

고반사 도료를 사용한 차열성 아스팔트 도로포장의 온도저감특성

홍창우*

Hong, Chang Woo*

Properties of Temperature Reduction of Cooling Asphalt Pavements Using High-Reflectivity Paints

ABSTRACT : Air pollution and artificial heat of urban areas have caused the urban heat island in which asphalt pavements absorb solar heat during the daytime and release the heat at night. Hence, in order to improve the environment of urban areas, it is necessary to examine cooling pavements that can reduce heat on road pavements in urban areas. The application of temperature insulation paints on road pavements require to reduce black brightness for visibility, to increase the reflection rate of infrared light and minimize the reflection rate of visible light. In the study, one part of Acrylic-emulsion was used as a main binder, and the changes in black brightness and the changes of addition ratio (0%, 15%, 30%) of hollow ceramics, as well as kinds of paints (carbon black pigment, mixed mineral pigment) were selected as the main experimental factors. The performance of temperature reduction of cooling pavements was analyzed through the reflection rate of spectrum, the reflection rate of solar heat, and the lamp test. Abrasion resistance, UV accelerated weather resistance, and sliding resistance were tested in real situations. In addition, the performance of heat reduction of testing pavements covered with high-reflection paints was analyzed by using an infrared camera. As the test results, when using mixed mineral paints and hollow ceramic of 30%, the reflection rate of spectrum was 43% in the area of near-infrared ray and 17% in the area of visible light at black brightness of $L^* = 42.89$ and the reflection rate of solar heat was 27.5%. Total color difference was $\Delta E = 0.27$ in the test of UV Accelerated Weather Resistance, indicating almost no changes in color. BPN was more than 53 when scattering #2 and #4 silica sand of more than 0.12 kg/m^2 . In Taber's abrasion resistance test, abrasion loss was up to 86.4mg at 500 rotations. The performance of heat reduction was evaluated using an infrared camera at the test section applying high-reflection paints to asphalt pavements, in which the results showed that the temperature was reduced by 12.7°C on CI-30-40 cooling pavements ($L^* = 38.76$) and by 14.2°C on CI-30-60 cooling pavements ($L^* = 57.12$).

Key words : high-reflectivity paints, urban heat island, brightness, spectral reflection factor, cooling pavement

초록 : 도심지의 대기오염 및 인공열 등으로 인해 도시열섬현상이 발생되고 있으며, 특히 아스팔트 포장의 경우 낮에는 일사열을 흡수하고 밤에 방출하기 때문에 도심부의 환경을 개선하기 위해서는 도심 도로포장의 온도를 저하시키는 차열성 포장에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 도로포장에 차열성 도료를 적용하기 위해서는 시인성을 높이기 위해 흑색명도를 저하시켜야 하며, 적외선 반사율은 증가시키고, 가시광선 반사율은 최소화 하는 특성이 요구된다. 본 연구에서는 1액형 아크릴 에멀전을 주 바인더로 사용하고 안료의 종류(카본블랙, 합성무기안료) 및 중공세라믹 혼입률(0%, 15%, 30%)변화, 흑색명도의 변화를 주요 실험인자로 선정하였다. 차열성 도로포장의 온도저감 성능은 분광반사율과 일사반사율, 램프 조사 방법을 통해 분석하였다. 그리고 마모저항성, 자외선 촉진내후성, 미끄럼 저항성에 대한 현장적용성을 평가하였다. 그리고 고반사 도료 시험포장에 대해서 열화상 촬영을 통해 온도저감 효과를 분석하였다. 실험결과

* 정회원 · 한국교통대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Korea National University of Transportation · cwhong@ut.ac.kr)

Received October 25 2011, Revised June 22 2012, Accepted December 13 2012

합성무기안료와 중공세라믹 30%를 혼합한 경우에 흑색 명도 $L^* = 42.89$ 에서 분광반사율이 근적외선 영역에서 43%, 가시광선 영역에서 17%를 보였으며, 일사반사율은 27.5%로 나타났다. 그리고 자외선 촉진내후성 시험에 의한 총색차 ΔE 가 0.27로 색변화가 거의 발생되지 않았으며, 규사 2호, 4호를 상도, 하도에 $0.12\text{kg}/\text{m}^2$ 이상 산포할 경우 BPN은 53이상을 보였다. 또한 테이머 마모시험에 의한 마모감량은 500회전시 최대 86.4mg 이하로 나타났다. 아스팔트 포장에 고반사 도료를 시공한 시험구간의 열저감 성능을 열화상 촬영에 의해 평가한 결과 CI-30-40 차열성포장($L^* = 38.76$)은 12.7°C , CI-30-60 차열성포장($L^* = 57.12$)은 14.2°C 의 온도저감효과를 보였다.

검색어 : 고반사도료, 열섬현상, 명도, 분광반사율, 차열성포장

1. 서론

최근 급속도로 진행된 산업화로 도심지에 구조물들과 인구가 밀집되면서, 녹지 면적이 줄어들고 인공열 등이 증가함으로 인해 도심지의 온도가 다른 지역 보다 더 높은 도시 열섬현상(heat island)이 빈번히 발생되고 있다. 도시 열섬현상이 일어나는 원인은 아스팔트와 콘크리트 등의 인공시설물, 자동차 배기가스 및 공기조화기 등의 인공열과 녹지면적의 감소 등을 들 수 있다. 박태순 등(2009)은 서울지역의 도시 열섬현상 분석에서 1987년 강남지역의 온도가 $16 \sim 19^\circ\text{C}$ 에서 2003년 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 로 증가하였다고 보고하였다. 도시의 지표면 피복상태가 열섬현상에 미치는 영향이 매우 크면, 특히 아스팔트 포장은 낮에는 일사열을 흡수하였다가 밤에 방출하기 때문에 대기의 온도를 높이는 주 역할을 한다고 하였다(Yang et al., 2008). 이와같은 도시 열섬현상을 억제하기 위해서는 녹지면적을 늘리고, 도심지 구조물 및 아스팔트 도로 포장의 온도를 저하시키는 방법이 요구된다(Heat Island Group, 2009). 이를 위해 미국과 일본 등에서는 태양광선을 차단하는 도료의 개발을 통해 건축분야 등에 적용을 하고 있으며, 최근에 들어 도로포장 분야에 적용하기 위해 연구가 활발히 진행되고 있다. 일본 환경성에서는 열섬현상 완화를 목표로 Cool City 중추 지역 시범사업을 도쿄 등 11곳의 지역에서 2007년부터 시설녹화와 보수성포장, 고반사율 도료 도장 등을 사용한 방법을 조합하여 추진중에 있다. 그리고 차열성 포장에 대한 JIS 기술표준안을 수립하고 확대 적용하기 위해 활발히 연구를 진행중에 있다. 松田将至 等(2008)은 아스팔트 포장노면에서는 교통안전성이라는 관점에서 차열효과가 높은 백색 도료를 도장할 수 없기 때문에, 안전성을 확보하면서 차열효과를 얻을 수 있는 도료 개발의 필요성을 언급하고 도료의 명도에 따른 시공사례를 통해 13°C 저감효과가 있는 방안을 제시하였다. Cao 등(2011)은 열반사 코팅제를 아스팔트 도로포장에 적용하여 9°C 의 온도저감 효과를 보였고, 투수성, 내마모성, 동결융해저항성 등에 대한 내구성 검토를 수행하였다. 국내에서도 김인수 등(2006)은 배수성 포장에 차열성 도료를 코팅한 포장에 대한 표면온도저감효과에 대해서

