Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 36, No. 4: 685-694/ August, 2016
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2016.36.4.0685

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Transportation Engineering 교통공학

축광노면표시 시인성 및 설치규격개선 효과분석: 고속도로 사고다발구간을 중심으로

이용주* · 이명환** · 최기주***
Yi, Yongju*, Lee, Myunghwan**, Choi, Keechoo***

Effectiveness Analysis of Phosphorescent Pavement Markings for Improving Visibility and Design Standards: Focusing on Expressway Accident Hot Spots

ABSTRACT

Visibility of lane marking is impaired at night, or in case of rain, and thereby threatens traffic safety. Recently, various studies and technology 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, improvement of lane marking visibility (32.7%) by applying phosphorescent material mixed paint, and expressway lane design standards alternative (length 6m, gap 12m, width 13cm: 27.8% of painted surface are reduced) adoption with ergonomic analysis. In this study, a set of cost-benefit analyses was performed for the cases where such techniques were applied. Based on the literature review, 26.9% of traffic accidents would be prevented by improving lane marking visibility by 32.7%; accident reduction benefit was calculated as much as 12.5 billion KRW. Meanwhile, total increased cost when introducing phosphorescent material mixed paint and lane design standards alternative is calculated as 30.6 billion KRW. However, economic feasibility could not be secured with 0.41 of cost-benefit ratio when applied to the expressway network as a whole. Additionally, cost-benefit (B/C) analysis was applied to each of the top 20 night accident hot spots and the results of B/C ratios were between 0.67 and 4.20, showing that 11 out of 20 spot sections of expressway can have economic feasibility. This results indicate, with this kind of pavement marking applied to accident hot spots in rural expressway, better visibility and economic feasibility can be guaranteed through traffic accident reduction. Some limitations and future research agenda have also been discussed.

Key words : Pavement marking, Phosphorescent lane paint, Lane marking, Visibility, Lane design standard, 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), 축광차선도료를 배합한 야광 노면표시의 시인성 개선(32.7%), 인간공학적 검토를 통한 고속도로 차선도색 설치규격 개선안(도색길이 6m, 빈길이 12m, 차선폭 13cm: 도색면적 27.8% 절감)을 도입하였을 때 종합적인 소요비용 및 사고절감 편익을 고려한 경제성분석을 통해 도입타당성을 제시하고자 하였다. 기존 문헌을 바탕으로 노면표시 시인성 32.7% 개선에 따라 26.9%의 사고감소 효과가 있는 것으로 나타났으며, 이에 대한 고속도로 교통사고 절감편익은 125억원으로 산정되었다. 야광차선 도입 및 설치규격 개선에 따른 총비용 증가분은 306억원으로 고속도로 일괄 도입시 경제성(비용-편익비 0.41) 확보가 어려운 것으로 나타났다. 야간 교통사고가 잦은 상위 20개 구

* 종신회원 · 교신저자 · 아주대학교 TOD기반 지속가능 도시·교통 연구센터 연구조교수 (**Corresponding Author** · Ajou University · srzr2001@ajou.ac.kr)
** 정회원 · 한국교통연구원 도로교통본부 연구원 (The Korea Transport Institute · myunghwan@koti.re.kr)
*** 종신회원 · 아주대학교 교통시스템공학과 교수 (Ajou University · keechoo@ajou.ac.kr)

Received June 24, 2016/ **revised** July 4, 2016/ **accepted** July 7, 2016

Copyright ⓒ 2016 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

간을 대상으로 각 구간별 경제성 분석을 수행한 결과, 구간에 따라 비용-편익비가 0.67~4.20으로 전체 20개 구간 중 11개 구간에서 경제성이 확보되어, 특히 지방부 고속도로 사고다발구간에 야광 노면표시 및 설치 규격 개선을 우선적으로 적용시 사고 감소에 따른 경제성이 존재하는 것으로 확인되었다. 연구의 한계와 향후 연구주제가 함께 논문의 말미에 토의되었다.

검색어 : 차선도색, 축광차선도료, 노면표시, 시인성, 차선규격, 사고다발구간

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

국내 교통안전 수준은 자동차 1만 대당 교통사고 사망자 수를 기준으로 할 때 1.9명으로 OECD 가입국가 34개 국가 중 32위 수준에 불과(2013년 기준)하다. 이로 인한 도로 교통사고 사회적 비용은 연간 총 26조 5,725억원(2014년 기준)으로 우리나라 연간 GDP의 1.8%, 국가 전체 예산의 9.7%에 이르는 규모이며 도로 교통사고 사상자는 2014년 기준 연간 179만 6997명이다(Korea Road Traffic Authority, 2016). 특히 야간 사망자 수가 주간의 약 1.2배 수준인데, 야간 교통사고의 원인 중 하나는 도로교통 시설물에 대한 시인성 악화로 도로 상황정보 제공량이 극히 낮아져 운전자의 사전인지 반응 작용이 늦어지기 때문이며, 특히 도로의 주행차로를 구분하는 차선표시 부분의 시인성 저하가 거론되고 있다. 이는 차선표시 도색 후 일정기간이 경과하면서 도료 자체의 마모 손실과 재귀반사 기능을 부여하는 글래스 비드[1]의 마모 및 탈락에 의한 품질 저하가 발생하는 데에 기인하는데, 최근 차선도색 장비 성능 개량에 따른 노면표시 수명 연장, 축광차선도료(Phosphorescent Lane Paint, 축광이란 빛의 자극을 중단해도 계속해서 발광하는 성질을 이르며, 인광·야광과 동일한 의미임)를 배합한 야광 노면표시의 시인성 개선 연구, 인간공학적 검토를 통한 고속도로 차선도색 설치규격 개선안 등 차선도색과 관련된 다양한 대안들이 개발되었으며 이를 본격적으로 적용하기에 앞서 도입 타당성을 검토할 필요가 있다. 노면표시의 성능 개선에 따른 재귀반사성능 향상을 통하여 교통사고 감소를 기대해볼 수 있으나, 기존 노면표시 대비 축광차선도료를 배합한 야광 노면표시의 재료비가 약 5배에 달하여 투입비용 이상의 편익을 유발할 수 있는지, 즉 경제성 확보가 가능한지에 대한 분석이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 최근 개발된 차선도색 기술 대안의 비용 증가 요인(축광차선도료의 재료비 증가) 및 절감요인(재도색주기 연장 및 설치규격 개선에 따른 도색면적 감소), 사고절감 편익의 경제적 환산가치를 고려하여 경제성을 분석하고, 도입 타당성이 높은 구간의 특성을 제시하고자 한다.

