

장대터널의 사례에 기반한 대심도 지하도로 교통시설 및 운영 개선방안

최중철[†] · 임준범 · 홍지연 · 이성열^{*}

서울시립대학교 교통공학과 · ^{*}삼성교통안전문화연구소
(2015. 9. 7. 접수 / 2015. 11. 12. 수정 / 2015. 12. 17. 채택)

Study on the Ways to Improve Deep Underground Road Facilities and Operation Based on the Cases of Longitudinal Tunnel

Jong Chul Choi[†] · Joon Beom Lim · Ji yeon Hong · Sung Yeol Lee^{*}

Department of Transportation Engineering, University of Seoul
^{*}Samsung Traffic Safety Research Institute

(Received September 7, 2015 / Revised November 12, 2015 / Accepted December 17, 2015)

Abstract : Recently, starting with the deep underground road construction plan in Seobu Expressway, Korea, there area many studies on deep underground roads to be newly built. However, there is an extreme lack of safety standards, which does not consider traffic conditions and road driving characteristics. Therefore, this study reviewed safety elements to reflect in the deep underground road planning by analyzing driving stability of longitudinal tunnels with road environments, which resemble deep underground roads. For comprehensive analysis, the characteristics and causes of the accidents that have occurred in seven longitudinal tunnels with a length of 2km or over in Gangwon area, were collected. Specifically, geometric structures and facilities of each tunnel were investigated. Also, the present state of facility installation and the changes in driving speed of vehicles passing through each tunnel were observed to analyze the causes for the traffic accidents in each tunnel and accident reduction alternatives. It was revealed that the most frequent accidents in the tunnels resulted from the changes of traffic flow due to the abrupt speed reduction of forward vehicles, or the failure in speed control of following vehicles during the traffic congestion situation. Moreover, installing facilities such as plane and longitudinal curves, median strips and marginal strips seem to induce consistent driving speed. These results mean that for accident prevention, speed management must be preceded and there is a need to develop and introduce safety facilities actively to control the driving flow of forward and following vehicles.

Key Words : longitudinal tunnel, accident analysis, speed profile, transportation facilities

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

최근 선진국에서는 대도시 교통체증을 해소함과 동시에 지상 녹지공간을 확보하기 위하여 지하 교통시설 건설을 확대하고 있으며, 국내에서도 서울 및 수도권을 중심으로 다양한 관련 사업들이 계획·추진되고 있다. 그러나 국내의 경우 대심도 지하도로 건설 경험이 많지 않으며, 관련 핵심기술 및 안전성에 대한 검토 및 기술 축적이 충분하지 않은 실정이다. 특히, 대심도 교통시설의 안전과 방재에 대한 논의가 충분하지 못한

실정으로, 심도있는 검토와 그에 따른 기술적, 정책적 검토가 필요하다.

국내의 경우 대심도 지하도로의 효시라고 할 수 있는 서부간선도로(10.3 km)계획과 함께 대심도 지하도로에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 설계·공법·포장 등에 집중되어 교통여건 및 도로주행 특성을 고려한 안전기준 연구는 매우 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 기존 안전관리 기준에서 제시하고 있는 교통시설 및 교통운영 현황을 살펴보고 대심도 지하도로와 유사한 특성을 갖는 장대터널에서의 도로주행특성을 조사하여, 안전측면의 검토요소를 사전 파

[†] Corresponding Author : jongchul Choi, Tel : +82-2-6490-5662, E-mail : jocchoi@hanmail.net
Department of Transportation Engineering, University of Seoul, 163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

악할 수 있도록 하는 것이 목적이다. 물론 대심도 지하도로는 5% 이상의 내리막 경사를 가지고 있어 장대터널과 다른 특성이 있으나, 본선부에서의 주행행태는 유사할 것으로 판단된다. 이에 장대터널부에서 운전자의 주행특성과 사고특성을 대심도 지하도로에서도 적용할 수 있는 요소를 분석하였다.

1.2. 연구내용 및 방법

본 연구는 대심도 지하도로와 유사한 특성을 갖는 장대터널에서 발생한 교통사고를 분석하고 시설 및 운영 현황조사를 중심으로 안전성 강화방안을 도출한다. 현재까지 대심도 터널은 국내 건설된 터널이 없는 바, 장대터널 사고분석을 통해 대심도 지하도로 계획 시 반영해야 할 안전요소를 검토하였다.

본 연구의 교통사고분석 대상은 대심도 지하도로의 연장을 고려하여, 강원도지역에 위치한 연장 2 km 이상의 장대터널을 7곳 선정하였다. 대심도·장대터널 교통사고 발생특성 및 원인분석을 위해 사고자료 수집과 함께 터널기하구조 및 현장시설물 설치현황에 대해 조사하였다. 또한 과거 5년간 교통사고자료 분석을 통해 장대터널 구간의 사고발생추이 및 특성을 도출하였으며, 이를 바탕으로 시설·사고특성을 종합하여 개선방안을 마련하고자 하였다.

2. 기존 문헌 고찰

Kim은 장대터널에서의 운전자 시각각성변화를 분석한 결과, 운전자의 시각적 각성수준은 터널 진입전 200 m 지점에서 터널입구까지 약 41% 증가하였으며, 장대터널 진입 후 주행상황에서도 시각적 각성상태가 유지되었다. 그러나 도로의 선형변화 및 긴급대피로 등의 터널내부구조변화, LCD(Lane Control System) 등의 표지판 및 안전시설, 환기팬 등이 설치되지 않은 구간에서 시각각성수준이 유의하게 감소하는 것을 보아 해당 구간의 교통사고유발의 개연성이 존재하는 것으로 판단하였다¹⁾.

KoROAD은 터널구간 통과 시 운전자 행동 및 생리변화에 대한 실험을 한 결과, 터널진입 후의 운전자 중추신경계 및 자율신경계가 터널 진입전에 비해서 활성화된 것을 확인하였다. 또한 터널내에서의 주행속도는 터널진입후부터 속도가 감소하다가 터널 중간지점을 지나면서 완만한 속도의 상승을 보이면서 터널후반부에서 주행속도가 증가하는 추세에 있음을 증명하였다²⁾.

Kim은 도로주행 시뮬레이터 실험을 통하여 터널내 운전자의 생체반응 및 차량 주행특성을 분석하고, 동

시에 운전자에 주행안전성에 관련한 설문조사를 실시하였다. 연구 결과에 따라, 운전자는 터널진입시와 터널내에서 심리적 압박감을 받았으며, 폐쇄된 터널특성으로 인해 시각적 피로를 느낀 것으로 분석하였다³⁾.

