

# 교통흐름을 고려한 터널단면 확대 시공기술의 사회적 손실비용 산정에 관한 연구

이승수<sup>1,2</sup> · 김동규<sup>1\*</sup> · 서종원<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 지반연구소, <sup>2</sup>한양대학교 건설환경공학과

## A study on the social cost estimation of the tunnel section enlargement method considering traffic flow

Lee, Seung Soo<sup>1,2</sup>, Kim, Dong-Gyou<sup>1\*</sup>, Seo Jong Won<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, HanYang University

**ABSTRACT:** Using existing tunnel for section enlargement and remodeling is being considered as an optimal alternative in order to solve traffic jam in tunnel. The existing method has been performed while blocking the traffic flow. Recently, New enlargement method was developed which can maintain traffic flow during the construction by using protector. It can minimize social loss due to keeping traffic flow. On the other hand, installing and operating protector can cause economic disadvantages. So, social cost estimation considering traffic flow should be considered for relevant economic evaluation of tunnel section enlargement methods. This paper presents the social cost estimation method of tunnel section enlargement methods considering traffic flow. In addition, to compare economic efficiency existing method with new method, suggested method was applied to Maebong Tunnel.

**Keywords:** Joints set, tunnel section enlargement method, social cost, economic feasibility, traffic flow

**초 록:** 도심지 교통량의 증가로 터널구간의 정체현상을 해결하기 위해 기존의 터널을 활용하여 증축 혹은 개축하는 단면 확대공사가 최적의 대안으로 고려되고 있다. 기존의 단면 확대기술은 교통흐름을 차단하고 시공하나, 최근 프로텍터를 활용하여 교통흐름을 유지할 수 있는 교통류 보존형 터널 단면 확대기술이 개발되었다. 이 기술은 교통흐름을 보존하여 수많은 사회적 손실을 최소화 할 수 있으나, 교통흐름을 보존하기 위한 프로텍터의 설치 및 운영으로 경제성 측면에서 불리할 수밖에 없다. 이러한 단면 확대기술들의 경제성을 적절히 평가하기 위해서는 시공중 교통흐름을 고려한 사회적 손실비용을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 터널단면 확대 시공기술의 교통흐름을 고려한 사회적 손실비용을 산정하는 방법을 제시하는 것을 목표로 하였다. 그리고 매봉터널을 대상으로 사례연구를 수행하여 교통흐름에 따른 사회적 손실비용의 차이를 분석하는 것을 목표로 하였다.

**주요어:** 절리군, 터널단면 확대기술, 사회적 손실비용, 경제성, 교통흐름

## 1. 서론

인구가 밀집된 대도시의 교통량이 급격히 증가함으로써 터널의 교통정체현상이 심해지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 신규터널 혹은 우회로를

건설하고 있지만 불필요한 용지매입 등 경제적, 환경적 측면에서 많은 문제점이 발생한다. 따라서 기존터널을 그대로 활용하되 차선을 증축하기 위한 터널단면 확대 시공기술이 최적의 대안으로 고려되고 있다. 국내에서는 기존터널의 단면 확대기술이 적용된 곳은 남산2호터널 및 경기도 화악터널 등이 있다. 그러나 시공중 터널내 교통흐름을 차단하고 공사를 수행함으로써 주변 우회도로의 정체현상을 유발하여 수많은

\*Corresponding author: Kim, Dong-Gyou  
E-mail: dgkim@kict.re.kr

Received July 14, 2015; Revised July 22, 2015;  
Accepted July 27, 2015

사회적 손실을 야기하고 있다(MOLIT, 2012).

따라서 일본, 프랑스 등에서 터널단면 확대공사 중 프로텍터를 활용하여 터널내 교통흐름을 유지할 수 있는 기술을 개발하여 적용중이다(Seo et al, 2008). 이를 통해 우회로의 사용이 필요 없고 우발적인 정체 현상이나 민원의 발생이 없어 사회적, 환경적으로 많은 간접적 이득을 도모할 수 있다. 국내에서도 기술적 필요성을 인식하여 2010년부터 3차년간 건설기술혁신사업의 일환으로 “교통류 보존형 터널단면 확대시공기술 개발”을 추진하였다. 그러나 기존의 확대시공기술에 비해서 차량보호용 강재프로텍터를 설치·해체·운영하는 과정에서 공기와 공사비용이 크게 증가한다는 약점을 가지고 있다. 현재의 설계 타당성 검토나 입찰방식이 대부분 경제성위주로 수행된다는 점을 고려하면, 신 시공기술이 매우 불리할 수밖에 없을 것이다.

