



Self-Healing Asphalt Prepared by using Ionic Epoxy Resin

Young-Jik Lee, Jun-Young Seo, Seo-Yeon Kim, Seung-Hyun Lee, and Young-Keun Hong[†]

Department of Polymer Engineering, The University of Suwon, Hwaseong 445-743, Korea

(Received July 8, 2015, Revised August 11, 2015, Accepted August 17, 2015)

Abstract: Anionic epoxy compound was synthesized and added to asphalt aiming to prepare self-healing asphalt. Epoxy-modified asphalt showed excellent modification effect and healing effect as well. The results revealed that with 5% addition of polymer the tensile strength, impact strength and complex shear modulus of the polymer-modified asphalt increased by 65%, 64% and 35%, respectively. It seems that high interaction occurs between polymer and asphalt matrix. Self-healing efficiency of the polymer-modified asphalt based on tensile strength showed 100%, comparing to 79% of straight asphalt. In impact experiment the polymer-modified asphalt showed 99% of healing efficiency, comparing to 77% of straight asphalt. In rheological experiment the polymer-modified asphalt showed 103% of healing efficiency, comparing to 72% of straight asphalt. It appears that the ionic bonding existing in epoxy polymers contributed to high values of self-healing efficiency. The polymer which has high intermolecular force fills the crack of the asphalt, pulling the opponent side each other, and so the original properties were restored.

Keywords: anionic epoxy compound, healing agent, self-healing asphalt, crack healing, healing efficiency

Introduction

도로는 교통과 물류에서 그 중요성이 커지고 있는 반면, 강우·강설 및 중차량 교통량 증대로 아스팔트 포장의 도로파손이 많아지고 있다. 고속도로 아스팔트 포장의 파손 중에서 포트홀(pothole)이 66%로 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 균열과 소성변형(rutting) 순으로 나타나고 있다.¹ 포장도로 파손은 교통안전의 심각한 위해 요인이며, 주행쾌적성 또한 크게 저하되므로 포장파손 저감을 위한 조치가 필요하다.

아스팔트는 일반적으로 저온 또는 상온(20°C 근처)에서는 균열이 발생하기 쉽고 고온(60°C 근처)에서는 소성변형이 발생하기 쉽다. 이를 억제하기 위하여 아스팔트를 개질한다. 그러나 개질아스팔트가 순수아스팔트(straight asphalt)보다 내구성이 강하다 하여도 수년이 지나면 어쩔 수 없이 수명을 다하게 된다. 특히 발생된 미세균열은 점점 커져 대개 포트홀을 형성한다. 이에 평편한 도로포장 상태를 계속 유지할 수 있고 그에 따라 도로포장의 수명을 늘릴 수 있는 자가치유형 아스팔트가 제안된다. 즉, 아스팔트 표면에 발생된 균열을 초기에 막아보자는 것이다. 이에 따라 아스팔트포장 수명을 연장시킬 수 있고 도로관리비·설치비를 줄일 수 있다.

자가치유 물질이란 스마트 재료의 한 부류로서 오랜 사용 중에 나타나는 손상을 치유하여 원 상태로 복구시킬 수 있는 능력 체계를 갖춘 물질을 말한다.² 이 구상은 생물들은 상처

를 입었을 경우 이를 자체적으로 치유한다는 데서 얻어졌다. 물질에 균열이나 다른 형태의 손상이 일어나면 여러 물성이 바뀌고 종국엔 물질 파괴를 일으킨다. 보통 균열이 발생하면 인간의 손으로 수리되거나 미세균열은 작아서 탐지가 어렵다. 물질이 사용 중에 일어나는 작은 손상을 치유할 수 있는 능력을 구조적으로 가지고 있다면 손상 수리비용과 함께 사용기간이 연장되어 생산비용도 크게 줄일 수 있을 것이며, 결과적으로 CO₂ 발생량을 줄일 수 있을 것이다.

