

열가소성 차선도장에서 반사유리알의 함침특성

홍인권 · 이창근 · 이승범[†]

단국대학교 화학공학과
(2015년 1월 29일 접수, 2015년 3월 3일 심사, 2015년 3월 9일 채택)

Embedment Properties of Reflective Beads for Thermoplastic Road Markings

In Kwon Hong, Chang Geun Lee, and Seung Bum Lee[†]

Department of Chemical Engineering, Dankook University, Gyeonggi 448-701, Korea
(Received January 29, 2015; Revised March 3, 2015; Accepted March 9, 2015)

초 록

열가소성 차선도료는 세계적으로 가장 보편적으로 사용되고 있는 차선도료이다. 그러나 국내 적용되고 있는 차선도료는 내구성이 1년 밖에 되지 않아 선진외국에 비해 수명(3년 이상)이 상대적으로 짧다. 이를 개선하고자 기존에 사용되고 있는 석유계 수지에 polyolefin 수지를 추가로 첨가하고, LDPE 왁스를 기능성이 부여된 산화 PE 왁스의 대체 사용으로 기존의 열가소성 차선도료의 단점을 보완하였다. 차선도료의 용융점도는 220°C의 온도에서 분사 도장방식의 최적 점도인 500 cP 이하가 되게 설계하였고, 도료를 도포한 후 반사유리알을 살포하는 시간간격을 1 s로 하여 함침비를 50~60%로 조절하였다. 또한 filler 중 CaCO₃의 첨가량을 40 wt% 이하로 하여 유리알 고착비를 향상시켰다. 열가소성 차선도료의 내마모성 평가를 위하여 4가지 조건에서의 재귀 반사성능을 측정하였다. 교통사고 발생 최소화와 운전자의 노령화 등으로 운전자 주행 중 최소 야간재귀 반사성능계수는 150 mcd · m² · lux⁻¹ 이상을 만족하여야 하며, 마모횟수 증가에 따른 야간재귀 반사성능 저하가 가장 적은 TPRM-7를 열가소성 차선도료의 최적 배합비율로 결정하였다.

Abstract

Thermoplastic road markings are one of the most widely used road markings in the world. However, the durability of domestic road markings is relatively shorter than that of the global average of, approximately, three years. To overcome it, the conventional thermoplastic road markings were prepared by adding polyolefin and oxidized PE wax to conventional petroleum resin. In addition, the melting viscosity was designed below 500 cP at 220 °C as well as the optimum viscosity for spray painting, and embedding ratio of glass beads were controlled about 50~60% by spraying in an interval of 1 second. Also the glass bead adhesive ratio was improved by reducing the amount of CaCO₃ below 40 wt%. The retroreflectivity was tested under four different conditions to evaluate the abrasion resistance of thermoplastic road markings. The retroreflectivity coefficient satisfied the international standard (150 mcd · m² · lux⁻¹) in this study, and TPRM-7 was determined as an optimal ratio.

Keywords: thermoplastic road markings, embedding ratio, retroreflectivity, abrasion resistance

1. 서 론

차선은 주간뿐만 아니라 야간에도 운전자에게 명확하게 보여 본래의 성능을 발휘해야 한다. 하지만 주간에는 가시광선 영역에서 명확하게 차선을 인지할 수 있지만 야간에는 조명이 없어 명확하게 차선을 운전자가 인지할 수 없기 때문에 차선도료의 표면에 반사유리알(reflective beads)을 포설함으로써 전조등의 빛을 운전자에게로 재귀 반사(retroreflection)하여 야간시인성을 부여한다[1-4]. 그러나 국내에서 사용되고 있는 차선도료는 시공 후 일정기간이 경과하면 자동차 바퀴에 의해 도장이 마모되고, 반사유리알이 탈리되어 시인성이 급격

히 저하된다[5-7]. 특히 우천 시 야간에 차선의 품질은 빗물의 수막에 의해 재귀 반사성능(retroreflectivity)을 상실시키므로 시인성을 열악하게 하여 위험하다[8-13]. 열가소성 차선도료(thermoplastic road markings)는 아스팔트 혹은 시멘트 콘크리트 노면 위에 용융상태인 도료를 사출 또는 분사한 후 도막이 굳기 전에 반사유리알을 함침 고정시키는 방식으로 도장한다. 따라서 도장 후 5 min 이내에 견고한 도막을 형성하기 때문에 신속하게 교통 개방이 필요한 곳에 적용 가능하고, 도막강도가 우수하여 3년 이상의 내구수명을 갖는다. 이들 열가소성 차선도료는 수지와 색상을 구현하는 착색 안료, 도막의 인장강도 및 점도조절을 위한 첨가제, 야간 시인성 확보를 위한 반사유리알과 각종 첨가제로 구성된다. 열가소성 차선도료는 수지의 종류에 따라 알키드수지계 도료(alkyd resin type paint)와 석유수지계 도료(petroleum resin type paint)로 분류된다. 알키드수지계 도료는 식물에서 추출한 지방산 또는 로진산을 원료로 사용한 열가소성 수지로서 도막의 강도와 내구성 및 내마모성이 우수하나 불포화지방산으로 인한 탄화 및

