

기상조건 변화에 따른 노면표시 비드의 최적 배합비율 산정

Optimal Mixtures of Roadway Pavement Marking Beads Under Various Weather Conditions

이 승 규 Lee, Seungkyu | 아주대학교 교통연구센터 전임연구원 · 주저자 (E-mail : aimlsk@ajou.ac.kr)
이 승 현 Lee Seunghyun | 아주대학교 교통연구센터 전임연구원 (E-mail : satlee226@ajou.ac.kr)
최 기 주 Choi Keechoo | 정회원 · 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 (E-mail : keechoo@ajou.ac.kr)

ABSTRACT

Lane markings such as edgelines, centerlines, and lines that delineate lanes generally provide drivers with the various information for safe driving. Drivers can easily recognize the lane markings through the color differences between the markings and road surfaces during the daytime. However, it is a bit difficult for drivers to perceive them during the nighttime due to the lack of artificial lights. Although the glass beads with the 1.5-refractive index have been used to improve the visibility of the lane markings during the nighttime, it is still difficult for drivers to recognize the lane markings properly, especially during the rainy nighttime, which may often lead to traffic accidents. To improve the retroreflectivity and visibility of the lane markings during the rainy nighttime, the high refractive beads with the 2.4-refractive index are essentially required, but they do not work appropriately during the dry nighttime. Thus, the mixed materials with the 1.5, 1.9, and 2.4-refractive beads should be considered for the satisfactory implementation of the lane markings. This study reveals the best mixing rates of the beads by conducting benefit-cost analysis under various weather conditions in Korea. The analysis results show that the lane markings with the 100% of the 2.4-refractive beads provide the highest visibility of lane markings regardless of the roadway conditions, but the benefit-cost (B/C) ratio of the bead mixture is merely 0.46. The best mixing rate of the beads, from the highest B/C ratio viewpoint, was identified as the mixture with a 80% of 1.5-refractive beads and a 20% of 2.4-refractive beads. Some limitations and future research agenda have also been discussed.

KEYWORDS

pavement marking, bead, retroreflectivity, refractive index, road safety

요지

노면표시에 도포된 굴절률 1.5 유리알은 야간 우천 시 효과적인 재귀반사를 수행하지 못하여 교통안전에 심각한 문제를 초래하고 있다. 이를 극복하기 위해 습윤상태에서 효과적 재귀반사를 수행하는 굴절률 2.4인 우천형 bead와 건조 시 최적의 재귀반사를 수행해 내는 굴절률 1.9 bead를 혼합한다. 그러나 고성능의 굴절률 1.9와 2.4 bead는 기존 1.5 유리알에 비해 상당한 고가이므로 전량 사용하기에는 상당한 비용이 소요된다. 따라서 현장 설치 시에는 서로 혼합하여 사용하는 것이 바람직하며, 최적 성능과 소요 비용을 고려한 적정 배합비율을 찾아내는 것이 중요하다. 본 연구에서는 다양한 비율로 혼합된 bead를 국내 고속도로의 길가장자리선에 설치하였을 때 발생하는 각각의 비용 및 편익에 따른 경제성 분석을 수행하였다. 분석 수행결과, 다양한 강수량 변화에도 높은 시인성을 유지하는 대안은 굴절률 2.4가 100% 구성된 차선으로 나타났으며, 경제성이 가장 높게 확보되는 대안은 굴절률 1.5가 80%, 2.4가 20%로 구성된 차선으로 B/C는 약 1.92 수준으로 도출되어 국내 고속도로 길가장자리선의 적용 시 가장 효과적인 대안인 것으로 확인되었다. 아울러 연구의 한계와 몇몇 장래 연구과제가 토의되었다.

핵심용어

노면표시, 비드, 굴절률, 재귀반사, 도로안전

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

도로교통사고를 예방하기 위해 운전자 교육 및 교통 시설 개선 등의 노력이 진행되고 있으며 근래에 들어서 사고율은 점점 감소추세에 있다. 그러나 상황별 교통사고 발생추이를 보면 우천 시 교통사고 발생 비율이 1990년 이후 최근 20년간 평균 7.4%를 나타냈으나, 최근 5년간에는 평균 8.8%로 평년보다 높게 나타나며 증가하는 추세에 있다. 또한 우천 시 사고규모를 의미하는 사망자수 비율은 최근 20년간 평균 9.3%를 나타냈으나 최근 5년간은 10.6%를 보여 우천 시의 대형사고 비율이 커짐을 확인할 수 있었다. 또한, 야간 시간대에 발생하는 사고비율은 1990년대에 40%를 밑돌았지만, 최근 5년간에는 49.2%를 나타내어 야간 시간대의 교통사고 발생 비율이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 시인성이 감소되는 야간 및 우천 상황의 사고감소를 위한 대안 마련이 필요한 실정이다.

차선은 교통안전시설 중 가장 자주 운전자가 접하는 노면표시이며, 도로 구간 내 차로의 경계를 표시하고 교통류를 분리하여 소통을 원활하고 안전하게 하는 중요한 역할을 수행한다. 이러한 노면표시는 도로와 구별되는 색상을 통해 운전자에게 인식되며 주간 상황에는 노면표시 정보가 무리 없이 운전자에게 전달되고 있다. 그러나 야간 상황에는 가시거리의 감소로 인해 노면표시의 시인성이 크게 떨어져 운전자가 쉽게 인지하지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 이를 극복하기 위하여 노면표시 설치 시 도로에 bead(유리알)를 첨가하여 차량 전조등의 재귀반사 효과를 극대화 시켜 야간 노면표시 시인성이 크게 향상되어 운전자의 주행 안전성에 도움을 주고 있다. 그러나 야간 우천 시에는 노면표시 표면에 수막이 생겨나 난반사가 발생하기 때문에 차량 전조등에 의한 재귀반사가 크게 감소하며 이는 사고발생을 야기시킨다.