기존의 기술과 신기술의 평가가 적절하게 수행되기 위해서는 비용중심의 평가보다 가치중심의 평가가 수행되어야 한다. 터널, 교량과 같은 사회기반시설물의 경우 시공목적의 사회적, 국가적 복지와 편리증진에 있기 때문이다. 국내에서도 공공공사의 입·낙찰제도에서 가치중심의 평가를 위하여 선진국형의 최고 가치낙찰제도의 도입방안이 검토되고 있다(CERIK, 2013). 터널단면 확대시공기술도 교통흐름의 보존 유무에 따라 교통혼잡에 따른 시간적·물질적·환경적으로 손해가 발생되므로 이를 포함하여 평가되는 것이 타당하다. 따라서 본 연구에서는 터널단면 확대시공기술을 대상으로 교통흐름의 보존여부에 따라 발생하는 사회적 손실비용을 산정하는 방법에 대하여 제시하고자 한다.

## 2. 연구수행 범위 및 절차

본 연구는 터널단면 확대시공기술을 대상으로 사회적 손실비용(social cost)을 산정하는 방법을 제시한다. 또한 제시된 방법을 3차로의 매봉터널을 4차로로 단

면을 확대하는 경우를 가정하여 사례연구를 수행하는 것을 목표로 하였다.

확대시공기술과정에서 교통흐름의 보존 여부의 가장 큰 차이점이 우회로의 사용여부와 공사기간의 차이에 있다. 신기술의 경우 프로텍터의 제작·설치·운영 과정에서 공사기간이 크게 증가되므로 이를 고려한 공사기간 산정방법을 제시하였다. 그리고 사회적 손실비용을 산정하기 위한 모델을 정하기 위하여 기존의 연구내용을 살펴보았다. Ehlen & Marshall (1966)은 사용자 비용을 차량운행비용, 시간지연비용, 사고비용뿐만 아니라 도로이용에 불편함 및 환경영향에 의한 추가비용을 반영한 모델을 제시하였다. Yu & Lo (2005)는 건설공사로 인한 사회적 손실비용은 시간변수에 의존된다고 정의하였다. 그리고 지연손실비용(traffic impacts), 환경적 손실비용(environmental impacts), 사업적 손실비용(business impacts)로 구분하고 이를 통합하여 COSCO (time-dependent construction social costs)라는 모델을 개발하였다. 국내에서는 한국교통연구원(Cho et al, 2007)의 “교통혼잡비용 추정 방법 개선”이라는 보고서에서 교통혼잡비용을 크게 차량운행비용과 시간지연비용으로 구분하여 산정모형을 적용하고 있다. 한국개발연구원에서 제시한 “도로철도 부문 사업의 예비타당성 조사 표준지침 수정 보완 연구” 보고서(KDI, 2008)에서는 도로이용에 따른 사용자 편익을 교통사고 절감편익, 주차비용 절감편익, 차량운행비용 절감편익, 통행시간 절감편익, 환경비용 절감편익 등으로 세분화하여 제시하였다.

기존의 연구에서는 교통흐름에 따른 사회적 손실비용으로서 차량운행비용, 시간가치비용, 사고비용, 불편가치비용, 환경오염비용을 고려하고 있다. 사고비용과 불편가치비용의 경우 우회도로의 상태와 날씨 등의 외적환경요인과 운전자의 심리상태를 반영하는 과정에서 주관적 가정이 많이 포함된다. 따라서 본 연구에서는 사회적 손실비용의 산정은 차량운행비용, 시간지연비용 및 환경오염비용으로 범위를 한정하였다. 차량운행비용은 터널의 교통흐름 차단으로 우회

로 설정을 통해 소모되는 운행비용을 의미한다. 시간 지연비용은 교통 혼잡으로 인하여 발생하는 손실시간을 화폐 가치화 한 것으로서 지체된 시간만큼 운전자가 가질 수 있는 시간에 대한 기회비용을 의미한다. 환경오염비용은 각 기술의 적용에 따른 대기오염에 대한 유발상황을 가정하여 비용에 대한 편익을 분석하였다. 사회적 손실비용의 산정을 위해 차량운행비용과 시간지연비용은 한국교통연구원의 모델을 적용하고 환경오염비용은 한국개발연구원에서 제시한 모델을 활용하였다. 마지막으로 매봉터널을 대상으로 사례연구를 수행하였으며, 산정에 필요한 독립·종속 변수를 정의하였다. 그리고 각 산정모델을 활용하여 각 기술의 적용에 따른 사회적 손실비용을 산출하여 비교하였다.

### 3. 사회적 손실비용 산정방법

본 연구에서의 사회적 손실비용 산정을 위한 비용 항목의 범위와 각 비용항목별 적용모델 및 소요변수를 정리하면 Fig. 1의 내용과 같다.