분석하였고, 박태순 등(2009)은 일본의 차열성 포장 기술연구회에서 발표한 차열성 포장의 실내조사시험법을 이용하여 실내시험을 통한 태양광선 차단 포장 코팅제의 성능평가를 진행한바 있다. 그리고 김동우 등(2009)은 일본의 차열성 포장의 시공사례를 조사하고, 필요성에 대해서 발표한 바 있다. 도로 포장에 차열성 도료를 적용하기 위해서는 가장 중요한 특성이 도로 포장의 시인성을 확보하기 위해 흑색명도를 최대한 낮추면서, 적외선 반사율은 증가시키고, 가시광선 파장은 흡수하는 성질을 갖도록 차열성 도료를 개발하는 것이다. 그리고 차열성 도료의 성능평가지 색상 명도와 차열성능은 매우 밀접한 연관 인자를 갖고 있으며, 색상 명도를 정량화하여 측정하고 이에 따른 차열성능을 검토하는 것이 신뢰성 있는 결과를 도출하는데 중요한 요인이 된다. 또한 차열성 도료를 도로포장에 적용하기 위해서는 마모성, 미끄럼저항성, 자외선 내후성 등에 대한 사용성 평가가 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 1액형 아크릴 에멀전을 주 바인더로 하고 반사 성능을 증가시키기 위해 흑색안료의 종류(카본블랙, 합성무기안료) 및 미소중공세라믹을 에멀전 중량 대비 0%, 15%, 30%로 혼합률을 변화시켜 이와같은 인자가 차열성능에 미치는 영향을 분석하였다. 차열성능을 평가하기 위한 방법은 분광반사율과 일사반사율, 램프 조사방법에 의한 온도변화 특성으로 분석하였다. 그리고 테이머 마모시험을 통한 마모저항성, 자외선 촉진내후성 시험에 의한 색변화도, 미끄럼 저항성 등의 시험을 통해 고반사 도료의 내구성 및 사용성에 대한 검토를 수행하였다. 그리고 고반사 도료를 적용한 차열성 시험포장에 대해서 적외선 온도 측정과 열화상 분석을 통해 차열성 포장의 온도저감 효과를 분석하였다.

2. 실험재료

2.1 아크릴 에멀전 바인더

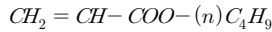
고반사 도료를 구성하는데 있어서 주 바인더는 비중 0.98, 점도 $200\text{mPa}\cdot\text{s}/25^\circ\text{C}$, pH 8.5인 1액형 아크릴 에멀전을 사용하였다. 사용된 아크릴 에멀전은 프로필렌의 공기 산화로 $\text{CH}_2 = \text{C}(\text{R}') - \text{COOR}$ 로 표시되는 아크릴산, 메타아크릴산 유도체

Table 1. Physical properties of color pigments

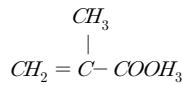
Pigment type	Color	Specific gravity	Thermostability(°C)	Conductivity(μS/cm)	Density(g/mL)	Av. particle size(μm)
Carbon black pigment	Black	2.4	-	63	0.53	0.6
Mixed mineral pigment	Black	5.2	> 800	81	0.69	1.4

Table 2. Physical properties of hollow ceramic

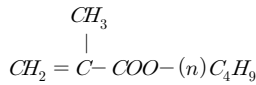
Division	Breaking strength (MPa)	Specific gravity (g/cc)	pH	Av. particle size (μm)	Typical particle size (μm/volume)			Color
					10 th %	50 th %	90 th %	
Hollow Glass Bubble	69	0.60	9.5	30	15	30	55	white



(a) n-Butyl acrylate



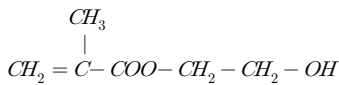
(b) Methyl methacrylate



(c) n-Butyl methacrylate



(d) Acrylic acid



(e) 2-Hydroxyethyl methacrylate



(f) Acrylamide

Fig. 1. Monomer of Molecular Structural Formula

들을 에스테르화 하여 불포화 모노머인 아크릴 에스테르를 유화 중합시켜 제조하였다. 유화 중합에 사용된 각 모너머(mon-omer)의 구조는 Fig. 1과 같다.

2.2 안료

1액형 아크릴 에멀전 바인더에 사용한 색상 안료는 카본블랙과 흑색 합성무기안료를 사용하였다. 안료는 명도 조절을 위해 아크릴 에멀전에 중량비로 배합하였으며, 흑색 명도를 20~80까지 조절하였다. 사용 안료의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

2.3 중공 세라믹

글래스 버블(glass bubble)은 중공형태로 소다석회 붕규산 유리(soda-lime borosilicate glass)를 주성분으로 한 미국 T사

Table 3. Experimental variables and notation

Specimen Number	Hollow Glass Bubble	Pigment type	Declared brightness(L)	Actual brightness(L*)
BC-0-40	0%	BC	40	43.17
BC-15-40	15%	BC	40	42.82
BC-30-40	30%	BC	40	42.91
CI-0-40	0%	CI	40	43.03
CI-15-40	15%	CI	40	42.77
CI-30-40	30%	CI	40	42.89
CI-30-20	30%	CI	20	22.02
CI-30-30	30%	CI	30	32.56
CI-30-40	30%	CI	40	42.89
CI-30-50	30%	CI	50	49.62
CI-30-60	30%	CI	60	60.00
CI-30-70	30%	CI	70	70.75
CI-30-80	30%	CI	80	82.89

주) BC : Carbon black pigment

CI : Mixed mineral black pigment

CI-30-40 : CI : pigment type

30 : hollow glass bubble content

40 : brightness(L)

의 제품을 사용하였다. 중공 세라믹의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

3. 실험 방법

3.1 실험인자

고반사 도료를 사용한 차열성 도로포장의 온도저감 특성을 분석하기 위해 Table 3과 같이 실험인자를 중공세라믹의 혼입률 변화(0%, 15%, 30%), 색상 안료의 종류(흑색 카본안료, 흑색 합성무기안료) 그리고 도로 포장면의 시인성 확보를 위한 흑색 명도의 변화(L*: 20~80)를 선정하였다. 특히 고반사 도료의

명도는 차열성능에 매우 중요한 인자로 MINOLTA사의 CR-400 색차계를 사용하여 명도를 수치화하여 정확도를 높였다.