1.2. 연구의 범위

본 연구는 우천시 노면표시의 시인성 개선에 대한 방법 중 고굴절 bead¹⁾를 사용하여 재귀반사율을 높이는 방법에 대하여 연구하였다. 기존에 사용되고 있는 굴절률 1.5 bead와 건조 시 최적 성능을 나타내는 1.9 bead, 그리고 우천 시 최적 성능을 나타내는 2.4 bead를 20% 단위로 적절히 혼합하여 실내실험을 통해 기상

1) 현재 국내·외 기준에는 노면표시에 살포되는 재귀반사체를 유리알(glass bead)로 정의하고 있으나 이는 굴절률 1.5인 유리알에 해당되며, 고 굴절률 재귀반사체의 경우 세라믹 재질로 구성되어 있으므로 본 연구에서는 유리알과 세라믹 비드를 합쳐서 bead로 통칭하였음.

조건 별 재귀반사율을 측정하였다.

각 노면표시 대안 별 경제성 분석은 노면표시 시인성 개선을 통한 사고감소효과에 대한 해외연구를 적용하여 실시하였다. 현재 사용되고 있는 굴절률 1.5 bead를 고속도로 전구간에 설치하는 것을 기본안으로 설정하고 여러 가지 비율로 bead가 배합된 각각의 노면표시를 대안으로 설정하였다. 대안 설치 시 소요되는 추가비용과 감소되는 사고발생비용을 적용한 편익을 통해 경제성을 분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 노면표시의 구성

2.1.1. 도로

노면표시의 주요 재료인 도료는 도로와는 다른 색상을 나타내어 운전자에게 노면표시를 식별시키며, 야간 시인성 향상을 위한 주 재료인 bead를 고정시키는 역할을 한다. 색상에 따라 백색·황색·청색으로 구분된다.

2.1.2. Bead

밝은 주간에는 도료를 통한 노면표시의 색별이 어렵지 않으나 어두운 야간에는 시인성이 크게 감소한다. 따라서 야간 시인성을 증대시키기 위하여 bead를 도료에 도포한다. 기존엔 bead를 유리재료로 만들어왔기 때문에 기존의 규정이나 연구에서는 glass bead(유리알)이라는 단어를 사용하였지만, 근래에 사용되기 시작한 고굴절 우천형 bead는 세라믹 재질이므로, 본 연구에서는 glass bead와 ceramic bead를 합쳐서 bead라고 통칭하였다. Bead는 차량의 전조등이 운전자에게 되돌아가는 재귀반사 원리를 통해 야간 시인성을 증대시킨다. 하지만 우천 시 노면에 수막이 형성되면 재귀반사 효과가 저하되어 시인성이 감소된다.

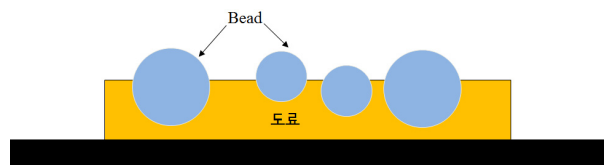


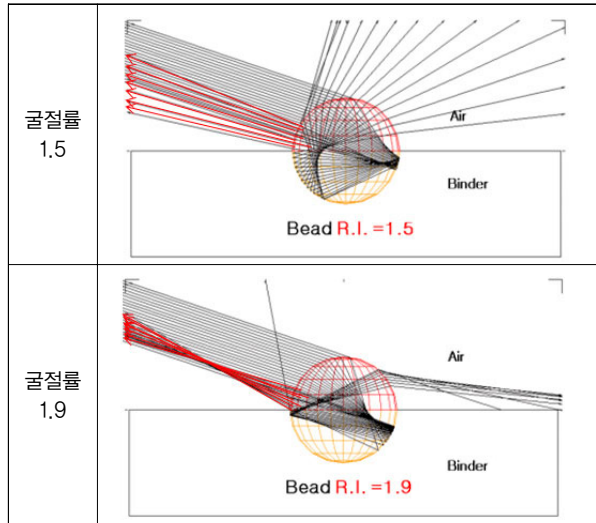
그림 1. 노면표시의 구성

2.2. 야간 우천 시 노면표시 시인성 확보방안

노면표시 설치 시 사용되는 bead는 차량의 전조등 불빛을 운전자에게 재귀반사하여 시인성을 증대시키는 역

할을 한다. 이러한 재귀반사의 효과는 bead의 굴절률에 따라서 달라지게 되는데, 건조 및 우천 상황에 따라서 재귀반사율은 변화한다.

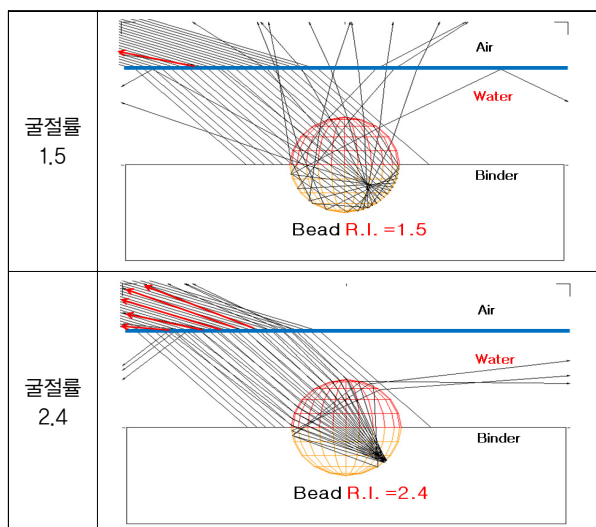
건조상태의 최대의 재귀반사 성능을 나타내는 굴절률은 1.9이며 bead 재귀반사 효과를 Advanced Systems Analysis Program(ASAP)을 통하여 다음과 같이 표현하였다. 굴절률 1.5보다 1.9일 때 전조등이 비추어졌던 방향으로 집중되어 재귀반사가 이루어 짐을 확인할 수 있다.



출처: Advanced Systems Analysis Program(ASAP), Monte Carlo simulation

그림 2. 건조상태의 최적 재귀반사 굴절률

하지만, 비가 와서 도로표면에 수막이 형성되었을 경우에는 수면에서 굴절이 발생하여 난반사가 발생하므로 기존 굴절률 1.9 bead는 효과적인 재귀반사를 해내지



출처: Advanced Systems Analysis Program(ASAP), Monte Carlo simulation

그림 3. 우천상태의 최적 재귀반사 굴절률

못한다. 일반적으로 우천 시에는 굴절률 2.4bead가 가장 높은 재귀반사 효과를 나타낸다.

