

축광노면표시 시인성 개선에 따른 경제성 분석 및 적용방안

이용주* · 이규진** · 김상태*** · 최기주****

Yi, Yongju* · Lee, Kyujin** · Kim, Sangtae*** · Choi, Keechoo****

Effectiveness Analysis and Application of Phosphorescent Pavement Markings for Improving Visibility

ABSTRACT

Visibility of lane marking is impaired at night or in the rain, which thereby threatens traffic safety. Recently, various studies and technologies have been developed to improve lane marking visibility, such as the extension of lane marking life expectancy (up to 1.5 times), improvement of lane marking equipment productivity, improvement of lane marking visibility by applying phosphorescent material mixed paint. Cost-benefit analysis was performed with considering various benefit items that can be expected. About 45% of traffic accidents would be prevented by improving lane marking visibility. Additionally, accident reduction benefit and traffic congestion reduction benefit were calculated as much as 246 billion KRW per year and 12 billion KRW per year, respectively, by reducing repaint cycle due to enhanced durability. 45 billion KRW per year is expected to reduced with improved lane detection performance of autonomous vehicle. Meanwhile, total increased cost when introducing phosphorescent material mixed paint to 91,195km of nationwide road is identified as 1922 billion KRW per year. However, economic feasibility could not be secured with 0.16 of cost-benefit ratio when applied to the road network as a whole. In case of "Accident Hot Spot" analyzing section window (400m), one or more fatality or two or more injured (one or more injured in case of less than 2 lanes per direction) per year were caused by pavement marking related accident, economic feasibility was secured. In detail, 3.91 of cost-benefit ratio is estimated with comparison of the installation cost for 5,697 of accident hot spot and accident reduction benefit. Some limitations and future research agenda have also been discussed.

Key words : Pavement marking, Phosphorescent lane paint, Lane marking, Visibility, Accident hot spot

초 록

야간 혹은 우천시에 노면표시의 시인성이 저하되어 교통안전에 위협을 초래하고 있는 가운데, 본 연구에서는 최근 소개된 차선도색 장비 성능개량에 따른 노면표시 수명 연장(1.5배), 생산성 향상(56.3%), 축광차선도료를 배합한 야광 노면표시의 시인성 개선(97.0%) 등 다양한 기대 편익과 종합적인 소요비용을 고려한 경제적 타당성을 제시하고자 하였다. 노면표시 시인성 개선에 따라 45.4%의 사고가 감소, 연간 2,463억원의 교통사고 절감편익이 발생하며, 재도색주기 증가에 따른 공사중 교통혼잡비용 절감 연간 123억원, 자율주행자동차 차선인식 성능 개선에 따른 장비 가격 절감으로 연간 453억원의 편익이 발생하여, 축광노면표시 도입에 따른 연간 총 편익은 3,039억원으로 산정되었다. 전국 도로 91,195km의 차로구분선, 중앙선 및 가장자리차선에 야광차선 도입시 총비용 증가분은 연간 1조 9,222억원으로 경제성(비용-편익비 0.16) 확보가 어려운 것으로 나타났다. 교통사고 잦은 곳의 지방부 분석 구간길이(400m)에 대한 도로유형별·차로수별 차선도색비용과 교통사고비용 원단위를 적용하여 축광 노면표시의 경제적 타당성이 확보되는 사고 규모를 산정한 결과, 노면표시가 직·간접적 원인인 사고로 유발된 사망자가 연간 1명 이상이거나, 부상자가 연간 2명 이상(단, 왕복 4차로 미만인 경우는 연간 1명 이상)인 경우 경제적 타당성이 확보되는 것으로 나타났다.

* 중신회원·교신저자·아주대학교 TOD기반 지속가능 도시·교통 연구센터 연구조교수 (Corresponding Author·Ajou University·srzr2001@ajou.ac.kr)

** 정회원·아주대학교 TOD기반 지속가능 도시·교통 연구센터 연구부교수 (Ajou University·transjin@ajou.ac.kr)

*** 정회원·(주)평화엔지니어링 기술연구원 연구위원 (Pyunghwa Engineering Consultant LTD·stkim99@pec.kr)

**** 중신회원·아주대학교 교통시스템공학과 교수 (Ajou University·keechoo@ajou.ac.kr)

Received June 21, 2017/ revised July 8, 2017/ accepted July 25, 2017

구체적으로, 관련 사고구간(5,697개)에 대한 야광 노면표시 설치비용을 사고감소편익과 비교한 결과, 충분한 경제성(비용-편익비 3.91)이 확보되었다. 연구의 한계와 향후 연구주제가 논문의 말미에 토의되었다.

검색어 : 차선도색, 축광차선도료, 노면표시, 시인성, 교통사고 잦은 곳

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

도로상의 노면표시, 그 중에서도 차선은 차량의 진로를 구분하는 역할을 담당하며 운전자에게 규제 및 지시의 내용 전달, 도로 선행의 안내를 통한 안전성 제고, 도로 공간의 효율적 이용 등 전통적 기능을 제공함과 동시에 최근에는 차선 인식 기능을 탑재한 자율주행자동차가 개발되고 있는 점 등을 고려할 때 명확한 차선 정보의 제공은 필수적이라 할 수 있다.

그러나 차선표시 도색 후 일정기간이 경과하면서 도로 자체의 마모 손실과 재귀반사 기능을 부여하는 글래스 비드¹⁾의 마모 및 탈리에 의한 품질 저하가 발생하여 특히 야간 차선 시인성이 불량한 경우가 많아 교통 안전에 심각한 위협이 되고 있는 실정이다. 선행 연구(Yi et al., 2016)에서는 한국도로공사의 내부자료를 바탕으로 2005~2011년의 7년간 도로공사 관할 전국 고속도로에서 발생한 야간교통 사고 중 노면표시가 직·간접적인 사고 원인으로 작용할 수 있는 주시태만과 핸들과대조작 사고를 조사한 결과 평균권 284건(사망 44명, 부상 153명)에 달하여 개선의 필요성이 있음을 시사하였다.

최근 차선도색 장비 성능 개량에 따른 노면표시 수명 연장과 생산성 향상, 축광차선도료(Phosphorescent Lane Paint, 축광이란 빛의 자극을 중단해도 계속해서 발광하는 성질을 이르는, 인광·야광과 동일한 의미임)를 배합한 야광 노면표시의 시인성 개선 연구 등 차선도색과 관련된 다양한 대안들이 개발되었으며 이를 본격적으로 적용하기에 앞서 도입 타당성을 검토할 필요가 있다. 선행 연구(Yi et al., 2016)에서는 고속도로에 국한하여 노면표시의 성능 개선 및 설치규격 개선에 따른 사고절감 편익을 주요 골자로 하는 경제성 분석을 수행한 바 있으며, 본 연구에서는 적용 대상 도로의 확장(고속도로 및 일반도로), 편익 산정항목의 확대(사고절감편익, 공사중 교통혼잡비용 감소, 자율주행자동차 차선인식장비 원가절감요인 등)을 종합적으로 고려하여 차선도색 장비 성능 개량 및 축광차선도료 사용에 대한 투입비용 이상의 편익을 유발할 수 있는지에 대한 경제적 타당성을 검토하고자 한다.