각 사회적 비용항목별 산정 모델은 수식으로 제공

되고 있으나, 산정결과가 신뢰적이기 위해서는 필요한 독립·종속변수를 객관적 데이터에 근거하여 획득하였다. 차량운행비용은 차량의 종류별 우회로 인해 추가되는 유류비 및 차량의 운행에 따른 고정비와 변동비를 반영한 손실비용이다. 따라서 교통량, 연료 비용, 차종별 속도에 따른 연료소모량, 운행거리 등의 데이터가 필요하다. 시간지연비용은 우회로 설정에 따른 시간지연으로 인해 운전자가 손해를 보는 비용으로 교통량, 차종별 운행시간가치비용과 지연시간을 산정하기 위한 거리와 통행시간데이터가 필요하다. 마지막으로 환경오염비용은 차종과 속도에 따라 변하므로, 교통량과 각 차종별 이동거리 및 속도를 독립변수로 하고 이에 따른 차종과 속도별 대기환경오염비용데이터를 활용하여 산정하게 된다. 각 사회적 비용 항목에 대한 구체적인 산정모델과 방법, 그리고 소요 데이터의 적용에 대해서는 본 3장과 4장의 사례연구 과정에서 설명하기로 한다.

#### 3.1 차량운행비용 및 시간지연비용 산정방법

한국교통연구원에서 제시하고 있는 교통혼잡비용

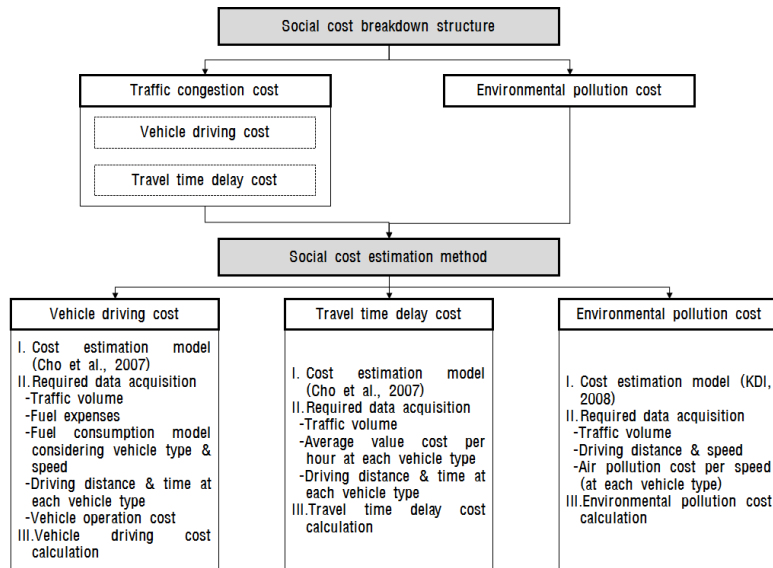


Fig. 1. Social cost estimation process and required data definition

모델은 크게 차량운행비용과 시간지연비용으로 구성된다(Cho et al., 2007). 교통혼잡이 발생하는 시간은 순간마다 다르게 나타나지만, 시간별 정량화하여 시간단위로 계산하는 것이 바람직하다. 따라서 조사된 교통량을 1일 시간대별 분포에 따라 혼잡비용을 계산한 뒤 이를 다시 하루단위 또는 1년 단위의 혼잡비용으로 계산해야 할 것이다.

차량운행비용은 운행여부와 상관없이 고정적으로 지출되는 운전자의 인건비, 차량의 감가상각비, 보험료 및 각종 제세공과금 등의 고정비와 운행의 여건에 따라 달라지는 연료소모비, 차량의 유지정비비, 엔진오일비 및 타이어 마모비 등의 변동비로 구성된다. 본 연구에서는 고정비와 변동비의 연료소모비만을 다룬다. 또한, 시간지연비용은 차량의 운행속도가 느려지거나 우회로 인하여 지체된 시간만큼 운전자가 손해 볼 수 있는 시간을 가치화 한 것이다. 다음 Table 1은 한국교통연구원의 교통혼잡비용모델에 대한 내용으로서 각각 차량운행비용과 시간지연비용을 계산할 수 있는 식이다.

교통혼잡비용의 차량운행비용 계산에 필요한 독립 변수는 대상터널의 시간대별, 차종별 교통량정보, 연

료비 및 우회도로의 평균주행속도 및 거리에 대한 데이터가 필요하다. 일반적으로 터널의 교통량 정보는 시간대별 운행대수로 기록되고 있기 때문에 차종별 교통량은 서울시의 통계연보 자료(Seoul Statistics, 2015)를 참고하여 2008년 등록된 차량의 비율(승용차 82%, 버스 5.7%, 화물차 12.3%)을 따라 산정하기로 하였다. 그리고 연료비를 산정하기 위한 휘발유와 경유의 단가는 2014년도 평균 주유소 판매가격(KNOC, 2015)을 적용하였으며(휘발유 1,827.3원/l, 경유 1,636.7원/l), 최근 서울시내버스는 천연가스를 연료로 하지만 편의상 모두 경유를 사용하는 것으로 가정하였다.

시간지연에 따른 교통혼잡비용 모델은 우회로 인해 변경된 통행시간을 기준으로 각 차종별 평균통행시간 가치비용의 편익을 분석하였으며, 서울시의 차종별 시간당 평균통행시간 가치를 참조(Seoul Development Institute, 2006)하였다(Table 2).