2.3. 관련 기준

2.3.1. 성능 기준

국내에서는 노면표시 재귀반사 성능 기준이 2010년에 새롭게 개정되었다. 백색 기준 설치 시 재귀반사 성능이 기존 $130\text{mcd}/\text{m}^2\cdot\text{Lux}$ 에서 $250\text{mcd}/\text{m}^2\cdot\text{Lux}$ 로 상향조정 되었다. 또한, 우천시 안전강화 추세에 따라 우천형 bead의 재귀반사 성능 기준을 만들어 백색기준 건조 시 $350\text{mcd}/\text{m}^2\cdot\text{Lux}$, 우천 시 $250\text{mcd}/\text{m}^2\cdot\text{Lux}$ 이상으로 새로운 기준을 만들었다. 건조상태의 측정기준은 ASTM E1710을 따르며 우천상태의 측정기준은 ASTM E2177을 따른다.

표 1. 노면표시 재귀반사 성능기준

(단위 : $\text{mcd}/\text{m}^2\cdot\text{Lux}$)

구 분	측정 기준	노면 상태	측정 시기	반 사 성 능	
				백 색	황 색
일반 bead	ASTM E1710	건조	설치 시	250	175
			재도색 시	100	70
우천형 bead	ASTM E1710	건조	설치 시	350	300
	ASTM E2177	습윤	설치 시	250	250

주 1) "설치시"는 준공검사기준치를 의미한다.

2) "재도색 시기"는 반사성능의 값이 기준치 이하일 때 재도색 시점으로 본다

3) 위 기준은 설치기술 및 유리알 생산기술의 개선에 따라 조정할 수 있다.

출처: 국토해양부 도로정책관, "차선도색 특별 시방서(표준안)", 2010

2.3.2. 조사 기준

노면표시의 재귀반사를 측정하는 기준은 국제적으로 통용되고 있는 ASTM(American Society for Testing and Materials)기준이 있다. ASTM은 1898년 미국에서 설립되어 세계에서 가장 큰 민간단체 규격 제정기관으로, 각종 소재와 제품 등에 대한 민간 규격을 개발하여 보급하고 있으며, 노면표시의 재귀반사 성능평가를 위하여 측정 방법과 주변 조건에 대한 규격을 제시하였다. 재귀반사의 측정 위치와 관찰각에 대해서는 ASTM E1710에서 제시하고 있으며, 우천 후 노면습윤 상태에서는 ASTM E2177에서 제시하였고 강수상태의 측정기준에 대해서는 ASTM E2176에서 제시하고 있다.

1) ASTM E1710

재귀반사율은 빛의 각도 및 대상과의 거리에 따라 값

이 상이해 질 수 있으므로 일정한 기준에 따라 측정하여야 한다. ASTM에서는 1997년 E1710-97을 통해 노면 표시의 재귀반사 기본 측정기준을 제시하였으며, 두차례의 개선을 통해 2011년 ASTM E1710-11을 제정하였다. 표준기상조건은 일반 건조 시이며 노면표시가 완전 건조된 상태에서 측정한다. 재귀반사 측정 시 30m 이격된 위치에서 빛을 발산하는 광원의 높이는 차량 전조등의 높이를 감안한 0.65m로 설정하고, 재귀반사된 광원의 관측높이는 승용차 운전자의 눈높이를 고려한 1.20m로 설정하였다. 이 경우 전조등 광원의 입사각은 도로표면의 법선으로부터 88.76°가 되며, 입사광원과 관측광원 사이에 이루어지는 관측각은 1.05°가 된다.

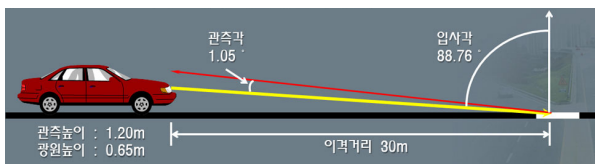


그림 4. 노면표시 재귀반사 관측기준(ASTM E1710-11)

2) ASTM E2176

ASTM E1710 제정 이후, 우천상태에서의 노면표시의 재귀반사성능 측정기준을 마련하기 위해 ASTM E2176-01 기준이 제정되었다. 지속적인 강수상태(Continuous wetting)에서의 노면표시 재귀반사율을 측정하며, 기준 강수량은 9.3in/h(240mm/h)이다.

3) ASTM E2177

ASTM E2177은 ASTM E2176과 더불어 우천 시 재귀반사성능 측정기준을 위하여 마련되었다. ASTM E2176이 약천후 시의 측정이라면 ASTM E2177은 적은 강수량에서의 노면표시 측정을 의미한다. 노면표시에 충분한 양의 물을 살포한 후 45초동안 기다린 뒤에 재귀반사율을 측정한다.

2.4. 연구 동향

2.4.1. 우천 시 재귀반사율

2000년대 초반, 우천 시 노면표시 재귀반사성능의 중요성이 점차 부각되었다. ASTM에서는 2001년에 우천 시 노면표시 재귀반사성능 판독기준을 제정하였고 다양한 연구가 시행되었다.

Schnell(2003)은 야간상태에서 다양한 종류의 노면표시의 운전자 주행 시인거리와 노면표시 재귀반사율을 여러 기상상황을 적용하여 측정하였다. 시인거리 증가

에 영향을 끼치는 요소로는 bead의 굴절률 감소, 강수량의 증가, 차량속도의 증가 등이 있는 것으로 연구되었다. 또한, ASTM 기준으로 재귀반사율을 측정하여 건조 시>습윤 시>우천 시 순서로 높은 재귀반사율을 보이는 것으로 측정되었다.

Carslon(2005)은 노면표시 재귀반사실험을 실내외 실외로 구분하여 시행하였으며, 도로 경사 2% 시 수평상태에 비해 재귀반사율이 20% 증가하고 경사도 4% 시 수평상태에 비해 재귀반사율이 50% 이상 증가하는 것으로 연구되었다.