1.2 연구의 내용 및 방법

첫째, 연구의 배경을 서술하고 목적을 제시한다. 둘째, 기존 문헌 고찰을 통해 차선 시인성의 효용, 차선도색 공사중 교통혼잡비용 추정, 자율주행자동차의 차선인식기술 동향 등을 고찰한다. 셋째, 차선도색 기술 대안의 소요 비용과 차선 시인성 개선에 수반되는 다양한 절감 편익 도출을 통해 경제성 분석을 수행한다. 마지막으로 종합결론 및 한계점과 향후 연구 과제를 제시한다. 본 연구의 내용적 범위는 차선도색이 적용되는 공용도로를 대상으로 한다.

2. 기존 문헌 고찰

2.1 차선 시인성의 중요성 및 효용

Rumar and Marsh (1998)은 야간 주행시 열악한 차선 시인성이 교통안전을 심각하게 위협하고 있음에 착안하여 관련 연구동향과 향후 개선방향에 대하여 논의하였다. 최대 3초 이하의 전방 주행거리(예를 들어 100km/h로 주행시 약 83m 전방)에 대한 근거리 차선 시인성뿐 아니라, 최소 5초 이상의 전방 주행거리에 대한 원거리 차선 시인성이 확보되어야 하나 야간에는 원거리 차선 시인성의 부족으로 인간공학적 측면에서 안전성이 저해되며, 표지병 등의 병행 사용시 안전성이 향상됨과 동시에 원거리 차선 시인성의 증가에 따라 통행속도가 다소 증가하고, 특히 고령자와 장애인인 얻는 편익이 상대적으로 높음을 기존 문헌에서 밝혀내었다.

Campbell et al. (2012)에서는 관련문헌의 종합적 검토를 통하여 차선의 시인성에 대하여 사전 인지시간은 최소 3초, 권장 5초를, 휘도는 최소 100mcd/m²/lux, 차량의 전면부 유리 및 헤드라이트 오염에 대한 시인성 저하 보정시 121mcd/m²/lux를 제시하였다.

Carlson et al. (2009)는 차선도색의 다양한 편익에 관하여 최근 진행되는 연구를 중심으로 고찰하였다. 이에 따르면 도로 가장자리 차선 설치에 따라 사고가 사례별로 12~21% 감소하며 특히 야간과 저시정 기상 상태에서 사고감소 효과가 큰 것으로 나타났으며, 차로 폭의 확대 또한 유의한 사고 감소 효과가 있는 것으로 도출되었다. 한편, 차량 주행속도는 거의 변화가 없으며, 야간 차선 최소 재귀반사 수준에 대한 운전자 조사 결과 1990년대 초반까지는 100mcd/m²/lux 수준에서 최근(2000년대 초반)에는 120~130mcd/m²/lux를 선호하는 것으로 조사되었다.

Road Traffic Authority (2009)는 차선 시인성 개선 연구의 문헌 고찰 단계에서 차선 시인성 향상 및 표지병 설치 등에 따른

1) 광원으로부터 온 빛이 물체의 표면에서 반사되어 다시 광원으로 돌아가는 반사인 재귀반사를 도로상에서 재현하기 위해 반사체의 재료를 유리로 제작하는 경우임.

사고 감소 효과가 18-46%임을 밝히고 국내 차선 시인성의 저해요 인과 개선방안을 도출하였는데, 구체적인 개선방안으로는 장소별 차선 공법 차등 적용, 교통량 등을 고려한 비용분석, 시인성 기준 상향 조정, 계약방법 개선, 악천후시 시인성 개선을 위한 지침 개선 및 연구개발, 기술교육 및 정보교류 등을 제시하였다.

2.2 차선도색 공사중 교통혼잡비용 추정

Chung et al. (2009)는 교통사고, 악천후, 도로에서의 작업 등 돌발상황에 의해 발생하는 비 반복적 지정체의 혼잡비용을 추정하였다. 고속도로 부문은 네트워크 및 교통류 자료와 교통사고, 강수, 도로공사 자료를 사용하여 계량화하였으며, 일반국도 및 지방도 부문은 자료 수집의 한계상 일부 구간의 교통량, 통행속도를 수집·분석하여 전국으로 확장하는 방법을 적용하였다. 공사로 인한 혼잡은 MUTCD (2003)에서 제시한 값을 참고하여 공사 시작지점으로부터 3.2km 상류부까지를 영향범위로 고려하였으며, 고속도로 본선의 일부 차단이 발생한 20,078건(2008년 기준)의 공사 자료를 반영하였다. 분석 결과 2008년 기준 고속국도의 비 반복적 총지체량은 22,902,418대·시로 이 중에서 공사에 의한 지정체는 3,366,164대·시(14.7%)로 나타났으며, 이에 따른 혼잡비용은 5,207억원, 이 중에서 공사에 의한 혼잡비용은 779억원(15.0%)로 나타났다. 일반국도 및 지방도의 경우 비 반복적 지정체에 따른 혼잡비용은 23,143억원으로 집계되었다.

2.3 자율주행자동차의 차선인식기술 동향

Davies (2016)은 차선의 재귀반사, 대비, 폭 등 다양한 요소 중 어떠한 요소가 자율주행자동차의 영상인식에 중요한 요인으로 작용하는지 실험을 통해 조사하였다. 56km/h로 주행시에는 전방 8~14m, 112km/h로 주행시에는 전방 8~18m 범위의 차선을 인식하였으며, 야간에는 재귀반사가, 주간에는 휘도 대비가 장비의 성능에 가장 중요한 요소로 작용하였다. 차선폭의 경우 10cm와 15cm를 비교시, 재귀반사 성능이 다소 떨어지더라도 넓은 폭(15cm)이 장비 인식 측면에서 더 나은 결과를 도출하는 것으로 나타났다.

