

# 터널사고 재난 안전비용 분석 방법에 관한 연구

백충현\*  
\*㈜서현기술단

## A Study on the Analysis Method of Safety Cost of Tunnel Accident

Chung-Hyun Baek\*  
\*Seohyun Engineering

### Abstract

This paper analyzed a survey of 388 general target samples to analyze the correlation between disaster safety costs and human risk factor analysis and evacuation behavior due to tunnel accidents. Considering the impact of the tunnel accident on disaster safety costs and the correlation between human evacuation and risk factors in the tunnel environment, the system should be reorganized to reflect the tunnel's basic plan, tunnel cross-section, tunnel installation.

**Keywords :** Transportation Safety, Tunnel Accidents, Safety Cost

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 SOC 건설 물량이 확대되고 있고, 교통 분야에서 자동차와 철도의 고속화를 위한 장대터널 건설 역시 증가하고 있다. 이러한 고속화의 목적 달성을 위해 장대터널 건설이 당연시 되지만, 영화 '터널'에서와 같이 건설 시의 부실, 겨울철 블랙 아이스 등으로 인한 터널 내 추돌 등으로 인한 사고 위험성이 높아져서 재난안전사고로 인한 사상자 발생이 늘어나고 있다.

터널의 제한적인 공간은 구조적으로 길어깨 여유가 없고 1차 사고발생 시 사고조치 공간이 부족하여 2차 사고 유발 가능성이 높아 대형사고로의 확대 가능성이 높다. 특히 터널 내부의 낮은 밝기로 인해 운전자의 시야가 좁아지고 속도감이 떨어지는 착시 때문에 과속이 발생하여 터널 내 사고발생의 원인이 되기도 한다.

직접적인 충돌 사고 외에도 밀폐된 터널 내부에서 화재 발생 시 부수적으로 발생하는 연기는 터널 내부공간의 산소 공급이 한정되어 불완전 연소가 되는 경우가 많다. 발생한 연기는 외부 배출이 안될 경우 터널 내에 정체되어

터널 내 사고로 인해 대피가 어려운 사고 피해자들의 질식사 원인이 되기도 한다. 최근 전기차량 도입의 확대와 위험물 차량 등으로 화재전파가 이루어져 일반화재와 달리 진화가 어렵고, 인명피해가 많이 발생할 수 있다. 고속도로 터널 내 교통사고 차량화재 재난사고 원인은 엔진과열·적재함·자동차 추돌·터널 전기합선 등이라고 조사되었으며, 또한 터널 내 교통사고 재난 발생 주사고 원인으로서는 차량화재·과속·제동장치·졸음운전·주시태만·적재불량·추돌불량·안전거리미확보·노면잡물·타이어파손으로 조사되었는데 이는 모두 인적 재난에 따른 것으로 조사되었다.

본 논문에서는 다양한 변인으로 터널 인적 위험인자를 도출하여 터널 이용자와 관리자의 터널 화재 시 대피 행동에 대한 인식 제고와 터널 내 환경 안전을 위한 정책에 인적 위험요소 인자를 도출하여 활용하고자 하였다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

#### 1.2.1 연구의 범위

본 연구는 터널 내에서 발생하고 있는 재난안전 교도사

†Corresponding Author : Chung-Hyun Baek, Seohyun Bldg, Heungan-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea, E-mail: uman2943@naver.com

Received: February 15, 2021; Revision: March 22, 2021; Accepted: March 22, 2021

고에 대해 2015~2017년간 총 3년간의 국내 고속도로를 대상으로 교통사고 재난유형 및 비용을 분석하였다. 이에 필요한 대책을 강구하고 터널 교통사고 재난을 최소화하기 위해 교통가치 비용분석과 인적 위험요소 인자를 제시하였다.

본 연구의 공간적 범위는 서울외곽순환 고속도로 상행선으로 하였고, 시간적 범위는 2018년 6월 12일(화) 오전 08시~09시까지 1시간으로 설정하였다. 연구 내용적 범위는 1) 기존 소화설비 화재진압 시스템의 고속도로 터널화재 시 터널 길이와 교통량에 따른 교통정체 비용을 분석하여 시간가치가 운행가치 보다 더 영향을 미칠 수 있음을 분석, 2) 통행가치 시간을 정체시간, 차종별 시간가치(원/대)·차종별 교통량(대/시) 등의 요인으로 구성 후 비용을 도출하여 시간가치와 운행가치의 영향관계를 분석, 3) 기존 소화설비와 대안으로 제시하는 초기 화재진압 기술의 교통정체 비용을 산출하여 정체시간이 길어질수록 증가하는 시간가치를 분석한다.

