

표면 에너지를 이용한 칩실 포장의 초기 점착력 특성 연구

Study on Early Adhesive Characteristic of Chip Seals Using a Surface Energy Approach

임정혁 Im, Jeong Hyuk | 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : jhim@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The objective of this study is to evaluate the early adhesive characteristic of asphalt emulsions, including polymer-modified emulsions, for chip seals using the surface energy concept, the bitumen bond strength (BBS) test, and the Vialit test.

METHODS : Two general methods, the BBS test and Vialit test, were applied to investigate the bond strength and the aggregate loss, respectively. A new theory, the surface free energy (SFE) theory, was used to evaluate the adhesive characteristic between the emulsion and the aggregate. Based on the theory, the contact angles were measured, and then the surface energy components were calculated. Using those components, the work of adhesion (W_a) was calculated for each emulsion. To ensure reliable results, all the tests were performed under the same conditions, i.e., at 25 °C for 240 minutes of curing time. For the materials, three emulsions (CRS-2, CRS-2L, and CRS-2P) and one aggregate type (granite) were employed.

RESULTS AND CONCLUSIONS : Under the same conditions, the modified emulsions showed better adhesive characteristics and curing behaviors than the unmodified emulsions. In addition, there was no significant difference between the various modified emulsions. One of the important findings is that the analysis by W_a presents more sensitive results than other methods. The results of the W_a showed that the CRS-2P emulsion has the best adhesive characteristics. Consequently, the use of modified emulsions for chip seals could prevent aggregate loss and allow open traffic earlier.

Keywords

surface energy, work of adhesion, adhesive characteristic, asphalt emulsion, chip seals

Corresponding Author : Im, Jeong Hyuk, Senior Researcher
Highway Pavement Research Division, SOC Research Institute,
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283,
Goyangdae-ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.995.0894 Fax : +82.31.910.0161
E-mail : jhim@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Nov. 20, 2015 Revised Nov. 24, 2015 Accepted Dec. 03, 2015

1. 연구배경 및 목적

도로 분야의 세계적인 추세는 신규 건설이 줄어들고 있으며, 기존 공용중인 도로의 설계 수명을 고려할 때, 재시공 및 보수의 필요가 증대되고 있다. 때문에 공용중인 도로포장의 유지보수에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한, 세계적으로 환경보전에 대한 중요성이 증대하고, 정부의 사회기반시설에 대한 예산 절감의 필요성이 대두되고 있는 실정으로 고려할 때, 도로의 유지보수 분야

에서도 친환경, 저비용 공법에 대한 요구가 점점 증가하는 추세이다.

아스팔트 도로의 유지보수 공법은 일반적으로 노후 포장을 절삭한 후 재포장하는 개념과 노후 포장에 표면 처리 공법을 적용하는 개념으로 나눌 수 있으며, 도로포장의 설계 수명연장과 비용 절감, 그리고 환경 요인 등을 고려하여 가장 적절한 유지보수공법이 적용되어야 한다. 노후 포장의 상태에 따라 적합한 공법이 적절한

시기에 적용될 때, 가장 효과적인 도로의 유지보수 즉, 충분한 공용성능을 갖는 저비용의 유지보수가 이루어질 수 있다. Fig. 1은 공용시간에 따른 포장의 상태를 나타내는 그래프로, 적절한 유지보수의 효과를 나타낸다 (Basic Asphalt Recycling Manual, 2001).

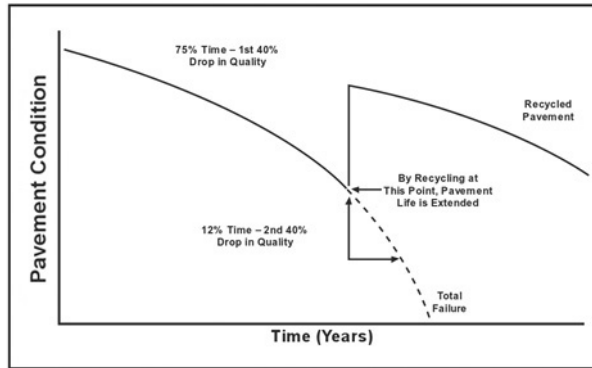


Fig. 1 Pavement Deterioration and Recycling Rehabilitation vs. Time (Basic Asphalt Recycling Manual 2001)

노후 아스팔트 포장의 표면에 적용하여 보수하는 공법인 표면처리공법으로 칩실, 슬러리실, microsurfacing, 포그실 등이 일반적이며, 특히 칩실의 경우 미국, 호주, 뉴질랜드, 캐나다, 영국 등지에서 광범위하게 사용되고 있다(Gransberg and James 2005). Fig. 2는 각 국가별 칩실의 적용 현황을 보여준다.