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

1.2 연구의 내용 및 방법

첫째, 연구의 배경을 서술하고 목적을 제시한다. 둘째, 기존 문헌 고찰을 통해 해외 차선 설치 규격 기준, 차선 시인성과 교통사고와의 상관관계 등을 고찰한다. 셋째, 차선도색 기술 대안과 국내 도로 실정에 맞는 차선 설치 규격 개선안에 대한 소요 비용과 사고절감 편익 도출을 통해 경제성 분석을 수행한다. 마지막으로 종합결론 및 한계점과 향후 연구 과제를 제시한다. 본 연구의 내용적 범위는 교통사고 통계 및 도로 기하구조 정보 구득이 가능한 고속도로를 대상으로 한정하였다.

2. 기존 문헌 고찰

2.1 국내·외 차선도색 설치기준 검토

국내 고속도로 차선규격 기준은 도로교통법에 따라 KNPA (2012)에서 제시하고 있는데, 여기에 따르면 차로간을 구분하는 차선은 점선과 실선으로 나뉘는데, 이중 점선의 경우 도색길이(L_1) 1,000cm, 빈길이(L_2) 1,000cm, 너비(W) 10~15cm로 제시하고 있으며 각 선의 구성은 Fig. 1과 같다. 다만 현재 한국도로공사에서는 고속도로 차선 설치시 도색길이(L_1) 800cm, 빈길이(L_2) 1,200cm, 너비(W) 15cm를 적용하고 있다.

국외 사례를 살펴보면, 우선 미국의 경우 Federal Highway Administration (2009)에서 발간한 MUTCD (Manual on Uniform Traffic Control Devices)에서 그 규격을 명시하고 있는데, 고속도로의 경우 구체적으로 도색길이(Length)는 10ft(약 3m), 빈길이(Gap)는 30ft(약 9m), 너비(W)는 4~6인치(약 10~15cm)로 제시하고 있다. 캐나다(앨버타주(Alberta Transportation, 2003), 브리티시컬럼비아주(British Columbia Ministry of Transportation and Highways, 2000))에서는 도색길이 3m, 빈길이 6m, 너비 10cm의 규격을 제시하고 있으며, 호주(사우스오스트레일리아 주(Government of South Australia: Department of Planning, Transport and Infrastructure, 2015), 뉴사우스웨일즈주(New South Wales Government: Road and Maritime Services, 2010), 퀸즈랜드주(Queensland Government: Department of Transport and Main Roads, 2015))

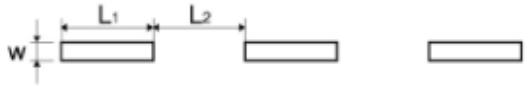

Fig. 1. Elements of Lane Line

Table 1. Highway Lane Installation Standard of Each Country

Country	Length (L_1, m)	Gap (L_2, m)	Ratio (L_1:L_2)	Width (cm)
Korea	8	12	1:1.5	15
Turkey	6	9	1:1.5	-
Italy	4.5	7.5	1:1.67	-
Canada	3	6	1:2	10
Portugal	4	8	1:2	-
Ireland	4	8	1:2	10
Denmark, Germany, Swiss	6	12	1:2	15
USA	3	9	1:3	10~15
Bulgaria, Israel, Luxembourg	3	9	1:3	-
Australia, Sweden	3	9	1:3	10
Netherlands	3	9	1:3	15
Finland	3	9	1:3	20
Tunisia	3	10	1:3.33	-
France	3	10	1:3.33	10
UK	2	7	1:3.5	10
Belgium	2.5	10	1:4	20
Singapore	2	10	1:5	10

Data: Transportation Research Board (2002) (Re-quoted from Korea Expressway Corp. (2014))

에서는 도색길이 3m, 빈길이 9m, 너비 10cm의 규격을 제시하고 있다. 이외에 유럽 등 세계 각국의 고속도로 차로 구분 차선 규격 기준은 Table 1과 같다(Transportation Research Board (2002): Korea Expressway Corp. (2014)에서 재인용).

전체적으로 도색길이(L_1)와 빈길이(L_2)의 비율을 살펴보면, 우리나라(1:1.5)를 제외하고 1:1.5~1:5의 비율로 적용되고 있으나 대부분 1:2 또는 1:3의 비율을 적용하고 있어, 국내 고속도로의 빈길이 대비 도색길이 비율은 다소 과다한 것으로 볼 수 있다.

2.2 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 사고발생에 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. 또한, 노면표시 시인성 개선과 사고발생률과의 관계는 재귀반사율 200mcd/m^2·lux 이하 구간에 한해서 유의하게 나타나는 것으로 분석되었다.