Gibbons(2007)는 일반 bead 페인트식, 대구경 bead 페인트식, Thermoplastic, 테이프식 노면표시를 대상으로 주변 불빛, 도로 포장 종류, 차량 종류를 구분하여 주행 중 시인거리를 측정하였다. 테이프식>Thermoplastic>대구경 bead 페인트식>일반 bead 페인트식 순서로 먼 곳에서 노면표시 인식이 가능한 것으로 나타났으며, 주변 불빛이 있을 때·콘크리트 포장일 때·운전자 눈높이가 높을 때 시인거리가 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 재귀반사율 200mcd/m²·Lux이 충분한 시인거리 확보를 위한 적정 요구 수준인 것으로 연구되었다.

Pike(2007)는 18가지 노면표시를 건조·습윤·16가지 강수량을 구분하여 재귀반사율을 측정하였다. 강수량과 노면표시의 종류는 모두 재귀반사율과 관련이 있는 것으로 나타났으며 서로간의 상호작용도 존재하는 것으로 관측되었다. 그리고 ASTM E2176의 Continuous wetting 기준인 시간당 강수량 9.5inch(241mm/h)는 실제 관측되는 강수량에 비해 과도하게 많은 양이라는 것을 지적하였다.

2.4.2. 노면표시 시인성과 사고발생간의 상관관계

2000년대 초·중반에는 노면표시의 성능검증에 관한 연구가 주로 진행되다가 2000년대 후반부터 노면표시의 안전개선 효과에 관한 연구가 이루어지기 시작하였다.

Smadi(2008)는 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/m²·Lux 이하 구간에 한해서 유의하게 나타나

는 것으로 분석되었다.

Donnel(2009)는 다차로 고속도로에서 백색 길가장 자리선의 시인성을 개선할 경우, 재귀반사율 $50\text{mcd}/\text{m}^2 \cdot \text{Lux}$ 개선 시마다 사고율이 약 18%씩 감소하는 것으로 추정하였다.

2.4.3. 노면표시 재귀반사율 감소에 따른 생애주기

노면표시는 초기 설치 후 시간의 경과에 따라 재귀반사율이 감소하게 되며 일정 수준 이하로 떨어졌을 때에는 재도색을 해야 한다. 감소 폭은 노면표시의 재질 및 주변 환경에 따라서 변화하게 되는데 이러한 변화에 영향을 끼치는 요인에 대해서 분석이 이루어졌다.

Sarasua(2003)는 비선형, 선형의 복합모형으로 다양한 노면표시의 성능저하 함수를 산출하여 노면표시 종류·노면표시 표면의 종류·재도색 시기에 따라 재귀반사율이 결정되는 것을 확인하고, 온도·습기·교통량은 관계가 없다고 나타내었다.

Kopf(2004)는 mobile retroreflectometer를 이용하여, 색상, 교통량에 따른 노면표시 종류별 성능저하 모형을 개발하였다.

Bahar(2006)는 Inverse polynomial regression을 이용하여 노면표시 성능저하와 시간과의 관계를 나타내고, 노면표시의 종류·교통량은 관계가 없다고 결론을 내렸다.

3. Bead 최적 배합비율 산정 실험

3.1. 실험 설계

3.1.1. 노면표시 샘플 제작

Bead 배합별 재귀반사율을 측정하기 위해 굴절률 1.5, 1.9, 2.4 bead를 20% 분포 단위로 다양하게 혼합하여 실험용 노면표시 샘플을 제작하였다. Binder는 상온경화형 페인트식인 Cold Plastic MMA를 선택하였으며, 샘플의 크기는 휘도계로부터 정확한 측정값을 구해내기 위하여 최소 측정 넓이인 $70 \times 400(\text{mm})$ 보다 큰 $200 \times 400(\text{mm})$ 로 결정하였다.

샘플 한 개당 Binder 도포량은 $32\text{ml}(44.8\text{g})$ 이며 bead는 총 10g 를 도포하여 각각 다른 bead 비율을 가진 23개 샘플을 제작하였다.

3.1.2. 도로환경

경사도는 한국도로공사의 도로설계요령에 따라 표준

횡단경사인 2.0%로 설정하였다. 또한, 국내에서는 시공성과 편경사 접속 시의 문제점들을 고려하여 단일경사를 주로 적용하고 있기 때문에 빗물이 중분대로부터 바깥쪽으로 흐르는 것으로 가정하였다.

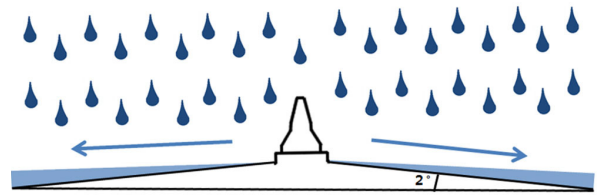


그림 5. 단일경사 적용 시 빗물의 흐름

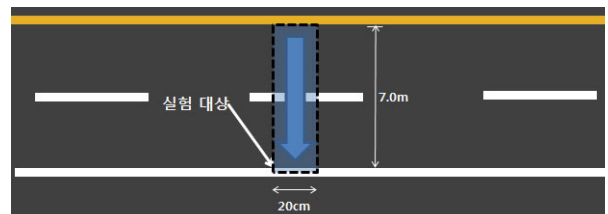


그림 6. 실험 대상의 도로 상황 적용

3.1.3. 측정 방법

기상상태를 총 다섯가지로 구분하여 건조상태·젖은 상태·강수량 $5 \cdot 10 \cdot 20\text{mm}/\text{h}$ 상태를 구현하여 노면표시별 재귀반사를 측정하였다. 건조상태는 노면이 완전 건조한 상태에서 측정하였으며, 젖은 상태는 노면에 1분간 116.7ml 의 물을 뿌리고 40초간 기다린 후 측정하였다. 그리고 강수량 $5 \cdot 10 \cdot 20\text{mm}/\text{h}$ 는 각각 분당 $117 \cdot 233 \cdot 467\text{ml}$ 양의 물을 뿌리면서 30초 이상 경과 후에 측정하였다.