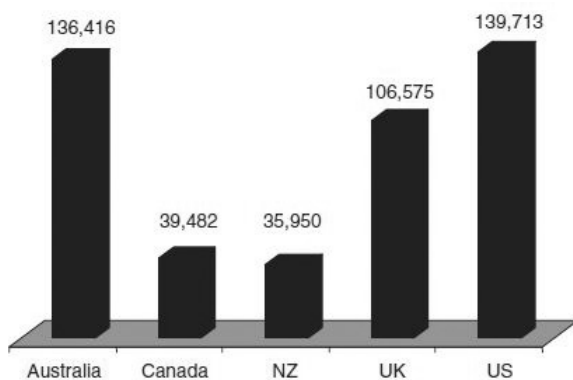


Fig. 2 Lane Miles of Chip Seal Service Life (Source: Gransberg and James 2005)

1920년대에 개발되어 적용되기 시작한 칩실 공법은 비교적 최근까지 저교통량 도로의 대표적인 유지보수 공법으로 사용되었으나, 재료 품질의 향상과 시공공법의 최적화로 인해 공용성 증진 효과를 검증하였고 점차 중교통량 도로에 적용이 증가하고 있는 상황이다(Im et al. 2014, Im and Kim 2015). 또한, 칩실의 시공은 신규 아스팔트 시공 및 절삭 후 재포설 방법과 비교할 때,

재료의 가열 온도(일반적으로 60℃)가 매우 낮으며, 때문에 시공 중 발생하는 유증기 등의 유해가스 배출이 거의 없는 환경 친화적인 공법이라는 장점을 갖고 있다.

그러나, 칩실의 중교통량 도로 적용을 위해 사전에 고려해야 할 문제는 시공 후 골재 탈리가 야기할 수 있는 교통개방 지연, 구조적 파손, 그리고 주행 차량의 사고 위험성이다. 이러한 문제점을 예방하기 위해서는 유화아스팔트와 골재 표면 사이의 점착력 특성을 파악하여 골재 탈리를 최소화하는 것이 중요하며, 칩실의 양생특성을 고려할 때 초기 양생기간 즉, 시공 후 첫날 동안의 점착력 특성을 평가하는 것이 필요하다.

본 연구에서는, 칩실의 대표적인 공용성 평가 기준인 골재 탈리에 영향을 미치는 유화아스팔트와 골재와의 점착력 특성을 파악하기 위해 미국 노스캐롤라이나 주 도로교통국의 칩실에 일반적으로 사용되는 유화아스팔트와 골재 사이의 점착력을 기존에 사용되던 실험법(BBS Test, Vialit Test)을 통하여 평가한 후, 표면에너지 개념을 이용하여 도출된 점착력과 비교하여 칩실의 초기 점착력을 평가하였다.

2. 표면 에너지

2.1. 표면 에너지 이론

표면 에너지(표면 자유 에너지, Surface Free Energy, SFE) 개념은 재료의 접촉면의 점착력(Adhesive or Cohesive Characteristics)을 설명할 수 있는 이론으로, 최근 몇몇 연구에서 골재와 아스팔트 바인더 사이의 접촉면에서 발생하는 점착력 특성 분석에 성공적으로 적용되었다(Little and Bhasin 2006, Masad et al. 2006). 몇 가지 이론들 중에 Van Oss-Chaudhury-Good 이론이 고체 표면의 표면 에너지 구성성분을 결정하기 위해 일반적으로 적용된다. 이때, 재료의 전체 표면 에너지는 표면의 분자력 형태에 따라 다음의 세 가지로 구분된다: (1) nonpolar component(van der Waals or dispersive component); (2) Lewis acid component; (3) Lewis base component. 전체 표면 에너지는 각 구성성분의 조합으로 계산되며, 다음의 Eq. (1)과 같다.

$$\gamma^{Total} = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-} \quad (1)$$

여기서,

$$\gamma^{Total} = \text{total surface energy,}$$

γ^{LW} = Lifshitz-van der Waals or dispersive component,
 γ^{AB} = acid-base component,
 γ^+ = Lewis acid component,
 γ^- = Lewis base component.