Donnell et al. (2009)은 다차로 고속도로에서 백색길 가장자리선의 시인성 개선을 연구하였는데, 재귀반사율 50mcd/m^2·lux개선 시마다 사고율이 약 18%씩 감소하는 것으로 추정하였다.

Lee et al. (2015)은 한국도로공사에서 고속도로에 시범 설치한 일부구간에 대해 차선밝기가 240mcd/m^2·lux에서 420mcd/m^2·lux로 1.75배 증가한 구간에서 약 41.7% 교통사고 감소 효과가 있는 것으로 분석하였다.

2.3 국내 도로 실정에 맞는 차선 설치 규격 개선안

Korea Expressway Corp. (2014)에서는 국내 고속도로 차선규격이 국외의 규격에 비해 도색길이가 과다한 점을 지적하고, 차선성능의 개선에 따른 예산 증가요인을 최소화하고자 차선 재료, 규격, 성능에 대한 개선 연구를 수행하였다. 운전자 응답 조사 및 차량주행 시뮬레이터를 통해 시인성을 반영한 최적의 차선설치규격을 도출하고자 하였는데, 가상주행 시뮬레이션 실험에서는 총 80명(고령자 30명 포함)을 대상으로 경부고속도로 신탄진~청원IC (12km) 구간에 대한 현행안과 국외 기준을 고려한 개선안 18개에 대한 비교 실험을 수행한 결과 주행속도 편차, 차로편측위치 절대값 및 표준편차값, 운전자 선호도 설문, 운전자 불안뇌파 파워, 야간 및 기상악화 실험 등을 수행시 차선길이 6m, 빈길이 12m, 차선폭 13cm인 대안이 가장 우수한 최적안으로 산출되었다. 길이비 1:2 이하, 도색면적 60m^2/km 미만인 6개 대안에 대하여 현장시공 후 탑승자실험 및 응답조사를 실행한 결과에서도 기존 규격에 비해 최적안(차선길이 6m, 빈길이 12m, 차선폭 13cm)을 더욱 선호하는 것으로 나타났으며, 차선폭 13~15cm에 대해 이용자는 큰 차이를 느끼지 못하는 것으로 나타났다. 최적안의 도색면적은 43.3m^2/km로, 현행 규격의 도색면적인 60m^2/km에 비해 약 27.8%의 도색면적을 절감할 수 있는 것으로 산출되었다.

3. 고속도로 일괄 도입시 경제성 분석

3.1 편익 추정

3.1.1 야광 노면표시의 사고감소율 추정

최근 개발된 야광 노면표시는 축광안료 최적배합비인 40%를 적용하여 융착식 도료의 성질을 유지하고자 하였으며, 현장시공 후 자동차 전조등에 의한 재귀반사도를 측정하였다. 재귀반사는 휘도측정기(LTX-XL)를 이용하여 입사각 88.76°, 관찰각 1.05° (통상 거리 30m에서 자동차의 전조등 높이 65cm, 운전자 눈의 높이 1.2m를 표준으로 상정하며, 성능기준은 백색 240mcd/m^2·Lux 이상임) 조건에서 측정하였으며, 3회에 걸친 측정에서 기존 융착식 노면표시는 303mcd/m^2·Lux, 야광 노면표시는 402mcd/m^2·Lux의 성능을 보여, 야광 노면표시가 기존 노면표시 대비 99mcd/m^2·Lux (약 32.7%)의 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/m^2·lux개선 시마다 사고율이 약 18%씩 감소하는 것으로 추정하였으며, 이에 따르면 본 야광 노면표시는 약 35.6%의 사고 감소가 가능한 것으로 추정된다.

$$\frac{18\%}{50mcd/m^2 \cdot lux} \times 99mcd/m^2 \cdot lux = 35.6\%$$

또한 Lee et al. (2015)의 연구결과에서는 차선밝기가 240mcd/m^2·lux에서 420mcd/m^2·lux로 75% 증가한 구간에서 약 41.7% 교통사고 감소 효과가 있는 것으로 분석하였으며, 이에 따르면 본 야광 노면표시는 약 18.2%의 사고 감소가 가능한 것으로 추정된다.

$$\frac{41.7\%}{75\%} \times 32.7\% = 18.2\%$$

두 문헌의 사고감소 추정효과를 종합하면, 본 야광 노면표시를 설치시 평균적으로 26.9%의 사고감소 효과가 있다고 볼 수 있다.

3.1.2 고속도로 발생 사고 통계

본 야광 노면표시의 우선적 적용 대상인 고속도로를 대상으로 사고 통계를 분석하였다. 한국도로공사의 내부자료에 따르면, 2005~2011년도에 도로공사 관할 전국 고속도로에서 발생한 사고 17,844건(주간 10,634건(59.6%), 야간 7,210건(40.4%))에 대하여 사고원인, 사망, 부상, 시간대 등이 기록된 자료를 분석하였다. 그 결과 고속도로 노선별 사고발생 건수(7년간)는 경부선이 약 3,500건으로 가장 많은 것으로 나타났고, 이어서 서해안선, 중부통영대전선, 영동선 등이 1,500건 이상, 남해선, 중부내륙선, 논산천안 및 호남선 등이 1,000건 이상의 사고를 기록한 것으로 나타났다.