[†] Corresponding Author: Dankook University,
Department of Chemical Engineering, Gyeonggi 448-701, Korea
Tel: +82-31-8005-3559 e-mail: leesb@dankook.ac.kr

Table 1. Specifications of Thermoplastic Road Markings

Composition (wt%)	Conv.	TPRM-1	TPRM-2	TPRM-3	TPRM-4	TPRM-5	TPRM-6	TPRM-7
C ₅ aliphatic HC resin	18	16	16	16	16	18	18	18
polyolefin resin	-	2	2	2	2	2	2	3
LDPE wax	1	1	-	-	-	-	-	-
oxidized PE wax	-	-	1	1	1	1	0.5	0.5
di-octyl phthalate	1	1	1	1	1	1	1.5	1.5
CaCO ₃	56	56	56	48	41	39	39	38
glass beads	20	20	20	28	35	35	35	35
pigment (TiO ₂)	4	4	4	4	4	4	4	4
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

황변(yellowing) 문제가 지적되고 있다[14-15]. 석유수지계 도료는 석유에서 추출한 열가소성 수지로서 분자량 조절 및 반응기 설계가 용이하여 다양한 분야에서 사용되고 있다[16]. 열가소성 차선도료의 노면 접착 메커니즘(road surface bonding mechanism)은 아스팔트 포장의 경우 아스팔트 표면을 녹여 상호 열접착되지만 콘크리트 포장의 경우에는 도료가 콘크리트 공극에 침투하여 진행된다. 따라서 차선도료와 콘크리트 노면의 접착성질 및 도막의 내구성이 저하될 경우 노면과의 박리 또는 도막 crack 등이 발생된다. 따라서 차선도장의 경우 도장 온도에 따른 용융 점도와 함침비(embedding ratio) 및 유리알 고착비(glass bead adhesive ratio)가 매우 중요하다[17]. 따라서 본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 열가소성 차선도료의 용융점도와 함침비를 개선하기 위해 수지 및 왁스의 배합비율, 첨가제의 배합비율을 변화시켜 우수한 물리적 특성을 갖는 차선도료를 설계하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 열가소성 차선도료의 설계

기존에 사용되고 있는 열가소성 차선도료는 C₅ 지방족 탄화수소계 수지(C₅ aliphatic hydrocarbon resin)와 LDPE 왁스, 가소제(plasticizer), 첨가제인 calcium carbonate (CaCO₃)와 유리알(glass beads, average diameter = 370 μm), 백색안료 등을 혼합하여 제조한다. 본 연구에서는 기존 도료의 용융점도와 함침비를 개선하기 위해 수지 및 왁스의 배합비율, 첨가제의 배합비율 등을 변화시켜 열가소성 차선도료를 제조하였다. 실험에 사용된 석유수지계 도료의 수지로는 C₅ 지방족 탄화수소계 수지(R-1100S, Kolonindustries Co. Ltd.)에 polyolefin 수지(Affinity, Dow chemical)를 혼합하여 사용하였으며, 왁스는 LDPE 왁스(LC-101N, Lion ChemTech.)와 산화 PE 왁스(oxidized PE wax, LC-301E, Lion ChemTech.)를 사용하였다. 또한 혼합성(miscibility) 향상을 위하여 가소제로는 di-octyl phthalate (DOP)를 사용하였고, 첨가제로는 CaCO₃와 유리알을 혼합하여 사용하였다. 실험에 사용된 열가소성 차선도료의 배합비율을 Table 1에 나타내었다.

기존에 사용되고 있는 열가소성 차선도료의 경우 C₅ 지방족 탄화수소계 수지를 기본 수지로 사용하였으나, 본 연구에서 설계한 열가소성 차선도료인 TPRM-1~TPRM-7은 인장강도, 유리알 고착비를 개선하기 위하여 hydrocarbon계 수지에 가소제 역할을 하는 polyolefin 수지를 첨가하였다. 차선도료에 첨가되는 왁스성분은 주로 도장 후 광택도나 함침비를 개선하는 역할을 하지만 과량 첨가할 경우 도장의 부착력을 저하시킨다. 따라서 본 연구에서는 왁스의 종류와 첨가량에

따른 영향을 고찰하기 위해 기존에 사용되고 있는 LDPE 왁스와 기능성이 부여된 산화 PE 왁스를 비교 실험한 후 최적 첨가량을 결정하였다. 또한 첨가제로 사용된 CaCO₃와 유리알은 전체 도료의 73~76 wt% 첨가하였다. CaCO₃의 첨가량이 많으면 도료의 인장강도가 저하되어 crack이 발생할 수 있고, 유리알의 첨가량이 많으면 도장과정에서 스프레이 분사 막힘 등에 문제가 발생할 수 있어 배합비율이 매우 중요하다. 본 연구에서는 CaCO₃의 사용량을 줄이고, 유리알의 사용량을 최대 35 wt%까지 첨가하여 열가소성 차선도료를 설계하였다.