2.2. Wettability(젖음성)

Wetting(젖음) 특성은 고체 표면에 액체가 작은 방울 형태로 공급될 때, 액체가 고체 표면으로 퍼지는 경향을 의미한다(Shanahan 1991). 열역학적 흡착 이론(thermodynamic adsorption theory)에 의하면 점착력(adhesion)은 충분히 젖은 상태(sufficient wetting)에서 발현되기 때문에, wetting(젖음)은 점착력을 향상시키는 필수 조건이라고 할 수 있다. Wetting 특성은 고체 표면에 공급된 작은 방울 형태 액체의 접촉각을 측정하여 얻을 수 있으며, 접촉각이 0° 일 때 완전한 젖음 상태, 접촉각이 90° 이하일 때 젖음 상태(좋은 젖음과 점착력), 그리고 접촉각이 90° 이상일 때 젖지 않은 상태(나쁜 젖음과 점착력)라고 정의할 수 있다. 접촉각과 표면 에너지, 표면 장력 등의 관계는 Young's 관계식(Eq. (2))로 표현할 수 있다(Schrader 1995, Young 1804).

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos \theta \quad (2)$$

여기서,

γ_S = Solid surface free energy,
 γ_{SL} = solid-liquid interfacial free energy,
 γ_L = liquid surface tension, and
 θ = contact angle.

Fig. 3은 Young's 관계식(Eq. (2))에 사용된 변수의 관계를 보여준다.

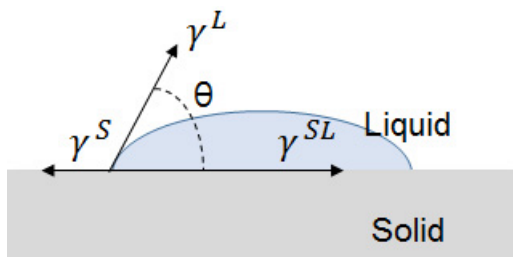


Fig. 3 Variables of Young's Equation Using Contact Angle

2.3. Work of Adhesion(접착일)

Work of Adhesion(접착일, W_a)은 다른 재료 사이의 분자간 상호작용의 정도를 나타내며, 액체와 고체 사이의 점착력(adhesion)은 액체로부터 고체가 분리되는데 필요한 일을 의미한다(Reynolds 2005). Work of Adhesion(접착일)은 Eq. (3)의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$W_a = \gamma_L(1 + \cos \theta) \\ = 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_L^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_S^+\gamma_L^-} + 2\sqrt{\gamma_S^-\gamma_L^+} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 고체에서 측정되는 성분관련 세 개의 미지 변수(γ_L^{LW} , γ_L^+ , γ_L^-)가 존재하며, 이들 미지 변수는 표면 에너지 특성이 알려진 최소 세 가지의 액체를 이용하여 접촉각 측정을 통해 계산될 수 있다. 본 연구에서는 물성이 알려진 세 가지 액체와 유화아스팔트의 표면에서 측정된 접촉각을 사용하여 유화아스팔트의 표면 에너지 성분을 계산하였다. 또한, 유화아스팔트의 전체 표면 에너지는 Eq. (1)을 통해 얻어지며, van Oss et al.(1987)의 연구 결과를 바탕으로 액체의 성질 즉, 극성을 고려한 2개의 polar(극)과 1개의 apolar(무극) 액체(water, ethylene glycol, diiodomethane)가 사용되었다. Table 1은 특성이 알려진 최소 세 가지의 액체의 표면 에너지 성분 특성을 보여준다.

Table 1. Surface Energy of Probe Liquids at 25°C (mJ/m²)

Liquid	γ^{Total}	γ^{LW}	γ^+	γ^-
Water	72.8	21.8	25.5	25.5
Ethylene glycol	48.0	29.0	47.0	1.9
Diiodomethane	50.8	50.8	0.0	0.0

3. 재료 및 방법

3.1. 실험 재료

3.1.1. 유화아스팔트

유화아스팔트는 현재 미국 노스캐롤라이나 주 교통국에서 칩실 포장에 일반적으로 사용하는 2종의 유화아스팔트(CRS-2, CRS-2L)와 폴리머 종류에 따른 개질 특성을 비교하기 위해 SBS 폴리머가 첨가된 CRS-2P가 선정되어 사용되었다.