사고발생 원인별로 분석해보면 운전자요인(과속, 안전거리미확보, 졸음, 주시태만, 핸들과대조작 등)이 85%로 대부분을 차지하며, 이어서 차량요인(타이어파손, 엔진과열, 제동장치 등) 11%, 기타요인 4%로 나타났으며, 노면표시가 직·간접적인 사고 원인으로 작용할 수 있는 운전자요인을 세부적으로 분석하면, 졸음운전과 과속이 각각 26%, 주시태만이 18%, 핸들과대조작이 16% 등으로 나타났다.

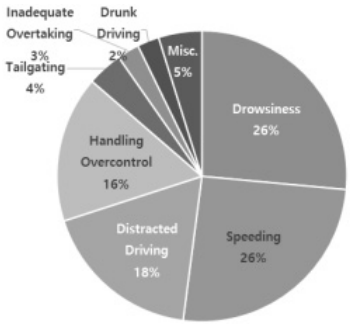

Fig. 2. Main Causes of Driver-Oriented Accidents on Expressway (2005~2011)

3.1.3 노면표시 시인성 개선에 따른 사고감소 추정

본 야광 노면표시는 야간의 노면표시 시인성을 개선하는 것으로, 전체 사고 중 야간에 발생한 운전자 요인의 사고만을 대상으로 하며, 이중에서도 노면표시가 직·간접적인 사고 원인으로 작용할 수 있는 주시태만과 핸들과대조작만을 분석한 결과 7년간 야간에 해당 원인으로 발생한 사고는 1,990건, 이에 따른 사망자는 306명, 부상자는 1,073명으로 분석되며, 이를 연간으로 환산시 연간 284건의 사고(사망 44명, 부상 153명)가 발생하는 것으로 산정할 수 있다. 노면표시(차선) 재귀반사율 증가에 따른 사고감소율 추정 결과인 26.9%를 적용시, 연간 76건(사망 12명, 부상 41명)의 사고를 예방할 수 있을 것으로 예상된다.

3.1.4 사고편익 도출

Korea Development Institute (2008)의 「도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)」에서는 도로

Table 2. 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 3. Accident Reduction Benefit Followed by Improving Visibility of Expressway 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	12	52,741	632,892	762,473
Number of Injured	41	2,156	88,396	106,495
Number of Accident	76	4,159	316,084	380,800
Total	-	-	1,037,372	1,249,767

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

부문 교통사고비용 원단위를 2007년 기준으로 Table 2와 같이 제시하고 있다.

본 연구의 사고감소 규모 추정치에 교통사고비용 원단위를 적용하여 사고편익을 도출한 결과는 Table 3과 같으며, 2015년 기준 총 125억여 원의 편익이 발생하는 것으로 산정된다.

3.1.5 편익 산정

노면표시 시인성 개선에 따른 편익은 위에서 산출한 연간 교통사고 절감편익 124.98억원을 현행 편익으로 설정하고, Korea Expressway Corp. (2014)에서 선정한 대안들에 대한 가상주행 시뮬레이션을 통해 주행속도(평균 및 표준편차), 차로편측위치(LPM)(절대값, 표준편차,진동횟수), 심리분석(선호도, 불안뇌파) 측정 결과를 종합점수화한 결과를 편익의 가중치로 사용하여 대안별 편익을 산정하였다. 해당 연구의 종합분석 결과 대안 7이 가장 우수한 것으로 나타났으므로, 해당 대안의 편익을 현행 편익(124.98억)과 같다고 설정하고 기타 대안은 종합점수의 상대적 비율에 따라 산정하였다. 다만 종합점수가 음(-)의 점수로 도출된 대안(4, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19)들은 편익 분석에서 제외하였다(Table 4).

3.2 비용 추정

3.2.1 기존 노면표시와 야광 노면표시의 수명 분석

기존 융착식 노면표시는 유리알 비드의 지속적 탈락에 따른 시인성 성능의 지속적 감소로 인하여 주기적으로 재도색이 필요하며, 이러한 주기는 교통량 및 현장 여건, 도료 및 시공 품질 등에 따라 차이가 있다. Korea Road Traffic Authority Traffic Science Institute (2012)의 연구에 따르면 백색 노면표시는 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.

따라서 기존 노면표시는 재귀반사 성능 유지를 위하여 12개월마다 재도색이 필요한 것으로 적용하고, 새롭게 개발된 야광 노면표시는 차선도색 장비 성능의 개량 및 도료, 비드 품질 향상이 수반됨에 따라 기존의 1.5배 수명을 갖는 것으로 가정하였으며, 기존 노면표시는 m^2당 2만원, 야광 노면표시는 m^2당 10만원의 재료비가 소요되는 것으로 적용하였고, 기타 장비사용료 및 인건비는 동일한 것으로 가정하였다.

3.2.2 비용 산정

차선도색 시공 비용에는 재료비 이외의 인건비, 잡재료비, 기계경비 등의 여러 가지 비용 소요가 예상되나, 축광차선도료 적용에 따른 재료비 인상분 외 기타 비용은 동일하게 적용될 것으로 예상되므로 본 비용에서는 재료비 인상분만을 산정하였다. Korea Expressway Corp. (2014)에 따르면 2012년 한국도로공사는 130억의 예산으로 전체 고속도로구간에 대해 차선도색을 시행하였으며, 고속도로 차선 총 연장은 25,244km로 km당 도색 비용을 산출하면 514,974원인데, 통상적으로 차선도색 전체 시공 비용 중 도료비가 차지하는 비율은 85% 내외이므로 본 연구에서는 이를 적용, km당 도색 재료 비용을 437,728원으로 산정하였다. 또한 차선도색 기술 및 재료 성능 향상에 따라 재도색주기가 1.5배(현 12개월→18개월)로 증가할 것으로 예상되어 이를 토대로 km당 도색 비용이 33.3% 절감되는 것으로 반영하였다.