### 3.2 환경오염비용 산정방법

환경오염비용은 한국개발연구원에서 제시한 환경

Table 1. Traffic congestion model (Cho et al., 2007)

		Model	
		$= \sum_i \sum_j \sum_k Traffic\ volume_{i,j,k} \times [Fuel\ expenses_j \times Distance_j \times (Fuel\ consumption_{driving\ speed} - Fuel\ consumption_{reference\ speed}) + Vehicle\ operation\ cost\ per\ hour_i \times (Driving\ time(adjusted)_j - Driving\ time(original)_j)]$	
		i=vehicle class, j=route, k=time, V=speed(km/hr), time=hour	
Traffic congestion cost by driving vehicle	Fuel consumption model	Passenger car=0.02882+0.910/V+0.000003828×V <sup>2</sup>	
		Mini bus=0.03336+1.153/V+0.000004312×V <sup>2</sup>	
		Large bus=0.02476+3.492/V+0.00001277×V <sup>2</sup>	
		Small truck=0.01695+1.292/V+0.00001647×V <sup>2</sup>	
		Large truck=0.06639+4.158/V+0.00002525×V <sup>2</sup>	
Vehicle operation cost per hour	Car	17,061 won/1*hr	labor cost + depreciation cost +insurance cost + tax & the public utilities charge
	Bus	17,329 won/1*hr	
	Truck	13,902 won/1*hr	
Traffic congestion cost by travel time delay	$= \sum_i \sum_j \sum_k Traffic\ volume_{i,j,k} \times Fuel\ expenses_j \times Distance_j \times Average\ value\ cost\ per\ hour(at\ each\ vehicle\ class)_i \times (Driving\ time(adjusted)_j - Driving\ time(original)_j)]$		

**Table 2.** Average value cost per hour (Seoul Development Institute, 2006)

	Car		Bus		Truck	
	work	non work	work	non work	work	non work
Auto occupancy (man)	0.22	1.09	1.46	11.49	1.00	0.00
Time value (won)	18,626	6,091	10,228 (1 man) 18,626 (0.466 man)	3,036	16,571	-
Time value (won/car*hr)	4,177	6,668	18,797	34,884	16,571	
Average time value (won/car)	10,844		53,681		16,571	

**Table 3.** Air pollution cost per vehicle class and speed in 2007 (KDI, 2008)

Class	Speed (km/hr)	CO	NOX	HC	PM	CO2	Total (won/km)
Car	10	34.19	10.69	6.55	0.00	16.14	67.57
	20	15.09	6.13	2.25	0.00	10.91	34.38
	30	9.35	4.43	1.21	0.00	8.69	23.68
	40	6.65	3.52	0.77	0.00	7.39	18.32
	50	5.11	2.94	0.55	0.00	6.52	15.11
	60	4.13	2.53	0.41	0.00	5.88	12.96
Bus	10	57.92	239.01	16.25	41.23	44.87	399.28
	20	40.69	180.62	10.18	29.90	34.95	296.34
	30	33.10	153.33	7.75	24.78	30.20	249.15
	40	28.58	136.50	6.38	21.68	27.23	220.38
	50	25.51	124.74	5.49	19.55	25.12	200.41
Truck	10	63.23	315.68	21.81	70.21	133.26	604.19
	20	37.83	242.86	14.73	52.49	101.71	449.63
	30	28.01	208.33	11.71	44.26	86.85	379.16
	40	22.63	186.85	9.59	39.23	77.63	335.93
	50	19.18	171.72	8.77	35.72	71.17	306.57

오염비용에 대한 산정방법을 적용하였으며, 소음 및 기타 환경오염에 대한 비용은 제외하고, 차량통행에 의해 발생하는 대기오염비용만을 적용하였다. 대기오염비용은 서울시에서 제공한 분석대상에 대한 작간 접 영향권내 링크를 대상으로 통행배정작업의 결과로 산출된 주행속도와 교통량을 이용하여 주행속도에 따른 대기오염단위비용을 적용하여 산정한다. 본 연구에서는 터널과 우회로만을 분석대상 경로로 설정하였다. 근본적으로 교통의 흐름이 우회로나 터널 중 어느 쪽을 이용하든 통행량은 같지만, 차량의 통행속

도에 따라 대기오염비용이 달라지므로 이를 고려하여 산정할 필요가 있다. 다음 식 (1)은 한국개발연구원에서 제시하고 있는 대기오염에 대한 환경오염비용 계산식이며, Table 3은 차종별·속도별 대기오염비용에 대한 내용이다(KDI, 2008). 아래의 식과 표를 참조하여 우회로 및 터널의 차도에 부하된 차종별 교통량과 길이를 곱한 결과를 각 상황별 평균속도에 기초한 차종별 대기오염 단위비용과 곱한 값이 대기오염비용이 된다.