3.1.2. 골재

본 연구에 사용되는 유화아스팔트와의 호환(compatibility)을 위해 화강암 골재가 사용되었으며, 화강암

질 골재는 미국 노스캐롤라이나 주에서 가장 보편적으로 사용된다. 재료에 따른 실험 오차를 줄이기 위해, 본 연구에 적용된 골재는 동일한 골재원의 골재를 사용하였고, BBS 시험과 접촉각 측정시험을 위해 동일한 골재원에서 화강암 원석을 구하여 실험에 적합한 크기로 절단, 가공하여 사용하였다.

칩실 시편은 노스캐롤라이나 주 교통국 입도곡선에 적합한 골재를 사용하여 제작하였다.

3.2. 실험 방법

3.2.1. 접촉각 측정 시험

유화아스팔트와 골재 사이의 접촉각은 Sessile Drop Goniometer(Fig. 4)를 사용하여 25°C에서 측정하였다. 시료의 접촉각 측정 후 자체 소프트웨어(DROPimage)를 통해 계산된 표면 에너지 성분 값을 이용하여 유화아스팔트와 골재 사이의 점착력을 평가하였다.

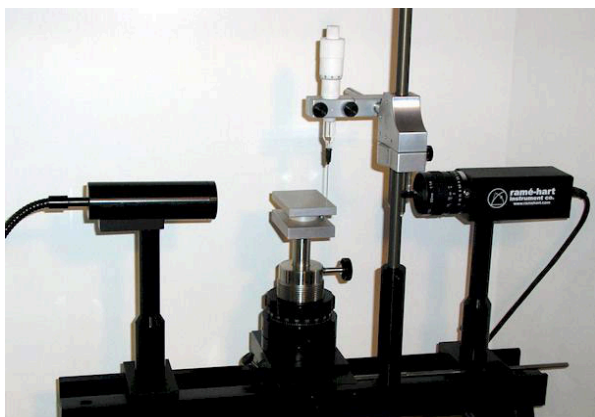


Fig. 4 Contact Angle Goniometer

본 연구에 사용된 칩실 시편을 모사하기 위해, 동일한 양(동일한 적용율)의 골재와 유화아스팔트를 사용하여 접촉각 측정을 위한 시편을 제작하였다. 이를 위해 30mm×50mm×20mm(가로, 세로, 두께) 크기의 골재 판을 준비하였고, BBS test의 골재 시료와 같은 조건으로 표면을 처리하였다. 준비된 골재 시료 표면에 일정한 적용율의 유화아스팔트를 공급하기 위해 내측 크기가 20mm×30mm(가로, 세로)인 실리콘 몰드를 준비하여 유화아스팔트 시료를 제작하였다. 다른 시험과 동일한 조건을 구현하기 위해 유화아스팔트의 양생 특성을 고려하여 준비된 골재와 몰드에 유화아스팔트를 공급한 후 시료는 즉시 향온 챔버로 옮겨져 25°C 온도에서 4시간 양생한 후 접촉각 시험을 수행하였다. Fig. 5는 접촉각 측정을 위한 시편 제작 과정을 보여주며, Fig. 6은 각 시험 액체별 접촉각 측정에 사용된 액체 방울의 사진을 나타낸다.

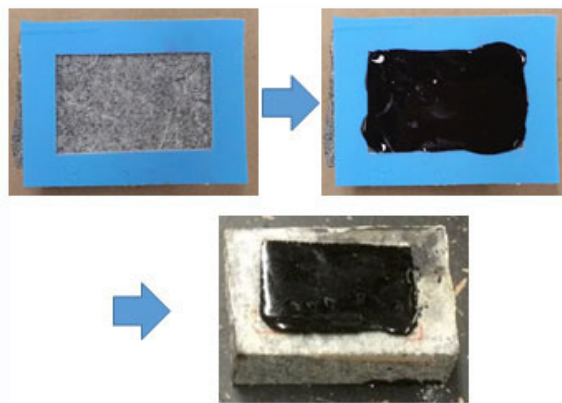


Fig. 5 Specimen Preparation for Goniometer Test



Fig. 6 Pictures of Each Droplet for Contact Angle Measurement

3.2.2. Bitumen Bond Strength(BBS) Test

BBS test는 AASHTO TP 91에 정의된 실험으로 아스팔트 바인더 또는 유화아스팔트와 골재 표면의 점착력을 측정하는 시험이다. 유화아스팔트를 사용한 BBS 시험법은 기존의 연구를 참조할 수 있다(Im et. al., 2014).