2.2. 열가소성 차선도료의 물성 분석

열가소성 차선도료의 물성 분석을 위해 용융점도, 인장강도, 연화점 등을 분석하였다. 용융점도는 브룩필드 점도계(RVDV-III Ultra, ASTM D4016)를 이용하여 160~220 °C 온도범위에서 측정하였으며, 연화점은 링과 볼을 이용한 장비(Ring-Ball apparatus, EN 1871)를 사용하여 측정하였다. 이 방법은 도료를 링 안에 채우고 13.9 g의 쇠구슬을 올린 후 glycerin 용액 내에 수평으로 위치시킨다. 용액의 온도를 5 °C/min으로 가열시키면서 구슬이 아래로 25.4 mm 내려왔을 때의 온도를 측정한다. 도료의 인장강도는 0~3.5 MPa 범위 접착강도 시험기(Elcometer 106, ASTM D4541)를 이용하여 측정하였으며, 유리알 고착비는 wet abrasion scrub 시험기(903/3, Sheen Co. Ltd., KS M6080/ASTM D3450)를 이용하여 산출하였다.

2.3. 열가소성 차선도료의 도장 특성

차선도료의 도장특성을 평가하기 위해 시편에 1.5 mm로 일정하게 도장한 후 시인성 향상을 위해 반사유리알(average diameter = 470 μm)을 390 g/m²로 살포하여 함침비 및 유리알 고착비를 분석하였다. 또한 내마모성 시험은 실물 마모시험기(wear simulator)를 이용하여 측정하였다. 실물 마모시험기는 직경 6.4 m의 회전판으로 구성되어 있으며, 회전속도는 5~120 km/h로 조절할 수 있다. 회전판 원형틀 내에 8개의 시험판 고정대(0.4 × 0.25 × 0.05 m)를 설치하고 표면은 아스팔트 재질을 사용하였다. 이 장비는 대칭으로 고정된 2개 조의 타이어 2개로 0~4,000 N 범위의 하중을 가하면서 회전시켰다. 내마모성 시험에 따른 결과는 주간재귀 반사성능(retroreflectivity at daylight and under road lighting)과 3가지 조건에서의 야간재귀 반사성능(retroreflectivity at night) -건조조건(dry test condition), 젖은조건(wetness test condition), 그리고 비오는 조건(rain test condition)-에서 마모횟수의 결과물로 나타낼 수 있다. 차선도장의 주간재귀 반사성능은 주간 또는 가로등이 있는 조건하에서 도로 표지의 재귀 반사성능

Table 2. Melting Viscosity of Thermoplastic Road Markings

Temp. (°C)	Conv.	TPRM-1	TPRM-2	TPRM-3	TPRM-4	TPRM-5	TPRM-6	TPRM-7
160	111,520	135,000	132,500	122,050	110,080	98,500	87,600	92,800
170	45,300	52,400	51,800	46,850	41,060	39,030	36,800	38,400
180	17,600	19,700	18,600	16,300	15,130	14,695	14,300	14,900
190	5,120	6,850	6,540	5,820	4,630	4,640	4,250	4,330
200	2,150	3,460	3,260	2,480	1,870	1,560	1,260	1,360
210	860	1,190	1,060	890	690	650	580	620
220	480	620	590	510	450	440	420	430

계수(luminance coefficient, Q_d)는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Q_d = \frac{L}{E} \quad (1)$$

여기서 L 은 확산 조명 조건 하에서 반사성능($\text{mcd} \cdot \text{m}^2$)이고, E 는 바닥면의 조도(lux)이다.

차선도장의 야간재귀 반사성능은 자동차의 전조등 빛이 역반사 되는 것을 측정하는 것이며, 야간재귀 반사성능계수(retroreflection luminance coefficient, R_L)는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$R_L = \frac{L_s}{E_s} \quad (2)$$

여기서 L_s 는 단일 광원에 작은 각도만큼 벌어진 장소에서 측정된 반사성능 값이고 E_s 는 광원이 조명 방향과 수직인 장소에서의 조도이다. 이에 따른 표준 측정 조건은 운전자의 눈높이가 노면에서 1.2 m이고 전조등의 높이가 0.65 m인 조건에서 거리 30 m되는 차선의 재귀 반사성능을 측정한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열가소성 차선도료의 용융점도