3.2 램프 조사 시험

실내 차열성능 실험은 2008년 일본의 토목 기술센터에서 실시한 “유체타입 차열성 포장의 노면온도 저감성능 평가의 실내 조사시험법”을 적용하였다. 조사 실험장치는 Philips사의 120W 빔램프를 사용하여 Fig. 2와 같이 조사장치를 제작하였다. 실험 환경조건은 30±1℃, 50±5%RH 상태를 유지시키는 항온항습실에서 실시하였다. 시험체는 Fig. 3과 같이 크기는 100×100×50mm이며, 조사시험부인 상면을 제외하고 시험체 외부를 50mm두께의 단열재로 마감하였다. 시험체의 상면에는 고반사 도료를 하도와 상도로 구분하여 각각 0.4kg/m²을 도포하였다. 표면온도의 측정은 분해능 0.1℃, 정확도 ±0.2℃를 갖는 접지식 온도계를 사용하여 3점의 온도를 측정하여 평균온도를 사용하였다.

3.3 분광 반사율 시험

분광반사율 측정 및 일사반사율 산출은 JIS K 5602(2008)를 따랐으며, 시험에 사용된 시험편은 JIS K 5600(1999)에 따라 제작하였다.

그리고 고반사 도료는 알루미늄 판넬에 하도와 상도로 구분하

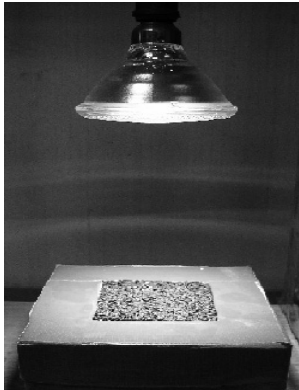


Fig. 2. Lamp irradiation test

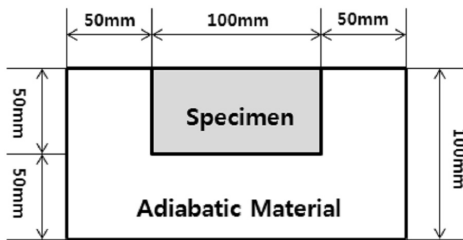


Fig. 3. Lamp investigate cross-sectional view of the test specimen

여 각각 0.4kg/m²을 도포하였다. 분광반사율 측정은 300~2,500nm 파장영역의 반사율을 측정하기 위해 Fig. 4와 같은 미국 GER사의 분광광도계(GER-3700)를 사용하여 암실에서 실시하였다. 일사반사율은 측정된 분광반사율에 기준 태양광의 중과계수(ISO 9845-1)를 곱하고, 이를 파장 전체 범위에 걸쳐 가중 평균으로 계산하는 것으로 식 (1)과 같다.

$$P_e = \frac{\sum_{300}^{2,500} E\lambda \Delta\lambda p(\lambda)}{\sum_{300}^{2,500} E\lambda \Delta\lambda} \quad (1)$$

여기서, P_e : 일사반사율(%)

$p(\lambda)$: 분광 반사율(%)

$E\lambda \Delta\lambda$: 기준 태양광의 중과계수

3.4 마모 저항성 시험

내마모성은 도료의 마모시험 방법인 KS M ISO 7784-1에 의거해 테이버형 마모시험기를 사용하여 마모감량을 3회 측정하였다. 시험은 20±1℃ 하에서 마모륜은 H-18을 사용하였고 회전속도 60rpm하에서 회전수를 200회, 500회 1,000회로 증가시키면서 각 회전수별 마모감량을 0.1mg 단위까지 측정하고 회전수에 따른 마모감량을 식 (2)에 의해 100회전, 250회전, 500회전시 마모감량으로 나타내었다.

$$A(mg) = \frac{B}{200} \times 100 \quad (2)$$

여기서, A : N/2회전으로 환산한 마모감량(mg)

B : N회전으로 시험시 마모감량(mg)

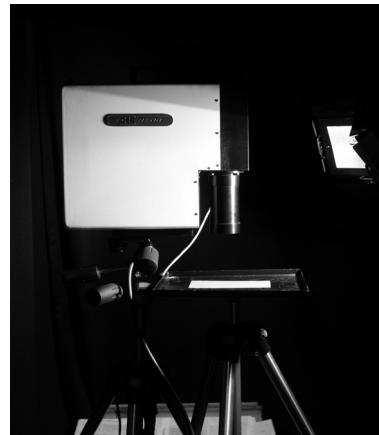


Fig. 4. Spectrophotometer (GER-3700)

3.5 미끄럼 저항성 시험

미끄럼 저항성 시험은 KS F 2357(2001)에 의거해 수행하였다. 실험은 영국식 미끄럼 저항시험기(BPT)를 사용하여 미끄럼 저항지수(BPN)를 측정하였다. 시험체 제작은 고반사 도료를 하도와 상도로 구분하여 각각 $0.4kg/m^2$ 을 도포하였으며, 이때 규사를 하도와 상도에 다음과 같이 산포하였다. 규사종류는 2호, 4호, 6호이며, 산포량은 $0.12kg/m^2$, $0.20kg/m^2$, $0.28kg/m^2$ 이다.