유화아스팔트는 온도와 양생시간에 따라 민감한 공용특



(a) PATTI Device



(b) Piston and Pull-Out Stubs in Chamber

Fig. 7 BBS Test Set-Up

성 및 파괴 거동을 보이며, 때문에 시료의 양생부터 실험까지의 전 과정은 정확한 실험 온도를 구현할 수 있는 조건에서 수행되어야 한다. 본 연구에서는 칩실의 초기 양생 시간 동안의 거동 평가를 위해 25℃의 온도에서 각 30분, 60분, 120분, 240분의 시편 양생 후 시험을 진행하였다.

Fig. 7은 BBS 시험을 위한 장비와 실제 챔버 안에서 진행되는 시험 모습을 보여준다.

3.2.3. Vialit Test

Vialit test는 BS EN 12272-3에 규정된 시험으로, 스틸 몰드에 제작된 칩실 시편을 거꾸로 거치한 후 쇠 구슬을 50cm 높이에서 10초 동안 3회 자유낙하 후 시편의 무게 변화를 측정하여 골재 탈리를 평가하는 시험이다. 본 연구에서는 실제 현장에 시공되는 칩실 배합설계를 적용하여 시편을 제작하였고, 25℃의 온도에서 각 30분, 60분, 120분, 240분의 시편 양생 후 시험을 진행하였다. 보다 자세한 시험법은 기존의 연구를 참조할 수 있다(Im et al., 2015). Fig. 8은 Vialit test를 보여준다.



Fig. 8 Vialit Test Apparatus

4. 실험결과 및 분석

4.1. Work of Adhesion(Wa)

표면 에너지 이론을 이용한 골재와 유화아스팔트 사이의 점착력 분석을 위해 세 가지 액체를 사용하여 4시간 양생된 총 세 가지 유화아스팔트 시료 표면에서 접촉각을 측정하여 표면 에너지 성분을 계산하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 측정된 접촉각과 전체 표면 에너지(total surface energy)를 나타낸다.

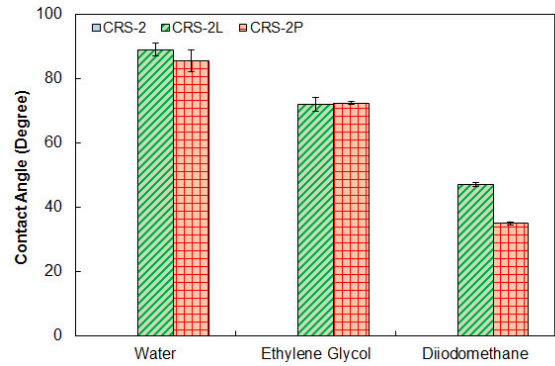


Fig. 9 Contact Angle for Each Emulsion

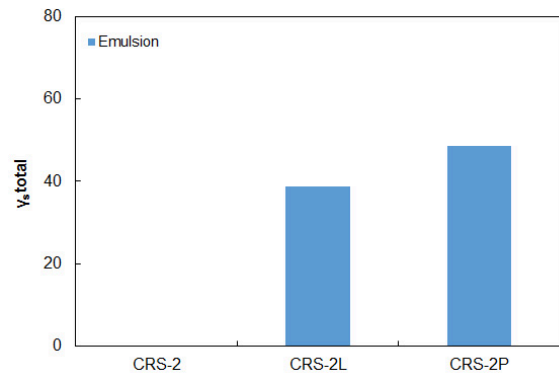


Fig. 10 Total Surface Energy for Each Emulsion

본 연구에서 각 유화아스팔트 시료에 동일한 조건과 양생 시간을 적용하였고, 실험 결과 CRS-2 유화아스팔트의 경우 4시간 양생 후 실험에 적합한 양생 상태를 발현하지 못하여 접촉각 측정이 불가능하였다. 즉, CRS-2 시료 표면에 액체 방울을 공급할 때, 시료의 아스팔트 성분이 액체와 용해되어 액체 방울이 일정한 형상을 유지하지 못하는 결과를 보였다. 결론적으로 개질 유화아스팔트(CRS-2L, CRS-2P)와 비교할 때, CRS-2는 양생시간이 더 필요한 것으로 판단할 수 있다.