Vacek et al. (2007)는 자율주행자동차의 차선변경, 추월, 회전 등에 필수적 정보인 차선 및 노면표시 등 노면도색의 인식 기술 동향을 고찰하였다. 지방부 도로의 주행실험 결과, 차선은 대체로 높은 인식률을 보이나 주행 차선의 양 옆을 제외한 먼 거리의 차선(예를 들어 반대편 주행차로의 가장자리 차선)은 간혹 인식이 정상적으로 되지 않는 경우가 있었으며, 노면표시(화살표)의 경우 다른 차량으로 인해 가려진 경우를 제외하고는 모두 인식이 가능한 것으로 나타났다. 향후 과제로는 인식기술 자체의 향상과 더불어 차선도색의 명확성 향상이 필요한 것으로 제시되었다.

Sage (2016)는 자율주행자동차 최대의 적은 열악한 도로 여건인

데, 차선이 불분명하거나 도로 표지판이 불량한 경우 라이더나 레이더 등의 기능을 고도화하고 도로 정보를 내장해야 하는 등 비용 증가 요인이 발생하며, 구글의 자율주행자동차에 탑재한 초기형 라이더의 가격이 7만5천 달러에 달하는 등 이들 부품의 가격이 매우 높음을 밝혔다. 한편, 2016년 1월 ‘쿼너지(Quanergy)’라는 업체가 250달러짜리 라이더를 공개한바 있으며, 쿼너지는 2018년 까지 상용화할 계획인데 업체는 100달러 미만으로 가격이 떨어지기를 기대하고 있음을 기술하였다.

2.4 차선 시인성과 교통사고의 상관관계)

Smadi et al. (2008)은 노면표시와 사고발생률간의 상관관계를 연구하였다. 도로 및 차선의 종류를 구분하여 각 상황별 사고발생 감소율을 추정하였다. 다차로 고속도로와 2차로도로 모두 중앙선·측선의 노면표시 재귀반사율이 높아질수록 사고발생은 감소하는 것으로 분석되었다. 그러나 다차로 고속도로의 차로구분선은 사고 발생에 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. 또한, 노면표시 시인성 개선과 사고발생률과의 관계는 재귀반사율 200mcd/m²·lux 이하 구간에 한해서 유의하게 나타나는 것으로 분석되었다.

Donnell et al. (2009)은 다차로 고속도로에서 백색길 가장자리선의 시인성 개선을 연구하였는데, 재귀반사율 50mcd/m²·lux개선 시마다 사고율이 약 18%씩 감소하는 것으로 추정하였다.

Lee et al. (2015)은 한국도로공사에서 고속도로에 시범 설치한 일부구간에 대해 차선밝기가 240mcd/m²·lux에서 420mcd/m²·lux로 1.75배 증가한 구간에서 약 41.7% 교통사고 감소 효과가 있는 것으로 분석하였다.

3. 신 차선도색 기술의 편익 추정

3.1 사고감소 편익 추정

3.1.1 축광 노면표시의 사고감소율 추정

최근 개발된 축광 노면표시(KS M 6080)는 축광안료 최적배합 비인 40%를 적용하여 용착식 도료의 성질을 유지하고자 하였으며, 주변 광원이 거의 없고 교통량이 낮은 현장(경기도 포천시 신북면 소재)을 대상으로 시험시공 후 자동차 전조등에 의한 재귀반사도를 측정하였다. 재귀반사는 휘도측정기(LTX-XL)를 이용하여 관찰각 2.29° (통상 거리 30m에서 자동차의 전조등 높이 65cm, 운전자 눈의 높이 1.2m를 표준으로 상정하며, 성능기준은 백색 240mcd/m²·Lux 이상임) 조건에서 측정하였으며, 설치 후 6개월 경과 시점에서 3개 지점별로 3회에 걸친 측정에서 축광 노면표시는 평균 597mcd/m²·Lux의 성능을 보여, 기존 용착식 노면표시(303mcd/m²·Lux) 대비 294mcd/m²·Lux (약 97.0%)의

2) 선행 연구(Yi et al., 2016)에서 검토되었던 내용을 인용하였음.

성능 개선을 보이는 것으로 나타났다.

기존문헌 고찰 단계에서 재귀반사율과 사고감소율의 관계를 정량적으로 밝힌 2개의 연구에 따라 야광 노면표시를 적용하는 경우의 사고감소율을 추정하고자 한다. 우선 Donnell et al. (2009)의 연구결과에서는 재귀반사율 50mcd/m²·lux개선 시마다 사고율이 약 18%씩 감소하는 것으로 추정하였는데, 모형에서 사용된 최대 재귀반사율은 약 470mcd/m²·lux로 본 연구의 측광 노면표시는 이 범위를 벗어나고 있어 모형의 최대값인 470mcd/m²·lux를 적용시(즉, 167mcd/m²·Lux의 성능 개선) 약 60.1%의 사고 감소가 가능한 것으로 추정된다.

$$\frac{18\%}{50\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lux}} \times 167\text{mcd/m}^2 \cdot \text{lux} = 60.1\%$$

또한 Lee et al. (2015)의 연구결과에서는 차선밝기가 240 mcd/m²·lux에서 420mcd/m²·lux로 75% 증가한 구간에서 약 41.7% 교통사고 감소 효과가 있는 것으로 분석하였으며, Donnell et al. (2009)의 연구에서 적용된 최대값 470mcd/m²·lux를 적용시 기존 대비 차선밝기가 55% 증가하여 본 측광 노면표시는 약 30.6%의 사고 감소가 가능한 것으로 추정된다.

$$\frac{41.7\%}{75\%} \times 55.0\% = 30.6\%$$

두 문헌의 사고감소 추정효과를 종합하면, 본 측광 노면표시를 설치시 평균적으로 45.4%의 사고감소 효과가 있다고 볼 수 있다.

3.1.2 전국 교통사고 통계

본 연구의 공간적 범위인 전국 도로를 대상으로 교통사고 통계를 분석하였다. 도로교통공단 교통사고분석시스템에 기록된 2015년도 전국 도로 발생 교통사고 1,141,925건(주간 760,080건(66.6%), 야간 381,845건(33.4%))에 대하여 사고원인, 사망, 부상, 시간대 등이 포함된 자료를 분석하였다(Table 1). 범규위반 원인별로 분석해보면 기타 및 미분류를 제외하고 안전운전불이행이 24.6%, 안전거리미확보 9.4%, 신호위반 3.8% 등의 순으로 나타났으며, 야간만을 분석할 경우 안전운전불이행이 31.7%, 안전거리미확보 7.7%, 신호위반 6.7% 등의 순으로 나타나는 등 일부 원인의 경우 야간 발생비율이 높은 것으로 분석되었다.