Lee는 연장 3.3 km인 둔내터널의 속도자료를 활용하여 일반터널과 장대터널의 속도변화 폭을 비교하였다. 비교결과, 장대터널의 속도변화가 일반터널에 비해 컸으며, 일반터널에서의 속도가 높은 지점은 입구였으나, 장대터널의 경우 터널입구로부터 약 1.6 km 지점부터 상당한 가속현상을 보이며, 2.0 km이후에 터널 진입전 속도를 회복하는 것으로 나타났다⁴⁾.

Hirata and Yai는 드라이빙 시뮬레이터를 제작하여 도시부 지붕식 터널에서의 운전자 인지정도를 분석하였다. 분석결과, 지붕식 터널내 분류부 및 합류부의 중간 직선주행구간에서 운전자의 인지력이 저하됨을 밝혔다. 또한 운전자의 인지력이 저하되는 분류부에서 오디오정보를 제공할 경우 운전자의 인지력이 복원되는 것을 밝혔다⁵⁾.

Akamatsu은 터널환경이 운전행동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 10명의 피실험자의 주행중 가속페달 파워를 측정 분석하였다. 현장실험에서는 주야간 양방향 모두 터널 진입과 진출시에 가속페달 파워가 감소되었으나 차량시뮬레이터 실험에선 양방향 모두 주간인 경우에만 터널 진출시 가속페달 파워의 감소가 발생하였다⁶⁾.

Park은 로짓모형을 구축하여 장대터널에서의 교통사고와 연관한 주요요인과의 관계를 규명하였다. 기하구조 요인에서 곡선반경이 2,000 m 이상일 때 사고가 양의 부호로 관련하며, 길어깨 폭은 2 m 이하일 경우 교통사고의 위험이 있는 것으로 판단하였다. 또한 주행차로 및 추월차로의 공동주 내장재가 미설치된 장대터널에서 교통사고의 위험이 있는 것으로 나타났다. 즉 장대터널의 교통사고는 운전자의 시인성 및 공간확보를 위한 요인이 교통사고와 관련이 있는 것으로 분석되었다⁷⁾.

Jeong은 장대터널 포함하는 도로를 주행하는 시뮬레이션을 통해 운전자가 터널의 선형 및 환경 변화에 생리적 반응을 살펴보았다. 이는 전두엽 및 중심엽에서 얻어진 α 파와 β 파 측정결과에 따라 민감하게 나타내는 것을 알아내었으며, 주행 시 직전구간에 비해 긴장감 및 졸림감의 지표가 두드러지게 증가하는 구간을 위험구간으로 판단하였다⁸⁾.

Martens은 터널내 긴급차로 유무에 따른 운전행동변화를 알아보기 위하여 피험자 10명을 대상으로 차량시뮬레이터 실험을 수행하였다. 연구결과, 일반도로에

비해 터널 주행시 더 왼편으로 치우쳐 운전을 하였으며 긴급차로가 없는 경우에는 긴급차로가 좁거나 있는 조건에 비하여 더욱 왼편으로 치우쳐서 운전하는 것으로 나타났다⁹⁾.

Wang은 장대터널 내부 경관변화에 따른 운전자의 감성적 측면을 고려한 안전성 연구를 수행하였다. 연구결과, LED시선유도시설 설치시, 조도가 높을수록, 측방여유폭이 넓을수록 터널 내에서 안전성이 증가함을 제시하였다¹⁰⁾.

Blaauw은 터널 횡단면 구성요소에 관한 연구에서 측방여유폭 변화에 따른 운전자 주행행태 연구결과, 측방여유폭이 운전자의 심리적 현상에 영향을 미치고 있으며, 측방여유폭을 2.0 m 이상 확충하는 것이 가장 적절하다고 제시하고 있다¹¹⁻¹²⁾.

기존문헌을 고찰한 결과는 Table 1과 같으며, 장대터널에서 운전자들이 보일 수 있는 행동이나 심리적 특성분석이 주를 이루었으며, 현장실험보다는 가상주행 시뮬레이션을 통한 연구가 많았다. 또한 실험적 연구결과가 대부분이며, 실제 사고자료와 매칭하여 결과를 이끌어낸 연구는 거의 없었다. 본 연구에서는 장대터널을 대상으로 사고자료 분석, 시설 및 운영현황 분석, 그리고 주행차량의 속도를 이용한 주행안정성을 복합적으로 분석하여 향후 대심도 및 장대터널에서의 사고 발생 예방대안을 마련하고자 한다.

Table 1. Summary of literature review

Methodology	Author	Implication
Statistical analysis	Park(2011)	Accidents increase if the curve radius is more than 2,000 m and the shoulder is less than 2 m in tunnels
	Blaauw(1974)	The tunnel's shoulderlane width widenings need to be at least 2.0 m
Field experiment	KoROAD(1996)	Car speeds increase starting from the tunnel's center
	Lee(2002)	Cars are shown to accelerate at 1.6 km from the tunnel's entrance
	Kim(2009)	The driver's visual workload increases by 41% 200 m before the tunnel's entrance
Virtual simulation experiment	Kim(2007)	The driver feels psychological pressure and the driver's eyes become tired during tunnel driving
	Hirata(2000)	Drivers are shown to have decreased cognitive at the partial merging area.
	Martens(2003)	In a tunnel, the driver tends to drive more on the left side of lane compared to when driving on a normal road
	Wang(2010)	The more delineators, lateral width widenings there are the safer it is

3. 현황분석

장대터널은 1,000 m 이상(도로설계요령, 한국도로공사)을 말하고 있으나, 장대터널은 도로시설물로서의 기하구조적 특징으로인해 한번 진입하면 최소 1.5 km 이상을 터널 내에서 장시간 지속적으로 주행해야하기 때문에 기존의 보통 터널과 달리 운전자에 압박감 및 폐쇄감을 주어 심리적으로 불안감을 얻는 등 여러 부작용을 낳을 수 있다¹³⁾는 연구결과를 토대로 본 연구의 연구대상 터널은 연장 2 km 이상의 터널을 선정하였다. 대상터널은 강원도지역의 영동고속도로에 위치한 둔내터널과 진부1터널, 동해고속도로에 위치한 강릉5터널, 국도 38호선에 위치한 두문동재 2터널, 국도 46호선에 위치한 배후령터널과 수인터널, 국지도 56호선에 위치한 미시령터널이며, 터널별 연장 및 차로수는 Table 2와 같다.