언어진 표면 에너지 성분을 바탕으로 각 유화아스팔트의 W_a 를 계산하여 점착력을 평가하였다(Fig. 11).

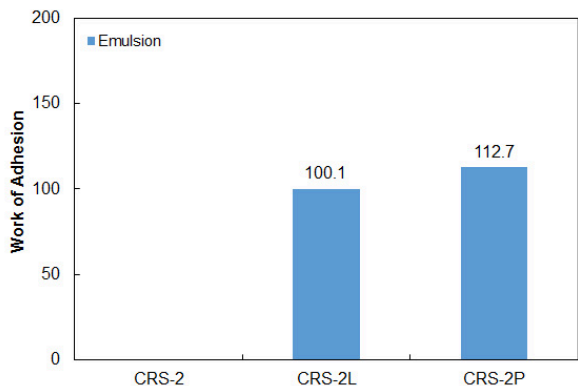


Fig. 11 Work of Adhesion for Each Emulsion

Fig. 11에서 4시간 양생 후 유화아스팔트의 점착력은 CRS-2P가 가장 좋은 것으로 나타났다.

4.2. BBS Test

세 종류의 유화아스팔트 시편을 제작하여 25°C에서 각 양생시간별로 시험을 수행하였고, 그 결과는 Fig. 12에 나타내었다.

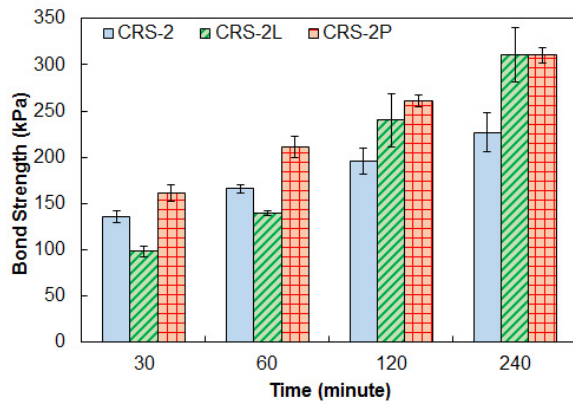


Fig. 12 Bond Strength Results

Fig. 12에서 전체적으로 양생시간이 늘어나면서 모든 종류의 유화아스팔트의 점착력은 향상되었고, 특히 CRS-2P는 모든 양생시간에서 가장 우수한 점착력을 나타내었다. 반면에 CRS-2는 초기 1시간 이내의 양생 시간에서는 CRS-2L보다 큰 점착력을 보였으나 이후의 점착력 증가는 다른 유화아스팔트에 비해 미비하였다.

4.3. 골재 탈리 특성

세 종류의 유화아스팔트를 사용하여 칩실 시편을 제작하였고 25°C에서 각 양생시간별로 Vialit test를 수행하여 골재 탈리 특성을 평가하였다(Fig. 13).

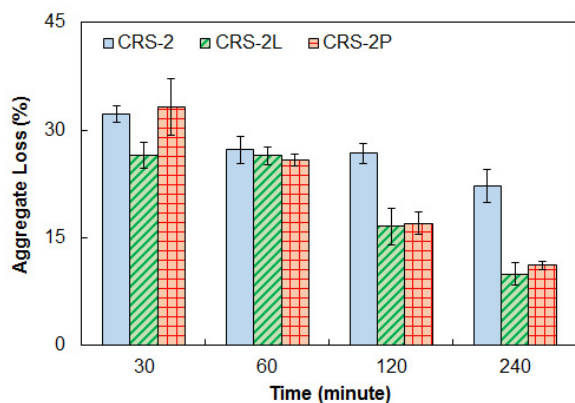


Fig. 13 Aggregate Loss Results

Fig. 13에서 양생시간이 늘어나면서 모든 종류의 유

화아스팔트 시편의 골재 탈리는 줄어들었다. 특히 CRS-2 시편은 개질 유화아스팔트 시편에 비해 골재 탈리의 감소가 크지 않음을 알 수 있다. 시편의 편차를 고려할 때, 개질 아스팔트 사이의 골재 탈리 특성의 차이는 거의 없다고 판단할 수 있다.