노면표시가 작간접적인 사고 원인으로 작용할 수 있는 교차로통행방법위반과 차로위반에 대하여 야간시간대에 발생한 사고를 세부적으로 분석하면 Table 2와 같은데, 총 발생한 사고는 5,697건, 이에 따른 사망자는 15명, 부상자는 9,518명으로 집계되었으며, 시간대별로는 20~22시가 39.7%, 22~0시가 27.7% 등의 순으로

Table 1. Traffic Accidents Statistics in 2015

Cause	Total		Night time (20:00~06:00)	
	Accidents	Ratio	Accidents	Ratio
Intrusion of median lane	21,161	1.9%	5,361	2.5%
Violation of traffic signal	43,325	3.8%	14,588	6.7%
Disobey safe distance	107,889	9.4%	16,796	7.7%
Illegal U-turn	2,414	0.2%	634	0.3%
Speed limit violation	647	0.1%	309	0.1%
Failure of safe driving	283,829	24.9%	68,810	31.7%
Violation of intersection driving rules	21,006	1.8%	4,479	2.1%
Violation of passenger protection obligation	17,388	1.5%	3,757	1.7%
Line violation	4,879	0.4%	1,218	0.6%
Interruption of straight - right turn	7,324	0.6%	1,505	0.7%
Other	371,045	32.5%	60,946	28.0%
Unclassified	261,018	22.9%	38,946	17.9%
Total	1,141,925	100.0%	217,349	100.0%

Data: Korea Road Traffic Authority (2017), Traffic Accident Analysis System (<http://taas.koroad.or.kr>)

Table 2. Night Time Traffic Accidents by Time Slot Caused by Poor Lane Visibility

Time Slot	Accidents	Ratio	Fatality	Injured
20:00 to 22:00	2,259	39.7%	4	3,639
22:00 to 00:00	1,579	27.7%	7	2,663
00:00 to 02:00	968	17.0%	2	1,697
02:00 to 04:00	440	7.7%	0	799
04:00 to 06:00	451	7.9%	2	720
Total	5,697	100.0%	15	9,518

Data: Korea Road Traffic Authority (2017), Traffic Accident Analysis System (<http://taas.koroad.or.kr>)

자정 이전 발생한 야간 교통사고가 전체의 65% 이상을 차지하는 것으로 나타났다.

3.1.3 노면표시 시인성 개선에 따른 사고감소 추정

본 측광 노면표시는 야간의 노면표시 시인성을 개선하는 것으로, 앞 절에서 검토된 야간시간대 교차로통행방법위반과 차로위반 원인 사고 5,697건(사망 15명, 부상 9,518명)에 노면표시(차선) 재귀 반사율 증가에 따른 사고감소율 추정 결과인 45.4%를 적용시, 연간 2,586건(사망 7명, 부상 4,321명)의 사고를 예방할 수 있을 것으로 예상된다.

Table 3. Road Traffic Accident Unit Cost (As of 2007)
(Unit: 10,000 KRW)

Classification		Fatality	Injured
Per Person	PGS Excl.	41,944	519
	PGS Incl.	52,741	2,156
Per Accident	PGS Excl.	2,595	
	PGS Incl.	4,159	

Source: Korea Development Institute (2008)

* PGS Excl. Cost = Net Average Cost (Such as compensation, funeral, production loss, and medical)+Traffic police cost+Insurance administrative cost

Table 4. Accident Reduction Benefit Followed by Improving Visibility of Pavement Markings (Unit: 10,000 KRW)

Classification	Reduced Amount	Unit Cost (PGS Incl.)	Accident Reduction Benefit (As of 2007)	Accident Reduction Benefit (As of 2015)
Number of Fatality	7	52,741	369,187	444,870
Number of Injured	4,321	2,156	9,316,076	11,225,872
Number of Accident	2,586	4,159	10,755,174	12,959,985
Total	-	-	20,440,437	24,630,727

* Consumer Price Index (2007=100, 2015=120.5)

3.1.4 사고편익 도출

Korea Development Institute (2008)의 「도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)」에서는 도로 부문 교통사고비용 원단위를 2007년 기준으로 Table 3과 같이 제시하고 있다.

본 연구의 사고감소 규모 추정치에 교통사고비용 원단위를 적용하여 사고편익을 도출한 결과는 Table 4와 같으며, 2015년 기준 총 2,463억여 원의 편익이 발생하는 것으로 산정된다.

3.2 공사중 교통혼잡 절감 편익 추정

3.2.1 공사중 교통혼잡비용 규모 추정

Chung et al. (2009)에 따르면 2008년 기준 고속국도의 비 반복적 교통혼잡비용은 5,207억원, 이중에서 공사에 의한 혼잡비용은 779억원(15.0%)로 나타났으며, 일반국도 및 지방도의 경우 비 반복적 지정체에 따른 혼잡비용은 23,143억원으로 제시되었으나 관련 자료의 부족으로 발생원인별로는 구분되지 않았다. 고속도로의 공사 원인 비 반복적 교통혼잡의 비율(15.0%)을 일반국도 및 지방도의 비 반복적 교통혼잡비용에 적용시 공사에 의한 혼잡비용은 3,471억원으로 추정된다. 따라서 고속도로, 일반국도 및 지방

Table 5. Durability Test Results for General and Phosphorescent Pavement Markings
(Unit: mcd/m²/lux)

After 4 million count of wheel rolling	Retro-reflective performance of general pavement markings	Retro-reflective performance of phosphorescent pavement markings
Dry condition	316	489
Wet condition	87	135

도를 종합하면 공사에 의해 발생하는 교통혼잡비용은 4,250억원(=775+3,471)으로 산정된다.

본선을 차단하는 공사로는 차선도색 외에도 도로안전시설물 설치·점검·보수, 도로 포장, 표지판설치 등 다양할 수 있는데, 한국도로공사의 내부자료에 따르면 평일 본선차단 작업구간 중 작업 내용이 차선도색인 비율은 5~10% 내외이며, 평균치인 7.5%를 적용시 차선도색에 의해 유발되는 전체(고속도로, 일반국도 및 지방도) 교통혼잡비용은 약 319억원(=4,250억원×7.5%)에 이를 것으로 추산된다.

3.2.2 차선도색 기술 및 재료 성능 향상에 따른 재도색주기 증가

신 차선도색 기술은 차선도색 장비 성능의 개량 및 도료, 비드 품질 향상 등에 따른 내구성 향상이 기대된다. 이에 따른 재도색주기 증가폭을 추정하기 위하여 기존 및 측방 도료의 내구성 시험을 (재)한국화학시험연구원을 통해 진행하였다. 노면표지용 도로 시료를 200mm×400mm×50mm의 아스팔트 블록에 시편으로 제작하였으며, SSENES사의 윤하중내마모성시험기를 이용하여 60km/h의 속도로 정회전 60분, 대기(Holding) 5분, 역회전 60분의 순으로 반복 진행하였다. KS M 6080: 2014의 시험방법에 따라 바퀴회전 수 400만회 경과 후 건조한 노면 및 젖은 노면에서의 재귀반사 성능을 측정하였다. 재귀반사 측정은 휘도측정기(LTX-XL)를 이용하여 관찰각 2.29° 조건에서 측정하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다.

