도를 도식화하여 나타냄
	·과업대상 선정	·비용 모델	·대상별 비용을 평가하여 고비용 항목을 VE대상으로 선정
분석	·원안설계안 분석 및 개선방안 설정	·입찰안내서 분석 ·원안설계 검토	·입찰 안내서, 원안설계안에 대한 현황 및 문제점등을 분석
	·기능분석	·FAST 다이어그램	·대상 구조물에 요구되는 기능을 나열한 후 주기능, 부기능 등으로 나누고, 각 기능별로 개선대상 우선순위를 정함
	·개선방안 제안	·브레인 스토밍 법	·각 기능에 대한 개선안 제안
	·대안의 구체화 및 타당성 검토	·구체화 조사	·기능별 개선안 조합 및 대안 선정 ·선정된 대안에 대한 타당성 검토
실행	·최적안 선정	·경제성 검토 ·품질모델에 의한 가중치 평가	·경제성 검토는 LCC분석으로 실시 ·각 대안에 대한 종합적 평가

여기서 향상된 가치에는 생애주기 비용의 절감과 같은 정량적 평가가 가능한 가치이외에 기능성, 이용자의 편의, 조형미, 상징성과 같은 정성적 가치도 포함된다.

일반적으로 현재 수행되고 있는 설계단계에서 VE 추진절차를 요약하면 그림 1 및 표 2와 같다.

VE 및 LCC분석기법은 공히 프로젝트의 비용절감을 주목표로 주로 설계 VE분석시 비용은 LCC로 검토하고 기타 비경제적인 요소에 대한 종합적인 분석을 VE를 통해 검토하는 방식으로 현재 적용되고 있는 실정이다.

## 2.2 LCC 분석에 의한 경제성 검토방법 및 문제점

구조물에 대하여 LCC분석을 적용한다는 것은 구조물의 총 수명기간 동안 발생하는 모든 비용을 포함한 비용 분석을 의미한다. 따라서 구조물의 LCC를 초기 공사비만으로 평가하는 것은 곤란하며, 초기공사비, 안전진단 및 보수·보강비를 포함한 유지관리비, 해체 및 재가설비, 통행료 수입 등을 포함한 이익까지 고려하여 평가하는 것이 바람직하다. LCC 분석은 전 과정의 비용을 통합하여 이를 바탕으로 경제성 검토를 수행하는데 적합한 도구이다. 일반적으로 LCC분석은 VE를 통해 제안된 대안에 대하여 비용의 경제성 검토를 수행하는데 적용한다.

그러나, 앞에서 언급한 바와 같이 화폐가치의 변동을 고려한 할인율 (discount rate)을 이용한 현재가치화법을 적용하는 LCC기법에서도 건설공사로 야기되는 다양한 형태의 사회적인 손실비용을 고려할 수 없는 단점이 있다.

## 2.3 VE 평가방법론 및 문제점

VE에 있어서 도출된 여러 가지 대안은 적절한 평가를 통하여 해당 프로젝트에 알맞은 최적의 대안을 선정하는데 목적이 있다. 이러한 대안 선정 방법은 일반적인 대안 평가와 마찬가지로 정성 평가와 정량 평가, 두 가지로 나누어진다. 건설분야에 있어서 VE의 경우 주로 정량평가로는 앞에서 언급한 바와 같이 LCC 분석이 사용되며, 정성평가로는 분석행렬 (analysis matrix)을 이용한 가중평가 (weighted comparison)방법이 주로 사용된다 (Dell'Isola (1982)).

분석행렬 (표 3)을 이용한 평가 방법은 쌍대비교를 근간으로 한 다기준 의사결정 (multiple criteria decision)을 가능하게 하는 가장 기본적인 방법으로서 일반적으로 사용되는 단순한 가중 평균 방법과는 몇 가지 큰 차이가 존재한다. 그 중에서 가장 두드러지는 차이는 가중치 도출 과정에 있다. 일반적으로 전문가 평가에 있어서는 전문가들이 자신의 기준에 맞추어 설정한 점수를 정규화하여 가중치를 도출하여왔다. 하지만, 분석행렬은 각 기준에 대한 가중치를 일반적인 점수 방법에 의존하지 않고 쌍대비교를 통하여 수행한다. 즉 두 가지 평가 요소가 존재할 경우 두 평가 요소 중 서로 간에 어느 것이 뛰어난지 우열을 가려서 점수를 도출하는 것이다. 이러한 방법은 각 평가 요소간 절대적인 차이 대신 상대적인 차이를 강조하며, 가중치 도출 과정이 공개되기 때문에 좀 더 객관적인 평가를 가능하게 한다.

하지만, 분석행렬방법은 몇 가지 큰 제약을 가지고 있다. 첫째로 분석행렬은 가중치에 대해서는 쌍대비교를 통하여 상대적인 가중치를 객관적으로 도출하고 있지만, 실제적으로 점수 도출에 있어서는 일반적인 전문가의 점수 부여 방법을 택하고 있다. 따라서, 비록 가중치에서는 객관성을 상당히 확보하였지만, 평가에 있어서 이러한 장점이 사라지게 된다.

두 번째로 기존 방법은 평가 자체가 건전하게 진행되었는지, 평가 결과가 신뢰할만한지 검증할 수 있는 도구를 가지고 있지 않다. 평가자가 불성실하거나, 평가의 구조 자체가 잘못 설정되었을 경우 평가 결과는 심각하게 왜곡된다. 이러한 왜곡은 기존 방법론에 있어서는 단지 전

표 3. Analysis Matrix의 구성 (예)

평가 항목	A	B	C	D	E	F	G	H	total	가중치
A		a	c	d	a	a	a	a	5.0	17.9
B			c	d	e	f	b/g	b/h	1.0	3.6
C				d	c	c	c	c	6.0	21.4
D					d	d	d	d	7.0	25.0
E						e/f	e	e	3.3	12.5
F							f	f	3.5	12.5
G								g/h	1.0	3.6
H									1.0	3.6
합계									28.0	100.0

표 4. 기존 VE 평가방법의 문제점 및 AHP의 장점

구 분	기존 방법론의 문제점	AHP의 장점
정확도 문제	•절대적인 평가 점수 체계는 평가에 있어서 객관성을 유지하는 데 한계	•쌍대비교 평가 및 고유값 계산을 통한 일관성 확인 가능
신뢰도 문제	•기존 평가체계는 평가결과에 대한 신뢰성을 단지 전문가의 의견에만 의존	•일관성지수를 이용한 신뢰도 검정
민감도 문제	•기존 평가체계는 scale factor 및 평가 방법에 따라 왜곡 가능성 존재	•비교척도 재정립 및 쌍대비교, 선형대수의 적용
독립성 문제	•평가에 있어서 각 요소에 대한 이해가 평가자마다 다를 수 있다.	•계층과정(hierarchy structure)를 통해 독립성 확보

문가의 세심한 주의 이외에는 확인할 수 있는 방법이 존재하지 않는다.