그림 7. 노면표시 재귀반사 측정

3.2. 실험 결과

건조상태(dry)에서는 대부분의 노면표시 샘플이 기준치인 $250\text{mcd}/\text{m}^2 \cdot \text{Lux}$ 를 초과하였다. 굴절률 1.5 bead 노면표시는 $313\text{mcd}/\text{m}^2 \cdot \text{Lux}$ 로 건조상태 기준치인 $250\text{mcd}/\text{m}^2 \cdot \text{Lux}$ 보다 약간 높은 값을 나타냈다. 그리고 1.9 bead는 $2,495\text{mcd}/\text{m}^2 \cdot \text{Lux}$ 로 매우 높은 값을 나타

냈으며 건조 시 최적의 재귀반사율을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 반면 2.4 bead는 212mcd/m²·Lux로 측정되어 기준치인 250mcd/m²·Lux에 못미쳐, 건조 시에는 효과적인 재귀반사를 수행해내지 못함을 알 수 있었다.

젖은 상태(recovery)에서는 굴절률 1.5와 1.9 bead의 재귀반사율이 건조 시에 비하여 크게 감소하였으나 2.4 bead는 크게 증가하여 건조 시 굴절률보다 약 다섯 배 증가한 1,166mcd/m²·Lux를 나타냈다. 5mm/h 강수 시 재귀반사율에서 굴절률 2.4bead가 포함되지 않은 노면표시는 190mcd/m²·Lux를 밑돌았으며, 40% 이상 포함된 노면표시는 240mcd/m²·Lux 이상의 높은 재귀반사율을 보였다.

10mm/h와 20mm/h 강수 시에도 2.4 bead가 많이 포함되어있는 노면표시가 높은 재귀반사율을 보였으며, 2.4 bead는 20mm/h 강수 시에도 231mcd/m²·Lux의 재귀반사율을 나타내는 등 우천 시에 높은 성능을 발휘했다.

표 2. Bead 배합별·강수량별 재귀반사 측정값

번호 (n)	Bead(%)			반사성능(mcd/m ² ·Lux)				
	1.5	1.9	2.4	건조상태	젖은상태	5mm/h	10mm/h	20mm/h
1	100	0	0	313	156	94	40	12
2	80	20	0	607	202	90	39	16
3	60	40	0	629	351	187	97	29
4	40	60	0	1,676	311	111	42	15
5	20	80	0	2,356	246	136	60	23
6	0	100	0	2,495	221	90	39	22
7	80	0	20	176	294	174	108	50
8	60	20	20	993	245	76	35	15
9	40	40	20	1,096	453	225	140	63
10	20	60	20	1,836	396	213	98	47
11	0	80	20	2,437	439	240	156	66
12	60	0	40	219	437	244	131	66
13	40	20	40	595	524	337	211	135
14	20	40	40	1,246	494	280	123	41
15	0	60	40	1,742	613	373	245	92
16	40	0	60	311	602	411	249	113
17	20	20	60	749	550	512	313	156
18	0	40	60	1,076	632	408	210	84
19	20	0	80	218	693	571	348	166
20	0	20	80	813	633	440	293	105
21	0	0	100	212	1,166	793	484	231
22	20	10	70	331	460	332	244	161
23	10	20	70	425	523	400	261	156

4. 노면표시 경제성 분석

4.1. 개요

현장에 설치되어 있는 노면표시에는 대부분 굴절률 1.5 glass bead가 도포되어 있다. 하지만 굴절률 1.5 bead는 야간 우천 시에 적절한 재귀반사를 하지 못해 충분한 시인성을 확보하지 못한다. 반면 고굴절 bead는 우천 시에 높은 재귀반사 성능을 발휘하여 높은 시인성 확보가 가능하지만, 가격이 고가라는 단점이 있어서 이를 적용하기 위해 부분적으로 혼합하여 사용할 수 있다. 따라서 본 분석에서는 각각 상이한 굴절률의 bead 배합 변화에 따라 발생할 노면표시의 편익과 비용을 산정하여 경제성을 분석하였다.

4.2. 비용 분석

본 실험에 사용되었던 상온경화형 페인트 MMA방식에서는 재료에 따른 시공방식의 차이는 없다. 따라서 bead 배합에 따른 비용의 차이는 재료비 차이에 의해서만 발생한다. 차선 1개 당 bead 단가는 1km 설치 시 굴절률 1.5 bead가 약 6,563원이다. 그러나 1.9 bead는 98,438원이며 2.4 bead는 131,250원으로 기존의 굴절률 1.5 bead에 비하여 각각 15배, 20배 가량의 가격 차이가 발생한다.

표 3. Bead 별 설치 단가

(단위 : 원)

	1.5	1.9	2.4
kg당 재료 단가	700	10,500	14,000
km/line 당 단가	6,563	98,438	131,250

Donnel(2009)의 연구에 따르면 다차로 고속도로에서 길가장자리선의 시인성을 개선할 경우 사고의 감소가 유의하게 나타난다고 제시하고 있다. 따라서 국내 고속도로 측선(길가장자리선)에 대한 개선을 대상으로 하였으며, 차선 소요는 양방향 1개 차로씩 필요하다. 2010년 말 기준으로 전국 고속도로에 설치되어 있는 측선 길이는 총 14,316km에 달하며 이에 대한 차선 개선 비용을 산정하였다.

4.3. 편익 분석

4.3.1. 개요

교통시설투자의 시행으로 발생하는 편익은 교통 측면의 직접편익과 사회적 편익인 간접편익으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 노면표시의 개선으로 발생하는 편익 중 정량화가 가능한 교통 측면의 직접편익에 해당하

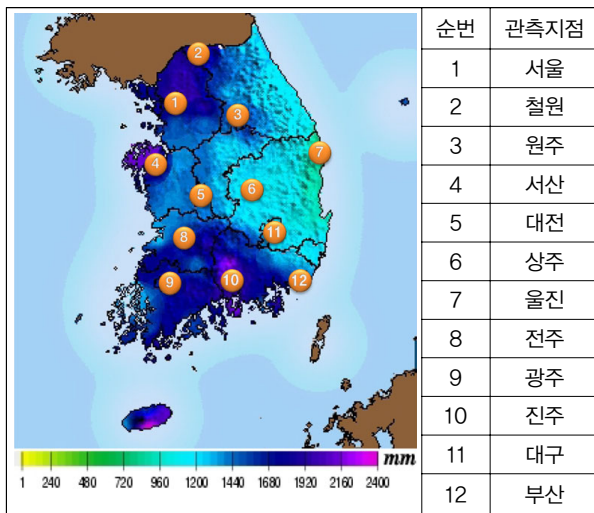
는 교통사고 감소 편익을 산출하였다.

$$\text{편익} = \text{사고비용}_{(\text{개선전})} - \text{사고비용}_{(\text{개선후})} \quad (1)$$

기준에 발생한 사고에 대한 사고비용에서 새로운 노면표시 설치 시 발생 추정되는 사고비용과의 차이를 편익으로 산정하였다.