대상 터널의 교통사고 수집자료는 최근 5년간(2009년 ~ 2013년) 발생한 경찰기록자료로, 자료수집은 도로교통공단의 교통사고분석시스템을 활용하여 수집하였으며, 도면분석을 통해 미시령터널을 제외한 6개 터널의 기하구조 현황을 구축하였다. 장대터널 교통사고 발생특성 및 원인의 심층 분석을 위해 대상터널 기하구조와 관련하여 사고자료를 수집·분석하였다. 또한 터널구간의 안전 개선방안을 도출하기 위해 주행차량의 추종방법을 이용하여 터널 이용 차량의 주행속도변화를 조사하고, 조사용차량에 영상카메라를 부착하여 비디오촬영을 통한 터널구간 시설물 설치 현황조사를 실시하였다.

3.1. 터널부 사고발생 현황

3.1.1. 터널부 교통사고 현황분석

최근 5년간(2009년 ~ 2013년) 발생한 터널구간 교통사고에 대한 심층분석을 통한 주요사고원인 분석을 위해 터널기하구조현황과 사고지점, 사고기록정보를 종합화하였다. 터널기하구조는 자료수집단계에서 구축

Table 2. List of longitudinal tunnels

Sort	Name	Distance(km)	No. of lanes
Expressway	Dunnae	3.3	4
	Jinbu 1	2.1	4
	Gangneung 5	2.1	4
National roads	Dumun dongjae 2	2.5	2(one-way)
	Baehuryeong	5	2
	Soojin	2.9	2
Local roads	Misiryong	3.5	4

Table 3. Traffic accident in the longitudinal tunnel

Sort	Name	# of Accidents frequency (5years)	Fatalities (people)	seriously injured (people)	Slightly injured (people)
Express way	Dounnae	32	0	26	129
	Jinbu 1	15	0	14	28
	Gangneung 5	4	4	25	10
National roads	Dumun dongjae 2	1	0	2	0
	Baehuryeong	1	1	2	0
	Soojin	0	0	0	0
Local roads	Misiryong	2	0	0	3
Sum		55	5	69	170

한 도면기하구조현황을 활용하였으며 사고위치(위치좌표 없음)와 매칭하여 지점에 대한 정보를 검토하였다. 사고기록정보는 경찰이 기록한 사고개요를 검토하여 추출하였으며, 사고위치의 경우 교통사고분석시스템에서 위치좌표를 공개하지 않고 있어, 정확한 발생지점을 알 수 없는 한계가 있다. 따라서 위치오차가 발생할 수 있다. 각 터널별 심층분석을 실시하였으며 수인터널의 경우 과거사고 발생기록이 없어 분석에서 제외하였다.

터널의 최근 5년간 발생한 사고통계 자료 수집결과는 Table 3과 같으며, 일반국도, 국지도에 위치한 터널의 경우 사고빈도가 매우 낮게 나타나고 있다. 고속도로 상에 위치한 터널은 민간보험사 사고기록을 제외하고 둔내터널 32건, 진부1터널 15건으로 집계되었으며, 수인터널에서는 5년간 사고가 발생하지 않았다.

사고 1건당 인명피해 심각도를 각 터널로 비교하면 둔내터널의 경우, 중상자수 0.8명/건, 경상자수 4.0명/

건으로 나타났으며, 진부 1터널의 경우, 중상자수 0.9명/건, 경상자수 1.9명/건으로 나타났다.

강릉5터널에서 최근 5년간 사망자수는 1명/건, 중상자수는 6.3명/건, 경상자수는 2.5명/건, 사고빈도는 고속도로 중 4건으로 가장 낮으나 사고건당 인명피해는 가장 크게 나타났다. 강릉5터널에서 발생한 사망사고 1건이 사망자수 4명, 중상자수 25명, 경상자수 10명이 포함된 대형사고로서 강릉5터널의 사고심각도를 높인 것이기 때문에 강릉터널이 특별히 위험한 터널이라고 판단하기는 어렵다.

사고유형을 살펴보면(Table 4) 모든 사고가 차대차사고로 차대보행자 사고는 발생하지 않았다. 그 외 차량단독사고가 소수 발생한 것으로 나타났다. 차대차사고는 추돌사고와 측면충돌사고로 조사되었으며 차량단독사고는 전체 공작물충돌사고가 발생하였다.

법규위반에서는 운전자요인에 의해 교통사고가 발생하였음을 기록하고 있다. 주요 위반은 안전거리미확보와 안전운전불이행 2가지 요인으로 압축된다. 추돌사고는 총 44건으로 전체사고 55건 중 약 80%를 차지하고 있다. 이 중 안전거리미확보와 안전운전불이행은 각 20건, 24건으로 전체사고내에서 차지하는 비중은 각 36%, 44% 수준으로 터널사고는 안전거리미확보 및 안전운전불이행에 의한 추돌사고가 주요 사고유형으로 종합된다.

터널별 사고발생 내역을 검토하면 터널진입시 입구부 시설충돌사고, 터널내부에서의 추돌사고가 대표적인 사고유형으로 나타났다.

각 터널별 사고원인을 종합한 결과는 Table 5와 같으며, 전체 55건 중 단독차량사고는 4건, 추돌사고가 51건으로 나타났다. 또한 교통상황에 따라 일반시 31

Table 4. Number of accidents with regard to accident cause of tunnel

Sort (unit : number of accident (%))		Dunnae	Jinbu 1	Gangneung 5	Dumun dongjae 2	Baehuryeong	Soojin	Misiryong	Sum
Car to car crash	Rear-Ender	Unobtained safety distance	16 (29)	3 (5)	-	1 (2)	-	-	20 (36)
		Desertion of safe driving	15 (27)	6 (11)	2 (4)	-	-	1 (2)	24 (44)
	The Broad-Collision	Violation of lane	1 (2)	-	-	-	-	-	1 (2)
		Unobtained safety distance	-	1 (2)	-	-	-	-	1 (2)
		Desertion of safe driving	-	3 (5)	1 (2)	-	-	-	4 (7)
	The others		-	1 (2)	-	-	-	-	1 (2)
Independent crash	Fixed object crash	-	1 (2)	1 (2)	-	1 (2)	-	1 (2)	4 (7)
Sum		32 (58)	15 (27)	4 (7)	1 (2)	1 (2)	-	2 (4)	55 (100)

Table 5. Crash type of congested situation and Non-congested situation

Sort		Non-Congestion	Congestion	Sum
# of Independent crash		4	-	4
Car to car crash	# of Two -Vehicle collision	10	7	51
	# of Chain-Reaction collision	17	17	
Sum		31	24	55

건, 지정체시 24건으로 나타났다.