## 1.2.2 연구의 방법

시간가치 비용과 운행비용 분석을 위해 문헌 조사는 국토교통부 한국도로공사 도로교통연구원 2015년도 자료를 이용하여 기존의 고속도로 터널 재난 발생 유형에 대하여 실시하고, 기존의 교통사고 재난 유형 조사를 발생 건수·인명피해·주사고 원인·사고 전 차량 속도·요일별·주야구분·사고 시간·날씨·권역별·포장 구분 등 10개 항목에 대하여 비용을 분석하고 조사하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 기존 터널 재난발생 유형 연구

터널 안전의 인적 위험요소는 재난발생의 유형에 따라 나눌 수 있다. 터널 안전의 인적 위험요소는 소화설비·터널화재·혼잡비용·교통사고·교통분석·교통안전·위험도·환기설비·터널구조 등에 따라 나눌 수 있다. 각 위험요소에 대하여 국내·외 연구 문헌을 조사하고, 기존의 도로 터널 재난발생 사례를 분석하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 장에서는 국내·외 문헌을 조사하고, 재난 안전비용 인적 위험요소 간의 상관관계를 문헌을 통해 분석하였다.

조현준(2015)은 미분무 소화설비에 따른 터널내부 연기 환기에 대한 연구를 수행하였다. 본 문헌에 따르면, 미분무소화설비에 대한 국외 인증기준은 실험시의 용도, 부피, 위험정도 등에 따라 화재를 구분하여 실의 치수, 개구

부, 노즐의 이격 거리, 재질, 높이 등에 따라 정량적으로 제시하고 있다. 그러나 국내의 경우에는 최소 길이, 부피, 벽의 최소 두께, 재질, 외벽의 불연재 보강 등의 기준만을 제시하고 그 범위 내에서 신청자의 재량에 맡기고 있다. 또한 국내의 경우, 시험실의 규격과 정형화된 기준이 없어 미분무 소화설비에 대한 데이터 축적이 쉽지 않다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 미분무 소화설비에 따른 터널 내부 연기 환기에 대한 설비와 관련하여 설문조사를 실시하였다.

소수현, 박경환(2010)은 방수밀도에 대한 물분무 소화시스템 실험을 실시하였다. 2차선 도로터널 모형세트에서 실시한 1개의 물분무노즐의 방수밀도시험 결과, 방수밀도는 전후, 좌우가 매우 불균일하게 나타났다. 최고밀도와 최소밀도의 밀도 비는 0.35MPa에서 2.7배, 0.5MPa에서 7.3배로 나타났다. 이것은 물분무노즐의 물의 분사 정도가 매우 불균일함을 보여준다. 1개의 노즐을 설치한 경우, 도로터널의 화재안전기준 및 도로터널방재시설설치 및 유지관리지침에서 정하고 있는 기준밀도인 6L/min·m<sup>2</sup>에 비해 상당히 낮은 4.16L/min·m<sup>2</sup>(0.35 MPa), 4.8L/min·m<sup>2</sup>(0.5MPa)으로 매우 작음을 알 수 있다. 2차선 도로터널 실험터널에서 실시한 5개의 물분무노즐의 방수밀도시험 수행 결과, 3종류의 노즐에서 측정된 평균방수밀도는 5.6, 5.8 및 5.9L/min·m<sup>2</sup>으로 기준밀도인 6.0L/min·m<sup>2</sup>에 근접하였다. 방수분포를 보면, A노즐은 가운데 열에 있는 물통을 중심으로 좌우 밀도비가 작고, 앞뒤 밀도비가 크게 나타났다. B노즐은 좌우가 균일하였으며, C노즐은 좌우, 전후 모두 균일한 분포를 보여주었다. 노즐에서 가까운 바닥에 비해 중간의 물통에서 일반적으로 높은 방수밀도를 보여주고 있다. 따라서 본 문헌을 통해 대피행동 지연요인 설문조사를 실시하고 연구하였다.

김선영(2004)은 혼잡비용에 대한 사회적 손실과 관련하여 연구를 실시하였다. 본 문헌에서는 출근시간대 발생한 고장차량의 추가 혼잡비용은 1시간당 분석구간에서 소동이 원활한 경우나 정체 시 모두 약 3백만 원 정도로 산출되었다. 지정체 지속시간과 현재, 4월 고장차량 발생 건수 166건에 의한 혼잡비용의 총합은 엄청난 사회적 비용의 손실을 유발하는 것으로 추정할 수 있다. 현재와 같이 운전자들의 고장차량 발생 시 그 파급효과에 대한 인식이 미흡한 상황에서는 그 발생건수나 처리시간이 단축되기 어려우며, 사회적 혼잡비용을 줄이기도 어렵다. 본 문헌을 통해 본 연구에서는 터널 내 재난 안전비용과 관련하여 시간가치 비용이 운행비용보다 얼마나 더 영향을 미치는지 가설을 입증하려 하였다.