3.6 자외선 촉진내후성 시험

자외선 촉진내후성 시험은 KS M ISO 11507에 따라 수행하였고, 측정법에 의한 색차는 KS M ISO 7724-2에 의거해 분석하였다. 시편은 알루미늄 판넬에 고반사 도료를 $0.4kg/m^2$ 도포하여 제작한 후 ASTRA 2000 UV시험기를 사용하여 실험하였다. 자외선 노출시험은 8시간을 한 사이클로 구성하여, $60\pm 3^\circ C$ 하에서 UV($0.63W/m^2/nm$)를 4시간 노출시키고 이후 $50\pm 3^\circ C$ 하에서 4시간 응축하는 것을 1사이클로 하였다. 자외선 노출 시험을 14일간 수행한 후 시편에 대한 색상변화는 색차계(CR-400)를 사용하여 측정하였다. 색차분석은 식 (3)을 사용하여 산출하였으며, 색상변화의 평가는 Table 4의 NBS(National Bureau of Standard Unit of U.S)에 의한 규정에 의해 평가하였다(홍창우, 2011).

Table 4. Color difference grade by NBS

ΔE	Evaluation
0~0.5	trace
0.5~1.5	slight
1.5~3.0	noticeable
3.0~6.0	appreciable
6.0~12.0	much
12.0 <	very much

Table 5. Spectral reflection factor with black pigment and hollow ceramic contents

Specimen	Brightness (L^*)	Hollow ceramic contents (%)	Spectral reflection factor (%)				Solar reflectance (%)
			ultraviolet ray (300-400nm)	visible ray (400-700nm)	near-infrared ray (700-2500nm)	total wave length (300-2500nm)	total wave length (300-2500nm)
BC-0-40	43.17	0	9.64	12.44	7.35	8.68	9.91
BC-15-40	42.82	15	12.38	14.99	10.69	11.79	12.86
BC-30-40	42.91	30	13.66	14.51	10.83	11.91	12.72
CI-0-40	43.03	0	14.72	14.06	36.28	29.31	23.07
CI-15-40	42.77	15	16.16	15.23	39.46	31.87	24.90
CI-30-40	42.89	30	21.34	16.97	43.01	35.20	27.47

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

여기서, $\Delta L^* = L_T^* - L^*$,

$$\Delta a^* = a_T^* - a^*,$$

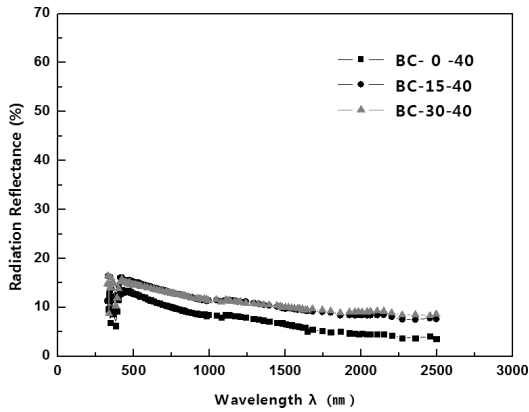
$$\Delta b^* = b_T^* - b^*$$

4. 실험결과 및 분석

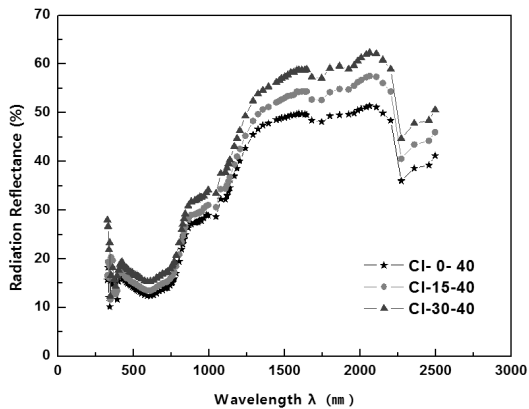
4.1 안료 및 중공형 세라믹 혼입률에 따른 차열특성

중공형 세라믹과 흑색안료가 파장영역별 분광반사율에 미치는 영향과 온도저감 성능에 대한 평가를 하였다. Table 5는 중공세라믹 혼입률을 0%, 15%, 30% 혼입한 경우와, 흑색안료로 사용된 카본블랙과 흑색 합성무기안료를 사용한 경우의 분광반사율과 일사반사율을 나타낸 것이다. 분광반사율은 물체 색이 단색광에 대한 반사율을 백분율로 표시한 것으로 스펙트럼 효과에 의해 반사되는 비율을 말한다. 그리고 일사반사율은 태양광에 의한 반사율로 환원해 준 반사율이다.

Fig. 5는 300~2,500nm의 분광반사율을 사용안료에 따라 나타낸 것이다. Table 5의 파장영역별 분광반사율을 보면 가시광선영역(400~700nm)에서 카본블랙안료를 사용한 경우 12.44%~14.99%이고, 합성무기안료를 사용한 경우 14.06%~16.97%로 분광반사율 차이는 2~3%이내로 나타났다. 반면에 근적외선영역(700~2,500nm)에서는 카본블랙안료를 사용한 경우가 7.35%~10.83%이고, 합성무기안료를 사용한 경우가 36.28%~43.01%로 카본블랙안료에 비해 분광반사율이 4~5배 증가되었다. 전 파장영역(300~2,500nm)에서도 합성무기안료를 사용한 경우가 29.31%~35.2%이고, 카본블랙을 사용한 경우 8.68%~11.91%로 합성무기안료를 사용한 경우가 분광반사율이 3배 이상 높은 것으로 나타났다. 그리고 중공세라믹 혼입률이 증가함에 따라 분광반사율은 전 파장영역에서 카본블랙을 사용한 경우에는 3%, 합성무기안료를 사용한 경우에는 6%정도 분광반사율이 증가하는 것으로 나타났다.