우리나라 현행 차선도색 기준은 도색길이 8m, 빈길이 12m, 차선폭 15cm로 1km당 60㎡의 면적이 도색되며, 축광차선도료 재료비용이 기존 노면표시 재료비용의 약 5배에 달하므로 야광 노면표시의 km당 도색 재료 비용은 2,188,640원(km당 도색면적 $60m^2$ 기준)으로 산정하였다. 따라서 기존 노면표시 대비 야광 노면표시의 재료비 증가분은 1,750,912원/km(km당 도색면적 $60m^2$ 기준)이다.

Korea Expressway Corp. (2014)의 연구에서 설정한 바와 같이 해외의 차선도색 기술 및 도색길이, 빈길이, 차선폭을 다르게 설정한 총 19개 대안 중 편익 산정에서 검토된 8개 대안(현행안 포함, Table 4) 각각의 km당 도색 면적을 산출한 후 km당 도색 증가

Table 4. Accident Reduction Benefit Followed by Expressway Pavement Markings Design Alternatives

Alt.	Length (m)	Gap (m)	Width (cm)	Painted Surface per km (m^2)	Simulation Score	Accident Reduction Benefit (10,000 KRW)
1 (Current)	8	12	15	60	-	1,249,767
2	8	12	10	40	0.151	392,338
3	6	9	10	40	0.448	1,164,024
5	4	8	10	33.3	0.173	449,500
6	6	12	15	50	0.141	366,356
7	6	12	13	43.3	0.481	1,249,767
12	5	10	15	50	0.409	1,062,692
13	3	9	15	37.5	0.112	291,006

비용 및 고속도로 차선 총 연장(25,244km) 도색 증가 비용을 산정하였다. 고속도로 평균 편도 차로수를 3차로로 가정시, 양 가장자리 차선(2개)은 현행과 같이 실선 처리되고 차로 구분선(2개)에는 차선도색 기술 대안이 적용되는 것으로 산정하여, 고속도로 차선 총 연장(25,244km) 중 1/2인 12,622km에 차선도색 기술 대안에 따른 도색 면적 변화 비율을 적용하였으며, 대안 2 기준으로 재료비 증가분을 산출한 결과는 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&(\text{야광 노면표시 재료비 증가분}) \\
&\times\left(\frac{(\text{대안 } km\text{당 도색 면적})}{(\text{현행 } km\text{당 도색 면적})} \times(\text{고속도로 차로 구분선 총 연장}) + (\text{고속도로 가장자리 차선 총 연장})\right) \\
&= 1{,}750{,}912 \times \left(\frac{40}{60} \times 12{,}622 + 12{,}622\right) \\
&= 36{,}833{,}352{,}107 = 368.33\text{억 원}
\end{aligned}
$$

한편 대안 2 기준 재도색주기 연장에 따른 비용 절감분 계산 과정은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&(\text{고속도로 차선 전체 도색 비용}) \times \frac{(\text{대안 재도색주기})}{(\text{현행 재도색주기})} \cdot \\
&\times\left(\frac{(\text{고속도로 가장자리 차선 총 연장})}{(\text{고속도로 차선 총 연장})} + \frac{(\text{고속도로 차로 구분선 총 연장})}{(\text{고속도로 차선 총 연장})} \times \frac{(\text{대안 } km\text{당 도색 면적})}{(\text{현행 } km\text{당 도색 면적})}\right) \\
&= 130\text{억 원} \times \frac{12}{18} \\
&\times\left(\frac{12{,}622}{25{,}244} + \frac{12{,}622}{25{,}244} \times \frac{40}{60}\right) \\
&= 72.22\text{억 원}
\end{aligned}
$$

따라서 대안 2 기준 총 도색비용 증가분은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&(\text{재료비 증가분}) - (\text{재도색 비용 절감분}) \\
&= 368.33 - 72.22 = 296.11\text{억 원}
\end{aligned}
$$

3.3 경제성 분석

차선도색 설치 규격의 변화에 따라 발생할 노면표시의 편익과

Table 5. Increased Painting Cost followed by Expressway Pavement Markings Design Alternatives

Alt.	Length (m)	Gap (m)	Width (cm)	Painted Surface per km (m^2)	Increased Material Cost (0.1 Billion KRW)	Saved Cost by Life Expectancy Extension (0.1 Billion KRW)	Total Increased Painting Cost (0.1 Billion KRW)
1 (Current)	8	12	15	60	442.00	86.67	355.33
2	8	12	10	40	368.33	72.22	296.11
3	6	9	10	40	368.33	72.22	296.11
5	4	8	10	33.3	343.66	67.38	276.28
6	6	12	15	50	405.17	79.44	325.73
7	6	12	13	43.3	380.49	74.61	305.88
12	5	10	15	50	405.17	79.44	325.73
13	3	9	15	37.5	359.13	70.42	288.71

Table 6. Benefit-Cost (B/C) Ratio followed by Expressway Pavement Markings Design Alternatives

Alt.	Length (m)	Gap (m)	Width (cm)	Painted Surface per km (m^2)	Accident Reduction Benefit (0.1 Billion KRW)	Total Increased Painting Cost (0.1 Billion KRW)	B/C Ratio
1 (Current)	8	12	15	60	124.98	355.33	0.35
2	8	12	10	40	39.23	296.11	0.13
3	6	9	10	40	116.40	296.11	0.39
5	4	8	10	33.3	44.95	276.28	0.16
6	6	12	15	50	36.64	325.73	0.11
7	6	12	13	43.3	124.98	305.88	0.41
12	5	10	15	50	106.27	325.73	0.33
13	3	9	15	37.5	29.10	288.71	0.10