시험 결과, 건조한 노면과 젖은 노면 조건 모두에서 기존 차선 대비 재귀반사도가 1.55배 향상되는 것으로 나타나, 재귀반사 성능 기준의 내구성이 1.55배 향상된 것으로 판단할 수 있다. 따라서 현재 통상적으로 1년인 재도색 주기 또한 1.5년으로 증가하여 이에 따른 설치비용 및 교통혼잡 절감 등을 기대할 수 있다.

3.2.3 차선도색 기술 및 재료 성능 향상에 따른 공사중 교통혼잡 절감 편익 추정

차선도색 공사로 인한 비 반복적 교통혼잡비용은 연간 319억원으로 추산된 바 있으며, 신 차선도색 기술의 내구성 향상에 따라 재도색주기는 1.5배 증가할 것으로 전망되었다. 따라서 차선도색

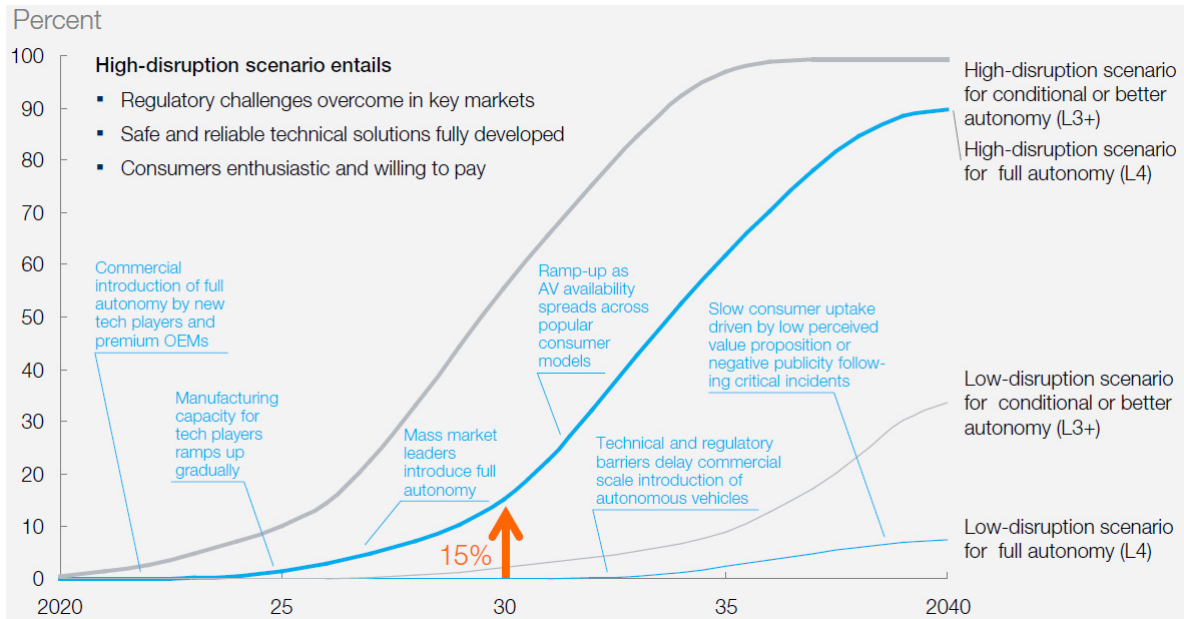


Fig. 1. New Vehicle Market Share of Fully Autonomous Vehicles (Source: McKinsey & Company (2016))

공사의 빈도는 기존의 66.7% (=1/1.5) 규모로 감소하여 연간 106억 원(=319*(100%-66.7%))의 교통혼잡 비용이 절감될 것으로 기대된다. 이는 2008년 기준 가격으로, 혼합 수준은 동일한 것으로 가정하고 소비자물가지수만을 이용하여 2015년 기준으로 환산하면 연간 123억원의 편익이 발생한다.

3.3 자율주행자동차 차선인식 성능 개선 편익 추정

자율주행자동차의 차선인식기술 동향에서 살펴본 바와 같이, 자율주행자동차가 스스로 도로 환경을 판단하고 운행함에 있어 차선은 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 차선 노후화, 재귀반사 성능 불량 등 시인성 저하에 따라 인식 장비 성능의 고도화에 따른 비용 증가 요인이 발생하는데, 최근 개발된 라이더 장비 가격은 250달러 수준이나 상용화 단계에서는 100달러 미만으로 떨어지기를 기대하고 있다. 신 차선도색 기술의 차선 시인성 향상에 따른 라이더 장비 차선인식 성능의 개선으로 장비 고도화 수준을 낮출 수 있을 것으로 기대되며, 라이더 장비 개발품(250달러) 및 상용화 기대가격(100달러) 차이의 절반 수준(대당 약 10만원)의 절감 요인이 유발되는 것으로 가정하였다.

McKinsey & Company (2016)에서 장래 자율주행자동차 시장을 전망한 바에 따르면(Fig. 1), 2020~30년 사이에 신차 시장에서 자율주행차(부분 자율주행 포함)의 비중 전망은 2020년 0%에서 2030년 50%까지 증가할 것으로 예상된 바 있다. 동일한 증가율로 해마다 증가하므로, 10년간 연평균 25%의 신차가 자율주행차에 해당하는 것으로 단순 산정할 수 있다. 우리나라의 연간 자동차

판매량은 2016년 기준 1,813,790대이므로 이 추세가 향후에도 동일하게 유지된다고 가정하면 2020~2030년 사이에 연평균 453,448대의 자율주행차량이 판매될 것으로 전망되며, 차선인식 성능 개선에 따른 장비 가격 절감(대당 10만원)을 적용시 연간 453.4억원의 경제적 편익이 발생할 것으로 추산된다.

4. 비용 추정 및 경제성 분석

4.1 기존 노면표시와 측광 노면표시의 설치단가 비교

융착식 노면표시는 유리알 비드의 지속적 탈락에 따른 시인성 성능의 지속적 감소로 인하여 주기적으로 재도색이 필요하며, 재도색 주기는 교통량 및 현장 여건, 도로 및 시공 품질 등에 따라 차이가 있다. Korea Road Traffic Authority Traffic Science Institute (2012)는 백색 노면표시가 수명의 경과에 따라 휘도 성능이 급격하게 저하되어 최초 설치로부터 약 10개월 경과시 재귀반사 성능이 최초의 75% 수준, 20개월 경과시 최초의 절반 수준에 그치는 것으로 분석하였다.