서임기(2012)등은 장대터널 교통사고 특성분석 연구를 실시하였다. 장대터널의 설계요소에서 교통사고와 관련된 요인은 종단경사, 측방 여유폭 요인이 교통사고와 영

향이 있는 것으로 분석되었다. 측방여유폭은 부(-)의 부호로 측방여유폭이 2m 이하일 경우에 교통사고의 위험이 있는 것으로 분석되었다. 교통 환경 요인의 차로당 연평균 일교통량은 정(+)의 부호로 10,000대 이상일 경우에 교통사고가 많이 발생한 것으로 분석되었다. 시선유도시설 중 장대터널 공동구 내장재 요인이 교통사고와 밀접한 관련이 있는 것으로 분석되었다. 본 문헌과 같이 교통사고에 따른 특성분석 연구를 통해, 터널 내 대피행동 가속화 요인의 위험 상황의 설문조사를 실시하고 분석하는 연구를 수행하였다.

이강훈(2019)에서는 고속도로 터널 안에서의 교통특성 연구를 수행하였다. 본 문헌에서는 관련 연구 및 사례를 검토하였다. 국내·외 터널 차로운영 관련 법제도 등을 조사분석 하였으며, 터널의 운전자특성, 시설특성, 교통류 특성에 관한 기존연구 등을 검토하였다. 둘째, 차로운영 유형별 교통류 특성 분석모형을 개발하고 이를 이용하여 터널 교통류를 분석한 결과 터널 진입 전후 교통류의 상태 변화에 영향을 주는 세 영향 요인(교통량, 중차량 비율, 터널 길이)과 속도변화량 분산의 관계를 검토하였다. 셋째, 차로운영유형별 시나리오에 대한 시뮬레이션 분석을 하였다. 이를 위해 창원1터널에 대한 시뮬레이션 네트워크 구성 및 정산을 수행한 후, 교통량수준, 중차량비, 차로 변경가능을 등 분석대안별로 시나리오 분석을 하였다. 넷째, 차로운영 유형별 교통류 특성 분석결과와 실제 터널의 교통특성 등을 비교분석 하였다. 다섯째, 터널 교통사고를 분석하고 차로운영 유형별로 분석하였다. 이를 위해 일반 구간, 차로운영유형별 교통사고 특성 등을 비교분석하고 해석모형, 시뮬레이션 분석결과와 비교분석 하였다. 마지막으로 교통특성 분석, 실제 터널 교통특성, 교통사고특성 분석결과 등을 근거로 합리적인 터널 내 차로운영 전략을 제시하였다. 본 문헌을 통해, 터널 내 대피행동을 반대하는 집단행동 설문조사를 실시하고 분석하였다.

김남영(2014)은 지하도 입체교차로 안에서의 환기 특성연구를 수행하였다. 자연환기량은 1차원 터널에서 얻을 수 있는 결과와 동일하게 차량 주행속도가 빨라질수록 증가하며, 단면적이 넓은 본선이 좁은 본선보다 많다. 지하도로 본선의 CO 농도는 중간에 연결로가 연결되어 있지 않는 한길이 방향으로 선형적으로 증가하며, 차량이 유출되는 접속부 하류의 CO 농도 기울기는 차량 주행속도가 저속 시에는 증가하고 고속 시에는 감소하였다. 연결로의 자연환기량은 연결로의 길이, 지하도로 내의 차량 대수, 차량의 주행속도 상승에 따라 증가하며, 연결로의 입출구

양단에 접속되는 본선의 단면적 넓이는 양쪽이 넓은 경우와 한쪽만 넓은 경우, 양쪽이 좁은 경우 3가지 형태인데, 양단이 넓은 단면적의 본선과 연결되면 자연환기량이 가장 많고, 양단이 좁은 단면적의 본선과 연결되면 자연환기량이 가장 작았다. 연결로의 CO 오염농도는 본선과 마찬가지로 자연환기량이 많은 연결로가 낮게 나타났다. 자연저항풍에 의해 -2.5m/s의 역풍이 지하도로 내에 영향을 미칠 때 자연저항풍이 없는 경우 보다 자연환기량은 전반적으로 감소하며 자연환기량의 감소폭은 차량 주행속도 저속 시가 고속 시에 비해 더 큰 것으로 나타났다. 지하도 입체교차로 안에서의 환기 특성에 대한 본 문헌을 통해 터널 내 대피행동 자연요인 설문조사를 실시하고 분석하였다.