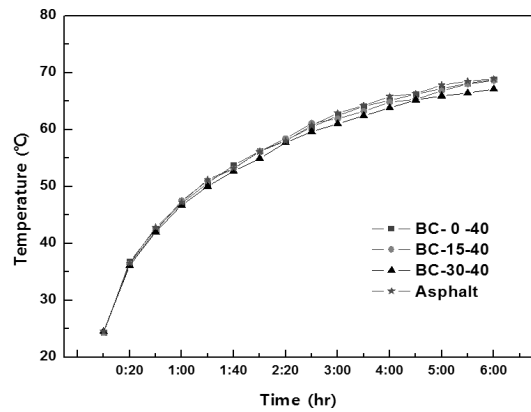
(a) Carbon black pigments



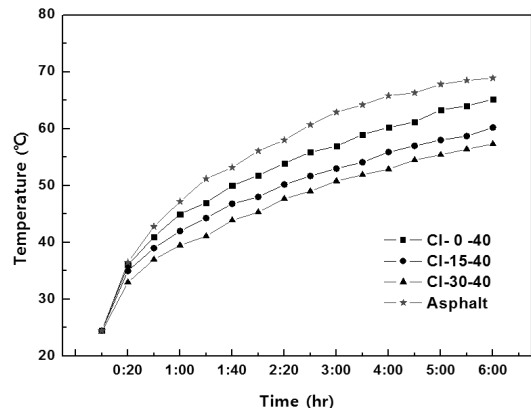
(b) Mixed mineral pigments

Fig. 5. Spectral reflection factor according to the hollow ceramic contents

측정된 분광반사율로 식 (1)에 의해 산출된 일사반사율은 색차계로 흑색명도를 측정한 결과 L^* 가 42~43으로 유사하며 카본블랙안료를 사용한 경우의 일사반사율은 9.91%~12.86%이고, 합성무기안료를 사용한 경우에는 23.07%~27.47%로 2배 이상의 일사반사율을 보였다. 반사능력이 가장 우수한 시험편은 합성무기안료를 사용하고 중공세라믹을 30% 혼입한 CI-30-40 시험편으로 나타났다. 이와같이 사용안료에 따라 반사율 특성의 차이를 보이는 것은 안료의 성분이 반사율에 미치는 영향이 크다는 것이며, 합성무기안료의 반사율이 높은 것은 안료가 알루미늄과 마그네슘 등의 산화물로 구성되어 금속성분에 의해 반사율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 가시광선 영역에서는 낮은 반사율을 보여 눈부심 등의 영향을 최소화하고, 적외선 영역에서는 반사율을 높이는 특성을 보였다. 그리고 중공세라믹 혼입률이 증가함에 따라 자외선 반사율도 증가하는 것으로 나타나, 자외선이 인체에 미치는 영향 등에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



(a) Carbon black pigments



(b) Mixed mineral pigments

Fig. 6. Temperature variation of specimens by lamp investigate test

램프 조사방법에 의한 공시체의 표면 온도변화는 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 (a)는 카본블랙 안료를 사용한 경우의 공시체 표면 온도변화를 나타낸 것으로서 고반사 도료를 사용하지 않은 아스팔트 노면의 온도와 차이를 보이지 않았다. 반면에 Fig 6의 (b)는 흑색 합성무기안료를 사용한 경우로 비교 시험편인 아스팔트 공시체 포장면의 표면온도가 50°C~69°C의 구간에서 중공세라믹 혼입률이 0%, 15%, 30%로 증가함에 따라 포장면의 표면온도는 각각 3°C~5°C, 6°C~9°C, 9°C~12°C 정도 저하되는 것으로 나타났다. 이와같이 합성무기안료를 사용한 경우에 포장면 표면온도가 저하되는 것은 근적외선 영역에서의 높은 반사율로 인해 포장체 내부의 축열 감소에 기인한 것으로 판단된다.

4.2 고반사 도료의 흑색 명도에 따른 차열특성

아스팔트 포장면에 적용하기 위해서는 고반사 도료의 색상 및 명도가 시인성 및 차열성능에서 중요한 요인이 된다. Table 6은 합성무기안료를 사용하고 중공세라믹의 혼입률을 30%로

Table 6. Spectral reflection factor according to the black brightness of high-reflectivity paints

Specimen	Brightness (L^*)	Hollow ceramic contents (%)	Spectral reflection factor (%)				Solar reflectance (%)
			ultraviolet ray (300-400nm)	visible ray (400-700nm)	near-infrared ray (700-2500nm)	total wave length (300-2500nm)	total wave length (300-2500nm)
CI-30-20	22.02	30	7.32	4.08	28.62	21.17	14.02
CI-30-30	32.56	30	13.13	8.21	34.66	26.77	19.91
CI-30-40	42.89	30	21.34	16.97	43.01	35.20	27.47
CI-30-50	49.62	30	21.99	20.87	46.14	38.24	31.25
CI-30-60	60.00	30	28.45	30.33	53.41	45.91	39.89
CI-30-70	70.75	30	41.34	45.35	63.31	57.23	53.41
CI-30-80	82.89	30	59.50	64.77	75.18	71.36	70.14

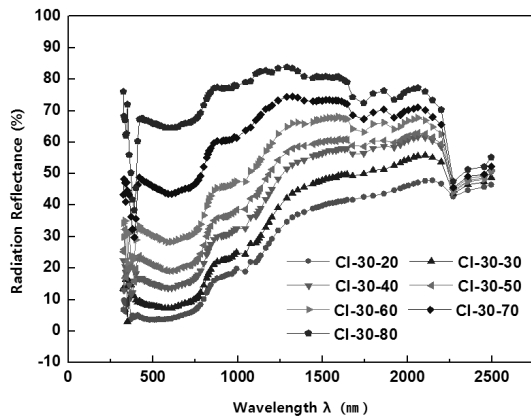


Fig. 7. Spectral reflection factor according to the black brightness

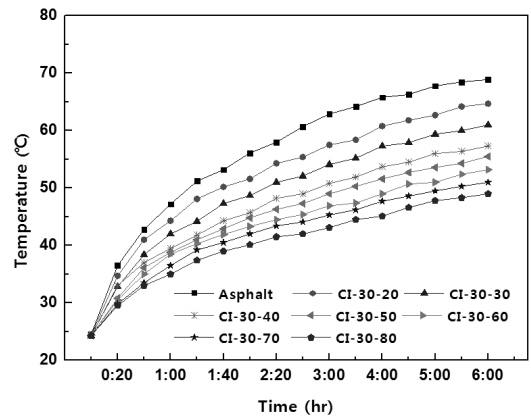


Fig. 8. Specimen surface temperature according to the black brightness

한 경우에 대해서 흑색명도를 20에서 80까지 증가시켰을 경우 (CI-30-20~80)의 분광반사율과 일사반사율을 파장영역에 따라 나타내었다.