세 번째로 분석행렬의 쌍대 비교 방법은 Scale Factor가 한정적이고 명확하지 않기 때문에 평가가 민감하지 못하고 제한적인 단점을 지니고 있다.

### 3. AHP를 이용한 VE평가과정의 도입

#### 3.1 AHP 평가방법론 개요

Saaty (1980)에 의해 고안된 AHP 방법은 기존의 정성적 평가 방법, 특히 상대적 비교를 통한 평가 방법들의 아이디어를 발전시켜 가설구조를 구성하고, 스케일의 정의 및 구조를 개선하여 쌍대비교를 좀 더 정교하게 개발시켜 이러한 쌍대비교 평가가 가중치뿐만 아니라, 대안 비교에까지 수행되도록 하여서 평가의 엄밀성을 높인 방법이다. 그리고, 설문 및 의사결정 과정에 있어서 의사결정자의 문제 해법 과정을 모사하였기 때문에 평가 설문에 임하는 사람이 쉽고 합리적으로 평가를 수행하도록 지원하고 있다. 또한, 일관성지수 (consistency index) 검토를 통해 대안 평가에 있어서 가설의 위계가 잘못 구성되거나 설문자가 불성실할 경우 평가 결과를 기각하고 다시 수정할 수 있도록 하였다. AHP의 장점을 기존 평가 방법론이 가지고 있는 문제와 비교해서 요약하면 표 4와 같다.

AHP는 쌍대비교를 전 항목에 걸쳐 수행하여 이전의 다른 쌍대비교 평가처럼 우삼각 또는 하삼각 행렬이 아닌 하나의 완전한 행렬을 구성한다. 이렇게 구성된 행렬에 대해 고유값을 도출해서 설문자가 일관성을 가지고

설문에 임하였는지 검정할 수 있다. 그러나, 설문자가 일관성을 가지고 설문에 임하였다고 하더라도 설문의 위계가 잘못 구성되었다면 결과는 일관성을 잃을 수 있다. 특히 각 요소가 독립적이어야 하며, 또한 같은 가지 내부에 있는 요소들은 범주 구분의 수준이 일치하여야 하는데 이러한 위계 설정이 잘못될 경우에도 일관성을 잃을 수 있다.

따라서, AHP기법에서는 이러한 일관성의 정보를 행렬이 가지고 있는 정보, 고유값 (eigen value)에서 도출해서 신뢰도 검정을 수행한다. 이 때 신뢰도 검정식은 다음과 같이 구성된다 (Saaty (1980, 1985, 1991)).

$$\text{일관성비율} = \frac{CI}{RI} \tag{1}$$

여기서, RI: 최종 일관성지수 (resulting consistency index, 표 5 참조)

CI: 일관성지수 (consistency index)  
 = (최대고유값 - n) / n-1  
 n: 행렬크기

RI는 행렬의 사이즈에 따라 다른 값을 가지게 되며, 표 5는 Saaty (1980)에 의해 계산된 행렬 사이즈에 따른 RI값을 정리한 것이다. 이때 계산에 의해 도출된 값은 0에 가까울수록 서로간의 관계가 일치하는 것을 나타낸다. 일관성 비율은 0.1보다 작아야 하며, 0일 경우 완벽한 일치를 나타내게 된다.

표 5. 행렬크기에 따른 최종 일관성지수

n	2	3	4	5	6	7	8
R.I	0.00	0.52	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

## 4. 새로운 의사결정기법의 설계적용

### 4.1 ○○공구 개요 및 노선현황

서울 강남중심지역의 도심지구간을 통과하는 지하철터널의 건설공법 선정을 위해 개착공법, 터널공법의 적용가능성에 대해 AHP평가를 통해 합리적인 건설공법을 선정하고자 하였으며, 본 공구의 현황을 요약하면 다음과 같다.

본 공구는 서초구 반포동 고속터미널에서 시작하여 반포주공아파트와 산성교회 사이를 지나 좌측에 반포주공 3단지과 우측에 삼호가든 아파트, 현대아파트를 두고 사평로 하부를 지나며, 경부고속도로 반포 IC를 통과하여 봉은사로를 지나 역삼동 차병원에 이르는 강남의 도심지 한복판을 지나는 공구이다 (그림 2 참조). 원안설계시에는 사평로 하부통과구간인 1구간 및 유치선터널 구간인 7구간만이 터널공법으로 계획되고, 나머지 구간 (2, 3, 4, 5, 6구간) 및 정거장 (924, 925)은 개착공법으로 계획되어 있었다.

### 4.2 지질 및 지층분포특성

과업구간은 광역적으로 노-장년기 지형에 해당하며, 선캠브리아기의 경기편마암복합체에 속하는 변성암류 및 일부 중생대의 암맥류를 기반암으로 하여 제4기의 충적층 및 매립층이 그 상부를 피복하고 있으며, 주 구성암석은 호상 흑운모편마암이 매우 우세하게 분포하며 일부 화강암질 편마암이 나타난다. 호상편마암은 수~수십 mm 두께로 엮리 불연속면이 발달되어 있다.

그림 3에 나타내 바와 같이 제4기의 충적층은 과업구간 중앙부 925정거장까지 최대 약 20m 두께로 두껍게 분포한다. 지형적으로 중앙부까지 전반적으로 평탄한 층적 및 매립지형과 중앙부 이후 완만한 경사의 낮은 구릉지인 특성에 따라 우수작용이 활발하게 작용한 결과로서 자갈, 모래등의 조립질 퇴적물이 우세하며 일부구간에 점토 및 실트가 협재되어 있다.