## 2.2 터널 사고 시 재난안전비용 분석 방법

### 2.2.1 터널 사고 재난 안전비용 산출 지표

#### 2.2.1.1 재난안전 통행시간가치 비용

교통사고로 인한 도로정체 시 발생하는 비용 중 가장 큰 부분을 차지하는 것은 사고로 인해 발생하는 재난에 따른 손실시간을 화폐화한 시간가치 비용이다. 시간가치비용은 차량별 재차인원 및 업무(출퇴근 인원), 비업무(쇼핑객, 통학생, 여가인원 등) 통행비율과 차량 1대당 재차인원에 의해 산정된다. 「교통시설 투자평가지침(제6차 개정), 2017.6, 국토교통부」에서는 2015년 기준가격의 차종별 차량 1대당 시간가치를 제시하고 있다. 본 연구에서는 <Table 1>과 같이<sup>1)</sup> 소비자물가지수를 적용하여 2017년 기준으로 차량 1대당<sup>2)</sup> 통행시간가치를 산정하였으며 그 결과 승용차는 15,700원/대, 버스 93,381원/대, 화물차는 17,190원/대로 나타났다.

재난안전 통행시간가치의 산정은 교통사고로 인해 발생하는 정체시간, 차종별 시간가치 그리고 차종별 시간교통량을 이용하여 산정할 수 있으며, 그 산정 값은 <식 1>에 의하여 산정하였다.

$$\text{총시간가치} = \sum_{k=1}^3 (\text{정체시간}_k \times \text{차종별 시간가치}_k \times \text{시간교통량}_k) \quad \text{<식 1>}$$

k = 차종 (1: 승용차, 2: 버스, 3: 화물차)

1) 2017년 기준 시간가치는 소비자물가지수를 이용하여 보정한 값임.  
2) 통행시간가치(Value of travel time)란 교통서비스를 이용하는 사람이 통행할 때, 통행시간 단축을 위하여 지불하고자 하는 금전적 가치를 말하는데, 차량별 재차인원 및 업무(출·퇴근 인원), 비업무(쇼핑객, 통학생, 여가 인원 등) 통행비율과 차량 1대당 재차 인원에 의해 산정된다.

2.2.1.2 재난안전 운행비용

교통사고로 인한 재난 교통정체 비용에는 통행시간가치비용 이외에 차량 운행에 따른<sup>3)</sup> 운행비용이 있다. 운행비용은 크게 유류비, 엔진 오일비, 타이어 마모비, 유지관리비, 감가상각비로 구분된다. 일반적인 도로운행 시 이 비용의 추정을 위해서는 구간속도, 교통량 및 도로연장 등의 자료가 필요하다.

본 연구에서는 터널 교통사고로 인해 발생하는 재난안전 운행비용을 산정하는 것으로 터널연장, 시간당 교통량 그리고 사고로 인한 교통정체 시 통행속도를 적용하여 운행비용을 산정하였다. 운행비 세부항목별 원 단위는 「교통시설 투자평가지침(제6차 개정), 2017.6, 국토교통부」에서 제시하는 차량 속도별 운행비용을 적용하였다. 그리고 재난안전 운행비용 산출은 <식 2>에 의하여 계산하였다.

$$\text{운행비} = \sum_{k=1}^3 (\text{차종별 시간교통량}_k \times \text{해당속도 차종별 운행비용}_k) \quad \text{<식 2>}$$

k = 차종(1 : 승용차, 2 : 버스, 3 : 화물차)

2.2.1.3 분석 교통량

본 연구에서는 청계터널, 안양터널, 사패산터널 그리고 수락산터널 터널에 대한 교통정체 비용을 산정한 후 짧은 터널과 장대 터널에 대한 비교 분석을 수행하였다. 분석 교통량은 교통량정보제공시스템(<http://www.road.re.kr>)의 시간대별 교통량 조사 자료를 이용하였으며, 외곽순환고속도로의 상행방향인 시계방향에 대해 오전 침두시인 8시~9시 1시간 기준으로 분석하였다.

2.2.1.4 정체시간

서울시 37개소 소방센터가 서울도심지 터널에 소방차가 도착한 시간을 분석하였더니, 5분 이내 12개 소방센터가 32.4% 도착하였고, 10분 이내 16개 소방센터는 43.2% 도착하였으며, 15분 이내 21.6%로 도착하였다. 그리고 30분 이내는 1개 소방센터만 도착하였다. 따라서 15분 이내까지 서울도심지 터널에 소방차가 도착한 것은 97.2%가 되므로 터널 화재사고 발생 시 정체시간을 15분부터 설정하였다.

2.2.2 터널 사고재난 안전비용 분석

2.2.2.1 터널사고 재난 안전비용 분석

기존 소화설비를 이용한 화재진압 시에는 터널구간 전 차로(4차로)의 통행이 차단되며 터널 후방에 교통정체로 인한 차량 대기행렬이 발생하게 된다. 이러한 대기행렬로 인해 발생하는 교통정체 비용에 대해 정체시간 15분, 20분, 25분으로 구분하여 각각의 시간가치 비용과 운행비를 산정하였다.