Fig. 7은 300~2,500nm 파장영역의 분광반사율을 흑색명도에 따라 나타낸 것으로서 실측 흑색명도 L^* 가 22.02에서 82.89로 증가됨에 따라 분광반사율은 21.17%에서 71.36%로 증가되었다. 가시광선 영역에서는 4.08%에서 64.77%, 근적외선 영역에서는 28.62%에서 75.18%로 분광반사율이 모든 파장영역에서 급격히 증가되는 것으로 나타났다. 이와같이 흑색명도가 높아짐에 따라 적외선 및 가시광선 반사율이 동시에 증가되는 것은 명도가 높아짐으로 인해 색상이 백색에 근접하기 때문이다. 그리고 일사반사율은 흑색명도가 증가함에 따라 14.02%에서 70.14%로 증가되어 명도가 반사율 특성에 매우 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 램프조사방법에 의한 포장체의 표면온도변화를 나타낸 것이다. 아스팔트 포장면의 표면온도가 50°C 이상인 경우에 흑색 명도가 20에서 80으로 10씩 증가됨에 따라 최대 온도차는 대략 4°C, 8°C, 12°C, 14°C, 16°C, 18°C, 20°C로

나타났다. 이와같이 흑색명도가 낮아질수록 근적외선 영역의 반사율이 감소하므로 인해 축열은 증가되어 포장면의 표면온도가 증가되는 것으로 판단된다. 도로포장에 있어서 시인성은 안전성 측면에서 매우 중요한 특성이기 때문에 가급적 흑색명도를 낮춰야 하고, 반대로 흑색명도를 낮추므로 인해 온도저감 성능은 감소된다. 따라서 포장면 표면온도를 10°C 이상 저감시키기 위해서는 중공세라믹을 30%이상 혼입하고 합성무기안료를 사용한 고반사 도료의 흑색명도를 40이상 확보해야 하는 것으로 나타났다.

4.3 마모 저항성

아스팔트 포장면에 도막으로 형성되는 고반사 도료의 내마모성은 도료의 마모시험 방법인 테이버형 마모시험기의 회전수에 따른 마모감량으로 분석하였다. Table 7은 중공세라믹 혼입률 0%, 15%, 30%에 따른 마모감량을 테이버 시험기의 회전수에 따라 나타낸 것이다. 이때 마모륜은 H-18을 사용하고, 테이버 시험기의 회전수는 200회, 500회, 1,000회이며, 이를 식 (2)에

의해 100회전, 250회전, 500회전시 마모감량으로 나타난 것이다. Table 7의 결과에 의하면 100회전시 증공세라믹을 혼입하지 않은 CI-0-40의 경우 43.5mg이고, CI-15-40는 50.5mg, CI-30-40은 58.7mg으로 증공세라믹의 혼입률이 0%에서 15%, 30%로 증가함에 따라 마모감량은 16%, 35% 증가되는 것으로 나타났다. 그리고 500회전시 마모감량은 66.7mg, 78.4mg, 86.4mg으로 100회전 대비 47%~55% 증가하였다. 도로표지용 도료의 품질기준을 참고하면 내마모성은 테이버 시험 100회전에 대해서 마모감량을 500mg이하로 규정하고 있다.

4.4 미끄럼 저항성

도로 포장면의 미끄럼 저항성은 아스팔트 포장과 고반사 도료를 도장한 경우에 대해서 규사종류 및 규사 산포량에 따라 미끄럼저항지수(BPN)를 분석하였다. 규사는 2호, 4호, 6호를

Table 7. Abrasion loss according to the hollow ceramic contents

Specimen	Hollow ceramic contents(%)	Abrasion loss (mg)		
		100 rotation	250 rotation	500 rotation
CI-0-40	0	43.5	49.5	66.7
CI-15-40	15	50.5	60.4	78.4
CI-30-40	30	58.7	66.7	86.4

Table 8. BPN according to the silica sand and scattering

Specimen	Sand scattering (kg/m^2)	Silica sand		
		# 2	# 4	# 6
Asphalt	0	46	46	46
	0	37	37	37
CI-30-40	0.12	54	53	51
	0.20	61	56	54
	0.28	66	61	57

사용하였고, 규사 산포량은 하도 상도에 각각 $0.12 kg/m^2$, $0.2 kg/m^2$, $0.28 kg/m^2$ 이다. Table 8은 규사종류 및 산포량에 따른 미끄럼 저항지수를 나타낸 것이다. 아스팔트 포장면의 미끄럼저항지수 BPN은 46으로 나타났으며, CI-30-40 고반사 도료를 아스팔트 포장면에 도막형성을 한 경우의 BPN은 37로 20% 감소하였다. 그리고 규사종류에 따른 미끄럼 저항지수는 규사 2호를 사용한 경우가 BPN이 가장 크게 나타났으며, 규사를 $0.12 kg/m^2$ 이상 산포한 경우 모든 규사 종류에서 50이상의 BPN을 보였다. 그리고 규사를 $0.28 kg/m^2$ 이상 산포한 경우에는 규사 2호와 4호의 경우 BPN이 60이상을 보여, 아스팔트 포장에 고반사 도료의 도막형성에 따른 미끄럼 저항성이 감소되는 것은 규사를 산포하는 것으로 미끄럼저항성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4.5 UV-촉진 내후성에 따른 색변화도

도로 포장 상부에 고반사 도료 도막 형성시 시간경과에 따라 자외선에 의한 바인더 및 안료의 색상 변화가 발생된다. 이와같은 색변화로 인해 명도도 변화되므로 차열성능에 영향을 주게 된다. Table 9는 자외선 촉진 내후성 시험에 따른 색변화를

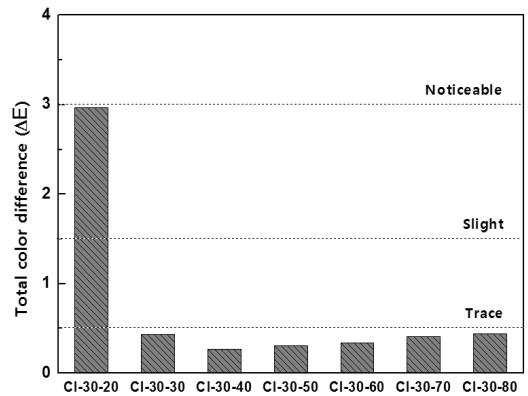


Fig. 9. Total color difference(ΔE) according to the black brightness

Table 9. Color difference changes according to the brightness of high-reflectivity paints by UV accelerated weathering test

Specimen	Initial value			Measurement value after 14day			Total color difference				Evaluation
	L^*	a^*	b^*	L_T^*	a_T^*	b_T^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE	
CI-30-20	22.02	1.87	0.97	24.74	1.39	1.84	2.72	-0.48	0.87	2.97	noticeable
CI-30-30	32.56	1.13	-2.97	32.88	1.27	-2.72	0.32	0.14	0.25	0.43	trace
CI-30-40	42.89	0.66	-4.07	42.90	0.89	-4.20	0.01	0.23	-0.14	0.27	trace
CI-30-50	49.62	0.51	-4.15	49.37	0.67	-4.06	-0.25	0.16	0.09	0.31	trace
CI-30-60	60.00	0.34	-3.74	59.83	0.56	-3.90	-0.17	0.22	-0.16	0.34	trace
CI-30-70	70.75	0.23	-2.93	70.43	0.42	-3.09	-0.32	0.19	-0.17	0.41	trace
CI-30-80	82.89	0.19	-1.44	82.63	0.52	-1.57	-0.26	0.33	-0.13	0.44	trace