특성상 충적층 분포구간과 모암풍화구간으로 분류할 수 있으며 충적층구간에서 매립층과 충적층이 약 8~20m로 두껍게 나타나며, 모암풍화구간에서 풍화토층이

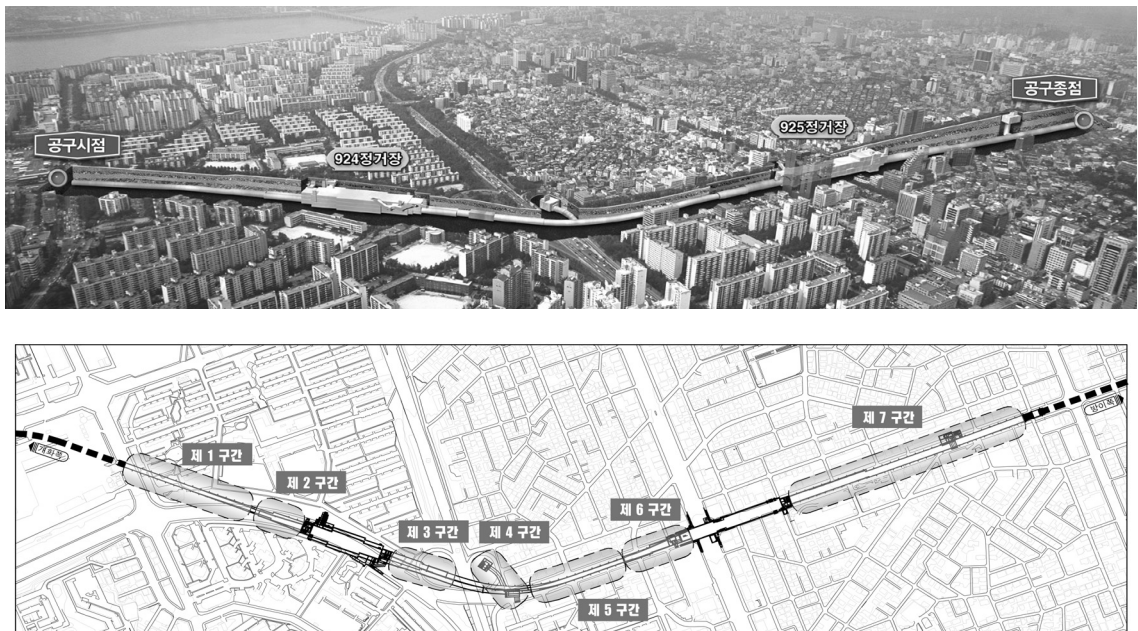


그림 2. ○○공구 노선 및 계획 현황

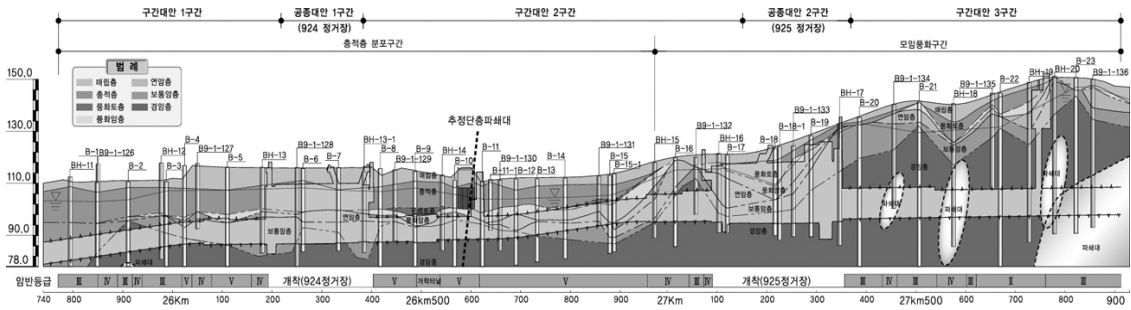


그림 3. ○○공구 종단 및 지층분포 특성

약 3~10m로 나타남을 알 수 있다.

## 5. AHP에 의한 정성평가결과

### 5.1 평가가설계층구조의 설정 및 가중치 매트릭스 산정

기존의 VE에서의 평가요소들은 정의가 명확하지 않거

나 독립적이지 않고, 공사 자체에서 발생하는 요소만 주로 평가하고, 터널 공사 자체가 가지는 공공적인 성격에 대한 고려가 미비하였을 뿐만 아니라, 하부 평가 요소에 대한 구성이 독립적으로 구성되어 있지 않기 때문에 본 평가에서는 2단계로 표6과 같이 평가요소를 정의하고 재구성하였다. 설문조사를 통해 터널관련 평가 요소들을 검토한 결과 터널에서는 안전성이 매우 중요한 것으로 나타났으며, 민원도 중요한 고려의 요소로 나타났다.

표 6. 평가가설계층구조의 설정

주기능	부기능
1. 안전성을 최대화한다.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•공법 및 구조물의 형태가 지반조건에 적절하고, 구조적인 안전성을 최대화한다.</li> <li>•공법에 따른 주변 건물의 안전성을 최대화한다.</li> <li>•공사장 내에서의 안전성 (공사장 (작업장)에서의 인부, 장비, 화재 등의 안전사고 등 예방)을 확보한다.</li> </ul>
2. 시공·유지보수 및 관리를 최대한 원활히 한다.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•시공 경험 및 관련 자료가 풍부하다.</li> <li>•공사 중 지반 조건의 변화에 대한 대응이 용이하다.</li> <li>•공정을 단순 명료하여 시공이 편리하다.</li> <li>•유지 및 보수 작업이 원활하다.</li> </ul>
3. 직접 비용을 최소화한다.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•총 공사비 (초기 공사비 + 유지 관리비)를 최소화한다.</li> <li>•초기 공사비 (시공비)를 최소화한다.</li> <li>•유지 관리비를 최소화한다.</li> <li>•공사 기간을 단축한다.</li> </ul>
4. 민원 발생을 최소화한다.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•공사중 진동 발생으로 인한 시민들의 민원을 최소화한다.</li> <li>•공사중 먼지 발생으로 인한 시민들의 민원을 최소화한다.</li> <li>•공사중 소음 발생으로 인한 시민들의 민원을 최소화한다.</li> <li>•사유지 침범 혹은 도로 점용을 최소화한다.</li> </ul>
5. 외부성을 최소화한다.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•공사장 주변 교통 장애를 최소화한다.</li> <li>•공사장 주변 도로 통행 불편을 최소화한다.</li> <li>•공사장 주변 거주민들의 불편 (소음, 진동, 먼지)을 최소화한다.</li> <li>•공사장 주변 상가 및 업체의 소득 감소를 최소화한다.</li> </ul>