기준에 사용되고 있는 열가소성 차선도료는 C_5 지방족 탄화수소계 수지($T_g = 48$ °C, softening point = 106 °C)에 LDPE 왁스와 가소제를 혼합하여 제조된다. 이 도료의 도막은 견고하고 brittle한 성질을 나타내어 차량바퀴에 대한 내하중력(압축강도)이 우수하고 하중내구력은 좋으나, 도막 자체의 인장강도가 약한 단점을 가지고 있다. 따라서 도막에 crack이 형성되면 수분이 유입되어 노면과 접착력을 서서히 약화시켜 결국 노면과의 박리를 유발시키고, 유리전이온도가 높아 도막의 경화속도가 빠르기 때문에 반사유리알의 탈리현상이 발생될 수 있다. 또한 차선도막 표면에 반사유리알을 노출시키기 위해 첨가되는 LDPE 왁스는 도막과 반사유리알의 부착력을 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 C_5 지방족 탄화수소계 수지에 polyolefin 수지($T_g = -57$ °C, softening point = 68~70 °C)를 첨가하고, 기능성이 부여된 산화 PE 왁스를 사용하여 차선도료의 물성을 향상시키고자 하였다. Table 2는 온도변화에 따른 열가소성 차선도료의 용융점도를 나타낸 표이다. 일반적으로 용융점도는 사출도장방식의 도장의 경우 2,000 cP 이하, 분사도장방식의 경우 500 cP 이하로 사용된다. 용융점도가 높을 경우 균질 coating 불량, 접착력 결여 및 낮은 함침비로 반사유리

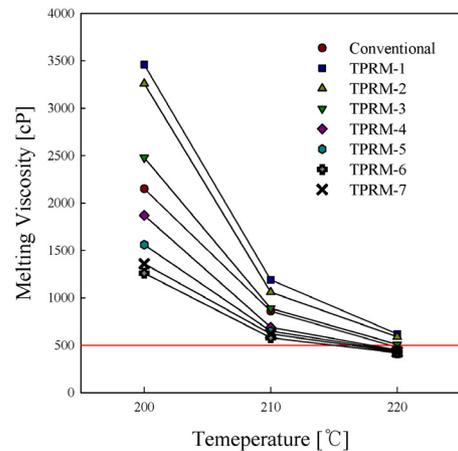


Figure 1. Variation of melting viscosity of thermoplastic road markings with temperature.

알이 탈리될 수 있다. 실험 결과 기준에 사용되고 있는 도료와 본 연구에서 설계한 TPRM-4~TPRM-7의 경우 220 °C의 온도에서 분사도장방식의 최적 점도인 500 cP 이하가 됨을 알 수 있었다.

Figure 1은 수지와 왁스의 조성 변화에 따른 열가소성 차선도료의 용융점도를 200~220 °C의 온도범위에서 나타낸 그림이다. 온도가 증가함에 따라 용융점도는 감소하는 경향을 나타내었으며, C_5 지방족 탄화수소계 수지에 polyolefin 수지를 첨가한 TPRM-1, TPRM-2의 경우에는 기존의 차선도료에 비해 용융점도가 높게 나타났다. 이를 조절하기 위하여 CaCO_3 의 첨가량을 줄이면서 용융점도를 조절하였다. 이에 따라 CaCO_3 의 첨가량이 상대적으로 낮은 TPRM-3~TPRM-7의 용융점도가 감소되었다. 또한 가소제인 di-octyl phthalate는 첨가량이 많은 TPRM-6와 TPRM-7의 경우 용융점도가 많이 감소하였다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 설계한 TPRM-4 (450 cP), TPRM-5 (440 cP), TPRM-6 (420 cP), TPRM-7 (430 cP)의 용융점도가 220 °C에서 분사도장방식의 최적 점도인 500 cP 이하가 됨을 확인하였다.

Table 3은 열가소성 차선도료의 유리전이온도, 연화점, 인장강도, 유리알 고착비 등의 물성을 나타낸 표이다. 열가소성 차선도료의 유리전이온도는 C_5 지방족 탄화수소계 수지($T_g = 48$ °C)와 polyolefin 수지($T_g = 57$ °C), 가소제인 di-octyl phthalate의 첨가량에 따라 계산된 이론값이다. 열가소성 차선도료의 연화점은 기존의 열가소성 차선도료의 경우 C_5 지방족 탄화수소계 수지만으로 구성되어 106 °C로 측정되었다. 이는 차선도료가 약간 딱딱할 수 있는 성질을 의미한다. 이러한 단점을 개선하기 위해 본 연구에서는 polyolefin 수지를 첨가하였으며, 그 결과 본 연구에서 설계한 도료의 연화점이 97~100 °C로

Table 3. Physical Properties of Thermoplastic Road Markings

	Conv.	TPRM-1	TPRM-2	TPRM-3	TPRM-4	TPRM-5	TPRM-6	TPRM-7
Glass transition temperature, °C	48	36	36	36	36	36.5	37.5	33
Softening point, °C	106	98	98	99	97	97	98	100
Tensile strength, MPa	0.86	0.98	0.98	1.08	1.14	1.18	1.22	1.26
Glass bead adhesive ratio, %	80	92	96	97	99	99	99	99