색차계를 이용해서 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 9는 총색차 ΔE 를 명도에 따라 구분한 것이다. CI-30-20 시험편을 제외하고 모든 시험편에서 총색차 ΔE 는 0.44이하를 보여 Table 4의 NBS에 의한 색차구분에서 trace로 평가되어 자외선 노출에 의한 색변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 CI-30-20 시험편은 총색차 ΔE 가 2.97로 색변화가 감지할 정도의 차이(noticeable)를 보이는 것으로 나타났다. 명도값을 보면 시험전 22.02에서 14일간 자외선 노출후 24.74로 변화되어 ΔL^* 가 2.72로 증가되었고, 명도 30이상의 모든 시험편에서는 ΔL^* 가 ± 0.32 이하의 변화를 보였다. CI-30-40 시험편이 색변화도가 가장 적었으며, 명도 40 시험편을 기준으로 명도가 증감됨에 따라 총색차 ΔE 도 증가하는 것으로 나타났다. 이와같은 결과는 백색바인더에 흑색 안료를 혼합하여 명도변화를 주었으므로 명도가 낮은 경우에는 흑색안료, 명도가 높은 경우에는 백색안료의 색변화가 영향을 주기 때문이며, 백색안료보다 흑색안료의 색변화가 더 크기 때문에 명도가 낮은 경우에 총색차의 값이 증가된 것으로 판단된다.

5. 차열성 포장 적용에 따른 노면온도 저감효과

아스팔트 포장에 고반사 도료를 도장한 차열성 포장의 열저감 성능은 적외선 온도계와 열화상 분석을 통해 평가하였다. 시험시공은 2011년 7월 밀입도 아스팔트로 포장된 C대학 구내 주차장에 CI-30-40, CI-30-60 고반사 도료를 롤러로 도장하여 시공하였다. 시공면적은 150×150cm이고 시공방법은 하도, 상도로 구분하여 고반사 도료 0.40kg/m²를 각각 2회 도장하였다. 시공시 고반사 도료에 유기용제를 사용하지 않아 냄새에 의한 작업의 문제점은 없었으며, 경화촉진제를 사용하지 않는 1액형 바인더를 사용함으로 작업이 간편하였으며 시공후 1시간 이내에 건조가 완료되었다.

Fig. 10은 고반사 도료 명도에 따른 시험시공 현장 및 열방사



Fig. 10. Test construction, and thermal emission tester

시험기를 나타낸 것이다. 시간경과에 따른 노면의 표면온도는 적외선 온도계로 1시간 간격으로 5개소를 측정하여 평균온도를 사용하였으며, 열방사 분석기 TH9100을 사용하여 열화상 촬영을 통한 노면 표면온도를 측정하였다. 측정은 2011년 7월 21일 실시하였으며, 오전 8시부터 오후 10시까지 14시간 동안의 대기온도, 아스팔트 포장과 차열성 포장의 온도 변화는 Fig. 11과 같다. 시험시 대기온도는 24.5℃ ~ 31.2℃ 이고, 습도는 40% ~ 60%이다. 건조가 완료된 후 도장된 고반사 도료를 색차계를 사용해서 명도(L^*)를 측정된 결과 아스팔트 포장은 24.13이고, CI-30-40 차열성 포장은 38.76, CI-30-60 차열성 포장은 57.12로 나타났다.

실내시험시 시험편의 실측 흑색명도는 L^* 가 42.89, 60.0으로 시험시공시 CI-30-40 포장은 4.13, CI-30-60 포장은 2.88 정도 명도(L^*)가 낮게 나타났다. 아스팔트 포장면의 최고 노면온도는 오후 2시에 67.8℃로 측정되었으며, CI-30-40 차열성 포장의 노면온도는 57.0℃, CI-30-60 차열성포장은 54.1℃로 10.8℃와 13.7℃의 온도저감효과를 보였다. 그리고 일몰 이후의 온도변화를 보면 차열성 포장이 아스팔트 포장에 비해 4℃ ~ 5℃ 정도 포장면 온도차가 유지되는 것으로 나타났다. Fig. 12는 오후 2시 열화상 측정에 의한 포장면의 온도를 나타낸 것이다.

CI-30-40 차열성 포장의 온도는 53.4℃ 아스팔트 포장은 66.1℃로 12.7℃의 온도저감을 보였고, CI-30-60 차열성 포장의 온도는 51.1℃ 아스팔트 포장은 65.3℃로 14.2℃의 온도저감 효과를 보였다. 아스팔트 도로 포장에 본 연구에서 사용한 고반사 도료를 적용하였을 경우 색차계에 의한 흑색 명도값(L^*)이 40~60인 경우에는 아스팔트 포장에 비해 최대 10℃ ~ 14℃ 정도의 온도저감 효과를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