4.4. 초기 점착 특성

충분히 양생되지 않은 유화아스팔트 시편의 접착각 측정은 현실적으로 불가능하여, 접착각 측정은 4시간의 양생 후 수행되었고, BBS test와 Vialit test는 양생 후 30분, 60분, 120분, 240분에 시험을 수행하여 초기 4시간 이내의 양생 특성을 비교하였다. 그러나 30분의 양생시간은 두 가지 시험의 경우에도 신뢰성 있는 결과를 도출하지 않는 것으로 판단되어 60분, 120분, 240분에 수행된 결과를 사용하여 초기 양생시간에 따른 점착력 특성을 분석하였다. 그 결과는 Fig. 14에 나타내었다. 또한 유화아스팔트 종류별로 선형 모델을 도출하여 점착력을 평가하였다(Table 2).

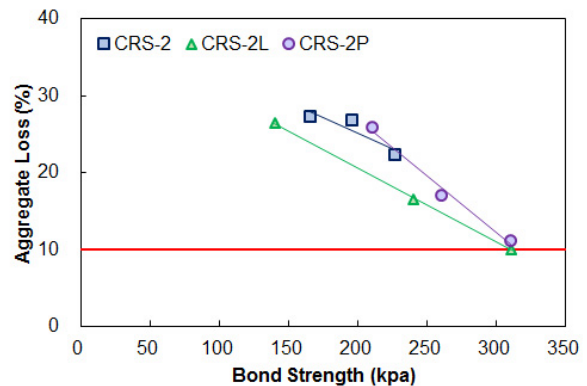


Fig. 14 Aggregate Loss vs. Bond Strength

Table 2. Linear Model between BBS and Aggregate Loss

Emulsion	Linear model
CRS-2	$y = -0.0817x + 41.45$
CRS-2L	$y = -0.0963x + 39.85$
CRS-2P	$y = -0.1474x + 56.40$

Fig. 14에서는 미국 알래스카 주 교통국의 칩실 공용성 평가 기준인 10% 골재 탈리율을 적용하여 각 유화아스팔트 시편의 골재 탈리와 점착력의 관계를 나타내었으며, CRS-2의 경우 개질 유화아스팔트와 비교할 때 상당히 부족한 점착특성을 나타내었다. 선형 모델을 고려할 때, 개질 유화아스팔트가 비개질 유화아스팔트에 비해 우수한 양생 특성을 보이는 것으로 판단할 수 있으며, 개질 유화아스팔트 사이의 비교에서는 큰 차이는 없

으나 CRS-2P가 우수한 양생 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

표면 에너지 이론, BBS test, 골재 탈리 특성 등의 세 가지 개념으로 평가된 점착력의 비교를 위해 CRS-2P 유화아스팔트의 결과를 기준으로 각 유화아스팔트 종류별 비율을 계산하여 비교하였다(Fig. 15).