## 5.2 AHP 평가결과

설문은 표 7에 나타난 AHP 진행도에서 나타나 있듯이 2단계로 구성된다. 1차 설문은 가중치에 대한 설문이며, 2차 설문은 대안 평가에 대한 설문이다. 설문은 터널건설관련 경력 10년 이상의 전문가 50인에게 의뢰하였다. 이중 가중치 설문은 주기능과 부기능으로 나누어서 수행하였는데, 주기능은 행렬 모두에 대한 값을 도출하기 위해서 10개의 설문을 제시하였으나, 부기능의 경우 행렬 모두의 값을 도출하기 위해서는 전체 설문 개수가 증가할 뿐만 아니라, 하부 항목의 경우 상대적으로 중요도가 떨어지기 때문에 부기능에 대한 설문은 n-1개에 대한 쌍대비교를 하고, 나머지 행렬 요소는 n-1개의 설문을 바탕으로 일관성비율(CR)이 0인 행렬을 재구성하였다. 이 때 도출된 매트릭스 및 가중치는 표 8과 같다.

CR 분석 결과는 다음의 식 (2)와 같으며, 이 수치는 Saaty (1980)가 제안한 0.1보다 작으므로 이 결과는 신뢰도를 유지하는 것으로 생각할 수 있다.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{(5.4-n)}{\frac{n-1}{1.12}} = 0.099 \quad (3)$$

가중치에 있어서 전문가들은 시공성과 비용보다는 안전성과 외부성, 민원을 대안 선택에 있어서 중요하게 여기는 것으로 나타났다. 특히 전문가들은 안전성이 가장 중요한 요소라고 판단하고 있다.

2차 설문인 대안 설문은 5개구간 (2, 3, 4, 5, 6구간)의 가능한 2개~4개 대안에 대해 설문을 실시하였다. AHP의 단점은 대안이 많아지고 하부 항목이 많아지면 설문이 증가한다는 데 있다. 특히 이번 연구의 경우 기존 다른 연구에 비해 가설계층구조가 넓은 뿐만 아니라, 대안 자체 및 구간이 많기 때문에 완전한 행렬을 구성하였을 경우 설문이 기하급수적으로 증가하여 설문 확보가 어렵다. 따라서, 대안에 대한 평가에 있어서도 1차 설문의 부기능처럼 n-1개의 쌍대비교에서 일관성비율이 0인 행렬을 재구축하는 형태로 진행하였다. 비록 신뢰도 검증이 떨어진다는 단점이 존재하지만, 참가하는

표 7. AHP 분석구조 및 분석단계별 특성

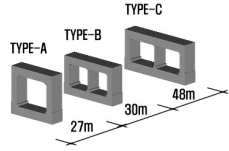
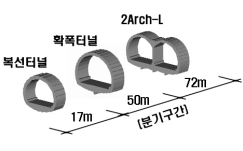

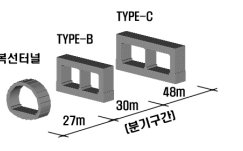
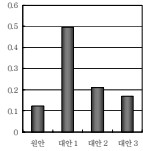
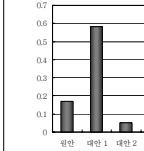
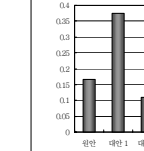
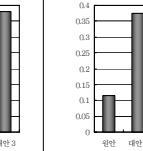
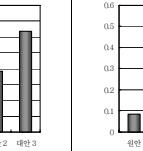
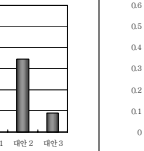
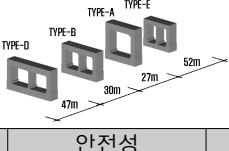
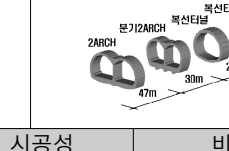
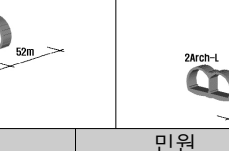
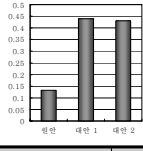
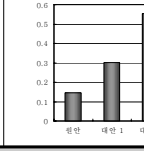
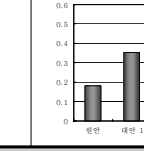
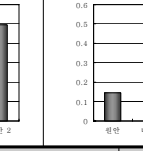
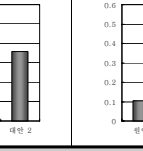
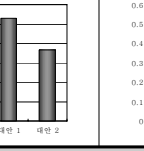
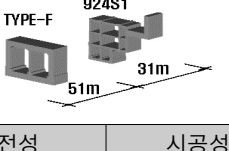

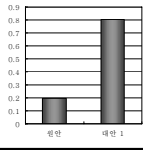
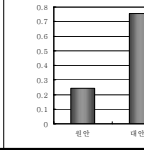
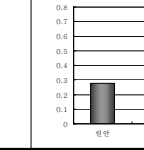
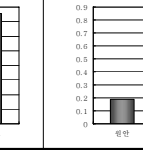
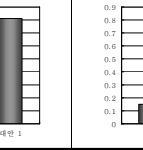
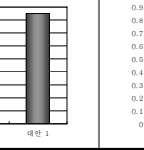
분석 구조		각 분석 단계별 특성	
계층구조 설정	대안 비교 설문	계층구조 설정	•평가 요소를 유기적으로 연결하여 상부 계층이 아닌 하부 계층으로 평가 요소를 세분화
가중치 설문	Eigenvalue 추정	설문	•절대비교가 아닌 쌍대비교를 통하여 평가자의 대안 평가에 대한 민감도를 극대화
Eigenvalue 추정	신뢰도 검증	Eigenvalue 추정	•설문결과에 대한 매트릭스의 특성을 도출
신뢰도 검증	Eigenvalue 추정	신뢰도 검증	•매트릭스 특성을 바탕으로 설문결과 및 계층 구조에 오류는 없었는지 점검
Eigenvector 추정	계층구조 적용	Eigenvector 추정	•매트릭스의 특성을 바탕으로 쌍대비교 결과를 가중치로 전환
가중치 도출	평가결과 도출	계층구조 적용	•하부 계층에서 수행된 평가 결과를 상부 계층까지 끌어올려서 평가 결과를 도출