자가치유 물질에 관한 연구는 외부에서 환경을 변화시키는 방식으로 진행되어 왔다. Wang³과 Lin⁴은 용액을 첨가하는 방식을 제시하였으며, Shen⁵은 자가치유를 위해서 열을 가하는 방식을 제시하였다. Li⁶와 Raghavan⁷은 외부에서 치유용 물질을 주입하는 방식을 제시하였다. 마이크로캡슐을 이용하여 미세 균열에 의한 손상을 입었을 때, 생물학적 시스템과 같이 외부의 조작 없이 스스로 치유되는 시스템들이 개발되었다.^{8,9} 치유제가 마이크로캡슐화 되어 고분자 시스템 안에 있다가 외부의 압력으로 고분자 시스템에 금(crack)이 가면, 그 금선(crack plane)에 있던 마이크로캡슐이 터지면서 금선으로 흘러나와 금선 근처에 이미 분산되어 있던 촉매와 반응하며 고분자가 중합되어 금선을 메우는 것이다. 이와 비슷한 작동하는 것이 미세 중공사(hollow fiber)이다. 치유제를 채운 중공사가 시멘트 콘크리트에 응용되고 있다. Cho¹⁰는 polydimethylsiloxane과 polydiethoxysiloxane을 축중합시켜 금속 표면에 생긴 미세균열을 70% 정도 치유시켰다.

[†]Corresponding author E-mail: ykhong@suwon.ac.kr

현재로서 아스팔트포장에서 아스팔트바인더의 미세균열을 봉합하여 포트홀 같은 균열 발생을 방지할 기술은 존재하지 않는다. 지금까지 균열의 보수 목적으로 아스팔트 표면에 환경적 물성저하와 습기 침투로부터 아스팔트 표면을 실란트로 처리하거나, 아스팔트의 주성분인 아스팔텐과 말텐의 비율을 원래 상태로 회복하여 노화된 아스팔트의 물성을 원래의 아스팔트 물성으로 바꾸어주도록 물성회복제(rejuvenator)를 아스팔트 표면에 처리하기도 한다. 그러나 이 약품들은 아스팔트 표면에서만 작동하고 또한 도로가 쉽게 미끄러지는 단점을 갖고 있다. 또 하나의 문제는 이들은 균열보수 목적이지만 균열방지 목적이 아니다. 최근에 자기장을 이용하여 균열을 보수하는 방법이 소개되었다¹¹. 이 방법은 아스팔트콘크리트에 전도성 섬유(철 또는 구리 섬유 또는 흑연)를 도입시키고, 시간이 지나 포장에 균열이 발생되면 포장 노면에 고주파 자기장을 발생시키는 자기장 발생장치를 근접시켜 아스팔트콘크리트 내의 전도성 섬유체가 발열(induction heat)하여 아스팔트가 30°C~70°C에서 뉴토니안 유체의 성질을 갖게 되고 그

에 따라 접착성을 갖게 되어 균열 계면이 서로 달라붙어 균열을 메우는 것이다. 그러나 이 방법 또한 균열 보수 방법이 아닌 균열 방지(예방) 방법이 아니다. 또한 인간의 도움이 필요하다는 점에서 자율성(autonomy)이 요구되는 진정한 자가치유 방법이 아니다.

아스팔트의 강성에 기여하는 성분인 아스팔텐은 극성 물질로서, 보통 분자량 1,000~5,000 g/mol이며, 순수아스팔트에는 약 20%가 포함되어 있다. 구성 성분으로는 벤젠, 고리알칸, 아민기, 수산기, 카르복실기, 싸이올기 등을 포함하고 있다.¹² 이중 아민기, 수산기, 카르복실기, 싸이올기 등은 반응 상대방에 수소를 줄 수 있어 수소를 잘 받아들이는 에폭사이드와 같은 화합물과 잘 반응한다.

이온 그룹이 포함된 고분자는 이온성 고분자 또는 아이오노머(ionomer)라고 불리운다.¹³ 아이오노머는 고분자 사슬에 이온기가 20 mol% 정도 도입된 형태이며 이온결합에 의해 고분자가 서로 이온집합체(ionic cluster) 형태로 결합 되어 실온에서는 가교 역할을 담당한다. 하지만 이 가교는 물리적 가교