연쇄추돌사고 10건(37%), 단독추돌사고 17건(63%)로 단독추돌사고비율이 높았으나 지정체시에는 연쇄추돌사고 17건(70%), 단독추돌사고 7건(30%)으로 연쇄추돌사고의 비율이 높게 나타났다.

이에 따라 지정체시에 일반시에는 사고가 발생할 경우 최초 충돌차량뿐만 아니라 2중, 3중이상의 충돌차량이 발생할 확률이 높은 것으로 나타났다.

3.1.2. 터널부 교통사고 원인분석

먼저 터널 접근시 일반 도로구간에 비해 터널의 낮은 조도로 인한 시거감소와 측방여유폭 부족 및 심리적 요인 등에 의해 속도저하로 인한 교통 지·정체가 나타난다. 터널내부의 속도변화는 주행차량 행렬 중 선두주행 차량의 저속주행발생시 뒤따르는 차량은 일정시간 간격을 두고 반응하므로 감속량이 커지며 차량

행렬의 후미로 갈수록 감속은 더욱 커진다. 본 연구에서 또한 터널 내에서의 속도변화는 사고 외 용량변화로 이어지고, 터널구간은 기본 구간과 달리 운전자 심리, 기하구조 불량, 터널 자체의 요인이 상호 복합적으로 발생하여 속도저하로 인한 지정체가 유발되고, 이로 인해 교통용량이 감소하였다. 터널추돌 사고의 경우 대다수사고가 전방주시태만으로 분류되고 있으며 이는 정확히 전방차량에 대한 거리인지 및 속도변화의 어려움에 의해 발생한다고 볼 수 있다.

단순개별시설 및 안전방호시설로는 추돌사고를 예방하기에는 한계가 따르고 있다. 즉, 터널추돌방지를 위해서는 현 개별단위 시설물보다 전방상황에 대한 사전정보제공 및 경고시스템설치 등 안전대책마련과 속도관리방법이 더욱 적절하다고 할 수 있다.

3.2. 교통안전 및 도로시설물 설치 현황조사

3.2.1. 현황조사방법

현황조사는 조사용차량에 카메라를 설치하여 영상 촬영을 통한 현장기록방법을 원칙으로 터널구간의 시설부분과 운영부분으로 구분하여 진행하였다. 시설부분은 교통안전표지판, 노면표시, 신호기, VMS 등을 포함한 교통안전시설과 시선유도, 조명, 차량방호시설, 전광표지 등을 포함한 도로안전시설, 그리고 안내표지와 구간단속 등을 포함한 도로시설로 구분하여 조사하였다. 조사한 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Facilities on Tunnel Entrance(within 500 m) and Inside Tunnel

Type		Dunnae	Jinbu 1	Gangneung 5	Dumun dongjae 2	Baehuryeong	Sooin	Misiryong
Tunnel entrance	Variable message sign	○	○	○	○	○	○	○
	Lane control system	○	○	○	○	○	○	○
	Tunnel notice sign	○	○	○	○	○	○	○
	Barriers	○	○	○	○	○	○	○
	No passing sign	×	×	○	○	○	×	○
	Painting instruction	○	○	○	×	○	○	×
	Traffic enforcement camera	○ (for section)	×	×	×	×	×	×
	Speed reduction sign	○	×	×	×	○	×	×
Speed limit sign	○	×	○ (to Gangneung)	×	○	×	○	
Inside tunnel	Variable message sign	○	○	○	○	○	○	○
	Lane control system	○	○	○	○	○	○	○
	Delineator	○	○	○	○	○	○	○
	Fire extinguisher	○	○	○	○	○	○	○
	Emergency parking lots	○	○	○	○	○	○	○
	Emergency telephone	○	○	○	○	○	○	○
	Speed limit sign	○	×	×	×	×	×	×
	Rumble strip	Grooving	Grooving	○	×	×	×	×
	Regulatory speed limit	○	×	×	×	from VMS	×	×
Pavement markings	×	×	×	×	×	for facilities	for facilities	

반면 운영부분은 터널 통과차량의 주행속도를 조사한 것이다. 시설조사의 경우 현장조사 및 비디오촬영 모니터링으로 위치도 작성을 하며 주행차량 속도조사의 경우 고속도로의 경우 200 m 단위 이정표시가 설치되어 있기 때문에 이를 기준으로 설정하며 일반국도 및 국지도의 경우도 이를 준용하였다. 비디오촬영은 제한속도를 유지하는 등 교통류에 지장을 주지 않는 범위에서 촬영 후 모니터링을 통해 시설물 위치도를 작성하였다.

3.2.2 시설현황

시설의 경우 교통안전시설과 도로안전시설을 중심으로 조사하였으며 시설현황결과는 Fig.1과 같이 나타내었다. 주행차량 속도 및 차간거리 안내에 대한 정보는 매우 부족한 것으로 나타났다. 사고현황분석에서 터널사고의 주요 유형은 후미추돌과 그에 따른 연쇄 추돌사고가 발생하고 있음을 고려할 때 차간거리 정보에 대한 시설보완이 필요하다고 할 수 있다.

모니터링을 통해 확인한 조사 대상 터널의 입구부(터널 전방 500 m구간) 시설 설치현황을 종합하면 공통시설로 가변정보표지판(VMS)과 차로제어시스템(LCS), 터널예고표지와 방호울타리가 모두 설치되어 있으나 일정차간거리유지나 감속운행에 대한 시설은 매우 부족한 것으로 조사되었다. 터널 내부의 차로는 모두 실선으로 차로변경을 허용하는 구간은 없었으며, 터널조명시설의 경우 최근 시공된 터널일수록 차선과 조명을 일치시켜 선형변화의 시선유도를 증진시킨다.

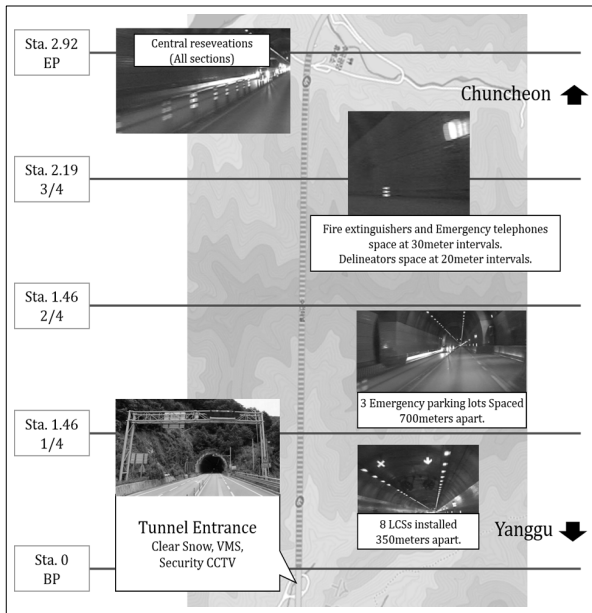


Fig. 1. Installation investigation result (ex. Sooin Tunnel).