표 8. 설문결과분석

가중치 매트릭스						고유값	고유벡터(가중치)	
	안전성	시공성	비용	민원	외부성	$\lambda = 5.4$	안전성	0.34
안전성	1	1.6	2.8	2.2	2.6		시공성	0.10
시공성	1/1.6	1	1/1.4	1/3	1/2.4		비용	0.10
비용	1/2.8	1.4	1	1/3.9	1/2		민원	0.22
민원	1/2.2	3	3.9	1	1/2.2		외부성	0.24
외부성	1/2.6	2.4	2	2.2	1			



표 9. 구간별 AHP 정성평가 결과

구간	원안설계		대안 1안		대안 2안		대안 3안				
	원안	대안	원안	대안	원안	대안	원안	대안			
제 2 구간											
	종합평가	안전성	시공성	비용	민원	외부성					
											
제 3 구간											
	종합평가	안전성	시공성	비용	민원	외부성					
											
제 4 구간											
	종합평가	안전성	시공성	비용	민원	외부성					
											

전문가들이 본 설문에 대해 높은 관심을 가지고 있고, 높은 수준의 전문가 집단이라는 것을 고려할 때 요구 신뢰도를 충분히 얻을 수 있을 것이라 기대하였다.

이렇게 하여 본 연구의 대상인 ○○공구의 의사결정대상 구간들에 대하여 구간별 실시한 AHP 평가결과는 다음의 표 9와 같다. 분석 결과 일반적으로 개착공법이 굴착에 의한 터널공법보다 더 안전하다고 인식되어져 있었

는데, 실제 가설계층구조를 통한 분석은 전문가들은 해당공구에 대해서는 굴착이 더 안전성이 뛰어난 것으로 판단하였다. 이것은 지하철 터널의 특성상 터널의 구조적인 안전성뿐만 아니라, 인접건물의 위험도등 외적인 요인들이 종합적으로 고려되었기 때문인 것으로 보인다. 또한 시공성 측면에서도 실무자들은 굴착공법이 크게 어려움을 겪지 않는 것으로 나타났다. 오히려 시공성 측면

표 9. 구간별 AHP 정성평가 결과 (계속)

구간	원안설계		대안1안			
	제 5 구간					
	종합평가	안전성	시공성	비용	민원	외부성
구간	원안설계		대안1안		대안2안	
	제 6 구간					
	종합평가	안전성	시공성	비용	민원	외부성

에서는 가스파이프 및 전선 등 지중에 매설된 장애물을 이동하고 복구해야 하는 개착공법이 굴착공법보다 떨어지는 것으로 실무자는 판단하는 것으로 생각한다. 그 외 민원과 외부성에서는 일반적으로 예측한 대로 굴착공법이 전반적으로 우세하게 나타났다. 각 구간별 AHP 결과를 정리하면 다음의 표 9와 같으며, 모든 소구간에 대해 원안설계의 개착공법보다는 터널공법으로의 변경이 합리적인 것으로 평가되었다.

## 6. 사회적비용과 위험을 고려한 LCSC평가

### 6.1 개요

도심지를 통과하는 지하철 터널의 건설로 인해 예상되는 사회적인 손실비용중 필수적으로 고려해야 하는 것으

로 공법에 따른 교통비용과 환경비용이 있다. 이들중 교통비용은 각 구간별 연장, 교통량 및 공사기간등의 함수이고, 환경비용은 인구수, 공사장으로부터의 이격거리, 공사기간등의 함수로 다음과 같은 세부항목으로 구분하여 지하철공사로 인한 사회적인 손실비용을 계산하였다.

교통비용은 ① 차량운행비용 (차량운행으로 인한 연료 소모 비용), ② 차량유지비용 (엔진 오일비, 타이어비, 감가 상각비 등 차량을 움직이는 데 소요되는 간접 비용) ③ 시간지체비용 (교통지체로 인하여 통행객이 잃어버리는 시간에 대한 시간 손실 비용)으로 구성되도록 하였다. 또한 환경비용은 ① 소음피해비용 (소음으로 인하여 주변 거주민이 받는 피해에 대한 비용), ② 진동피해비용 (진동으로 인하여 주변 거주민이 받는 피해에 대한 비용), ③ 대기오염비용 (교통지체로 인하여 발생하는 대기오염 및 건설공사로 발생하는 대기오염과 분진 등에 대한 처리비용과 이러한 오염으로 인하여 발생하는 질병

으로 인해 발행하는 환경 비용)으로 구분하여 산정하였다.

### 6.2 교통비용의 산정

도심지 지하철 공사로 인한 교통손실 비용의 추정을 위해 교통량 조사를 수행하였으며, 그 결과는 아래의 그림 3과 같다. 강남지역의 중심부를 통과하며, 반포 IC등이 인접한 관계로 대부분의 구간이 서비스수준 F의 열악한 조건을 지니고 있다.

교통량 조사결과, 공법별 공사기간 자료(표 10) 및 참고문헌(2)~(8)의 자료를 활용하여 구간별로 산정한 교

통 비용을 표 11에 정리하였다.

개착공법에 비해 터널공법이 구간별로 0.29~43.79 억원 정도 절감효과가 있는 것으로 판명되었으며, 7구간의 경우는 같은 터널공법이 적용되었지만 특수공법의 적용으로 인해 대안설계의 공기가 길게 산정되어(표 10 참조) 비용의 차이가 발생하였다.