$$\begin{aligned}
 &VOPC(\textit{The Valuation of Pollution Costs}) \\
 &= \sum_l \sum_{k=1}^3 (D_{lk} \times VT_k \times 365) \\
 &D_{lk} = \textit{route}(l), \textit{vehicle class}(k), \\
 &\quad \textit{number of car-km} \\
 &VT_k = \textit{air pollution cost per speed} \\
 &\quad (\textit{at each vehicle class}) \\
 &k = \textit{vehicle class}(1 : \textit{car}, 2 : \textit{bus}, 3 : \textit{truck})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

## 4. 매봉터널 대상 사례연구

매봉터널은 서울특별시 강남구에 위치하고, 평균 통행량이 73,000대/hr의 매우 교통량이 많으며 총 연장 700 m의 터널이다. 사례연구를 위해서는 기존기술이 적용되었을 때 우회로에 대한 거리가 필요하다. 본 연구에서는 국토교통부(2006)의 추가 우회거리 산정기준을 참고하였다. 일반도시부의 추가우회거리 길이 1.27 km를 적용하였으며, 터널 진입구간부터 진출구간까지의 실제길이 0.715 km와 합산하여 1.985 km의 우회도로 길이를 가정하였다.

### 4.1 공사기간 산정

#### 4.1.1 공사기간 산정을 위한 전제조건

매봉터널을 대상으로 공사기간을 산정하기 위해 국내에서 일반적으로 활용되고 있는 발파방식의 확대 기술을 기준으로 하였으며, 3차선을 4차선으로 확대하는 경우로 정의하였다. 터널단면 확대기술은 일반적으로 굴진사이클(발파굴착, 버력처리, 강지보공, 슛크리트공 및 락볼트공 등)의 주요공종이 라이닝, 방수공, 포장공 및 기타 부대공의 세부공종과 함께 반복적으로 수행된다. 따라서 각 기술별 기존의 사례와 전문가의 의견을 수렴하여 굴진사이클을 산정하였다. 기존 확대기술은 하루에 2번 발파를 수행하고 1번 발파에 1 m 씩 진행되는 것으로 하였다. 반면, 프로텍터를 사용하는 신기술은 굴착 전·후로 프로텍터를 움직이는 시간을 포함하여야 하며, 공사장의 폭과 범위가

좁아지기 때문에 하루에 1번 발파하는 것으로 전제하였다. 그리고 발파 전·후로 하루 1시간씩 발파에 의한 차량보호 및 터널환기를 위하여 차량을 통제하고, 이는 차량통행이 가장 적은 해뜨기 전 1시간을 기준으로 이루어진다고 가정하였다. 즉, 신기술은 발파당 1 m 진행으로 1일 1사이클 굴착이 진행되며, 굴착공사기간 동안 매일 하루 1시간씩 차량통제가 이루어지고, 이 시간에 프로텍터의 이동도 수행된다. 본 논문에서 터널 확대공사의 1사이클은 굴착, 버력처리, 강지보공, 슛크리트공 및 Rock Bolt공의 주요 세부공종의 수행프로세스를 의미한다.

그리고 굴착시간의 선정과 함께 프로텍터의 설치 및 해체에 따른 공사일수도 고려되어야 한다. 프로텍터의 제작은 미리 이루어진다고 가정하여 공사기간에 포함하지 않지만, 프로텍터를 이동하여 터널에 설치하는데 일반적으로 최소 2주(15일)의 시간이 필요하며, 공사이후 해체시에도 동일한 시간이 필요한 것으로 가정하였다. 그리고 프로텍터 설치 및 해체과정에서 프로텍터 구성요소들의 이동 및 원활한 작업을 위해 야간 8시간동안 차량을 통제하고 이루어진다고 가정하였다. 따라서 이에 따른 차량통제 시간은 총 30일간 야간 8시간씩 이루어진다.

굴착 및 프로텍터 설치 및 해체 등을 제외한 콘크리트 라이닝, 방수공, 포장공 등의 공종에 대해서는 공사기간을 산정하기 위하여 구체화된 터널의 총 연장 및 총 작업량을 단위 시간당 작업량으로 나누었다. 단위 시간당 작업량은 기존터널의 확대공사 작업사례를 참고하였다. 각 공종별 단위 시간당 작업량은 콘크리트 라이닝(10 m/4day), 방수공(10 m/day), 포장하부(500 m<sup>3</sup>/day), 포장상부(5,000 m<sup>3</sup>/day)로 적용하였으며, 기타 부대공은 개략적인 총 소요공기(기타 부대공 30일; 매봉 터널 3->4차로 확대 기준)를 가정하여 반영하였다.