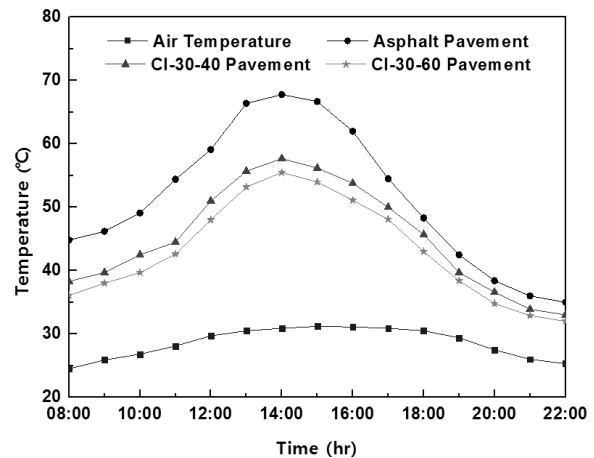


Fig. 11. Temperature variation of the asphalt pavement

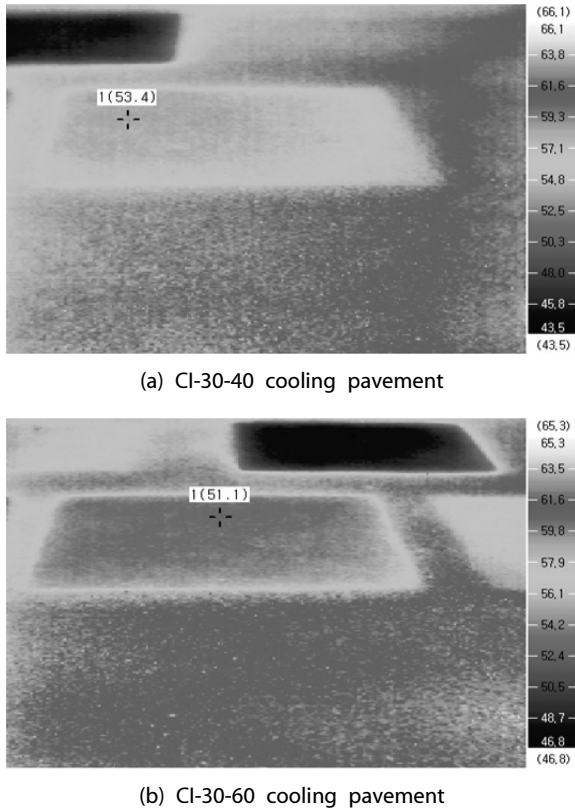


Fig. 12. Thermal infrared image of cooling asphalt pavements

6. 결론

본 연구에서는 도시 열섬현상의 원인 중 하나인 아스팔트 포장체의 복사열을 완화하기 위해 고반사 도료를 사용한 차열성 도로포장의 온도저감 성능을 분광반사율 및 일사반사율과 램프 조사방법을 통해 평가하였다. 그리고 현장적용성을 검토하기 위해 마모저항성, 미끄럼저항성, 자외선 촉진내후성 시험을 통해 내구성을 평가하고 온도저감 효과를 열화상 분석을 통해 확인한 결과 다음과 같다.

- (1) 고반사 도료에 흑색명도 조절을 위해 사용된 합성무기안료와 카본블랙 안료의 반사특성은 가시광선 영역에서는 유사하나, 근적외선 영역에서는 합성무기안료를 사용한 경우가 분광반사율이 36.28%~43.01%로 카본블랙 안료에 비해 4~5배 정도로 높은 것으로 나타났다. 합성무기안료는 알루미늄과 마그네슘 등의 산화물로 구성되어 금속성분에 의해 근적외선 반사율이 증가된 것으로 판단되며, 가시광선 영역에서는 낮은 반사율로 눈부심 등의 영향을 최소화 할 수 있어 도로포장에 적용이 가능할

것으로 판단된다.

- (2) 합성무기안료를 사용하고 중공세라믹을 30%혼입한 경우($L^* = 42.89$)가 혼입하지 않은 경우에 비해 분광반사율은 5.9%, 일사반사율은 4.4% 증가시켰으며, 램프조사방법에 의한 포장체 표면온도는 최대 7°C 정도 저감되는 것으로 나타났다. 그리고 도료의 흑색명도를 20에서 80까지 증가시키므로 인해 분광반사율과 일사반사율은 50%이상 증가되며, 흑색명도가 42.89인 경우 포장체 표면온도를 12°C, 명도가 60인 경우에는 14°C 저감시키는 것으로 나타났다.
- (3) 도료의 마모저항성은 테이버형 마모시험기의 회전수에 따른 마모감량으로 평가한 결과 중공세라믹 혼입률이 30%로 증가함에 따라 마모감량은 35%정도 증가하였으며, 500회전시 최대 마모감량은 86.4mg으로 나타났다. 그리고 미끄럼 저항성은 규사 2호, 4호를 상도, 하도에 0.20 kg/m² 이상 산포할 경우 미끄럼저항지수(BPN)은 60 이상을 보였다.
- (4) 자외선 촉진 내후성 시험에 따른 도료의 색변화도는 CI-30-20 시험편을 제외하고 모든 시험편에서 총색차 ΔE 는 0.44이하를 보여 NBS에 의한 색차평가에서 자외선 노출에 의한 색변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 CI-30-20 시험편은 ΔE 가 2.97로 색변화가 감지할 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. CI-30-40 시험편의 ΔE 가 0.27로 가장 적었으며, 명도 40 시험편을 기준으로 명도가 증감됨에 따라 총색차 ΔE 도 증가하였다.
- (5) 아스팔트 포장에 고반사 도료를 도장하여 시공한 시험구간의 열저감 성능을 열화상 촬영을 통해 평가한 결과 CI-30-40 차열성포장($L^* = 38.76$)은 12.7°C, CI-30-60 차열성포장($L^* = 57.12$)은 14.2°C의 온도저감 효과를 보였다.

References

- Park, T. S., Jeon, M. S., Cheon, J. Y., Chung, P. G. (2009). "Evaluation of solar light reflective coating." Proceeding of the Korean society of road engineers, Vol. 2009, No. 1, pp. 29-34.
- Lee, D. S., Kim, H. D., Kim, D. W., Bahng, K. H. (2009). "Experimental investigation of reducing the heat island effects using the newly developed isolation-heat paint and the heat exchanging paint." Proceeding of the society of air-conditioning and refrigeration engineers of Korea, Vol. 2009, No. 1, pp. 87-96.
- Kim, I. S., Han, E. S., Park, D. G., Cho, S. H. (2006). "A study on the surface temperature reduction of thermal insulation." Proceeding of the Korean society of road engineers, Vol. 8, No. 2, pp. 71-74.
- Hong, C. W. (2011) "Examination of color difference in elastic pavement that uses e p d m chip using ultraviolet ray accelerated

- weathering test.”*Journal of civil engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 91-98.
- Cao X., Tang B., Zhu H., Zhang A., Chen S. (2011) Cooling principle analysis and performance evaluation of heat-reflective coating for asphalt pavement, *American Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 7, pp. 1067-1075.
- Heat Island Group (2009) *Heat Island Group-High Temperatures*, from <http://eande.lbl.gov/heatisland/hightemps/>
- Yang, W., Gu, H., and Shan, Y. (2008), Influence of pavement temperature on urban heat island, *J. Highway Transp. Res. Dev.*, 25(3), pp. 147-152.
- Wong N. H., Tan P. Y., Chen Y. (2007) Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate, *Building and Environment*, 42, pp. 25-54.
- 桜田 将至 等(2008) 遮熱舗装用塗料の開発. 温熱舗装用塗料の開発, 技術報文-2, pp. 7-12.