4.3.2. 관련 자료 수집

노면표시의 강수량별 재귀반사율을 정확하게 구하기 위해서는 1mm/h 단위의 값이 필요하다. Recovery(1mm/h 미만), 5·10·20mm/h 강수상태별 재귀반사율은 본 연구에서 실험한 결과값을 적용하였고, 나머지 강수량은 보간법을 사용하여 계산하였다. 또한, Smadi(2008)의 연구 결과에 따라 재귀반사율 200mcd/m²·Lux 이상은 시인성이 충분히 확보되어 사고발생에 영향을 끼치지 않는다고 가정하여 모두 동일하게 200mcd/m²·Lux으로 적용하였다.



출처: 기상청, 2010 기상연보, p15, 2011

그림 8. 강수량 측정 도시

그리고 국내 12개 지점의 2002~2011년 총 10년간의 시간당 야간 강수량을 조사하였다. 각 도시별 강수량별 지속시간을 1시간 단위로 합산하여 우천 시 강수량별 지속시간 비율을 산정하였다.

최근 5년간의 우천 시 고속도로 교통사고 발생 건수와 야간 시간대 사고비율을 통해 산정한 야간 우천 시 고속도로 연간 사고 발생건수 및 사상자 수는 다음과 같다.

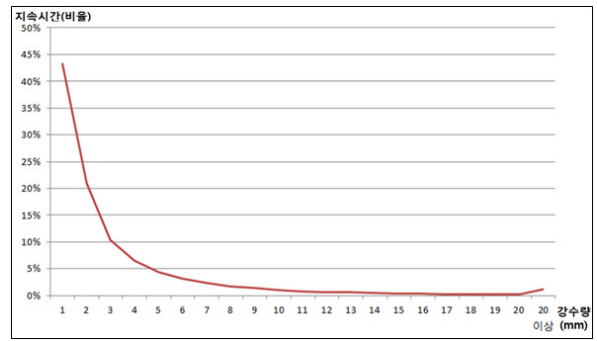


그림 9. 강수량별 지속시간 비율

표 4. 야간 우천 시 교통사고 발생 및 사상자 수

구 분	연평균 발생량	사고 1건당 발생량
발생건수	222.96	-
사망자수	34.43	0.1544
부상자수	462.17	2.0729

교통사고 발생으로 인한 손실금액인 교통사고비용 원단위는 한국개발연구원의 자료를 사용하였다.

표 5. 도로부문의 교통사고비용 원단위

(단위 : 만원)

구 분	2007년		2010년	
	사망	부상	사망	부상
사상자 1명당 사고비용 (PGS 포함)	52,741	2,156	62,273	2,546

주) 2007년 기준비용에 소비자물가지수(1,1807)를 적용하여 2010년 기준으로 보정하였음

출처: 한국개발연구원, "도로·철도부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)", 2008

4.3.3. 편익 산정

노면표시의 개선 전과 개선 후의 사고비용의 차이를 개선하기 위해서는 노면표시 시인성이 사고감소에 끼치는 정도를 추정해야 한다. Donnell(2009)의 연구에 따르면 다차로 고속도로에서 노면표시 축선 시인성 개선 시 교통사고의 절감효과가 있다고 나타내었다. 사고 발생 기대건수에 대한 수식을 다음과 같이 만들었으며, 차선 재귀반사율의 회귀파라미터 β₂를 -0.004로 도출해내었다.

$$Y_i = e^{\alpha} \times L \times MADT^{\beta_1} \times e^{\beta_2 X} \quad (2)$$

Y_i : 도로구간 i 내에서의 1개월동안 기대 사고 건수

α : 상수(-5.68)

L : 구간 길이(mile)

$MADT$: 월간 일평균 교통량(veh/day)

β_1 : $MADT$ 의 회귀 파라미터(0.44)

β_2 : 차선 재귀반사율의 회귀 파라미터(-0.004)

X : 차선 재귀반사율(mcd/m²·Lux)

우천시에는 강수량 변화에 따라 차선의 재귀반사율 X 가 달라지게된다. 따라서 1mm/h 미만의 recovery 상태부터 20mm/h까지의 강수량별 지속시간을 반영하여, 재귀반사율 변화에 따른 지속시간 가중치를 산정하여 계산하면 다음과 같이 풀이된다.

$$Y_R = \sum_{k=0}^{20} \left[(P_k \times e^{-0.004X_{1k}}) \times \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{12} (e^\alpha \times L_i \times MADT_{it}^{\beta_1}) \right] \times R \quad (3)$$

$$= \sum_{k=0}^{20} \left[(P_k \times e^{-0.004X_{1k}}) \times \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{12} (e^\alpha \times L_i \times MADT_{it}^{\beta_1}) \right] \times R$$

여기서, X_{nk} : 차선 n 에서 강수량 k 일 때의 재귀반사율(mcd/m²·Lux)

n : 차선 종류($n=1$: 기존 차선, $n \geq 2$: 개선 차선)

P_k : 강수량별 지속시간 비율

$$\left(\frac{\text{강수량 } k \text{ 지속시간}}{\text{총우천지속시간}} \right)$$

k : 시간당 강수량

($k=0$: Recovery, $k \geq 1$: k mm/h)

기존 국내 고속도로의 노면표시에는 굴절률 1.5 bead를 설치하였으므로, 실험 결과에 따른 강수량별 재귀반사율과 강수량 별 지속시간 비율을 적용하여 계산하면

$$\sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{1k}}) = 0.59527 \text{이 된다. 이를 적용하면 (4)}$$

와 같이 정리된다.