### 6.3 환경비용의 산정

사회적 비용중 환경에 미치는 영향을 보면 소음, 진동, 그리고 대기오염의 세항목으로 설정하였다. 각각의 영향

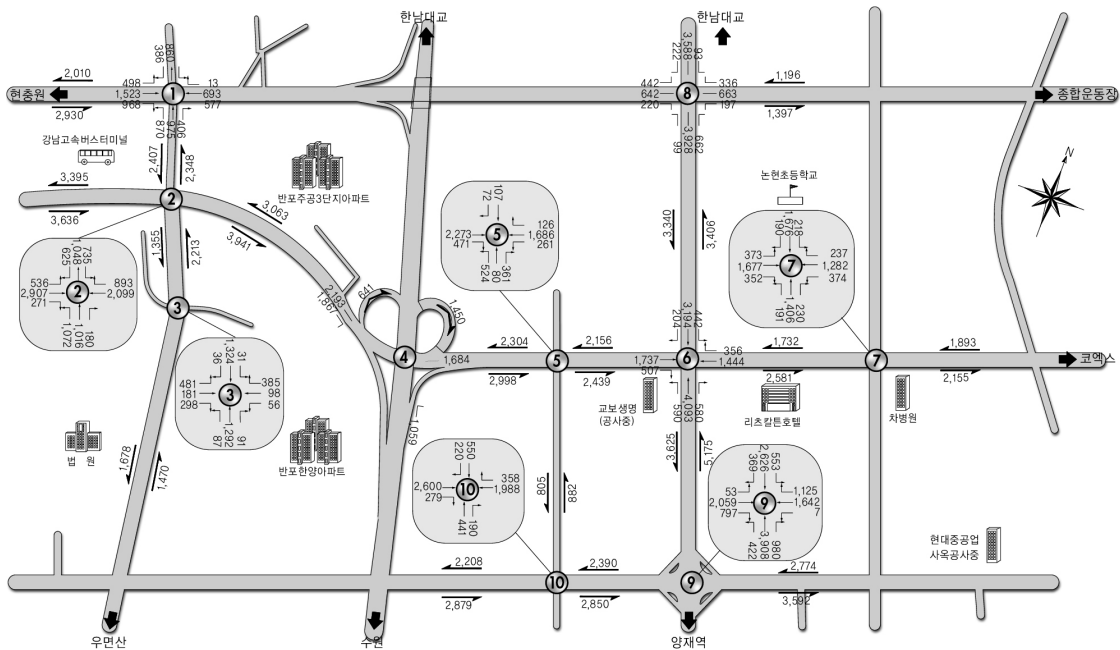


그림 3. 교통량 조사결과

표 10. 구간별·공법별 예상 소요공사기간 및 연장

구 간	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간	7구간
원안설계	1080일 (개착)	173일 (개착)	173일 (개착)	51일 (개착)	503일 (개착)	225일 (개착)	930일 (터널)
대안공법	1050일 (터널)	157일 (터널)	157일 (터널)	46일 (터널)	456일 (터널)	204일 (터널)	1140일 (터널)
연장(m)	323,125	105,275	105	30.7	305,810	137,040	563,022

표 11. 구간별 · 공법별 사회적 비용 산정결과

(단위 : 억원)

		구 간	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간	7구간	총 계
개착 공법	교통 비용	차량운행비용	19.05	3.17	3.17	0.78	13.10	5.86	11.45	
		차량유지비용	20.06	1.06	1.06	0.07	12.77	2.56	18.91	
		시간지체비용	69.83	4.19	4.18	0.33	191.61	9.91	85.35	
		소 계	108.94	8.42	8.40	1.18	217.48	18.33	115.72	478.47
	환경 비용	소음피해비용	0	9.12	0	0.22	4.55	1.75	0	
		진동피해비용	0	0	0	0	0	0	0	
		대기오염비용	102.96	5.58	5.57	0.41	65.19	13.23	95.65	
		소 계	102.96	14.70	5.57	0.63	69.75	14.97	95.65	304.22
		사회적비용총계	211.90	23.12	13.97	1.81	287.23	33.30	211.37	782.69
	터널 공법	교통 비용	차량운행비용	18.52	2.77	2.77	0.61	11.45	5.12	14.04
차량유지비용			19.51	0.95	0.95	0.06	11.41	2.29	23.18	
시간지체비용			67.89	3.31	3.30	0.21	150.83	7.96	104.63	
소 계			105.91	7.03	7.02	0.89	173.69	15.37	141.85	451.75
환경 비용		소음피해비용	0	0	0	0	0	0	0	
		진동피해비용	0	0	0	0	0	0	0	
		대기오염비용	90.27	4.40	4.39	0.28	52.81	10.59	105.73	
		소 계	90.27	4.40	4.39	0.28	52.81	10.59	105.73	268.46
		사회적비용총계	196.18	11.43	11.41	1.17	226.50	25.96	247.58	720.21
절감 액		교통비용	3.03	1.39	1.39	0.29	43.79	2.96	-26.13	26.72
	환경비용	12.69	10.30	1.18	0.34	16.94	4.39	-10.09	35.76	
	사회적비용	15.71	11.69	2.57	0.63	60.73	7.35	-36.22	62.47	

표 12. 공법별 위험비용 산정결과

(단위 : 억원)

		구 간	1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간	7구간	총 계
개착 공법	총공사비		72.50	123.40	187.90	20.00	146.20	116.10	138.90	805.00
	위험비용		0.88	1.51	2.29	0.24	1.78	1.42	1.69	9.82
터널 공법	총공사비		81.50	76.70	123.60	14.20	117.70	54.50	139.60	607.80
	위험비용		1.34	1.27	2.04	0.23	1.94	0.90	2.30	10.03

요소로 인한 피해액을 이론적으로 산정하는 것은 불가능하므로 중앙환경분쟁조정위원회에서 제시한 통계적 접근법 및 판례를 근거로 각각의 환경비용을 산정하였으며 그 결과는 표 11에 나타나 있다. 공법별 공사기간 자료(표 10), 참고문헌 (9)~(13)의 자료 및 지역인구수, 이격거리별 소음도 및 진동영향평가결과등을 활용하여 구간별로 환경비용을 산정하였다.