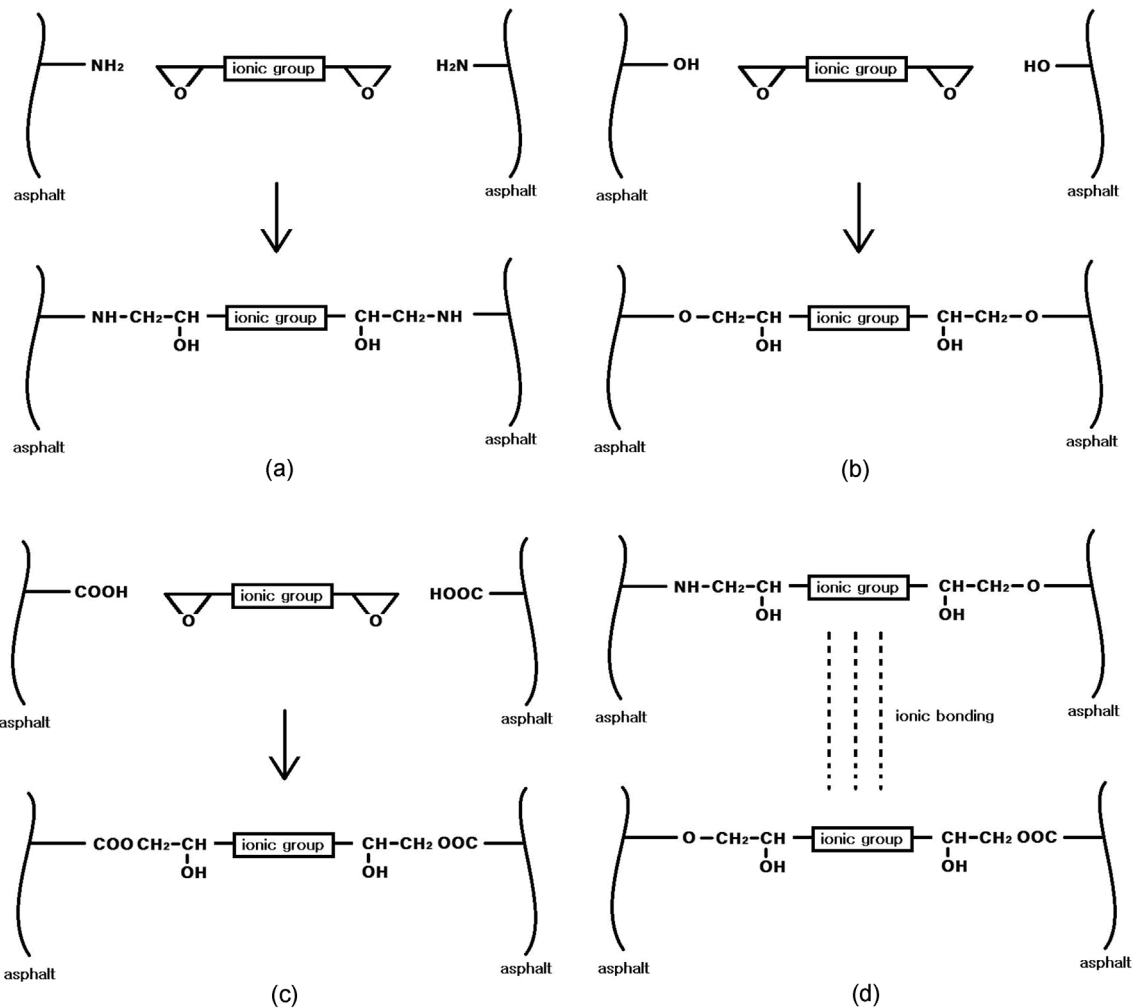


Figure 1. Ionic reaction mechanism of epoxy compound with asphaltene molecules; (a) reaction with amine group of asphaltene, (b) reaction with hydroxyl group, (c) reaction with carboxyl group, (d) ionic bond between ionic groups.

로서 고온에서는 가교가 와해되어 용융상태를 이룬다. 이로 부터 기계적 물성의 개질 및 자가복구 효과를 기대할 수 있을 것이다.

본체에 이온기를 가진 에폭시 화합물은 Figure 1처럼 수소를 줄 수 있는 반응기와 작용하여 자기들끼리는 이온결합으로 잡아당기고, 양말단에 있는 에폭시이드기는 아스팔트 분자들과 작용하며 가교를 형성하여 전체적으로 아스팔트는 가교구조를 이룬다.

이에 본 연구에서는 분자간 결합력이 큰 고분자, 즉 이온성 에폭시 화합물을 합성하여 이를 아스팔트 내부에 혼입시켜, 아스팔트 미세균열 계면에서 이온결합력에 의해 상대면으로의 이동을 원활하게 하여 계면이 빠른 시간 내에 서로 달라붙게 함으로써 더 이상의 미세균열 성장을 막아 더 큰 균열을 방지할 수 있는 자가치유형 아스팔트를 제조하고 이를 분석하고자 하였다.

Experimental

1. 실험재료 및 시약

본 연구에서 가장 기본적인 약품인 에폭시는 Sigma-Aldrich

의 bisphenol A propoxylate diglycidyl ether이다. 이온결합을 위한 물질로서 Sigma-Aldrich의 2,2-bis(hydroxymethyl)propionic acid와 triethylamine을 사용하였다. 이들은 정제하지 아니하고 구입 그대로 사용하였다. 나머지 약품들은 삼전화학에서 구입하여 사용하였다. 아스팔트(asphalt binder)는 (주)동남유화의 침입도(25°C) 60~80, 연화점 49°C인 AP-5를 사용하였다.