기존 노면표시는 재귀반사 성능 유지를 위한 일반적인 재도색 주기인 12개월을 적용하고, 신 차선도색 기술이 적용된 측광 노면표시는 3.2.2절에서 검토된 바와 같이 차선도색 장비 성능의 개량 및 도로, 비드 품질 향상에 따른 내구성 향상으로 재도색 주기를 18개월로 적용하였다. 측광 도로 적용에 따라 m²당 8만원(폭 15cm 기준 12,000원/m)의 재료비 상승 요인이 발생하나, 작업 효율성 향상에 따른 시공시간 단축(폭 15cm 차선 도색의 평균 분당 생산성

Table 6. Annual Maintenance Cost of Existing and Phosphorescent Pavement Markings

(Unit: KRW per meter (width: 15cm))

	Existing pavement markings	Phosphorescent pavement markings with new marking technology
Installation Unit Cost (A)	4,121	2,885
Phosphorescent Paint Cost (B)	-	12,000
Total Cost (C=A+B)	4,121	14,885
Cycle (D)	12 month	18 month
Annual Cost (C/(12/D))	4,121	9,923

Table 7. Road Statistics by Road Category and the Number of Lanes

(As of 2015, Unit: km)

Road category	The number of lanes					Total (Ratio)
	2	4	6	8	10	
National Expressway	2	3,102	549	540	0	4,193 (4.6%)
National Highway	5,981	6,761	766	137	25	13,670 (15.0%)
Special/Metropolitan City Road	426	1,797	1,398	853	253	4,727 (5.2%)
Provincial Road	13,327	1,649	274	54	1	15,305 (16.8%)
City ("Si") Road	14,682	5,331	1,780	477	66	22,337 (24.5%)
County ("Gun") Road	15,161	253	23	0	0	15,438 (16.9%)
Borough ("Gu") Road	14,101	1,194	164	66	0	15,525 (17.0%)
Total (Ratio)	63,681 (69.8%)	20,087 (22.0%)	4,954 (5.4%)	2,127 (2.3%)	346 (0.4%)	91,195 (100.0%)

Source: MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016)

이 기준 39.12m/min에서 61.17m/min으로 56.3% 향상됨에 따라 일반 도로 및 유리알 장비 사용료 및 인건비 등이 포함되는 일위대가는 폭 15cm 차선 기준으로 기존 4,121원/m에서 2,885원/m으로 하락하였다.

이를 종합하면 Table 6과 같은데, 기존 노면표시의 연간 유지보수비용은 폭 15cm 차선 기준 4,121원/m이며, 신 차선도색 기술이 적용된 축광 노면표시의 연간 유지보수비용은 9,923원/m로, 축광 노면표시 도입에 따른 추가 소요비용은 연간 5,802원/m로 산정된다.

4.2 차선도색규모 및 비용 추산

MOLIT (2016)의 전국 도로현황에 따르면(Table 7), 2015년 12월 기준으로 전국 도로 연장은 91,195km에 달하며, 도로 유형별로는 시도 22,337km (24.5%), 구도 15,525km (17.0%), 군도 15,438km (16.9%) 등의 순으로 총 연장이 긴 것으로 나타났고, 왕복 차로수별로는 2차로 63,681km (69.8%), 4차로 20,087km (22.0%), 6차로 4,954km (5.4%) 등으로 90% 이상의 도로가 왕복 4차로 이하인 것으로 조사되었다.

차선도색 규모 산정을 위하여 본 연구에서는 차로구분선과 중앙선, 가장자리차선만을 고려하였으며, 차로구분선의 경우 전구간 접선으로 가정하였다. 도로 유형별 차로구분선의 규격(도색길이와 빈길이의 비율)은 KNPA (2012)에서 제시된대로 자동차전용도로

(고속도로) 1:1 (1,000cm:1,000cm), 도시지역도로 0.625:1 (500cm:800cm), 지방지역도로 0.6:1 (300cm:500cm)을 적용하였다. 중앙선 및 가장자리차선은 고속도로의 경우 방향별로 양측 실선, 그 외 일반도로는 왕복 2차로의 경우 양측 가장자리차선 및 중앙선(단선), 왕복 4차로 이상은 양측 가장자리차선 및 중앙선(복선)을 적용하였다. 이에 따라 도로유형별 차로수별 차로구분선 및 가장자리차선 규모를 산정하면 각각 Table 8, Table 9와 같다.

산정 결과, 차로구분선 총 30,200km, 중앙선 및 가장자리차선 301,103km로 총 331,303km의 차선 도색이 필요한 것으로 도출되었다. 폭 15cm를 일괄 적용시 앞절에서 산정된 연간 차선도색 유지보수비용(기존 노면표시: 4,121원/m, 신 차선도색 기술이 적용된 축광 노면표시: 9,923원/m)을 적용하면, 기존 노면표시에는 연간 1조 3,653억원, 축광 노면표시에는 연간 3조 2,875억원이 소요되어, 신 차선도색 기술이 적용된 축광 노면표시 적용시 연간 1조 9,222억원의 추가 비용이 소요될 것으로 분석된다.

4.3 경제성 분석

앞서 3장에서 도출된 편익 항목별 발생액과 축광 노면표시의 차선도색 설치 비용을 토대로 경제성 분석을 수행하였다.

편익 항목별로는 축광 노면표시 설치에 따른 사고감소 편익 2,463억원, 공사중 교통혼잡감소에 따른 혼잡비용 절감 123억원,

Table 8. Lane Division Line Estimation by Road Category and the Number of Lanes

(Unit: km)

Road category	The number of lane (s)					Total
	2	4	6	8	10	
National Expressway	0	3,102	1,099	1,619	0	5,820
National Highway	0	5,201	1,178	316	78	6,773
Special/Metropolitan City Road	0	1,348	2,097	1,918	760	6,123
Provincial Road	0	1,268	421	126	3	1,818
City(“Si”) Road	0	4,101	2,739	1,101	204	8,145
County(“Gun”) Road	0	195	35	0	0	230
Borough(“Gu”) Road	0	896	246	149	1	1,291
Total	0	16,110	7,815	5,230	1,045	30,200

Table 9. Centerline and Edge Line Estimation by Road Category and the Number of Lanes

(Unit: km)

Road category	The number of lane (s)					Total
	2	4	6	8	10	
National Expressway	9	12,408	2,198	2,159	0	16,773
National Highway	17,944	27,044	3,062	549	102	48,700
Special/Metropolitan City Road	1,278	7,189	5,591	3,410	1,013	18,481
Provincial Road	39,982	6,594	1,095	218	3	47,893
City (“Si”) Road	44,045	21,326	7,122	1,908	265	74,666
County (“Gun”) Road	45,484	1,013	92	0	0	46,590
Borough (“Gu”) Road	42,302	4,776	656	265	1	48,000
Total	191,044	80,350	19,817	8,509	1,384	301,103