비용을 토대로 경제성 분석을 수행하였다. 현행 규격을 유지하면서 야광 노면표시로 변경시 B/C비는 0.35로 사고절감에 따른 경제성 확보 효과가 다소 미흡한 것으로 나타났으며, 차선도색 기술 대안 중 대안 3 및 대안 7의 B/C비는 현행 차선 규격보다 경제성이 약 12~16% 뛰어난 것으로 도출되었다. 따라서 축광차선도료를 적용한 야광 노면표시를 적용시 대안 3, 7 등의 차선도색 기술 대안을 함께 적용한다면 경제적 효과를 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 비용 등을 고려할 때 전체 고속도로에 일괄적으로 적용하는 것보다는 사고 잦은 지점 등에 우선적으로 적용하는 것이 바람직하다고 판단됨에 따라 4장에서 추가 분석을 수행하였다.

4. 고속도로 사고 잦은 구간 도입시 경제성 분석

4.1 대상 구간 선정

도로의 선형 등 기하구조에 따른 사고 위험도에 관계없이 전체 고속도로 노선에 대한 일괄 적용시, 사고 예방 규모에 비하여 투입되는 비용이 과다함에 따라 경제성이 다소 부족한 것으로 도출되었으며, 3.1.3절에서 검토된 야간 교통사고 1,990건을 대상으로 고속도로 10km 구간별 사고건수 및 사상자수를 집계하여 사고심각도(Table 2의 원단위에 따라 환산한 교통사고비용)가 높은 20개 구간(Table 7)에 대하여 야광 노면표시 도입 및 차선도색 설치 규격 개선(Table 6에서 경제성이 가장 높았던 대안 7 적용)시 경제성을 분석하고자 한다.

4.2 편익 추정

3.1.4절에서 적용되었던 교통사고비용 원단위를 이용하여 각 구간별로 노면표시 시인성 개선에 따른 사고 절감 편익을 산정하였다. 예를 들어 1순위인 경부선(340~350km)의 7년간 사고건수는 21회, 사망자수는 12명, 부상자수는 13명으로, 이를 연간으로 환산시 사고건수 3.0건, 사망자수 1.7명, 부상자수 1.9명이다. 노면표시 재귀반사율 증가에 따른 사고감소율 추정 결과인 26.9%를 적용시 노면표시 시인성 개선으로 연간 사고건수 0.8회, 사망자수 0.5명, 부상자수 0.5명이 감소할 것으로 전망되며, Table 2의 교통사고비용 원단위에 따라 Table 3과 같은 과정으로 사고감소편익 3.46억원이 산정되었다(Table 8).

Table 7. Top 20 Sections of Accident Hot Spots

Rank	Expwy Name	Milestone (km)	Avg. Number of Lanes (two ways)	Number of Accident	Number of Fatality	Number of Injued	Accident Cost (0.1 Billion KRW)
1	Gyeongbu	340-350	8.0	21	12	13	18.5
2	Jungbu	290-300	4.0	13	11	28	16.3
3	Seoul Ring	100-110	8.0	28	5	7	15.2
4	Gyeongbu	350-360	8.0	17	7	20	13.9
5	Seoul Ring	20-30	9.0	29	2	11	13.7
6	Seohaean	330-340	5.2	27	4	2	13.5
7	Seoul Ring	70-80	8.1	28	1	7	12.2
8	Seoul Ring	10-20	8.0	26	2	4	11.9
9	Gyeongbu	150-160	8.0	16	5	12	11.2
10	Gyeongin	10-20	7.9	15	6	8	11.1
11	Gyeongbu	390-400	8.5	23	1	13	10.9
12	Honam	70-80	4.9	17	5	4	10.7
13	Gyeongbu	130-140	8.0	18	3	10	10.2
14	Seoul Ring	120-128.1	8.0	22	1	10	10.2
15	Honam	180-190	8.0	17	2	20	10.1
16	Seohaean	320-330	7.2	20	1	13	9.8
17	Gyeongbu	330-340	7.3	15	4	9	9.7
18	Seoul Ring	80-90	8.0	20	2	4	9.6
19	Gyeongbu	140-150	8.0	17	3	7	9.5
20	Gyeongbu	120-130	8.0	12	4	11	8.8

Table 8. Accident Reduction Benefit followed by Expressway Pavement Markings Design Alternatives (Top 20 Accident Sections)

Rank	Expwy Name	Milestone (km)	Number of Accident/Fatality/Injured during 7 years (2005-2011)	Annual Average Number of Accident/Fatality/Injured	Accident Reduction Benefit (0.1 Billion KRW)
1	Gyeongbu	340-350	21/12/13	0.8/0.5/0.5	3.46
2	Jungbu	290-300	13/11/28	0.5/0.4/1.1	3.22
3	Seoul Ring	100-110	28/5/7	1.1/0.2/0.3	1.83
4	Gyeongbu	350-360	17/7/20	0.7/0.3/0.8	2.24
5	Seoul Ring	20-30	29/2/11	1.1/0.1/0.4	1.16
6	Seohaean	330-340	27/4/2	1.0/0.2/0.1	1.52
7	Seoul Ring	70-80	28/1/7	1.1/0.0/0.3	0.85
8	Seoul Ring	10-20	26/2/4	1.0/0.1/0.2	1.03
9	Gyeongbu	150-160	16/5/12	0.6/0.2/0.5	1.65
10	Gyeongin	10-20	15/6/8	0.6/0.2/0.3	1.83
11	Gyeongbu	390-400	23/1/13	0.9/0,0/0.5	0.82
12	Honam	70-80	17/5/4	0.7/0,2/0.2	1.59
13	Gyeongbu	130-140	18/3/10	0.7/0.1/0.4	1.18
14	Seoul Ring	120-128.1	22/1/10	0.8/0.0/0.4	0.77
15	Honam	180-190	17/2/20	0.7/0.1/0.8	1.02
16	Seohaean	320-330	20/1/13	0.8/0.0/0.5	0.76
17	Gyeongbu	330-340	15/4/9	0.6/0.2/0.3	1.36
18	Seoul Ring	80-90	20/2/4	0.8/0.1/0.2	0.91
19	Gyeongbu	140-150	17/3/7	0.7/0.1/0.3	1.13
20	Gyeongbu	120-130	12/4/11	0.5/0.2/0.4	1.32