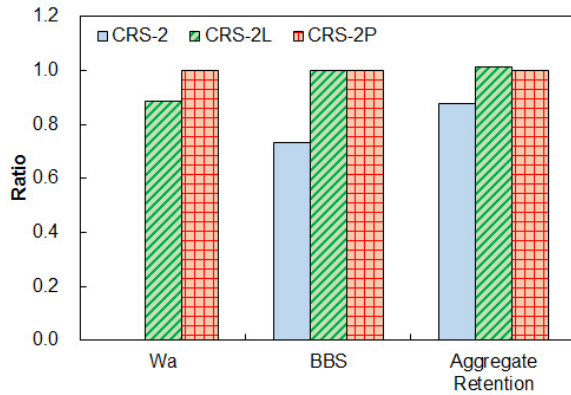


Fig. 15 Adhesion Ratio for Test Methods

Fig. 15에서 개질 유화아스팔트 2종(CRS-2L, CRS-2P)이 비개질 유화아스팔트(CRS-2)에 비해 우수한 점착력을 나타내었다. 개질 유화아스팔트 사이의 점착력은 BBS test와 Vialit test 결과는 차이가 없었으나, Wa 결과는 CRS-2P가 우수한 점착력을 나타내었으며, 골재 손실율과 다른 경향을 보이거나 이는 Wa 결과(표면 에너지 분석)의 사용이 기존 시험법에 비해 칩실 재료의 점착력 평가에 조금 더 민감하며, 충분히 적용할 수 있는 분석 방법이라고 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 동일한 조건 하에서 다양한 유화아스팔트의 점착력 특성을 평가하기 위하여 세 가지 칩실용 유화아스팔트(CRS-2, CRS-2L, CRS-2P)를 사용하여, 표면 에너지 이론, BBS test, 골재 탈리 특성 등의 세 가지 개념으로 비교하였다. BBS test와 Vialit test는 25℃에서 30분, 60분, 120분, 240분의 양생시간을 적용하여 시험을 수행하였고, 접촉각은 25℃에서 240분 양생 후 측정하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 동일한 조건(양생 시간과 온도)에서 개질 유화아스팔트는 개질되지 않은 유화아스팔트에 비해 우수한 양생 특성(점착력 특성)을 나타낸다.

2. 또한 동일한 조건 하에서 개질 유화아스팔트 사이의 점착력 특성은 큰 차이가 없는 것으로 확인되었으나, Wa 결과(표면 에너지 분석)의 사용은 기존 시험법에 비해 민감한 결과를 나타내며 CRS-2P가 가장 우수한 점착력 특성을 나타내었다.

3. 시험 결과를 바탕으로 Wa 결과(표면 에너지 분석)는 기존 실험 결과인 골재 손실율(Vialit test)과 약간 다른 결과를 보이나, 이 결과는 Wa 분석의 민감성 때문이라고 판단된다. 따라서 Wa 분석은 칩실 재료의 점착력 평가에 충분히 적용할 수 있다고 판단된다. 다만, 충분히 양생되지 않은 유화아스팔트 시료의 시험이 불가능한 단점이 있다. 또한 Wa 분석의 민감도 부분에 대한 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론적으로, 개질 유화아스팔트는 우수한 점착력 특성을 나타내었으며, 비개질 유화아스팔트에 비해 골재 탈리 방지 및 조기 교통개방의 특성을 보일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “탄소섬유복합재를 활용한 고기능성 도로포장시스템 개발”의 연구지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- AASHTO TP:91-11. Standard Test Method of Test for Determining Asphalt Binder Strength by Means of the Asphalt Bond Strength (ABS) Test. American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO).
- Basic Asphalt Recycling Manual (2001), Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), Maryland, USA.
- BS EN 12272-3. Surface Dressing Test Method Part 3: Determination of Binder Aggregate Adhesivity by the Vialit Plate Shock Test Method, British Standards Institution.
- Gransberg, D. and D.B. James (2005), NCHRP Synthesis 342, Chip Seal Best Practices, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 8.
- Im, J.H., Y.R. Kim, and S.L. Yang (2014), Bond Strength Evaluation of Asphalt Emulsions used in Asphalt Surface Treatments. International Journal of Highway Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 1-8.
- Im, J.H. and Y.R. Kim (2015), Performance Evaluation of Fog Seals on Chip Seals and Verification of Fog Seal Field Tests. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 42, No. 11, pp. 872-880.
- Im, J.H., Y.R. Kim, and C. Baek (2015), Performance Evaluation of Surface Treatments for Asphalt Pavement Preservation.

- International Journal of Highway Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 89-98.
- Little, D.N. and A. Bhasin (2006). Using Surface Energy Measurements to Select Materials for Asphalt Pavement. Final Report of Project 9-37, Texas Transportation Institute, National Cooperative Highway Research Program.
- Masad, E. C. Zollinger, R. Bulut, D.N. Little, and R.L. Lytton (2006). Characterization of HMA Moisture Damage Using Surface Energy and Fracture Properties. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 713-748.
- Reynolds, P. (2005). Colloid Science-Principles, Methods, and Applications. Blackwell Publishing Ltd., Chapter 9, pp. 159-178.
- Schrader, M.E. (1995). Young-Dupre Revisited. Langmuir, Vol. 11, pp. 3585-3589.
- Shanahan, M.E.R. (1991). Adhesion and Wetting: Similarities and Differences. Rubber World, Vol. 205, pp. 28-36.
- van Oss, C.J., M.K. Chaudhury, and R.J. Good (1987). Monopolar Surfaces. Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 11, pp. 3585-3589.
- Young, T. (1804). An Essay on the Cohesion of Fluids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 95, pp. 65-87.