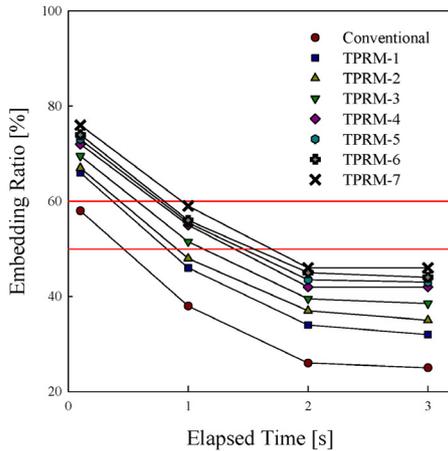


Figure 2. Variation of embedding ratio of thermoplastic road markings with elapsed time.

나타났다. 연화점 시험결과 2 °C의 차이는 시험재료를 링에 주입하여 과정이나 온도 상승조건에서의 편차 등을 고려하면 충분히 발생될 수 있다. 또한 기본수지에 polyolefin 수지가 첨가될 경우 인장강도는 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히 왁스 대신 사용된 가소제인 di-octyl phthalate를 첨가할 경우 인장강도가 증가됨을 알 수 있었다. 또한 열가소성 차선도료의 유리알 고착비를 측정 결과 사용된 수지와 차선도료에 첨가된 첨가제인 CaCO₃의 첨가량에 크게 의존하는 것을 알 수 있었다. C₅ 지방족 탄화수소계 수지에 56 wt%의 CaCO₃가 첨가된 기존의 열가소성 차선도료의 경우 20% 이상의 반사유리알이 탈리되었으나 polyolefin 수지를 첨가한 TPRM-1, TPRM-2의 경우에는 동일량의 CaCO₃가 첨가되었음에도 유리알 고착비가 92~96 wt%로 크게 향상됨을 알 수 있었다. 또한 CaCO₃의 첨가량이 감소됨에 따라 유리알 고착비는 증가하였으며, 이를 바탕으로 첨가제인 CaCO₃의 첨가량은 40 wt% 이하로 조절하는 것이 이상적임을 알 수 있었다.

3.2. 반사유리알의 침투특성

반사유리알의 함침비는 열가소성 차선도료에 살포되어 고착된 반사유리알의 침투 깊이를 말한다. 이상적인 함침비는 반사유리알 직경에 50~60%가 침투되어 고착되는 것이다. 함침비가 60% 이상이면 운전자가 반사유리알에 의해 재귀 반사된 차량의 빛을 감지할 수 없으며, 50% 이하이면 차량의 하중을 받는 차륜에 의해서 반사유리알이 쉽게 탈리될 수 있다. Figure 2는 반사유리알 살포시간에 따른 반사유리알의 함침비를 나타낸 그림이다. 차선도장은 도료를 도포한 후 반사유리알을 살포하는 방식으로 도장이 이루어지므로 반사유리알을 살포하는 시간간격이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 도료의 도장과 동시에 반사유리알을 살포한 경우와 1~3 s 간격 후에 살포한 경우를 비교하였다. 기존의 차선도료의 경우 도료의 도장과 동시에

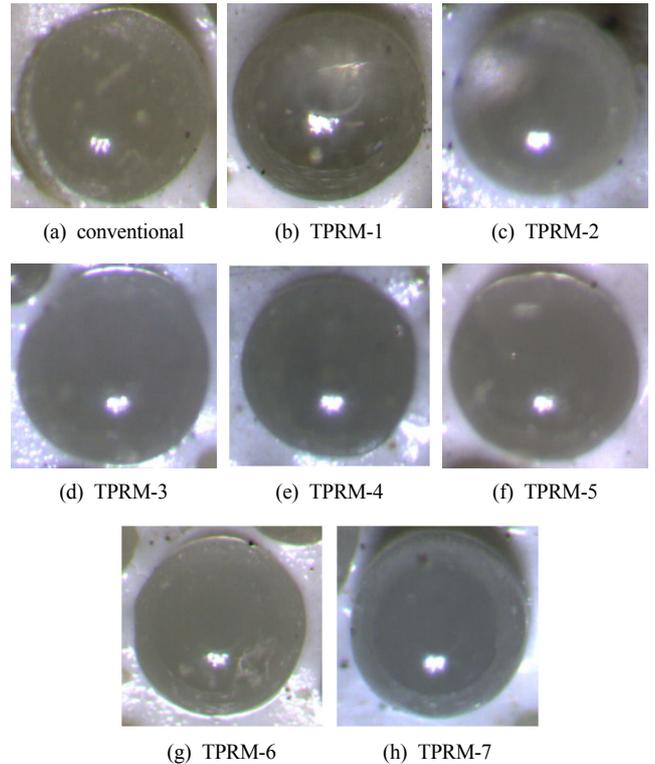


Figure 3. Pictures of embedded glass beads with various thermoplastic road markings.