환경비용 역시 개착공법에 비해 터널공법이 구간별로

0.34~16.94억원 정도를 절감할 수 있을 것으로 예상되었으며, 이는 터널공법 적용시 GNR공법 및 선대구경 심발등 소음 및 진동제어를 위한 적극적인 대책이 수립되어 허용치 이내의 기준을 만족하였기 때문으로 판단되며, 7구간의 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 대안설계의 공기차이(표 10 참조)로 인해 대기오염의 비용이 원안설계의 경우보다 클것으로 예상되었다.

### 6.4 위험비용의 산정

건설공법 선택시 서로 다른 위험에 노출되어 있어 단순 비교가 불가하며, 이러한 경우 두 공법간의 위험을 비용에 반영함으로써 위험을 대안평가에 내재시켜야만 한다. 이러한 위험비용의 추정은 공사보험요율로 대체될 수 있으며, 보험요율의 차이는 두 대안간의 위험의 차이를 반영하게 된다. 비교대상은 개착공법과 터널공법으로 한정하여 두 건설방법의 보험료 비교를 위해 기타의 보험조건을 동일화하여 위험비용을 비교하였다.

보험개발원 참조요율을 근거로 지하철 공사시에 적용되는 보험요율은 개착공법의 위험도를 1로 보았을 때 터널공법의 위험도는 1.241로 높게 나타나므로, 터널공법의 보험요율이 개착공법에 비해 0.33% 높으며, 이로 인해 터널공

법의 공사비가 약 197.2억원이 적더라도 위험비용은 약 0.21억원 증가하는 것을 알 수 있다 (표 12 참조).

### 6.5 종합평가

터널에 있어서 공법에 따른 장·단기 운영비용의 증감은 거의 같기 때문에 LCC에 있어서 유지·관리 비용은 동등하다고 가정하여 비교에서는 제외하고 앞에서 언급한 여러 가지 사회적 비용 및 위험비용을 이용하여 종합적인 경제성 평가 (LCSC)를 수행하였으며, 그 결과 공사비용은 터널공법이 개착공법보다 약 197.20억원 (∵ 805-607.8)을 감축할 수 있으며, 최종적으로 사회적 비용과 위험비용을 포함한 절감비용은 약 259.47억원 (∵ 1597.51-1338.04) 정도로 예상되었다 (그림 4 참조).

표 13. 위험비용 산정근거

구분	개착공법	터널공법	비고
가정사항			<ul style="list-style-type: none"> <li>•영국식 건설공사보험 보통 약관 적용, •보험가입금액(공사비) : 100억</li> <li>•공사기간 : 48개월,•제 3 자 배상책임담보 : 대인, 대물 일괄 10억.</li> <li>•주자기부담금 : ₩30,000,000 - 1 사고당 / 자연재해, ₩10,000,000 - 1 사고당 / 기타사고 / 제 3자 배상책임 (단, 대인제외)</li> <li>•기타 조건 동일</li> </ul>
공사목적물 위험도	1	1.241	•개착공법의 위험도를 1로 보았을 때 터널공법의 위험도는 1.241로 위험도가 커지는 것으로 나타남
제3자 배상책임 위험도	1	0.125	•주변건물의 피해 등에 대한 고려는 제3자 배상책임위험도를 기준으로 개착공법이 더 크게 나타남
보험요율	1.22%	1.65%	•단순히 공사진행의 위험도로 두 대안을 비교하는 건 바람직하지 못하므로 위의 두가지 인자 모두 고려 필요
보험료 (위의 가정 참조)	122백만원	165백만원	•국내 보험사가 동일하게 사용하는 보험개발원 참조요율에 근거한 지하철공사 적용시 보험요율에서 도출

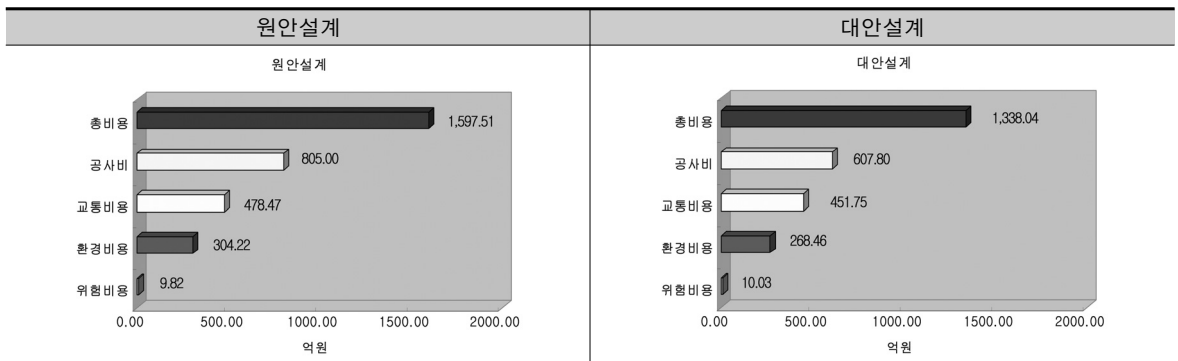


그림 4. LCSC 종합평가결과

표 14. 가치지표 평가결과

구 분		1구간	2구간	3구간	4구간	5구간	6구간	7구간	총 합
정성평가	원 안	-	0.12	0.13	0.20	0.19	0.13	-	0.21
	대 안	-	0.50	0.44	0.81	0.81	0.46	-	0.79
비용평가	원 안	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	대 안	0.98	0.60	0.67	0.71	0.80	0.54	1.11	0.84
가치지표	원 안	-	0.12	0.13	0.20	0.19	0.13	-	0.21
	대 안	-	0.83	0.66	1.14	1.01	0.85	-	0.94

## 7. 가치지표평가

Dell'Isola (1997) 등은 기존의 VE 모형 내에서는 비용평가와 정성평가를 개별적으로 평가할 것을 권고하고 있으며, 또한 GangaRao, Ward & Howser (1988)는 VE 모형을 개량하여 정성적 특성과 비용을 하나의 지표로 제시하여 기능분석 및 대안 목표 선정에 있어서 효율성을 검토해야 함을 권고하고 있다.

이번 연구에서는 이를 위해 가치지표 (value index) 평가를 수행하였으며, 일반적으로 가치지표 평가방법은 대안의 선택에 있어서 동일한 가치지표를 적용하여 추가적인 의사결정 정보를 제시하여 의사결정자에게 도움이 될 수 있는 것으로 알려져 있다.