2. 음이온 에폭시 화합물 합성

먼저 3구 플라스크 안에서 2,2-bis(hydroxymethyl)propionic acid (DMPA)와 triethylamine (TEA)를 mole 비 1 : 1로 40°C에서 300 rpm 속도로 3시간 동안 교반 반응시켜 anionomer를 얻었다. 만들어진 anionomer를 bisphenol A propoxylate diglycidyl ether (BPDE)와 합성하기 위해 고분자 양말단에 에폭시기가 남아 있게끔 mole 비 4 : 1 : 1 (BPDE : DMPA : TEA)로 80°C에서 150 rpm 속도로 18시간 동안 교반 반응시켰다.

3. 아스팔트 개질

온도가 조절되는 케틀에서 순수아스팔트에 음이온 에폭시

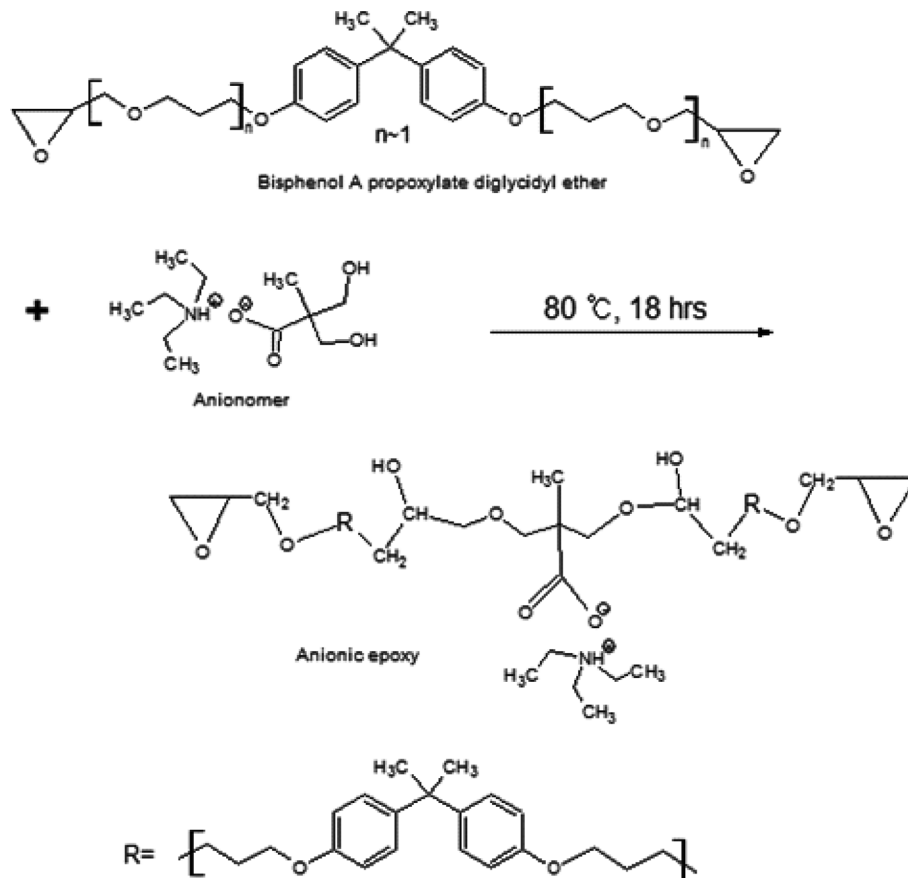


Figure 2. Preparation of the anionic epoxy compound.

화합물을 아스팔트 무게 대비 5%를 첨가하고 160°C, 500 rpm으로 2시간 동안 반응시켰다.

4. IR 분석

에폭시 화합물의 합성 여부를 확인하기 위하여 상온에서 Perkin Elmer의 FT-IR Spectrum Two를 사용하여 분석하였다.

5. 인장 시험

고분자개질아스팔트의 인장강도 측정은 인장 시편을 만들어 만능재료시험기(대경 UTM)를 사용하여 챔버(0°C)에서 그립거리 7 cm, crosshead speed 10 mm/min으로 고정하여 실험을 진행하였다.

인장 시험에 의한 자가치유성 시험은 인장강도시편을 문방구 칼로 자른 다음 절단된 부위를 붙여주고 1, 3, 6, 12 및 24 시간 동안 10°C에서 가만 붙여 두었다가 (휴식시간) 인장시험을 재개하였다.