터널 내부시설로는 가변정보표지판, 차로제어시스템, 시선유도표지, 소화기, 비상주차대 및 비상전화기가 공통으로 설치되어 있으며 제한속도표지 및 규정속도 준수에 대한 시설은 추돌사고가 많은 둔내터널만 중점적으로 설치하였고 나머지 터널에는 미설치되어 있다.

터널의 방재등급은 터널 연장에 따라 구분하며, 연장 3,000 m이상인 둔내터널, 배후령터널, 미시령터널은 1등급, 진부1터널, 강릉5터널, 두문동재2터널, 수인터널은 2등급(연장 1,000 m이상, 3,000 m미만)으로 구분된다. 조사결과 터널별 시설설치 특성은 터널방재등급에 따라 일괄적용하였음을 알 수 있었다.

즉, 사고의 유형이나 잠재위험성을 고려하기보다 규모에 비례하여 설치하고 있다고 할 수 있다. 소화기구, 정보설비(가변정보표지판, 차로제어설비), 피난시설(비상주차대, 피난연결통로(갱) 등의 방재시설은 모두 1~2등급 기본시설에 해당하는 시설이다. ‘도로안전시설 설치 및 관리지침(국토교통부)’의 시선유도시설편(터널 입구의 도색), 조명편(터널조명), 차량방호안전시설편(방호울타리) 설치에 따라 시설물이 설치되었으며 이를 종합화한 악천후구간·터널·장대교량편에 의해 터널 조명, 구조물도색, 시선유도표지, 표지병, 도로전광표지, 터널 시선유도등 시설이 설치된 것이다. 표시·표지의 경우 ‘교통노면표시 설치관리매뉴얼(경찰청)’에 따라 진로변경제한선이 설치되었으며 주차금지표시의 경우는 설치된 터널이 없다. ‘교통안전표지 설치관리 매뉴얼(경찰청)’에 의해 터널시설예고표지, 앞지르기금지표지가 설치되어 있었다. 주차금지표지는 설치되지 않았다.

3.3. 주행속도조사

터널구조 특성상 속도조사는 스피드건을 이용한 인력 조사가 불가하며 검지기 설치 또한 불가하다. 이에 선행주행차량 추적조사 방법으로 중차량을 포함한 개별차량 17대를 조사 후 통계 처리하였다. 총 17대 조사 후 최대 속도값, 최소 속도값 각 1대씩 제외하여 15대를 기준으로 하였다. 속도조사는 군집차량을 피하고 자유교통류 상황에서의 개별차량 속도조사가 이루어져야 하기 때문에 조사 시간대는 침두 시간대를 제외하고 오전 6시~7시, 10시~12시, 오후 2~4시 사이에 집중 조사하였으며, 조사차량은 주변 인터체인지 및 교차로를 통해 회차하여 터널 양방향차로에 대한 조사를 수행하였다.

3.3.1. 운영현황분석

운영현황분석에서는 주행차량 속도조사 결과를 이

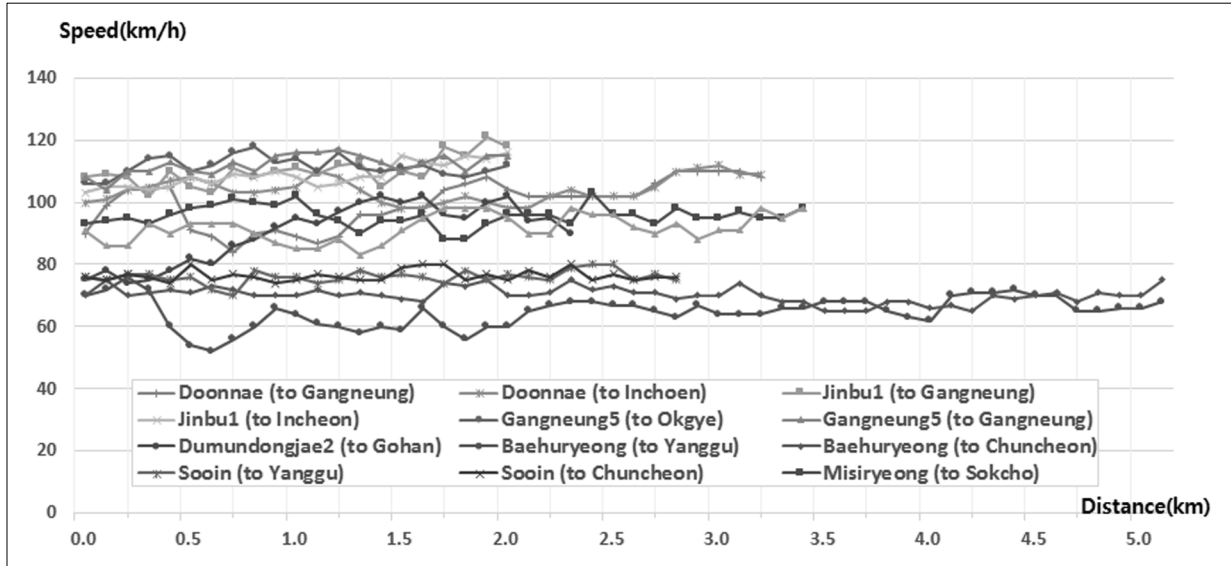


Fig. 2. Change of speed in tunnel.

용하여 터널 내 통과차량의 속도변화를 검토하였다 (Fig. 2). 독립터널의 경우 진입부와 진출부의 고저차를 두고 있어 주행방향은 하향경사구간이 된다. 그러나 배후령터널, 수인터널 등과 같이 터널 내 중앙 분리에 의해 양방향 통행이 가능한 터널은 주행방향에 따라 경사도가 반대가 되는 특성이 있다. 주행차량의 속도 그래프를 기하구조와 연관시킨 결과, 하향경사구간에서 터널 출구부로 갈수록 진입부보다 주행속도가 증가하는 패턴이 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 터널기하구조와 운영현황에 따라 총 3가지 유형의 주행속도를 구분하였다(Table 7). 유형 I은 전구간 곡선터널이면서 구간단속터널으로 둔내터널(양방향), 강릉5터널(양방향)이 해당되며, 유형II는 하향경사터널로서 진부1터널(양방향), 미시령터널(양방향), 두문동재2터널(고한방향)이 해당된다. 유형III은 대면통행터널으로 중앙분리시설대가 설치된 배후령터널(양방향), 수인터널(양방향)이 이에 해당된다.