먼저 통행 시간가치 산정은 <식 1>의 식을 적용하여 정체시간(15분, 20분, 25분)과 차종별 시간가치, 그리고 분석교통량을 이용하여 산정하였다. 분석대상 구간의 통행 시간가치는 15분 보다는 20분이 크고, 25분이 더 크게 나타났다. 통행 시간가치는 터널의 길이보다는 교통사고로 인한 정체시간이 길고, 교통량이 많은 곳이 전체 통행 시간가치의 합이 높은 것으로 분석되었다.

<Table 1> Time value calculation for disaster safety in case of tunnel accident

Classification	Traffic (V/hour)	congested time (minutes)	time value by vehicle (KRW million/hour)					total
			car	bus	small truck	medium truck	large truck	
Chunggye Tunnel (450m)	6,588	15	21.87	3.64	2.92	0.65	0.14	29.22
		20	29.15	4.86	3.89	0.86	0.19	38.94
		25	36.46	6.07	4.86	1.08	0.22	48.70
Anyang Tunnel (390m)	5,515	15	18.31	3.08	2.44	0.53	0.12	24.48
		20	24.41	4.11	3.25	0.72	0.15	32.65
		25	30.52	5.14	4.07	0.89	0.19	40.81
Sapesan Tunnel (3,993m)	4,453	15	12.62	1.49	3.85	1.10	0.10	19.17
		20	16.83	1.96	5.12	1.46	0.14	25.51
		25	21.04	2.43	6.41	1.84	0.17	31.89
Suraksan Tunnel (2,950m)	4,520	15	11.49	2.71	4.57	1.38	0.41	20.56
		20	15.32	3.55	6.10	1.82	0.55	27.35
		25	19.15	4.48	7.62	2.29	0.69	34.23

- 정체시간에 따른 재난안전 통행 시간가치 크기: 15분 < 20분 < 25분
- 교통량에 따른 재난안전 통행 시간가치 크기: 청계터널 > 안양터널 > 수락산터널 > 사패산터널

2.2.2.2 터널 사고 시 재난안전 운행비용 분석

재난안전 운행비용은 터널 내 사고로 인해 교통정체가 발생하여 사고처리 완료 시까지 통행속도 10km/h 이하로

3) 차량 운행비용은 차종별 시간 교통량에 해당속도 차종별 운행비용을 곱하여 얻어지는 값을 말하는데, 통상 유류비, 엔진 오일비, 타이어 마모비, 유지관리비, 감가상각비만을 고려한다.

운행하고 있다는 가정 하에 정체시간 동안 대기차량의 운행비를 산정하였다.

재난안전 운행비는 <식 2>의 운행비 산정식을 이용하여 운행구간(터널)의 통과 교통량과 분석대상 터널길이 그리고 운행비 원 단위를 이용하여 산정하였다. 운행비 산정결과 <Table 2>와 같이 안양터널(390m) 보다 청계터널(450m)의 운행비용이 높으며, 이보다 더 긴 수락산터널(2,950m)의 운행비용이 더 높았고, 대상터널 중 제일 긴 사패산터널(3,993m)의 운행비용이 가장 높게 분석되어 분석대상 터널의 길이에 따라 운행비의 차이가 나타났으며, 터널의 길이가 길수록 운행비용이 높게 산정되었다.

<Table 2> Estimation of operating costs for disaster safety in case of tunnel accidents

구분	congested time (minutes)	Operating expenses by vehicle type (KRW million/hour)					
		car	bus	small truck	medium truck	large truck	total
Chunggye Tunnel (450m)	15	1.31	0.06	0.14	0.05	0.01	1.57
	20	1.31	0.06	0.14	0.05	0.01	1.57
	25	1.31	0.06	0.14	0.05	0.01	1.57
Anyang Tunnel (390m)	15	0.95	0.05	0.10	0.04	0.01	1.15
	20	0.95	0.05	0.10	0.04	0.01	1.15
	25	0.95	0.05	0.10	0.04	0.01	1.15
Sapesan Tunnel (3,993m)	15	6.72	0.23	1.65	0.74	0.10	9.44
	20	6.72	0.23	1.65	0.74	0.10	9.44
	25	6.72	0.23	1.65	0.74	0.10	9.44
Suraksan Tunnel (2,950m)	15	4.52	0.31	1.45	0.68	0.30	7.26
	20	4.52	0.31	1.45	0.68	0.30	7.26
	25	4.52	0.31	1.45	0.68	0.30	7.26

- 정체시간에 따른 재난안전 운행비용 크기: 25분=20분=15분
- 터널 길이에 따른 재난안전 운행비용 크기: 사패산터널 > 수락산터널 > 청계터널 > 안양터널

운행비는 유류비, 엔진 오일비, 타이어 마모비, 유지관리비, 감가상각비로 구성되어 있는데 운행비는 차종별 시간교통량과 해당속도 차종별 운행비에 비례하여 크기가 작용하므로, 정체시간은 운행비에 영향을 미치지 않는다. 그러나 터널이 길수록 차종별 운행비가 큰 것은 차종별 해당속도가 빠르기 때문에 유류비가 많이 소요되기 때문인 것으로 분석되었다. 이는 시간가치가 운행비에 영향을 미칠 것이라는 가설과 정체시간이 길어질수록 시간가치는 증가할 것이라는 가설 및 평균운전 시간에 따라 터널 위험 이미지 비율은 유의한 차이가 있을 것이라는 가설을 입증하고자 한다.