반사유리알을 살포하여야 함침비 기준을 만족하였으며, 이는 C₅ 지방족 탄화수소계 수지를 단독으로 사용하고, CaCO₃의 첨가량이 56 wt%로 도료자체의 섞임성 등이 나쁘기 때문으로 사료된다. 살포시간 1~3 s 후에 살포한 함침비는 40% 이하로 나타났다. TPRM-1, TPRM-2의 경우에는 반사유리알을 바로 살포할 경우 함침비가 60% 이상을 나타내어 수지 안으로 많이 함침되었으며, 1 s 간격일 경우에는 50% 이하로 나타나 적정 함침비를 만족시키기 어려웠다. 이는 C₅ 지방족 탄화수소계 수지를 개선시키기 위한 polyolefin 수지를 추가 사용하고, LDPE 왁스를 산화 PE 왁스로 대체 사용하더라도, CaCO₃의 첨가량이 56 wt%로 많기 때문으로 사료된다. 그러나 본 연구에서 설계한 열가소성 차선도료인 TPRM-3에서 TPRM-7의 경우에는 반사유리알 살포시간이 1 s 간격에서 함침비가 50~60% 적정범위를 나타내었다. 이는 기본 배합인 CaCO₃의 첨가량이 56 wt%에서 TPRM-3 (48 wt%), TPRM-4 (41 wt%), TPRM-5와 TPRM-6 (이상 39 wt%), TPRM-7 (38 wt%)으로 감소시킨 영향으로 사료되며, TPRM-6, TPRM-7의 경우 가소제인 di-octyl phthalate와 polyolefin 수지의 첨가량을 증가시켰기 때문으로 사료된다. 그러나 살포시간 2~3 s 간격일 경우 함침비가 50% 이하가 되므로 도막 상으로 반사유리알이 노출되어 마모에 의한 탈리

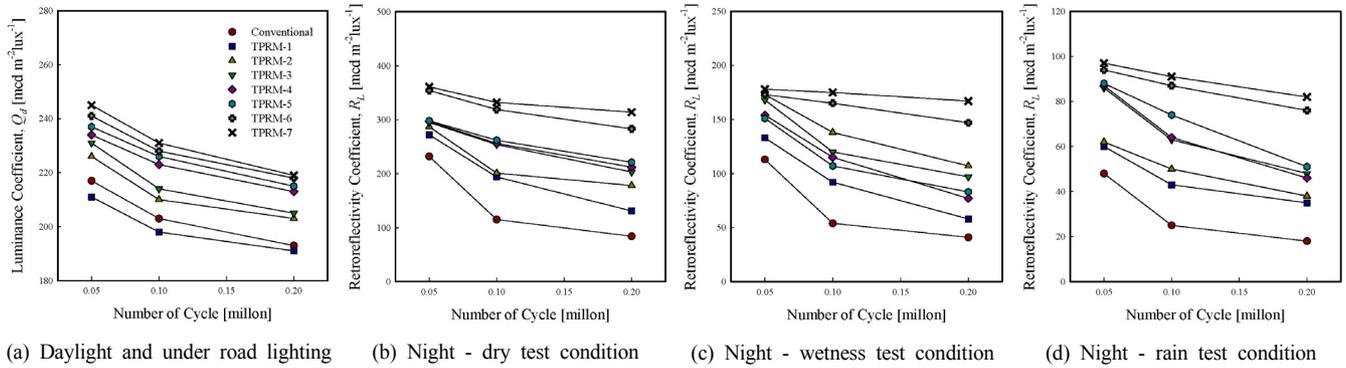


Figure 4. Luminance coefficients of thermoplastic road markings.

현상이 발생될 수 있으며, 이로 인해 재귀 반사도가 떨어질 것으로 예상된다. 따라서 반사유리알 살포는 도장 후 1 s 후에 이루어져야 할 것이다.

Figure 3은 반사유리알 살포시간이 1 s 간격일 때 열가소성 차선도료의 도장표면에 노출된 반사유리알을 나타낸 사진이다. 함침비의 결과와 마찬가지로 기존에 사용되고 있는 열가소성 차선도료와 TPRM-1, TPRM-2는 도장 표면에서 돌출되어 있는 것을 확인할 수 있으며, TPRM-3에서 TPRM-7까지의 열가소성 차선도료의 경우에는 비교적 적절하게 함침되어 있는 것을 알 수 있었다.

3.3. 열가소성 차선도료의 내마모성

열가소성 차선도료의 내마모성 평가를 위하여 운전자의 기본 주행 환경인 주간조건, 야간 건조조건, 야간 젖은조건, 그리고 야간 비오는 조건 등 4가지 조건에서 비교 평가하였다. 일반적으로 차선도장의 야간 재귀 반사 성능 최소요구기준은 2000년도 이전에 100 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$ 이하로 관리되어 왔으나, 교통사고 방지 및 인간 수명연장으로 인한 노령화 등으로 2000년 이후에는 120 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$ 로 상향되었고, 최근에는 150 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$ 이상으로 관리되고 있는 것이 국제적인 경향이다.