3.3.2. 주행속도 통계 결과

터널진입부터 진출까지 대부분 구간에서 85% 주행속도 및 평균주행속도가 제한속도를 초과하는 것으로 나타났으나 구간단속 중인 둔내터널의 경우에는 제한속도(100 km/h)에 근접하고 있는 것으로 조사되었다. 고속도로의 경우 강릉5터널, 진부1터널 85%주행속도가 제한속도 +20 km/h 수준이며 미시령터널의 경우 약 +40 km/h의 높은 속도를 보이고 있다. 터널을 진입한 순간(터널 이점 0 km)부터 진출하기까지 이점별 주행속도를 살펴보면 터널을 통과하는 동안 가속과 감속을

Table 7. Statistics for traveling speed

Type (unit : kph)	Direction	Mean Speed		85% Speed		
		Mean	S.D	Mean	S.D	
Type I	Dunnae (Speed limit 70)	Gangneung	99.6	7.7	114.0	3.1
		Incheon	103.9	4.0	115.3	5.1
	Gangneung 5 (Speed limit 70)	Gangneung	112.2	3.3	119.5	2.8
		Okgye	111.5	3.1	119.6	2.9
Type II	Jinbu 1 (Speed limit 70)	Gangneung	110.1	4.8	123.0	5.7
		Incheon	108.7	3.9	120.9	4.3
	Misiryong (Speed limit 70)	Sokcho	95.5	3.3	117.6	4.0
		Wontong	91.7	4.3	114.4	2.6
Dumun dongjae 2 (Speed limit 70)	Gohan	90.3	9.5	100.6	9.1	
Type III	Baehuryeong (Speed limit 60)	Yanggu	64.8	4.9	74.6	3.1
		Chuncheon	70.2	2.5	75.8	2.5
	Sooin (Speed limit 60)	Yanggu	76.0	2.1	84.4	2.0
		Chuncheon	76.4	1.8	86.9	3.1

반복하면서 터널 내부에서는 주행속도가 다소 높아지는 경향이 있는 것으로 조사되었다.

유형 I 터널에 속하는 둔내터널의 주행속도 그래프를 살펴보면 평균주행속도와 85%주행속도의 증감은 나타나지만 지속적인 추세패턴은 보이지 않았다. 이는 구간단속에 의한 현상으로 속도관리가 이루어진다는 것이다.

또한 강릉5터널과 같이 터널 전구간이 곡선(R=4,760 m)구간에 위치한 경우도 주행속도의 변화가 둔감하게 나타났다.

반면 유형Ⅱ에 해당하는 터널의 주행속도 그래프를 살펴보면 하향경사구간의 지속과 함께 주행속도도 상향추세를 보였다. 진부1터널의 경우 각 방면별 직선 구간에 하향경사 조합으로 주행속도는 증가추세이며 두문동재2터널은 전구간 하향경사구간으로 터널 진입부터 속도가 증가추세이나 곡선부 진입부를 기점으로 터널출구까지는 속도증감이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 평면곡선과 종단곡선이 주행속도에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다.

미시령 터널 속초방면의 경우 구간단속 예고표지가 있어도 실제 구간단속이 터널통과 후 시작되기 때문에 터널내부에서 감속효과는 없는 것으로 나타났다. 유형Ⅲ의 경우 중앙분리시설대에 의해 양방향 통행이 이루어지는 터널로 중앙분리시설대의 폭원이 0.5m 수준으로 매우 좁아 대향차량 영향에 의해 고속주행 및 과속 유발이 크게 나타나지 않았다.

터널별 주행실험차량 15대의 평균주행속도에 대해 shapiro-wilk test를 실시하여 정규성 검정한 결과, 모든 터널에서 유의수준이 0.05이상으로 나타났다. 따라서 본 연구의 피실험차량의 평균속도는 전체 터널 이용차량의 운전자들을 대표할 수 있는 표본이라 할 수 있다.

이를 통해 알 수 있는 점은 속도관리에는 적절한 곡선구간 삽입이 과속을 방지하는 대안이 될 수 있으며 터널구간의 구간단속 또한 속도일관성을 가능하게 할 수 있다는 것이다. 앞서 Park은 곡선반경 2,000 m 이상 일 때 사고가 증가하는 것으로 제시하였다. 또한 한국도로공사에서는 곡선반경이 3,000 m 이상일 시에는 운전자가 직선부의 주행행태와 같은 행태를 보이는 것으로 나타났다^{7,14)}. 따라서 속도관리 측면에서 적절한 곡선구간의 삽입은 지형 등을 고려해야겠으나, 곡선반경이 2,000 m를 넘지 않는 범위에서 이루어지는 것이 효과가 클 것으로 판단된다.

3.3.3. 터널 진입-진출속도 비교

다음은 터널을 이용하는 차량의 터널진입속도와 진출속도 간 차이가 유의한지 t-test를 통해 통계적으로 분석한 결과는 Table 8과 같다. 이를 위해 대상 터널의 실험차량별 진입 후 최초 100 m 이내의 속도와 진출 직전 100 m이내의 평균속도의 차이를 비교분석하였다. 중앙분리시설대가 존재하지 않는 유형 I과 유형 II 터널을 이용하는 차량은 터널 진입 시보다 터널 진출 시 높은 속도로 주행한 것으로 나타났으며, 터널진입 시와 진출 시의 평균속도의 차가 유의하게 발생한 것으로 나타났다. 반면 유형Ⅲ 터널의 경우 차량의 터널 진입속도와 터널 진출속도의 차이는 없는 것으로 나타

Table 8. T-test for speed difference analysis between tunnel entrance and exit

Type	Type	difference		t	sig. (2-tailed)
		Mean	S.d		
Type I	Dunnae (to Gangneung)	-17.87	7.34	-9.43	.000
	Dunnae (to Incheon)	-9.00	7.78	-4.48	.001
	Gangneung 5 (to Okgye)	-5.67	5.26	-4.17	.001
	Gangneung 5 (to Gangneung)	-7.13	4.82	-5.73	.000
Type II	Jinbu 1 (to Gangneung)	-10.80	9.31	-4.49	.001
	Jinbu 1 (to Incheon)	-12.20	6.16	-7.68	.000
	Misiryong (to Wontong)	-6.07	5.64	-4.17	.001
	Misiryong (to Sokcho)	-4.47	7.35	-2.35	.034
	Dumun dongjae2 (to Gohan)	-15.93	5.27	-11.71	.000
Type III	Sooin (to Yanggu)	0.67	2.82	0.92	.375
	Sooin (to Chuncheon)	-0.20	4.28	-0.18	.859
	Baehuryeong (to Yanggu)	0.73	3.22	0.98	.318
	Baehuryeong (to Chuncheon)	0.00	4.29	0.00	1.000

났다. 이는 중앙분리시설대 및 측대 설치에 따라 좁은 측방여유폭이 제공됨으로써 고속주행이 어렵기 때문이라 판단된다.