Table 9. Increased Painting Cost followed by Expressway Pavement Markings Design Alternatives (Top 20 Accident Sections)

Rank	Expwy Name	Milestone (km)	Avg. Number of Lanes (two ways)	Length of Lane Edge Lines (km)	Length of Broken Lines (km)	Increased Material Cost (0.1 Billion KRW)	Saved Cost by Life Expectancy Extension (0.1 Billion KRW)	Total Increased Painting Cost (0.1 Billion KRW)
1	Gyeongbu	340-350	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17
2	Jungbu	290-300	4.0	40.0	20.0	0.95	0.19	0.77
3	Seoul Ring	100-110	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17
4	Gyeongbu	350-360	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17
5	Seoul Ring	20-30	9.0	40.0	70.0	1.58	0.31	1.27
6	Seohaean	330-340	5.2	40.0	32.0	1.10	0.22	0.89
7	Seoul Ring	70-80	8.1	40.0	61.0	1.47	0.29	1.18
8	Seoul Ring	10-20	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17
9	Gyeongbu	150-160	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17
10	Gyeongin	10-20	7.9	40.0	59.0	1.45	0.28	1.16
11	Gyeongbu	390-400	8.5	40.0	65.0	1.52	0.30	1.22
12	Honam	70-80	4.9	40.0	29.0	1.07	0.21	0.86
13	Gyeongbu	130-140	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17
14	Seoul Ring	120-128.1	8.0	32.4	48.6	1.18	0.23	0.95
15	Honam	180-190	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17
16	Seohaean	320-330	7.2	40.0	52.0	1.36	0.27	1.09
17	Gyeongbu	330-340	7.3	40.0	53.0	1.37	0.27	1.10
18	Seoul Ring	80-90	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17
19	Gyeongbu	140-150	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17
20	Gyeongbu	120-130	8.0	40.0	60.0	1.46	0.29	1.17

4.3 비용 추정

3.2절의 비용 산정 방법론을 준용하여 각 구간별로 야광 노면표시 재료비 증가분 및 재도색주기 연장 및 차선도색 설치 규격(대안 7) 적용에 따른 비용 절감분을 고려하여 총 도색 비용 증가분을 산정하며, 각 구간별 평균 왕복차로수를 적용하여 가장자리 차선은 구간연장의 4배(각 방향별 양 가장자리), 차로구분선은 왕복차로수에서 2를 뺀 값(차로와 차로를 구분하는 선이므로 각 방향별로 1개 차로씩은 계산에서 제외됨)에 구간연장을 곱한 값을 적용하였다(Table 9).

4.4 경제성 분석

사고심각도 상위 20개 구간에 대한 노면표시 시인성 개선시 비용·편익 분석을 수행한 결과 전체 20개 구간 중 11개 구간에서 B/C 비가 1.0을 초과하여 경제성이 확보되는 것으로 나타났으며, 나머지 구간도 대부분 B/C 비가 1.0에 근접하고 있는데, 차로수가 많아 도색비용이 과다하게 소요되는 도시부 고속도로에서는 경제성 확보가 다소 부족한 것으로 나타났다. 따라서 축광차선도료를 적용한 야광 노면표시를 지방부 고속도로의 사고 잦은 구간에 우선적으로 적용시 사고 감소에 따른 경제성이 존재하는 것으로 나타났다(Table 10).

5. 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, 축광차선도료를 배합한 노면표시의 시인성 개선, 인간공학적 검토를 통한 고속도로 차선도색 설치규격 개선안 등이 소개되어 야간·우천시 교통안전을 증대하고자 하였다. 이에 본 연구에서는 해당 기법들을 도입하였을 때 종합적인 소요비용 및 사고절감 편익을 고려한 경제성 분석을 통해 도입 타당성을 제시하고자 하였다.

국내·외 차선도색 설치기준 검토에서는 도색길이와 빈길이의 비율을 기준으로 할 때 우리나라 기준이 외국에 비해 다소 과다한 것으로 조사되었다. 이에 Korea Expressway Corp. (2014)에서 다양한 대안에 대한 검토를 통해 최적의 차선설치규격(차선길이 6m, 빈길이 12m, 차선폭 13cm)을 도출하였으며, 해당 대안은 현행 규격 대비 약 27.8%의 도색면적을 절감할 수 있는 것으로 산출되었다.