Figure 4는 열가소성 차선도료의 내마모성 평가결과를 나타낸 그림이다. 주간재귀 반사성능의 경우 차선의 색상인 백색도와 가장 관련이 있으며, 색상이 오염될수록 재귀 반사성은 저하된다. 초기 측정된 마모횟수가 5만 회인 경우 주간재귀 반사성능은 기존에 사용되고 있는 열가소성 차선도료의 경우 217 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$ 이고, 본 연구에서 설계한 열가소성 차선도료인 TPRM-1 (211 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-2 (226 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-3 (231 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-4 (234 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-5 (237 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-6 (241 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-7 (245 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)로 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 실질적인 도로에서 차륜에 의한 오염이나 아스팔트의 오염 등을 고려하지 않았기 때문으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 야간재귀 반사성능을 이용하여 열가소성 차선도료의 최적 설계비를 결정하였다. 기존에 사용되고 있는 열가소성 차선도료의 경우 마모횟수가 10만 회인 경우 건조조건(115 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 젖은조건(54 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 비오는 조건(25 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)으로 급격한 저하가 나타났다. 이는 기존에 사용되고 있는 C_3 지방족 탄화수소계 수지만으로는 열가소성 차선도료의 성능을 만족시킬 수 없음을 보여주는 것이고, 도로 중 CaCO_3 의 첨가량이 56 wt%이므로 도로 자체의 취성 (brittleness)이 약하여 반사유리알이 쉽게 탈리

되기 때문으로 사료된다. 따라서 기존에 사용되고 있는 열가소성 차선도료는 운전자가 안전하게 운행할 수 있는 차선 최소 반사성능 기준에 만족할 수 없는 결과로 나타났다. 본 연구에서 설계한 TPRM-1, TPRM-2는 기존 수지를 개량하기 위하여 polyolefin 수지를 2 wt% 추가 배합하고, 기존 LDPE 왁스를 산화 PE 왁스로 대체 설계한 열가소성 차선도료이다. 내마모성 평가 결과 마모횟수가 각각 10만 회와 20만 회인 경우 야간재귀 반사성능이 건조조건에서 TPRM-1의 경우 10만 회(194 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 20만 회(131 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-2의 경우에는 10만 회 (201 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 20만 회(178 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)로 급격한 감소를 나타내었다. 이는 전반적으로 도로배합 중 CaCO_3 의 첨가량이 56 wt%로 크기 때문으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 CaCO_3 의 첨가량을 56 wt%에서 39 wt%로 감소시켜 TPRM-3, TPRM-4, TPRM-5를 제조하였다. CaCO_3 의 첨가량이 감소함에 따라 마모횟수가 10만 회인 경우 건조조건에서 TPRM-3 (254 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-4 (256 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-5 (262 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)로 개선되었으나 마모횟수가 20만 회인 경우 TPRM-3 (203 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-4 (212 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-5 (221 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)를 비교하면 큰 개선효과를 기대할 수 없었다. 이를 개선하기 위해 산화 PE 왁스의 사용량을 반으로 줄여 유리알 고착비를 향상시키고, 열가소성 차선도료의 섞임성을 향상시키기 위해 가소제인 di-octyl phthalate를 추가 첨가하여 설계한 TPRM-6, TPRM-7는 마모횟수가 10만 회인 경우 야간재귀 반사성능이 TPRM-6 (319 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-7 (332 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)로 개선되었으며, 마모횟수가 20만 회인 경우 TPRM-6 (283 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), TPRM-7 (314 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)로 야간재귀 반사성능계수(R_d)의 감소가 완만하게 이루어짐을 알 수 있었다. 특히 polyolefin 수지를 3 wt%로 첨가한 TPRM-7의 야간재귀 반사성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히 TPRM-7의 경우에는 마모횟수가 20만 회인 경우 야간재귀 반사성능이 건조조건(314 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 젖은조건(167 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 비오는 조건(82 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)으로 나타나 기존에 사용되고 있는 열가소성 차선도료의 건조조건(84 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 젖은조건(41 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 비오는 조건(18 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)이나 동일한 CaCO_3 첨가량인 TPRM-5의 건조조건(221 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 젖은조건(83 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$), 비오는 조건(51 $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lux}^{-1}$)에 비해 매우 우수한 야간재귀 반사성능을 나타내어 본 연구에서는 TPRM-7의 배합비율을 최적 배합비율로 결정하였다.