### 2.2.2.3 터널 사고 시 재난 안전비용 분석

기존 소화설비 화재진압 System의 고속도로 터널 내 화재진압 시 재난안전 전체비용의 산정은 <Table 3>과 같이 터널 내 사고로 인해 교통정체가 발생하여 사고처리 완료 시까지 통행속도 10km/h 이하로 운행하고 있다는 가정 하에 정체시간 동안 대기차량의 운행비를 산정하였다.

<Table 3> Disaster Safety Cost in tunnel accidents (Unit : KRW million/hour)

		congested time (minutes)	Disaster Safety Cost			
			Traffic (V/h)	Disaster Safety Cost (a+b)	Time Value (a)	Operation Cost (b)
Short Tunnel	Chunggye Tunnel (450m)	15	6,588	30.79	29.22	1.57
		20		40.51	38.94	1.57
		25		50.27	48.7	1.57
	Anyang Tunnel (390m)	15	5,515	25.63	24.48	1.15
		20		33.8	32.65	1.15
		25		41.96	40.81	1.15
Long Tunnel	Sapesan Tunnel (3,993m)	15	4,453	28.61	19.17	9.44
		20		34.95	25.51	9.44
		25		41.33	31.89	9.44
	Suraksan Tunnel (2,950m)	15	4,520	27.82	20.56	7.26
		20		34.61	27.35	7.26
		25		41.49	34.23	7.26

## 3. 재난 안전비용 및 대피행동 요소 상관관계분석

### 3.1 터널 사고 시 재난안전비용

터널 사고 시 재난 안전비용은 시간가치 비용과 청계터널의 15분 정체 시 운행비의 합을 말한다. 시간 가치 비용은 시간당 2,922만 원으로 분석하였고, 20분 및 25분 정체 시의 비용은 시간당 3,894만 원과 4,870만 원으로 각각 분석하였다. <Table 4>와 같이 안양터널에서의 15분, 20분 및 25분의 정체 시 시간 가치 비용은 <식 3.1>에 의해서 시간당 2,448만 원, 3,265만 원 및 4,081만 원으로 각각 분석하였다. 분석한 결과에 따르면 시간 가치 비용은 정체시간에 차종별 시간 가치와 시간 교통량을 곱하여 결정되므로 시간 가치에 영향을 미치는 것은 정체시간과 시간 교통량에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 또한 시간 가치는 정체시간이 길어지면 길수록 비례하여 증가하는

것으로 분석되었다.

<Table 4> Disaster safety costs in case of tunnel accidents  
(Unit : KRW million/hour)

Classification	congested time (minutes)	Disaster Safety Cost			
		Traffic (V/h)	Disaster Safety Cost (a+b)	Time Value (a)	Operation Cost (b)
Chunggye Tunnel (450m)	15	6,588	30.79	29.22	1.57
	20		40.51	38.94	1.57
	25		50.27	48.7	1.57
Anyang Tunnel (390m)	15	5,515	25.63	24.48	1.15
	20		33.8	32.65	1.15
	25		41.96	40.81	1.15

그리고 청계터널의 15분·20분·25분 정체 시 운영비용은 시간당 157만 원으로 그 값이 동일하고, 안양터널의 15분·20분·25분 정체 시 운영비용은 시간당 115만 원으로 이 값 또한 동일한 것으로 분석되었다. 운행비용은 유류비·엔진 오일비·타이어 마모비·유지관리비·감가상각비로 구분되며, 정체시간이 15분에서 25분까지 10분간 정체되어도 크게 영향을 미치지 않으므로 동일한 크기로 분석되었다. 또한 운행비는 차종별 시간교통량에 차종별 운행비용을 곱하여 계산되므로 시간 교통량에 비례하여 크기가 달라지는 것으로 분석되었다.

따라서 운행비가 터널별 정체시간 15분·20분·25분 모두 동일한 것은 운행비에 미치는 영향이 미미하기 때문인 것으로 분석되었고, 시간 가치 비용은 터널 길이에 관계없이 범위가 시간당 2,500만 원에서 5,000만 원 사이로 분석되어 시간 가치가 운행비용에 영향을 미칠 것이라는 가설이 입증되었다. 따라서 정체시간이 길어질수록 시간 가치는 증가한다는 가설이 입증되었다.