최근 개발된 야광 노면표시(축광차선도료)는 기존 차선 대비 99mcd/m^2·Lux(약 32.7%)의 성능 개선을 보이는 것으로 나타났는데, 재귀반사율과 사고감소율의 관계를 정량적으로 밝힌 2개의

Table 10. Benefit-Cost(B/C) Ratio followed by Expressway Pavement Markings Design Alternatives (Top 20 Accident Sections)

Rank	Expwy Name	Milestone (km)	Avg. Number of Lanes (two ways)	Accident Reduction Benefit (0.1 Billion KRW)	Total Increased Painting Cost (0.1 Billion KRW)	B/C Ratio
1	Gyeongbu	340-350	8.0	3.46	1.17	2.96
2	Jungbu	290-300	4.0	3.22	0.77	4.20
3	Seoul Ring	100-110	8.0	1.83	1.17	1.56
4	Gyeongbu	350-360	8.0	2.24	1.17	1.91
5	Seoul Ring	20-30	9.0	1.16	1.27	0.91
6	Seohaean	330-340	5.2	1.52	0.89	1.71
7	Seoul Ring	70-80	8.1	0.85	1.18	0.72
8	Seoul Ring	10-20	8.0	1.03	1.17	0.88
9	Gyeongbu	150-160	8.0	1.65	1.17	1.41
10	Gyeongin	10-20	7.9	1.83	1.16	1.58
11	Gyeongbu	390-400	8.5	0.82	1.22	0.67
12	Honam	70-80	4.9	1.59	0.86	1.85
13	Gyeongbu	130-140	8.0	1.18	1.17	1.01
14	Seoul Ring	120-128.1	8.0	0.77	0.95	0.81
15	Honam	180-190	8.0	1.02	1.17	0.87
16	Seohaean	320-330	7.2	0.76	1.09	0.70
17	Gyeongbu	330-340	7.3	1.36	1.10	1.23
18	Seoul Ring	80-90	8.0	0.91	1.17	0.78
19	Gyeongbu	140-150	8.0	1.13	1.17	0.96
20	Gyeongbu	120-130	8.0	1.32	1.17	1.12

연구에 따라 26.9%의 사고감소 효과가 있는 것으로 나타났으며, 이에 따라 연간 76건(사망 12명, 부상 41명)의 야간 고속도로 사고를 예방할 수 있을 것으로 예측되었다.

이를 토대로 우선 고속도로 일괄 도입시 경제성 분석을 수행하였다. 교통사고비용 원단위를 적용한 교통사고 절감 편익은 약 125억원으로 도출되었으며, 축광차선도료 적용에 따른 재료비 인상과 차선도색 기술·재료 성능 향상에 따른 재도색주기 증가, 차선도색 최적 대안에 따른 도색면적 절감 등을 종합적으로 고려한 비용은 약 306억원으로 도출되었다. 이에 따라 비용-편익비는 0.41로 경제성 확보가 어려운 것으로 나타났다.

이에 야간 주시태만과 핸들과대조작 교통사고가 잦은 상위 20개 구간을 선정하여 각 구간별로 야간 노면표시 도입 및 설치 규격을 개선하는 경우에 대한 경제성 분석을 수행한 결과, 비용-편익비는 구간에 따라 0.67~4.20으로 전체 20개 구간 중 11개 구간에서 경제성이 확보되는 것으로 나타났으며 차로수가 많아 도색비용이 과다하게 소요되는 곳에서 경제성 확보가 다소 부족한 것으로 나타났다.

연구 결과를 종합하면, 축광차선도료를 적용한 야광 노면표시를 설치 규격 개선과 더불어 사고 잦은 구간, 특히 차로수가 많지 않고 주변 광원이 없어 야간 시인성 저하폭이 큰 지방부 구간에 우선적으로 적용시 사고 감소에 따른 경제성이 존재하는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 고속도로 이정 거리를 기준으로 매 10km 단위로 분할한 뒤 각 개별 구간에 대한 교통사고 심각도와 야광 노면표시 설치 비용 산정을 통해 경제성을 분석하였으나, 구간 연장이나 분할 지점의 적정성 측면에서 사고 심각도가 가장 높은 구간이 선정되지 않았을 가능성이 높다는 한계점이 존재한다. 따라서 노면표시 시인성 저하에 따른 사고다발구간 선정 방법론을 구체화하여 최근 개발된 차선도색 기술의 실용화를 촉진해야 할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(15CTAP-C078004-02)과 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의해 수행되었습니다(NRF-2010-0028693).

References

Alberta Transportation (2003). *Highway Pavement Marking Guide*, Edmonton, Alberta, Canada.

British Columbia Ministry of Transportation and Highways (2000). *Manual of Standard Traffic Signs & Pavement Markings*, Victoria, B.C., Canada.

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.

Federal Highway Administration (2009). *Manual on Uniform Traffic Control Devices*, Washington, DC.

Government of South Australia: Department of Planning, Transport and Infrastructure (2015). *Pavement Marking Manual*, Adelaide, SA, Australia.

KNPA (Korean National Police Agency) (2012). *Traffic Pavement Marking Install & Management Manual* (in Korean).

Korea Expressway Corp. (2014). *Research on Improvement of Lane Marking Installation Standard* (in Korean).

Korea Road Traffic Authority (2016). *Social Costs caused by Road Traffic Accidents of 2014 (press release)* (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).

New South Wales Government: Road and Maritime Services (2010). *Delineation – Section 4: Longitudinal Markings*, Sydney, NSW, Australia.

Queensland Government: Department of Transport and Main Roads (2015). *Traffic and Road Use Management Manual*, Brisbane, QLD, Australia.

Smadi, O., Souleyrette, R., Ormand, D. and Hawkins, N. (2008). "Pavement marking retroreflectivity analysis of safety effectiveness." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2056, pp. 17-24.

Transportation Research Board (2002). *NCHRP Report 484: Feasibility Study for an All-White Pavement Marking System*, Washington, DC.