설문조사를 통한 2~6구간의 AHP결과를 통해 얻어진 정성평가결과와 LCSC에 의해 구해진 비용요소중 원안의 개착공법을 1이라는 비용요소로 하여 정규화시킨 대안의 비용요소를 동시에 고려하여 얻어진 최종적인 가치지표를 표 14에 요약하였으며, 검토결과 연구대상구간의 공법은 원안의 개착공법에 비해 대안의 터널에 의한 굴착공법이 4배 이상의 가치를 지니는 것으로 나타났다.

## 8. 결론

최근 건설공법의 선정에 적용되고 있는 VE 및 LCC 기법의 문제점을 분석하여 개선안을 도출하고자 AHP 기법을 통한 정성적인 분석과정의 객관화와 LCSC 평가기법에 의한 정량평가방법을 제안하였으며, 실제 설계단계에서 터널건설공법결정시의 지하철 ○○공구 적용사례

를 통하여 경제적인 구조물 건설방법을 검토하였다. 본 연구에 있어서 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 건설공법 선정시 VE 의사결정과정에서의 단점을 보완하고자 AHP기법을 도입하였으며, 사례분석을 통해 효율성을 검토하였다.
2. LCC분석을 통해 고려할 수 없는 다양한 형태의 사회적인 비용들을 정량화 하기 위해 LCSC 기법을 개발하였으며, 사례분석을 통해 효율성을 검토하였다.
3. 지하철 ○○공구의 사례에서 정성평가 (AHP)결과 개착공법과 터널공법의 공법간 차이에 있어서 안전성을 평가해볼 때, 가중평균한 전체적인 지표 및 세부항목에서 터널공법이 전반적으로 더 높은 안전성을 가지고 있는 것으로 나타났다.
4. 또한, 사회적 비용과 건설공법의 상대적 위험도를 고려한 LCSC 평가기법에서는 공법의 위험도는 큰 차이가 나지 않으며, 직접공사비용을 고려할 경우 공사비용의 절감액이 위험비용의 증가분에 비해 미소한 것으로 나타났다.
5. 정성평가와 정량평가정보를 종합해 볼 때 개착공법 보다는 터널공법의 채택이 합리적인 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. “철도부문사업의 예비타당성 조사 표준지침 연구 (개정판)”, 2000년도 예비타당성조사 연구보고서, 한국개발연구원, 2000.
2. “도로사업 투자분석기법 정립”, 국토연구원, 1999.
3. “도로 및 철도부문사업의 경제성분석 표준지침”, 1999

- 년도 예비타당성 보고서, 한국개발연구원, 1999.
4. “고속도로 타당성 조사 및 기본 설계 실무 편람”, 한국도로공사, 1998.
  5. “공공교통시설개발사업에 관한 투자 평가 지침”, 건설교통부, 2002.
  6. “건설교통통계연보 (교통부문)”, 건설교통부, 1998.
  7. “98 교통사고 통계분석” pp.255, 도로교통안전협회, 1999.
  8. “1998년 교통사고비용”, 교통개발연구원, 2000.
  9. “소음으로 인한 피해의 인과관계 검토 기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구”, 중앙환경분쟁조정위원회, 1996.
  10. “진동으로 인한 피해의 인과관계 검토 기준 및 피해액 산정방법에 관한 연구”, 중앙환경분쟁조정위원회, 1996.
  11. “도로의 구조·시설기준에 관한 규칙”, 건설교통부, 2000.
  12. “전력 산업의 사회적 비용에 관한 연구”, 한국전력공사, 1997.
  13. “서울시 지하철 9호선 1단계 건설 사업 환경 영향 평가서”, 서울특별시, 2002.
  14. “지하철 9호선 ○○공구 건설공사 대안설계보고서”, 서울특별시 지하철 건설본부, 2002.
  15. “지하철 9호선 ○○공구 건설공사 구조계산서”, 서울특별시 지하철 건설본부, 2002.
  16. Saaty, “Prediction, Projection and Forecasting”, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.
  17. Skibniewski, Mirolaw, Li-Cung Chao, “Evaluation of Advanced Construction Technology with AHP Method”, Journal of Construction Engineering and Management, Vol.118, No.3, pp.577-593, 1992.
  18. Dell’isola, Alphonse, “Value engineering, practical applications for design, construction, maintenance & operations”, RSMears, Kington, 1997.
  19. GangaRao, Ward & Howser, “Value Engineering Approach to Low-Volume Road Bridge Selection”, Journal of Construction Engineering and Management, Vol.114, No.9, pp.1962-1977, 1988.
  20. Al-Harbi, K. M. S., “Application of the AHP in Project Management,” International Journal of Project Management, Vol.19, pp.19-27, 2001.
  21. Saaty, T. L., “The Analytic Hierarchy Process”, New York, McGrawHill, 1980.
  22. Saaty, T. L., “Decision Making for Leaders”, Belmont, California, Life Time Learning Publications, 1985.
  23. Perez, J., “Some Comments on Saaty’s AHP,” Management Science, Vol.41, No.6, pp.1091-1095, 1995.
  24. Harker, P. T., Vargas, L. G. “The Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty’s Analytic Hierarchy Process,” Management Science, Vol. 33, No. 1, pp. 1383-1403, 1987.
  25. Dey, P. K., Tabucanon, M. T., “Petroleum Pipeline Construction Planning: A Conceptual Framework”, International Journal of Project Management, Vol. 14, No.4, pp.231-240, 1996.
  26. Khalil, M. I., “Selecting the Appropriate Delivery Method using AHP”, International Journal of Project Management, Vol. 20, pp.469-474, 2002.
  27. Kirk, S. J. and Dell’isola, A. J., “Life Cycle Costing for Design Professionals”, 1995.



**박준경**

(주)삼보기술단 대리  
samboeng@chollian.net



**전성권**

(주)삼보기술단 과장  
samboeng@chollian.net



**김영근**

(주)삼보기술단 지반부 이사  
babokyg@hanmail.net



**허은녕**

서울대학교 지구환경시스템공학부  
조교수  
heoe2@yahoo.co.kr

---