#### 4.1.2 각 기술별 공사기간 산정결과

4.11절의 공사기간 산정조건을 바탕으로 각 기술별

**Table 4.** Construction period calculation

Work	Unit	Existing method			New method		
		Quantity	Unit time	Duration	Quantity	Unit time	Duration
Tunnel length (m)		700			700		
Advance per 1 cycle		1 m			1 m		
The number of cycle per day		2 m/day			1 m/day		
Protector installation		-			15		
Protector dismantlement		-			15		
1 Cycle (excavation+muck-hauling+steel supports+rock bolt+shotcrete)	m	700	2 m/day	350	700	1 m/day	700
lining concrete	m	700	10 m/4day	280	700	10 m/4day	280
waterproofing	m	700	10 m/day	70	700	10 m/day	70
drainage	Drainage work perform simultaneously with waterproofing work						
paving (lower part)	m <sup>3</sup>	3,750	500 m <sup>3</sup> /day	8	3,750	500 m <sup>3</sup> /day	8
paving (upper part)	m <sup>3</sup>	3,750	5000 m <sup>3</sup> /day	1	3,750	5000 m <sup>3</sup> /day	1
subsidiary	m	-	-	30	-	-	30
Total (day)		750			1,130		

공사기간을 산정하였다(Table 4). 배수공은 방수공과 함께 병행되는 것으로 하여 별도의 공사기간을 산정하지 않았다. 신기술은 1일 1 굴진사이클의 프로세스를 고려하고, 프로텍터 설치·해체기간의 30일을 추가하였다. 총 공사기간은 기존 확대기술이 750일, 신기술이 1,130일이 소요되는 것으로 분석되었다.

## 4.2 사회적 손실비용 산정

### 4.2.1 교통흐름을 고려한 사회적 손실비용 산정 방법

기존기술을 사용하는 경우에는 총 공사 기간에 걸쳐 터널내 교통흐름이 완전 차단되는 경우이므로, 모든 차량이 우회한다고 가정하고 제시한 우회거리를 적용하여 사회적 손실비용을 산출한다. 즉, 총 공사기간동안 모든 차량이 우회하므로 교통흐름은 공사기간동안 동일하다고 보고 1일 차량지체비용, 1일 시간가치비용, 1일 환경피해비용을 산정하고 총 공사기간을 곱하여 산출한다.

반면, 신기술의 경우 교통흐름은, 크게 3가지로 나누어진다. 첫 번째는 프로텍터를 설치·해체하는 기간

의 30일 동안, 터널은 야간 8시간동안 차량을 통제한다고 전제하였다. 이는 프로텍터 구성요소들의 이동 및 원활한 작업을 위해 통상적으로 실시되며, 교통량이 가장 적은 야간에 실시된다고 가정하였다. 두 번째는 매일 1시간씩 심야시간에 차량을 통제하는 경우이다. 굴착 및 방수·배수공에 해당하는 공사기간동안 프로텍터 이동시간 및 발파에 따른 차량보호, 환기를 위하여 하루 1시간, 교통량이 가장 적은 해뜨기 전 시간에 차량을 통제하게 된다. 마지막은 공사기간 전체에 걸쳐 교통통제가 이루어지지 않는 기간을 고려하는 경우이다. 이는 터널내 교통흐름이 진행되는 경우에도 사회적 손실비용은 발생하게 되므로 이때의 간접비도 산출해야한다. 따라서 신기술의 경우 사회적 손실비용은 야간 8시간 통제하는 동안의 차량지체비용, 시간가치비용, 환경피해비용을 산출하고 이를 프로텍터의 설치·해체기간(30일)을 곱하여 계산한 값과, 심야 1시간 통제 하는 경우의 간접비용을 총 통제일수를 곱하여 계산한 값, 그리고 통제하지 않는 경우의 1일 사회적 손실비용을 총 공사기간으로 계산한 값의 총합을 말한다.

**Table 5.** Calculate social cost for existing technology

	Existing technology			
	car	bus	truck	
Tunnel length (km)	0.7			
diversion route length (km)	1.985			
percentage at each vehicle type in Seoul	82%	5.7%	12.3%	
fuel expenses (won/liter)	1,827.3	1,636.7	1,636.7	
reference speed (km/hr)	40			
driving speed (km/hr)	25			
vehicle operation cost per hour (won)	17,061	17,329	13,902	
average time value (won/car)	10,844	53,681	16,571	
traffic volume per day (ea)	73,041			
fuel consumption of reference speed (l/km)	0.0576948	0.132492	0.21074	
fuel consumption of driving speed (l/km)	0.0676125	0.17242125	0.24849125	
driving time (original)	0.0280 hr			
driving time (altered)	0.0794 hr			
Air pollution cost (won/ea*km)	34.38	296.34	449.63	
Traffic congestion cost (per day)	by driving vehicle	53,917,612	4,057,955	7,132,968
	by travel time delay	33,383,602	11,487,494	7,652,153
VOPC (pollution cost) (per day)	2,645,998	1,585,386	5,190,751	
construction period (day)	750			
<b>Total social cost (won)</b>	67,460,408,864	12,848,126,099	14,981,904,542	
	<b>95,290,439,504</b>			