Table 10. Benefit-Cost (B/C) Ratio of Phosphorescent Pavement Markings

(Unit: 100 million KRW)

Benefit	Traffic accident reduction	2,463
	Traffic congestion cost reduction caused by marking works	123
	Autonomous vehicle production cost reduction caused by improved lane visibility	453
Cost	19,222	
Benefit/Cost	0.158	

자율주행자동차 차선인식 성능 개선에 따른 장비 가격 절감 편익 453억원 등 연간 3,039억원의 총 편익이 발생할 것으로 예상된다. 축광 노면표시를 전체 도로에 적용시 추가 소비비용은 1조 9,222억 원으로, 경제성(비용 대비 편익)을 분석하면 0.158로 다소 미흡한 것으로 도출된다(Table 10). 따라서 사고 잦은 지점 등에 우선적으로 적용하는 것이 바람직하다고 판단됨에 따라 5장에서 추가 분석을 수행하였다.

5. 교통사고 잦은 곳 도입 기준 분석

5.1 교통사고 잦은 곳의 정의

도로교통공단에서는 『국가교통안전기본계획』 및 『교통사고 잦은 곳 개선사업 추진계획』에 따라 교통사고 잦은 곳 개선 사업을 추진하고 있다. 구체적으로는, 도로상에서 발생하는 교통사고를 분석하여 일정기준 이상의 교통사고가 발생하는 지점을 선정하여, 이들 지점 중 개선이 요구되는 지점에 대해 심층적인 사고요인 분석과 현장조사를 통해 개선대책을 수립한다(Korea Road Traffic Authority, 2016). 후보구간 선정 기준 중 도로구간의 길이는 단일 로의 경우 시가지는 반경 100m 이내(즉, 구간길이 200m), 기타 및 고속도로는 반경 200m 이내(즉, 구간길이 400m)로 제시하고 있으며, 사고 발생건수는 특별·광역시 5건 이상, 일반시·기타 3건 이상으로 제시하였다.

Table 11. Lane Division Line, Centerline and Edge Line Estimation for Accident Hot Spots (400m)

(Unit: m)

Road category	Lane Division Line by the number of lanes					Centerline and Edge line by the number of lanes				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
National Expressway	0	400	800	1,200	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
National Highway /Provincial Road / City (“Si”) Road / County (“Gun”) Road	0	308	615	923	1,231	1,200	1,600	1,600	1,600	1,600
Special/Metropolitan City Road / Borough(“Gu”) Road	0	300	600	900	1,200	1,200	1,600	1,600	1,600	1,600

Table 12. Phosphorescent Pavement Markings Installation Cost Estimation for Accident Hot Spots (400m)

Road category	Total length of line (m) by the number of lanes					Increased Installation Costs by Phosphorescent Pavement Markings (10,000 KRW) by the number of lanes				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
National Expressway	1,600	2,000	2,400	2,800	3,200	928.3	1,160.4	1,392.5	1,624.6	1,856.6
National Highway /Provincial Road / City (“Si”) Road / County (“Gun”) Road	1,200	1,908	2,215	2,523	2,831	696.2	1,106.8	1,285.4	1,463.9	1,642.4
Special/Metropolitan City Road / Borough(“Gu”) Road	1,200	1,900	2,200	2,500	2,800	696.2	1,102.4	1,276.4	1,450.5	1,624.6

Table 13. Accident Reduction Benefit of Casualty Followed by Improving Visibility of Pavement Markings

(Unit: 10,000 KRW)

Classification	Unit Cost (PGS Incl.)	Accident Reduction Rate	Accident Reduction Benefit (As of 2007)	Accident Reduction Benefit (As of 2015)
Fatality	52,741	42.1%	22,204	26,756
Injured	2,156	42.1%	908	1,094

* Consumer Price Index (2007=100, 2015=120.5)

5.2 분석 구간에 대한 차선도색비용

본 절에서는 단일로 지방부 및 고속도로의 분석 구간 거리인 400m를 기준으로 도로유형별·차로수별 차선도색비용을 산정하고 교통사고비용 원단위를 적용하여 축광 노면표시의 경제적 타당성이 확보되는 사고 규모를 제시하고자 한다. 400m 구간 기준 도로유형별·차로수별 차선도색 소요길이는 Table 11과 같다.

400m 구간 기준 신 차선도색 기술이 적용된 축광 노면표시 적용시 도로유형별·차로수별 차선도색 연간 추가소요비용은 Table 12와 같다.

분석 결과, 고속도로의 경우 차로수 규모에 따라 928만원(2차로)~1,857만원(10차로), 기타 도로의 경우 696만원(2차로)~1,630만원 내외(10차로)의 연간 추가비용이 소요되는 것으로 산정되었다.

Table 3의 교통사고비용 원단위와, 3.1.3절에서 밝힌 재귀반사율 증가에 따른 사고감소를 추정 결과(42.1%)를 적용하여 인적피해 발생 사고에 대한 기대 편익을 산정한 결과는 Table 13과 같이 사망 1건당 26,756만원, 부상 1건당 1,094만원으로 산정되었다.

이를 Table 12의 결과와 종합하면, 분석 대상구간(400m) 내에서 노면표시가 직·간접적 원인인 사고로 유발된 사망자가 연간 1명

이상이거나, 부상자가 연간 2명 이상(단, 왕복 4차로 미만인 경우는 연간 1명 이상)인 경우 신 차선도색 기술을 적용한 축광 노면표시의 도입에 따른 경제적 타당성이 확보된다고 할 수 있다.

3.1.2절에서 분석된 노면표시가 직·간접적인 사고 원인으로 발생한 사고 5,697건(사망 15명, 부상 9,518명)에 대하여 각 사고가 왕복 4차로 국도의 개별 구간에서 발생한 것으로 가정하면 야광 노면표시 도입에 따른 추가소요비용은 630.5억원(=구간(400m)당 1106.8만원×5,697개 구간)으로 산정되는데, 3.1.4절에서 추정된 연간 사고감소편익(2,463억원)을 적용시 비용 대비 편익은 3.91로써 경제성이 확보되는 것으로 나타났다.