4. 터널부 안전주행을 위한 개선안 도출

본 연구에서는 교통사고발생현황, 시설설치현황, 운영현황을 종합하고 대심도·장대터널 시설·운영개선 방향을 제시한다. 그러나 새로운 시설을 개발하거나 무분별한 시설을 도입하는 것은 불합리한 방안으로 현 시설물을 중심으로 기존 개선의 필요성을 살펴보았다. 현 도로안전시설물 및 교통관리시설물에 관한 기준은 지상부 도로를 대상으로 정해져 있기 때문에 대심도 지하도로에 적용 가능한 시설물 중 일부 시설물은 지하도로에 적용하기 위해서는 지하도로의 특성을 고려한 시설물의 개선 및 보완이 필요하다.

본 연구결과, 둔내터널, 진부1터널, 강릉5터널이 위치한 고속도로의 경우 터널을 통과하는 차량들의 평균주행속도가 높고, 사고빈도 또한 일반국도, 국가지원지방도상의 터널보다 높게 나타났다. 가장 높은 사고유

형은 후미추돌사고이며, 전방차량의 급감속 및 전방 지정체 상황에서 후미차량의 속도조절 실패 등 교통류의 변화시 사고로 이어지는 것으로 나타났다. 사고 심각도의 경우 대부분 중경상으로 나타나 추돌사고의 경우 연쇄추돌 비율이 40% 이상으로 매우 높게 발생하였다. 측면충돌의 경우 차로변경으로 인한 사고빈도가 높고 주변차량 및 시설과 충돌하는 경우가 대부분이었다. 측면여유폭이 좁고 내부 측대에 별도의 안전시설 설치가 불가능하여 차로이탈시 대부분 시설충격사고로 나타났다. 기타 낙하물 사고 및 노면상태불량에 의한 미끄러짐 사고 또한 발생하는 것으로 나타났다.

가장 빈번하게 나타날 사고유형은 추돌사고와 이와 관계된 연쇄추돌사고로 예측할 수 있으므로 추돌사고 예방을 위한 시설 및 운영 기준 마련이 사고예방을 위해 필요하다. 또한 대심도·장대터널의 단조로운 주변 환경은 운전자의 지루함과 피로도를 가중시켜 졸음운전으로 인한 사고위험을 높일 수 있다. 이러한 주행 환경을 개선하고자 지하도로에도 운전자의 주의를 환기시킬 수는 경관적 요소를 추가할 수 있는 시설 검토가 필요하다. 벽면에 지상부 통과구간의 지역 특성을 나타낼 수 있는 벽화를 추가하여 운전자에게 통과하고 있는 상부 위치정보와 함께 주행 중 볼거리를 제공함으로써 단조로움을 해소할 수 있다(Fig. 3).

또한 지하도로 일정구간마다 광장부를 확보하고 인공식재, 경관조명 등으로 운전자에게 잠시 쉴 수 있는 공간을 마련하는 것도 계획할 수 있다. 또 다른 방안으로 터널의 교통상황, 사고정보 및 접속부 상부도로의 교통상태를 알려주는 지하도로 전용 교통안내방송 채널을 추가하여 운전자가 터널에 진입시 지하도로에서 발생하는 각종 정보를 빠르고 정확하게 알 수 있도록 한다. 이 방송시설은 지능형 교통체계(ITS)와 방재시스템을 연계하여 통합시스템으로 운영되어야 효율적인

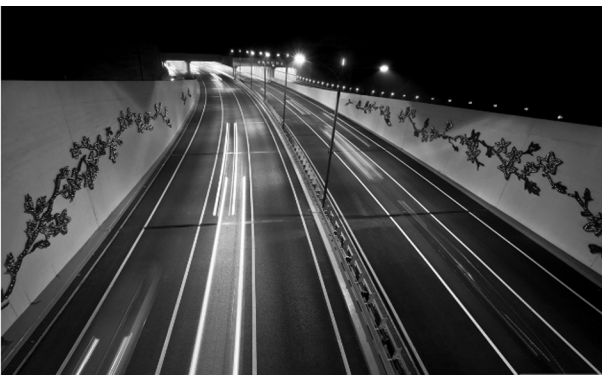


Fig. 3. Case of nagwon underground road way in pangyo.

운영이 가능하다. 부대시설의 경우 비상주차대, 휴게시설은 기능상 필요한 시설로 판단된다. 비상주차대의 경우 별도의 비상차로를 설치하지 않는 이상 비상주차대의 설치는 반드시 필요하며 장시간 단조로운 지하도로를 주행시 집중력 저하와 피로감으로 인한 졸음운전이 발생 할 수 있으므로 졸음쉼터 형식의 소규모 휴게시설이 필요하다. 다만 지하의 제한된 공간에 설치해야 하는 점에서 시공성, 경제성 등을 신중히 고려하여 적용해야 한다.

터널에서 발생하는 사고는 대부분 추돌형태로 발생하며, 대부분 전방차량에 대한 거리 및 속도변화의 인지 어려움에 의해 발생한다. 따라서 차량은 안전하게 통과하기 위해 과속하지 않는 범위 내에서 일관성 있는 속도로 주행할 수 있어야 한다. 이는 단순개별시설 및 안전방호시설로는 추돌사고를 예방하기에는 한계가 있다. 그러나 본 연구의 주행속도조사 결과에 따라 속도관리 측면에서 터널내 구간단속을 시행함으로써 속도일관성을 가능하게 할 수 있으며, 적절한 곡선구간 삽입이 과속을 방지하는 대안이 될 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

최근 도로계획은 기존의 단순한 지역간 연결에 그치지 않고 주행성 향상과 환경파괴 최소화를 위하여 노선을 선정하는 추세이다. 이는 산악지형이 많은 우리나라의 지형적 특성상 대심도 지하도로 및 장대터널 계획이 불가피함을 의미한다. 유럽의 경우에는 구난개념 측면에서 500~1,000 m를 짧은 터널(Short Tunnel), 1,000~15,000 m를 긴 터널(Long Tunnel), 그리고 15,000 m 이상을 장대터널 또는 매우 긴 터널(Very Long Tunnel)로 정의하고 있다.