각 기술별 사회적 손실비용을 산정하기 위해서는 교통흐름에 따른 각 적용기간, 평균통행속도 및 교통량이 결정되어야 한다. 따라서 서울시에서 제공한 매통터널 및 주변의 교통량 정보를 바탕으로 각 기술별 분석에 필요한 교통량을 적용하였다. 그리고 승용차, 버스, 화물차로 구분하여 비용을 구체화 하였으며, 서울시에 등록된 차종별 비율(승용차: 82%, 버스: 5.7%, 트럭: 12.3%)을 적용하여 각 시간대별 통행대수를 산정하였다. 간접비 산정에 필요한 우회로 기준속도(reference speed)는 심야시간(22:00~06:00) 기준 70 km/hr, 주·야간 평균 40 km/hr로 가정하였다. 또한 우회로 및 터널내의 시간대별 평균속도(driving speed)를 참조하여 심야시간대의 우회도로 평균속도는 50 km/hr, 주·야간 평균속도는 우회도로 및 터널

모두 25 km/hr를 적용하였다(Seoul Expressway Traffic Control Center, 2013).

3장에서 정의한 사회적 손실비용 산정방법을 바탕으로 먼저 기존기술에 대한 비용을 분석해 보았다 (Table 5). 기존 확대기술의 750일의 공사기간동안 발생하는 사회적 손실비용은 약 953억으로 산정되었다. 교통혼잡비용은 차량운행비용이 약 488억, 시간지연 비용이 약 394억이 발생되었다. 그리고 환경오염비용은 약 70억이 발생되었다. 차종별 발생하는 비용은 승용차 약 674억, 버스 약 128억, 트럭 약 150억이다.

신 확대기술을 대상으로 교통흐름에 따른 사회적 손실비용을 산정한 결과는 Table 6의 내용과 같다.

신 확대기술의 사회적 손실비용을 계산한 결과 1,130일의 공사기간동안 약 763억원으로 분석되었다.



**Table 6.** Calculate indirect cost for new technology

	New technology			
	car	bus	truck	
Tunnel length (km)	0.7			
diversion route length (km)	1.985			
percentage at each vehicle type	82%	5.7%	12.3%	
fuel expenses (won/liter)	1,827.3	1,636.7	1,636.7	
reference speed (km/hr)	70			
vehicle operation cost per hour	17,061 won	17,329 won	13,902 won	
average time value (won/car)	10,844	53,681	16,571	
fuel consumption of reference speed	0.0605772 l/km	0.137218714 l/km	0.249515 l/km	
driving time (original)	0.0140 hr			
<b>1. 30 days (8 hrs/1 day) during protector installation/dismantlement</b>				
traffic volume at night (22:00~06:00)	11,369 ea			
driving speed (km/hr)	50			
fuel consumption of driving speed	0.05659 l/km	0.126525 l/km	0.212675 l/km	
driving time (altered)	0.0397 hr			
Traffic congestion cost (per day)	by driving vehicle	4,000,370	274,030	391,270
	by travel time delay	2,598,117	894,027	595,538
VOPC (pollution cost) (per day)	411,856	246,769	807,952	
construction period (day)	30			
<b>social cost (won)</b>	210,310,282		53,842,805	
	306,597,887			
<b>2. 700 days (1 hrs/1 day) during cycle work construction</b>				
traffic volume at night (04:00~05:00)	666 ea			
driving speed (km/hr)	50			
fuel consumption of driving speed	0.05659 l/km	0.126525 l/km	0.212675 l/km	
driving time (altered)	0.0397 hr			
Traffic congestion cost (per day)	by driving vehicle	234,343	16,053	22,921
	by travel time delay	152,199	52,372	34,887
VOPC (pollution cost) (per day)	24,127	14,456	47,330	
construction period (day)	700			
<b>social cost (won)</b>	287,467,833		73,596,375	
	419,080,936			
<b>3. 1,100 days except case 1&amp;2</b>				
traffic volume per day (ea)	73,041			
driving speed (km/hr)	25			
fuel consumption of driving speed	0.0676125 l/km	0.17242125 l/km	0.24849125 l/km	
driving time (altered)	0.0280 hr			
Traffic congestion cost (per day)	by driving vehicle	33,791,491	2,020,101	3,497,093
	by travel time delay	18,185,620	6,257,779	4,168,488
VOPC (pollution cost) (per day)	224,357	134,427	440,130	
construction period (day)	1,100			
<b>social cost (won)</b>	57,421,614,365		8,916,281,559	
	75,591,432,920			
<b>Total social cost (won)</b>	<b>76,317,111,743</b>			