### 3.2 터널 위험인자와 대피행동 간의 상관관계

터널 위험인자 하위요인으로 오류경향, 흥분 추구성향, 법 준수 의지, 터널 정보인지, 인적 위험요소, 터널 이미지 평가와 반응변수 요인 대피행동 1단계(위험경고 신호의 인식) 가속화와 지연, 대피행동 2단계(대피행동에 대한 결정) 가속화와 지연, 대피행동 3단계(보안단계) 가속화와 지연 변인 간의 상관관계 수를 <Table 5>와 같이 나타냈다.

터널 위험인자 하위변인들 간의 상관관계를 분석한 결과, 흥분 추구성향은 오류 경향성과 유의미한 정적 상관을 보였으며( $r=.228, p<.000$ ), 법 준수의지와 오류 경향성은 유의미한 부적 상관으로 나타나( $r=-.215, p<.000$ ), 법 준수의지와 흥분 추구성향에서도 유의미한 부적 상관( $r=-.199, p<.000$ )을 나타냈다. 터널 정보인지는 오류 경향성과 유의미한 부적 상관관계( $r=-.237, p<.000$ )를

<Table 5> Results of association analysis between key variables

Major Variables	Error Tendenc	Excitation trend	law obey willness	Tunnel inform recognition	Human Risk Factors	Tunnel Image Evalu.	Accelerate Evacuation Action 1	Evacuation Action 1 Delay	Accelerate Evacuation Action 2	Evacuation Action 2 Delay	Accelerate Evacuation Action 3	Evacuation Action 3 Delay
Error Tendency	1											
Excitation trend	.228***	1										
law obey willness	-.215***	-.199**	1									
Tunnel inform recognition	-.237***	-.042	.050	1								
Human Risk Factors	.198***	.304***	-.387**	-.163***	1							
Tunnel Image Evalu.	-.127***	-.021	.105*	.191***	-.029	1						
Accelerate Evacuation Action 1	-.174**	-.081	.156**	.129*	-.158**	.033	1					
Evacuation Action 1 Delay	-.038	.055	.124*	.199**	-.178***	-.051	.641***	1				
Accelerate Evacuation Action 2	-.190***	-.059	.227***	.218***	-.232***	.079	.616***	.694***	1			
Evacuation Action 2 Delay	-.164***	.007	.125**	.124**	-.259***	.083	.598***	.678***	.765***	1		
Accelerate Evacuation Action 3	-.219***	-.059	.125**	.253***	-.166**	-.062	.533***	.579***	.644***	.634***	1	
Evacuation Action 3 Delay	-.097	-.013	.169***	.125**	-.228***	-.072	.518***	.557***	.662***	.656***	.805***	1

(N=388) \* $p<.05$ , \*\* $p<.01$ , \*\*\* $p<.001$

보였고, 인적 위험요소는 오류의 경향성과 유의미한 정적 상관을 보였으며( $r=.198, p<.000$ ), 인적 위험요소와 흥분 추구성향은 정적으로 유의미한 상관을 보였다( $r=.304, p<.000$ ). 다음으로 인적위험요소와 법 준수 의지는 유의미한 부적 상관을( $r=-.387, p<.000$ ), 인적 위험요소는 터널 정보인지와 유의미한 부적 상관을 나타냈다( $r=-.163, p<.000$ ), 터널 이미지 평가는 오류 경향성과 유의미한 부적 상관을 보였으며( $r=-.127, p<.000$ ), 터널 이미지 평가와 법 준수 의지는 유의미한 정적 상관을 보였다( $r=.105, p<.05$ ).

다음으로 터널 이미지 평가는 터널 정보인지와 유의미한 정적 상관을 나타냈다( $r=.191, p<.000$ ). 다음으로는 대피행동 단계와 위험인자 하위요인들 간의 상관관계 분석 결과, 오류의 경향성과 대피행동1 가속화( $r=-.174, p<.000$ ), 대피행동2 가속화( $r=-.190, p<.000$ ), 대피행동2 지연( $r=-.164, p<.000$ ), 대피행동3 가속화( $r=-.219, p<.000$ )로 나타나, 모두 유의미한 부적 상관관계인 것으로 보인다.

법 준수 의지와 대피행동1 가속화( $r=.156, p<.000$ ), 대피행동1 지연( $r=.124, p<.000$ ), 대피행동2 가속화( $r=.227, p<.000$ ), 대피행동2 지연( $r=.125, p<.000$ ), 대피행동3 가속화( $r=.125, p<.000$ ), 대피행동3 지연( $r=.169, p<.000$ ) 모두에서 유의미한 정적 상관을 보였다. 또 터널 정보인지와 대피행동1 가속화( $r=.129, p<.000$ ), 대피행동1 지연( $r=.199, p<.000$ ), 대피행동2 가속화( $r=.218, p<.000$ ), 대피행동2 지연( $r=.124, p<.000$ ), 대피행동3 가속화( $r=.253, p<.000$ ), 대피행동3 지연( $r=.125, p<.000$ ) 모두에서 유의미한 정적 상관을 보였다. 다음은 인적 위험요소와 대피행동1 가속화( $r=-.158, p<.000$ ), 대피행동1 지연( $r=-.178, p<.000$ ), 대피행동2 가속화( $r=-.232, p<.000$ ), 대피행동2 지연( $r=-.259, p<.000$ ), 대피행동3 가속화( $r=-.166, p<.000$ ), 대피행동3 지연( $r=-.228, p<.000$ ) 모두에서 유의미한 부적 상관을 보였다.