$$Y_R = \sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{nk}}) \times \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{12} (e^\alpha \times L_i \times MADT_{it}^{\beta_1}) \times R \quad (4)$$

$$= 0.59527 \times \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{12} (e^\alpha \times L_i \times MADT_{it}^{\beta_1}) \times R$$

최근 5년간의 야간 우천 시 발생하는 연간 평균 사고 건수는 222.96건이므로 이를 적용하면 다음과 같다.

$$Y_R = 222.96$$

$$= 0.59527 \times \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{12} (e^\alpha \times L_i \times MADT_{it}^{\beta_1}) \quad (5)$$

$$\therefore \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{12} (e^\alpha \times L_i \times MADT_{it}^{\beta_1}) \times R = 374.55 \quad (6)$$

따라서 국내 고속도로 축선의 재귀반사율 변화에 따른 야간 우천 시 연평균 고속도로 발생 사고 건수는 (7)과 같이 정리된다.

$$Y_R = \sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{nk}}) \times 374.55 \quad (7)$$

축선의 재귀반사율 개선에 따른 고속도로 사고 건수의 감소를 확인하기 위해서는 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$Y_{R(1)} - Y_{R(n)}$$

$$= \left[\sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{1k}}) \times 374.55 \right] - \left[\sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{nk}}) \times 374.55 \right]$$

$$= 374.55 \times \left[\sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{1k}}) \right] - \left[\sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{nk}}) \right] \quad (8)$$

여기서, $Y_{R(n)}$: 차선 n 설치 시 연간 야간우천 발생 사고 건수

사고 발생으로 인한 손실비용을 금전적 가치로 환산하기 위해서는 사망자 수와 부상자 수를 산정해야 한다. 최근 5년간의 고속도로 야간 우천 시 사고 1건당 사망자 수는 0.148명이며 부상자 수는 2.108명으로 집계되었다. 이를 적용하여 사망자 수와 부상자 수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$A_s = Y_n \times a_s$$

$$= \sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{nk}}) \times 374.55 \times a_s \quad (9)$$

여기서, A_s : 유형별 사고 발생 사상자 수

a_s : 야간 우천 시 사고 1건당 유형별 발생 사상자 원단위

(사망 $a_1 = 0.148$, 부상 $a_2 = 2.108$)

$$T_s = A_s \times t_s$$

$$= \sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{nk}}) \times 374.55 \times a_s \times t_s \quad (10)$$

여기서, T_s : 연간 유형별 사고발생 총비용

t_s : 유형별 사고비용 원단위

$$Z_n = \sum_{s=1}^2 (T_s) \quad (11)$$

$$= \sum_{s=1}^2 \left[\sum_{k=0}^{20} (P_k \times e^{-0.004X_{nk}}) \times a_s \times t_s \right] \times 374.55$$

여기서, Z_n : 차선 n 설치 시 연간 교통사고 발생 총비용

s : 사고 유형(1: 사망, 2: 부상)

따라서 차선 n 설치 시 발생하는 편익은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$B_n = Z_1 - Z_n$$

$$= \sum_{s=1}^2 \left(\sum_{k=0}^{20} \left[P_k \times (e^{-0.004X_{1k}} - e^{-0.004X_{nk}}) \right] \times a_s \times t_s \right) \times 374.55 \quad (12)$$

여기서, B_n : 차선 n 설치 시 발생 편익

4.4. 경제성 분석결과 비교

표 6에서 산정된 바와 같이 경제성 분석결과 배합비율 1.5 : 1.9 : 2.4 순서로 8:2:0, 6:4:0, 8:0:2, 6:0:4의 배합비율일 때 B/C 1.0 이상으로 경제성이 있는 것으로 나타났으며, 8:0:2 비율일 때 B/C 1.92로 가장 높은 경제성을 보였다. 또한, 경제성이 확보되는 대안 중 가장 높은 편익을 가지는 노면표시는 6:0:4 비율로 약 74억원의 편익이 발생되며 B/C는 약 1.04 정도로 추정되었다. 반면에, 굴절률 2.4 bead가 60% 이상 포함되어 강수량이 많이 나타날 때에도 높은 시인성을 유지하는 노면표시의 경우엔 큰 비용이 소요되기 때문에 경제성은 확보되지 않는 것으로 분석되었다.

표 6. 우천형 노면표시 경제성 분석결과

번호 (n)	구성 (1.5:1.9:2.4)	편익 (만원)	비용 (만원)	B/C
1	10:0:0	-	-	-
2	8:2:0	343,297	263,057	1.31
3	6:4:0	678,336	526,113	1.29
4	4:6:0	526,067	789,170	0.67
5	2:8:0	566,999	1,052,226	0.54
6	0:10:0	400,486	1,315,283	0.30
7	8:0:2	685,767	357,005	1.92
8	6:2:2	396,622	620,062	0.64

9	4:4:2	742,484	883,118	0.84
10	2:6:2	702,553	1,146,175	0.61
11	0:8:2	755,699	1,409,231	0.54
12	6:0:4	741,186	714,011	1.04
13	4:2:4	799,078	977,067	0.82
14	2:4:4	730,455	1,240,124	0.59
15	0:6:4	790,285	1,503,180	0.53
16	4:0:6	796,547	1,071,016	0.74
17	2:2:6	807,649	1,334,072	0.61
18	0:4:6	782,957	1,597,129	0.49
19	2:0:8	809,376	1,428,021	0.57
20	0:2:8	796,452	1,691,078	0.47
21	0:0:10	814,043	1,785,026	0.46
22	2:1:7	807,684	1,381,047	0.58
23	1:2:7	807,031	1,512,575	0.53

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 우천형 노면표시의 도입 시의 경제성 분석을 실시하였다. 굴절률 1.5·1.9·2.4 bead를 혼합하여 강수량 변화에 따른 재귀반사율을 측정하였으며, 각 배합별 시인성 개선으로 인한 사고감소 편익을 산출하여 경제성을 분석하였다.