기존 확대기술의 약 953억원에 비해 대략 190억원의 비용이 적게 발생되었다. 이는 신 확대기술이 터널내 교통흐름을 보존하고 우회로의 사용을 최소화함으로써, 기존기술이 우회로의 통과 소요시간이 0.0794시간이 걸리는데 반해 0.0358시간으로 약 2배의 시간이 절약되고 운행거리도 증가하지 않기 때문이다. 따라서 운행거리와 주행시간에 영향을 받는 차량운행비용, 시간지연비용 및 환경오염비용으로 구성되는 간접비에서 큰 차이가 발생하는 것을 확인 하였다. 특히 본 연구의 간접비 분석에 활용된 주행시간은 기존의 연평균 데이터를 활용하였는데 실제로는 기존기술과 같이 교통흐름을 차단할 경우 모든 차량이 우회로로 집중되어 보다 시간이 불리하게 작용되어 간접비의 차이가 크게 나타날 것으로 예상된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 터널단면 확대시공기술의 교통흐름에 따른 사회적 손실비용을 산정하기 위한 방법을 제시하였다. 그리고 매봉터널을 대상으로 사례연구를 수행하여 결과를 고찰하였다. 사회적 손실비용을 구체화하기 위하여 차량을 승용차, 버스, 트럭으로 구분하고, 교통흐름에 따른 우회로의 사용을 고려하여 차량운행비용, 시간지연비용 및 환경오염비용을 제시된 방법에 따라 산정하였다.

분석결과 교통흐름을 보존할 수 있는 신 확대기술이 사회적 손실비용을 보다 절감할 수 있는 것으로 확인되었다. 향후 직접비의 차이까지 고려하여 비교한다면 보다 타당성 있는 공법간 가치평가가 수행될 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서는 서울시의 교통량 데이터를 활용하여 우회도로의 통행속도와 시간을 반영하였지만, 실제 터널의 교통흐름 차단시 우회도로의 교통량이 추가되어 정체현상이 심해질 것이다. 이를 반영하기 위해 동일 시간대 터널 교통량을 추가 반영하고, 이에 따른 우회도로에서의 속도를 산정할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것이다. 그리

고 사회적 손실비용을 고려한 공법의 연구 및 개발이 지속적으로 추진되어 국가적인 차원에서의 간접적 이득을 고려해야 할 것이다. 특히, 프로텍터 공법과 같은 경우에도 차량통행 차단시간이 간헐적으로 발생되기 때문에 통행자에게 혼란을 유발시킬 수 있다. 그리고 공사기간이 기존기술보다 불리하기 때문에 이러한 문제점을 지속적으로 개선시켜야 한다.

사회적 손실비용은 시공사나 발주자에게 체감이 되지 않아 대부분 설계과정에서 간과되는 실정이다. 그러나 근래와 같이 대규모 도시가 발달하고 인구가 밀집된 환경에서 발생하는 사회적 손실비용은 지역사회, 나아가 국가적으로 막대한 경제적 손실을 유발한다. 따라서 보다 관심을 가지고 평가에 반영할 필요가 있을 것이다.

## References

1. CERIK(Construction & Economy Research Institute of Korea) (2013), A Study on the Overall Evaluating System for Best Value in Bidding of Public Construction Projects, Research Report.
2. Cho, H. S., Park, I. K., Lee, D. M., Park, J. S. (2007), Improvement of the Estimation Method for Traffic Congestion Costs, The Korea Transport Institute, ISBN 978-89-5503-259-8.
3. Ehlen, M. A & Marshall, H. E. (1996), The Economic of New Technology Materials: A Case Study of FRP Bridge Decking, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
4. KDI(Korea Development Institute) (2008), The Research of Evaluating and Revising Standard Guideline for Preliminary Feasibility Study of Road and Railway Business Sector(V), 2008 Research Report for Preliminary Feasibility Study.
5. KNOC(Korea National Oil Corporation) (2015) Domestic Oil Prices 2011, <http://www.opinet.co.kr/user/dopospdrg/dopOsPdrSelect.do>.
6. MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and

- Transport) (2012) The Development of Tunnel Section Enlargement Technology Keeping Traffic Flow(III), MOLIT R&D Report.
7. Seo, K. W., Back, K. H., Kim, W. G. (2008), “The Analysis of Foreign Cases about Tunnel Section Enlargement Method in Operation (Ⅱ)”, Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 2, pp. 71-79.
  8. Seoul Development Institute (2006), Seoul Traffic Index in 2005, Seoul Magazine.
  9. Seoul Expressway Traffic Control Center (2013), Traffic statistics by region, <http://www.smartway.seoul.kr/>.
  10. Seoul Statistics (2015), Vehicle registration status 2008, [http://stat.seoul.go.kr/jsp3/stat.db.jsp?cot=017&srl\\_dtl=10383](http://stat.seoul.go.kr/jsp3/stat.db.jsp?cot=017&srl_dtl=10383).
  11. Yu, W. D. and Lo, S. S. (2005), “Time-dependent construction social costs model, Construction Management and Economics”, Vol. 23, No. 3, pp. 327-337.