6. 결론 및 향후 연구과제

야간 혹은 우천시에 노면표시, 특히 차선의 시인성이 저하되어 교통 안전에 위협을 초래하고 있는 가운데, 최근 차선도색 장비 성능 개량에 따른 노면표시 수명 연장·생산성 향상, 축광차선도료를 배합한 야광 노면표시의 시인성 개선 연구 등 차선도색과 관련된 다양한 대안들이 개발되어 야간·우천시 교통안전을 증대하고자

하였다. 이에 본 연구에서는 신 차선도색 기술을 적용한 축광 노면표시의 종합적인 소요비용 및 기대 편익을 고려한 경제성 타당성을 제시하고자 하였다.

기존 문헌 고찰에서는 차선 시인성의 효용, 차선도색 공사중 교통혼잡비용 추정, 자율주행자동차의 차선인식기술 동향 등 차선 시인성 개선에 수반되는 다양한 절감 편익의 평가 방법론을 검토하였다.

야광 노면표시(축광차선도료)의 기존 차선 대비 성능 개선 정도(294mcd/m²·Lux, 약 97.0%)를 적용시 42.1%의 사고감소 효과가 있는 것으로 산정되었고, 전국 교통사고 통계에서 노면표시가 직간접적인 사고 원인으로 작용할 수 있는 사고 유형에 이를 적용시 연간 2,398건(사망 6명, 부상 4,007명)의 사고를 예방, 연간 2,283억여 원의 편익이 발생하는 것으로 산정되었다. 내구성 향상에 따른 재도색주기 증가(1.5배)로 절감되는 공사중 교통혼잡비용은 연간 123억원, 자율주행자동차 차선인식 성능 개선에 따른 장비 가격 절감(대당 10만원)에 따른 연간 편익 453.4억원 등을 합산하면 연간 2,860억원의 총 편익이 발생할 것으로 예상되었다.

전국 도로 91,195km에 대한 차로구분선, 중앙선 및 가장자리차선에 신 차선도색 기술이 적용된 축광 노면표시 적용시 추가 비용은 연간 1조 9,222억원으로 추산되어 경제성(비용 대비 편익)은 0.158로 다소 미흡한 것으로 도출되었다. 이에 따라 교통사고 잦은 곳의 지방부 분석 구간길이(400m)에 대한 도로유형별·차로수별 차선도색비용과 교통사고비용 원단위를 적용하여 축광 노면표시의 경제적 타당성이 확보되는 사고 규모를 산정한 결과, 노면표시가 직간접적 원인인 사고로 유발된 사망자가 연간 1명 이상이거나, 부상자가 연간 2명 이상(단, 왕복 4차로 미만인 경우는 연간 1명 이상)인 경우 경제적 타당성이 확보되는 것으로 나타났다. 구체적으로 2015년의 차선 시인성 관련 사고 발생지점에 대한 야광 노면표시 설치비용과 사고감소편익을 비교한 결과, 비용 대비 편익이 3.91로 충분한 경제성이 확보되었다.

연구 결과를 종합하면, 축광차선도료를 적용한 야광 노면표시를 전국 도로에 일괄 적용하는 것은 경제적 타당성이 부족하나, 노면표시가 직간접적 원인인 사고 잦은 곳을 위주로 설치시 도입 효과가 충분한 것으로 도출되었다.

본 연구에서는 정량화가 가능한 편익 항목을 위주로 경제성을 평가하였으나, 특히 축광 노면표시의 장점인 원거리 차선시인성의 확보와 더불어 보도 및 자전거도로 적용, 재난재해 상황에서의 유도 기능 등 다양한 편익 항목에 대한 추가 고려를 통하여 경제성 평가 결과를 보완할 필요가 있으며, 전국 사고통계자료의 지점별 분석을 통한 축광 노면표시 적용 우선구간 선정 등 추가 연구의 필요성이 존재하며, 이를 통해 최근 개발된 차선도색 기술의 실용화를 촉진해야 할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(16CTAP-C078004-03)과 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의해 수행되었습니다(NRF-2010-0028693).

References

- Campbell, J., Richard, C., Brown, J., Graham, J., Lichty, M. and O'Laughlin, M. (2012). *Human factors guidelines for road systems*. National Cooperative Highway Research Program Report 600C, Transportation Research Board.
- Carlson, P., Park, E. and Andersen, C. (2009). "Benefits of pavement markings: A renewed perspective based on recent and ongoing research." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2107, pp. 59-68.
- Chung, Y., Kim, J., Cho, H. and Shim, J. (2009). *Methodology for the estimation of non-recurrent traffic congestion costs*. The Korea Transport Institute Research Report No. 2009-29 (in Korean).
- Davies, C. (2016). "Pavement markings guiding autonomous vehicles - A real world study." *Proc. of Automated Vehicles Symp. 2016*, San Francisco, U.S.
- Donnell E., Karwa V. and Sathyanarayanan S. (2009). "Analysis of effects of pavement marking retroreflectivity on traffic crash frequency on highways in North Carolina." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2103, pp. 50-60.
- KNPA(Korean National Police Agency) (2012), *Traffic Pavement Marking Install & Management Manual* (in Korean).
- Korea Road Traffic Authority (2016), *Traffic Accidents Hot Spots Improvement Master Plan and Effectiveness Analysis of Year 2016* (in Korean).
- Korea Road Traffic Authority Traffic Science Institute (2012). *Study on Pavement Marking Reflective Performance Standards* (in Korean).
- Lee, M., Choi, K., Oh, I. and Kim, J. (2015). "Analysis of traffic accident reduction performance of high-quality and long-life pavement marking materials." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 4, pp. 921-929 (in Korean).
- McKinsey & Company (2016). *Automotive Revolution - Perspective Towards 2030*.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016). *Yearbook of Road Statistics 2016* (in Korean).
- MUTCD (2003). <http://mutcd.fhwa.dot.gov> (Re-quoted from Chung et al. (2009))
- Sage, A. (2016). *Where's the lane? Self-driving cars confused by shabby U.S. roadways*. Available at: <http://www.reuters.com/article/us-autos-autonomous-infrastructure-insig-idUSKCN0W>

- X131 (Accessed: June 6, 2017).
- Road Traffic Authority (2009), *Research on Lane visibility Improvement for Reducing Traffic Accidents* (in Korean).
- Rumar, K. and Marsh, D. (1998). *Lane markings in night driving: A review of past research and of the present situation*. University of Michigan Transportation Research Institute Technical Report, Report No. UMTRI-98-50.
- Vacek, S., Schimmel, C. and Dillmann, R. (2007). "Road-marking analysis for autonomous vehicle guidance." *Proc. of 3rd European Conference on Mobile Robots*. Freiburg, Germany, pp.1-6.
- Yi, Y., Lee, M. and Choi, K. (2016). "Effectiveness analysis of phosphorescent pavement markings for improving visibility and design standards: Focusing on expressway accident hot spots." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 4, pp. 685-694 (in Korean).