분석결과 기준에 사용되는 굴절률 1.5 bead가 100% 구성되었던 노면표시 대신 굴절률 1.5가 80%, 2.4가 20% 혼합된 노면표시를 사용할 경우 B/C가 1.92로 높은 경제성을 보이는 것으로 나타났다. B/C 1.0 이상의 대안 중에서는 1.5=60%, 2.4=40% 비율일 때 74억 원으로 가장 높은 사고절감편익을 나타냈으며 B/C는 1.04로 추정되었다. 반면, 편익이 약 81억 원으로 가장 높게 추정된 굴절률 2.4로 100% 구성된 노면표시의 경우 비용이 워낙 과다하게 소요되어 B/C는 0.46에 그쳤다.

굴절률 1.9와 2.4 bead은 각각 건조상태와 습윤상태에서 1000mcd/m²·Lux를 초과하며 매우 높은 재귀반사율을 보이지만, 200mcd/m²·Lux 이상이라면 사고 감소에 끼치는 영향력은 동일하다는 기존 연구사례가 있었기 때문에 늘어난 재귀반사율만큼 사고감소효과는 크지 않은 것으로 적용되었다. 또한, 고굴절 bead를 전체 적용하는 것은 기존의 굴절률 1.5 bead보다 15~20배에 달하는 높은 원가 때문에 경제성이 높지는 않은 것으로 나타났다.

강수량이 많아짐에 따라 사고 발생률과 사고 규모가 증가할 수 있음에도 불구하고, 본 연구에서는 사고자료 부족으로 우천 시 사고 발생 확률과 규모를 모두 동일하

게 가정하였다. 그리고 시공 이후에 노면마찰과 시간경과로 인해 감소되는 재귀반사율에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 향후에는 강수량의 변화에 따른 사고 발생 확률 연구와, 노면마찰로 인한 재귀반사율 감소에 대한 연구가 함께 수행되어 보다 정밀한 분석이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 07-기술혁신-A01)과 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-0029446).

참고 문헌

경찰청(2005), "교통노면표시 설치·관리 매뉴얼".
 국토해양부 도로정책관(2010), "차선도색 특별 시방서(표준안)".
 국토해양부(2011), "도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙".
 기상청(2011), "2010 기상연보".
 도로교통공단 교통사고통계 DB, "<http://taas.koroad.or.kr>".
 남영국(2004), "도로포장공학", 구미서관.
 도철웅(2004), "교통공학원론(상)", 청문각.
 여운웅·이대원·배광수(1998), "노면표시 반사성능 향상을 위한 최적조건 개발", *대한교통학회 추계발표회*, pp. 342-351.
 여운웅(2007), "Road Marking Characteristics of Night Visibility", 연세대학교 박사학위논문.
 오흥운·이현석(2003), "교통사고와 차선반사도", *도로포장공학회지 제5권 제1호*, pp. 53-59.
 장동호(2010), "노면표시 형태별 재귀반사 비교평가에 관한 연구", 아주대학교 석사학위논문.
 한국도로공사(2003), "고속도로 차선반사도 관리기준 설정 연구".
 한국교통연구원(2007), "2005년 교통사고비용 추정".
 한국개발연구원(2008), "도로·철도 부문 사업의 예비타당성 조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)".
 한국도로공사(2009), "고속도로공사 전문시방서 토목편".
 한국도로공사(2009), "도로설계요령".
 ASTM E1710-11(2011), "Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Pavement Marking Materials with CEN-Prescribed Geometry Using a Portable Retroreflector".
 ASTM E2176-01(2001), "Standard Test Method for Measuring the Coefficient of Retroreflected Luminance (RL) of Pavement Markings in a Standard Condition of Continuous Wetting".
 ASTM E2177-11(2011), "Standard Test Method for Measuring the

Coefficient of Retroreflected Luminance (RL) of Pavement Markings in a Standard Condition of Wetness".

Bahar G., Masliah M., Erwin T, Tan E, and Hauer E(2006), "Pavement Marking Materials and Markers: Real-World Relationship Between Retroreflectivity and Safety Over Yime.", *NCHRP web-only document 92*, Transportation Research Board, Washington, D.C.
 Carlson P.J., Miles J.D., Pratt M.P., and Pike A.M.(2005), "Evaluation of Wet-Weather Pavement Markings:First Year Report", *Rep. No. FHWA/TX-06/0-5008-1*, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office.
 Carlson P.J., Miles J.D., Pike A.M., and Park E.S.(2007), "Evaluation of Wet-Weather and Contrast Pavement Marking Applications: Final Report", *Rep. No. FHWA/TX-07/0-5008-2*, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office.
 CEN EN 1436(1997), "Road Marking Materials".
 Donnell E.T., 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 (2103)*, pp. 50-60.
 Gates T.J., Hawkins Jr. G, and Rose E. R.(2003), "Effective Pavement Marking Practices for Sealcoat and Hot-Mix Asphalt Pavements", *Rep. No. FHWA/TX-07/0-5008-2*, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office.
 Gibbons R.B., and Hankey J.(2007), "Wet Night Visibility of Pavement Markings Dynamic Experiment", *Transportation Research Record(2015)*, pp. 73-80.
 Schnell T., Aktan F., and Lee Y.-C.(2003), "Nighttime Visibility and Retroreflectance of Pavement Markings in Dry, Wet, and Rainy Conditions", *Transportation Research Record(1824)*, pp. 144-155.
 Kopf J.(2004), "Reflectivity of Pavement Markings: Analysis of Retroreflectivity Degradation Curves.", *Rep. No. WA-RD 592.1*, Univ. of Washington, Seattle.
 Pike A.M., Hawkins Jr. H.G., and Carlson, P.J.(2007), "Evaluating the Retroreflectivity of Pavement Marking Materials under Continuous Wetting Conditions", *Transportation Research Record(2015)*, pp. 81-90.
 Sarasua W. A., Clarke D. B., and Davis W. J.(2003), "Evaluation of Interstate Pavement Marking Retroreflectivity.", *Rep. No. FHWA-SC-03-01*, Clemson Univ., Clemson, S.C.
 Smadi O., Souleyrette R.R., Ormand D.J., and Hawkins N.(2008), "Pavement Marking Retroreflectivity Analysis of Safety Effectiveness", *Transportation Research Record(2056)*, pp. 17-24.
 (접수일 : 2012. 3. 2 / 심사일 : 2012. 3. 21 / 심사완료일 : 2012. 4. 16)