대심도 지하도로 및 장대터널은 선형조건, 교통조건, 터널내 유지관리 조건 및 방재설비 적용을 위한 설계 기준 등 여러 가지 측면을 고려하여 한다. 국내의 경우 터널등급에 따른 기준설정이 일반본선구간의 도로안전시설을 상당수 적용하고 시설의 등 간격 기준만 달리할 뿐 구체적이지 못한 실정으로 대심도 지하도로 및 장대터널에는 새로운 신규 기준도 고려해야 할 대상이다.

본 연구에서는 강원권지역 연장 2 km이상인 7개 터널을 대상으로 사고자료 분석, 시설 및 운영현황 분석을 실시하였으며 터널별 현황도를 작성하여 복합적인 현황분석을 실시하였다. 향후에 좀 더 많은 터널조사가 이루어져서 시설물 유무별로 주행속도 비교 등을 통해 시사점을 도출하는 것이 의미가 있을 것으로 판

단된다. 또한 터널 시설기준에 대한 검토를 통해 대심도 지하도로 및 장대터널에 적용해야 할 방향성을 검토하였다. 운영현황을 살펴보면 노면상의 시설은 일반 구간과 큰 차이점은 없으며 교통표시 및 표지는 최소한 설치하고 선형설계도 매우 단순한 것으로 나타났다. 또한 물리적 속도 감속시설이나 단속시설도 규모가 협소하며 사고다발 터널의 경우에만 과도하게 설치하는 것으로 나타났다. 교통사고의 경우 후미추돌사고가 주요 사고유형이며 속도관리를 통해 사고를 예방해야 할 것으로 전·후방 차량의 주행흐름에 대한 적극적인 시설개발 및 도입이 필요하다. 속도관리의 방법으로는 적절한 곡선부의 삽입(2,000 m이내의 곡선반경을 권장)과 터널내 경관조명의 설치로 인한 운전자 각성도 등이 있다.

터널 내 주행속도에 대한 조사분석 결과에 따라 터널구간의 평면곡선 및 종단곡선 뿐만 아니라 중앙분리 시설대, 측대 등 시설설치 형상 등이 주행속도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 기존연구와 유사한 결과라고 할 수 있다^{4,6,9)}.

향후연구에서는 더욱 많은 터널 사고자료와 유형자료를 수집하여 터널유형별(양방향 터널VS단방향 터널) 사고현황 비교가 필요할 것으로 보인다.

또한 대심도 지하도로 교통시설 및 운영 개선을 위하여 장대터널과 비장대터널의 운전자 주행행태 비교와 추종기법을 이용한 속도보다는 검지기 자료를 이용하여 시설규모에 따른 주행속도 변화 연구가 필요하고, 기존개선은 장대터널을 구간에서 운전자 인지반응과 생리현상변화를 중심으로 한 실험을 바탕으로 이루어져야 하기 때문에 향후 현장중심의 실증연구가 필요하며 장거리구간의 쾌적한 운전환경을 확보해주는 방향으로 보완연구가 지속되어야 한다.

References

- 1) J. Y. Kim, H. J. Kim and M. S. Jang, "Analyzing Drivers' Visual Response Variation in Very Long Expressway Tunnel- The Yuksimnyeong Tunnel-" Journal of Korean Society of Transportation, Vol. 27, No. 1, pp. 17-25, 2009.
- 2) KoROAD, "Effect of Highway Geometric Structure on the Driving Behavior of the Driver", 1996.
- 3) J. M. Kim, K. S. No and B. J. Jung, "Driver's Behavior on Long Tunnel using Driving Simulator", Proceedings of Korean Society of Road Engineers Conference, pp.133-138, 2007.
- 4) H. S. Lee, "A Study on the Speed Variation Characteristics in Tunnel Section of the Expressway", Master's Thesis, Kwandong University, 2002.
- 5) Hirata and Yai, "An Analysis of Driver's Awareness Level And Support System While Driving in Long Urban Expressway Tunnel", TRB Annual Meeting, 2000.
- 6) A. Motoyuki, I. Nobuhiro, S. Yoshihiko, U. -O. Hisanari, H. Takuro, S. Yasuo and O. Masaaki, "Simulator Study on Driver's Behavior While Driving through a Tunnel in Rolling Areas", Proceedings of the Driving Simulation Conference, Michigan, 2003.
- 7) J. J. Park, I. K. Seo, C. B. Lee and T. J. Ha, "A Study on the Traffic Accident Characteristics in Expressway Longitudinal Tunnel", Proceedings of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems Conference, pp. 40-45, 2011.
- 8) E. H. Jeong, J. M. Koo and S. J. Park, "Analysis of Driver's Physiological Signal in Long Tunnel", Proceedings of the Ergonomics Society of Korea Conference, pp.512-517, 2009.
- 9) M. H. Martens, J. Tonros and M. A. Kaptein, "Effects of Emergency Lane, Exits and Entries and Wall Pattern in Tunnels on Driving Behavior -Driving Simulator Studies-, Safety Standards for Road Design and Redesign", SAFESTAR Project, 2003.
- 10) Y. -W. Wang, K. -J. Kum, S. -N. Son and J. -S. Yu, "A Study on Development Evaluation Modeling Internal Landscape in Tunnel Considering Human Sensitivity Engineering", International Journal of Highway Engineering, Vol. 12, Issue 1, pp. 9-20, 2010.
- 11) G. J. Blaauw and Leebeek, "Traffic Management at the Aqueduct in Highway 4 (Memo IZF June 1974)", Soesterberg: The Netherlands: TNO Institute for Perception, 1974.
- 12) G. J. Blaauw and A. R. A. Van der Horst, "Lateral Positioning Behaviour of Car Drivers Near Tunnels - Final Report(Report IZF 1982 C-30)", Soesterberg: The Netherlands: TNO Institute for Perception, 1982.
- 13) K. J. Bieger, "Tunnel Rescue for New Main Lines of DB Network", Tunnel Management International, pp.7-15, 1999.
- 14) Korea Expressway Corporation, "Publish of SMART Highway Geometric Design Guideline", 2014.