4. 결 론

기존에 사용되고 있는 열가소성 차선도료의 도막은 딱딱하고 견고한 성질을 나타내어 압축강도가 우수하여 수직하중에 따른 내구력은 좋으나, 실제 차량바퀴 운행하중에 따른 수평 마찰력 및 전단응력이 취약하여 도막탈리, 유리알 고착비 저하 등으로 운전자가 차선을 인지할 수 없어 교통안전에 치명적인 위험성을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 열가소성 차선도료를 개량 설계하여 도막자체의 인장강도를 개선하고 내마모성을 향상시켜 운전자의 시인성을 개선하였다.

1. 열가소성 차선도료의 시공방식이 분사도장방식인 경우 220 °C 온도에서 최적 점도를 500 cP 이하로 설계하였다.

2. 기존에 사용되는 석유수지계 도료에 polyolefin 수지를 첨가하고, LDPE 왁스 대신 기능성이 부여된 산화 PE 왁스를 사용하여 연화점, 인장강도 등 차선도료의 물성을 개선하였다. 또한 첨가제 중 CaCO₃를 40 wt% 이하로 첨가하여 유리알 고착비를 향상시켰다.

3. 반사유리알의 함침비는 열가소성 차선도료에 살포되어 고착된 반사유리알의 침투 깊이로 가장 이상적인 함침비는 50~60%이다. 본 연구에서는 도장 후 반사유리알의 살포시간 간격을 1 s로 설정하여 함침비를 50~60%로 조절하였다.

4. 열가소성 차선도료의 내마모성 평가를 위하여 4가지 조건에서 재귀 반사성을 측정하였다. 교통사고 발생 최소화와 운전자의 노령화 등으로 운전자 주행 중 최소 야간재귀 반사성능계수가 150 mcd · m⁻² · lux⁻¹ 이상을 만족하여야 하며, 마모횟수 증가에 따른 야간재귀 반사도 저하가 가장 적은 TPRM-7를 열가소성 차선도료의 최적 배합비로 결정하였다.

References

1. A. Carlos and P. E. Lopez, Pavement Marking Handbook, Texas Department of Transportation (2004).
2. G. Burgess, M. R. Shortis, P. Scott, P., Photographic assessment of retroreflective film properties, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **66**(5), 743-750 (2011).
3. T. Grosge, Retro-reflection of glass beads for traffic road stripe paints, *Opt. Mater.*, **30**(10), 1549-1554 (2008).
4. J. R. Sayer and M. L. Mefford, High visibility safety apparel and nighttime conspicuity of pedestrians in work zones, *J. Safety Res.*, **35**(5), 537-546 (2004).

5. T. R. Miller, Benefit-cost analysis of lane marking, *Transp. Res. Rec.*, **1334**, 38-45 (1992).
6. E. Cuelho, J. Stephens, and C. McDonald, A Review of the Performance and Costs of Contemporary Pavement Marking Systems, State of Montana Department of Transportation (2003).
7. A. Thamizharasan, W. A. Sarasua, D. B. Clarke, and W. J. Davis, A Methodology for Estimating the Lifecycle of Interstate Highway Pavement Marking Retroreflectivity, 83rd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C. (2003).
8. S. Dahlstedt and O. Svenson, Detection and reading distances of retroreflective road signs during night driving, *Appl. Ergon.*, **8**(1), 7-14 (1977).
9. R. B. Gibbons and R. B. Williams, Assessment of the Durability of Wet Night Visible Pavement Marking; Wet Visibility Project Phase IV, Virginia Tech Transportation Institute (2012).
10. C. Holzshuher and T. Simmons, Mobile Retroreflectivity Characteristics for Pavement Markings at Highway Speeds, State of Florida (2005).
11. P. Konstantopoulos, P. Chapman, and D. Crundall, Driver's visual attention as a function of driving experience and visibility, *Accid. Anal. Prev.*, **42**(3), 827-834 (2010).
12. A. N. Parker and J. S. M. Meja, Evaluation of the Performance of Permanent Pavement Markings, 82nd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C. (2003).
13. A. Rahman and N. E. Lownes, Analysis of rainfall impacts on platoon vehicle spacing and speed, *Transp. Res. Part F : Traffic Psychol. Behav.*, **15**(4), 395-403 (2012).
14. A. Hofland, A., Alkyd resins: From down and out to alive and kicking, *Prog. Orga. Coat.*, **73**(4), 274-282 (2012).
15. S. M. Mirabedini, S. S. Jamali, M. Haghayegh, M. Sharifi, A. S. Mirabedini, and R. Hashemi-Nasab, Application of mixture experimental design to optimize formulation and performance of thermoplastic road markings, *Prog. Orga. Coat.*, **75**(4), 549-559 (2012).
16. S. M. Mirabedini, M. Sharifi, M. Haghayegh, Sh. Shabani, P. Bakhtiari, P., Blending of hydrocarbon and rosin ester-based resins to study its effect on the physical and mechanical properties of thermoplastic road markings, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, **22**, 457-467 (2010).
17. V. Kouskoulas, An optimization model for pavement marking systems, *Eur. J. Oper. Res.*, **33**(3) 298-303 (1988).