#### 4. 결론

본 논문은 터널 사고에 따른 재난 안전비용과 인적위험요소 인지분석과 대피행동간 상관관계를 분석하기 위해 일반대상 표본으로 388명에 설문조사를 분석하였다. 그 결론은 다음과 같이 도출할 수 있다.

첫째, 터널 사고 시 재난 안전비용은 운행비와 시간 가치비용에 따라 달라졌다. 운행비가 청계터널의 15분·20분·25분 모두 시간당 정체 시 157만 원의 동일 값으로

분석된 것은 운행비 요소가 감가상각비 등이므로 운행비에 미치는 영향이 미미하기 때문에 운행비가 재난 안전비용에 영향을 받지 않았다. 그러나 시간 가치비용은 정체시간과 시간 교통량에 비례하여 결정되므로 청계터널의 시간당 15분 정체 시 2,922만 원, 20분 정체 시 3,894만 원, 25분 정체 시 4,870만 원으로 정체시간이 길수록 시간 가치 비용이 크기 때문에 재난 안전비용에 영향을 받는 것으로 나타났다.

둘째, 시간가치가 운행비용에 영향을 미치는 요인은 차종별 시간교통량에 따라 달라졌다. 운행비는 차종별 시간교통량과 해당속도 차종별 운행비용에 비례하여 달라지므로 안양터널의 시간당 시간 가치비용이 15분 정체 시 2,448만 원, 20분 정체 시 3,265만 원, 25분 정체 시 4,081만 원으로 정체시간이 길수록 시간 가치비용에 영향을 미쳐 차종별 시간 교통량과 해당속도 차종별 운행비용이 비례하는 것으로 분석되었다.

셋째, 시간가치는 정체시간에 비례하여 증가한다. 시간가치는 정체시간과 시간 교통량에 비례하여 달라지므로 사패산 터널의 15분 정체 시 시간당 시간 가치비용이 1,917만 원, 20분 정체 시 2,551만 원, 25분 정체 시 3,189만 원으로 정체시간이 길수록 시간 가치비용이 커 시간 교통량이 많기 때문에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

이상과 같이 결론에서 도출된 터널 사고 시 통행 시간 가치 비용이 재난 안전비용에 미치는 영향, 터널 내 환경에서의 위험인자와 인간의 대피행동 간의 상관관계 등을 고려하여 터널의 기본계획·터널의 단면·피난 대피시설의 설치·터널의 부대시설 설치 등의 계획 단계에서부터 반영 되도록 제도를 정비하여 터널 내 재난 사고가 발생되지 않도록 하여야 할 것이다.

#### 5. References

- [1] C. E. Hong(2016), "A study on the public safety policy of traffic tunnel." The Journal of the Korean Society for Journal of the Korean Society for Public Security Administration, 163-194.
- [2] H. J. Cho(2015), "A comparative study on the domestic and foreign standards of differential sterilization facilities." Master's thesis, Disaster Prevention Engineering at Seoul National University.
- [3] I. K. Seo, J. J. Park, B. H. Ahn, J. Y. Lee(2012), "A study on the characteristics of traffic accident in highway long tunnel using logit model." Journal

of the Korean Civil Society, 549–556.

- [4] K. H. Lee(2019), “A study on the analysis and evaluation of micro-traffic characteristics through analytical model development of highway tunnel section.” Doctoral dissertation, Construction and Transportation Engineering at Ajou University.
- [5] N. Y. Kim(2014), “Ventilation characteristics by traffic ventilation in a network-type underground road intersection.” Doctoral dissertation, Mechanical Engineering at Kookmin University.
- [6] S. H. Lee(2018), “A study on the effect of top ground reinforcement on the relaxation height of tunnels.” Doctoral dissertation, Civil Engineering at Dongui University.
- [7] S. H. So, K. H. Park(2011), “Experimental study on the spray density distribution of water spray facilities in tunnels.” The Journal of the Korean Tunnel Underground Space Association, 1–8.

## 저자 소개



### 백충현

경기대학교 도시방재학과 공학박사  
 건설안전기술사, 토목품질시험기술사  
 現 ㈜서현기술단 부사장  
 前 경기도 광역도시철도과장  
 관심 분야 : 철도 및 도로 건설안전