6. 충격 시험

충격 시험으로는 아이조드(Izod)법에 의해 시편모형을 ASTM D256에 따라 제작하고 Tinius-Olsen 사의 Impact Strength Tester를 사용하여 파단이 노치 부분에서 일어나도록 하고 10°C에서 시험하였다. 노치는 아스팔트가 연성이라 기계로 깎기 어려워 날카로운 문방구 칼로 찍어 만들었다. 제조된 시료는 아스팔트의 물리짐을 방지하기 위하여 10°C에서 보관하여

사용하였다.

충격강도에 의한 자가치유성 시험은 인장시험에서와 같이 시편의 노치부분에서 가장 짧은 부분을 칼로 자르고 붙인 다음 휴식시간동안 가만 두었다가 충격시험을 재개하였다.

7. 유변 시험

고분자개질아스팔트의 온도에 따른 점탄성 거동을 파악하기 위하여 Malvern 사의 동적전단유변시험기(DSR)를 사용하였다. DSR 시험을 수행하기 위해서는 두 가지 형태의 시험방법이 있다. 그 중 본 실험에서는 parallel plate 방식을 사용하였다. 이 방식으로 시험할 경우에는 DSR의 진동 플레이트와 같은 직경을 갖는 원형의 아스팔트 시편이 필요하다. 따라서 자체 유변물성을 보기 위하여 지름 25 mm, 두께 2 mm의 원형 시편을 만들어 하나를 올려놓고 시험하고, 자가치유성을 보기 위하여 지름 25 mm, 두께 1 mm의 시편을 만들어 두 개를 겹쳐놓고 휴식시간에 따라 시험하였다. 진동수는 고속도로상의 속도(90 km/hr)와 유사한 10 rad/s로 고정시켰다.

Results and Discussion

1. 에폭시 아이오노머 IR 분석

DMPA (Figure 3)와 TEA를 반응시켜 얻은 DMPA/TEA (Figure 4)를 보면 DMPA에 있던 카르복실기의 키톤(C=O) 피크(1684 cm^{-1})가 1705 cm^{-1} 으로 이동하였고, DMPA에 없던 1558 cm^{-1} 가 생긴 것을 확인할 수 있다. 이는 음이온 COO^-

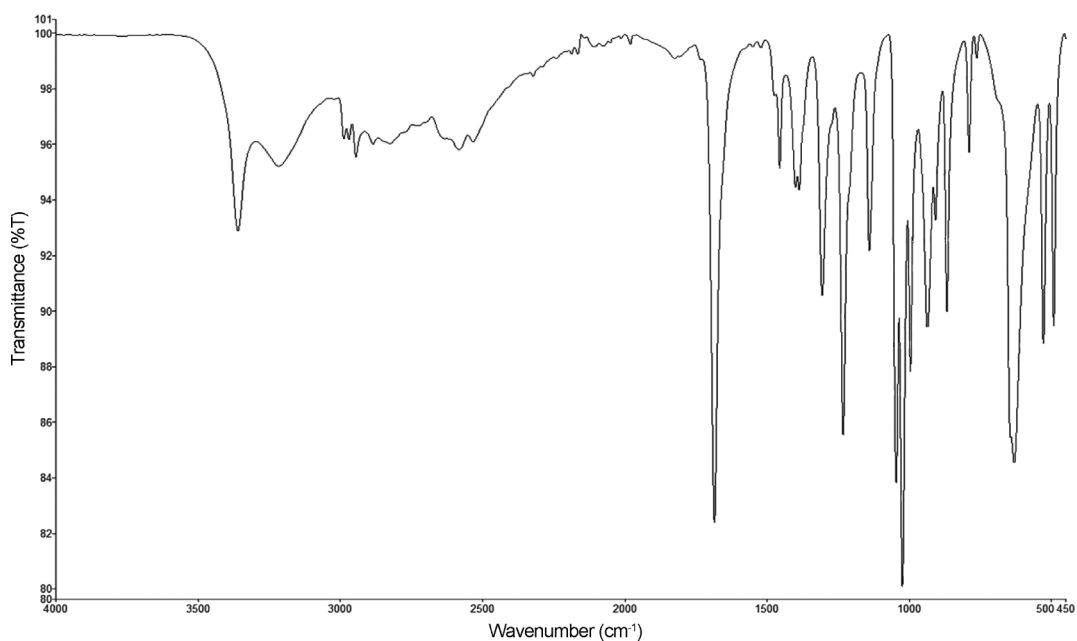


Figure 3. FT-IR spectrum of DMPA.

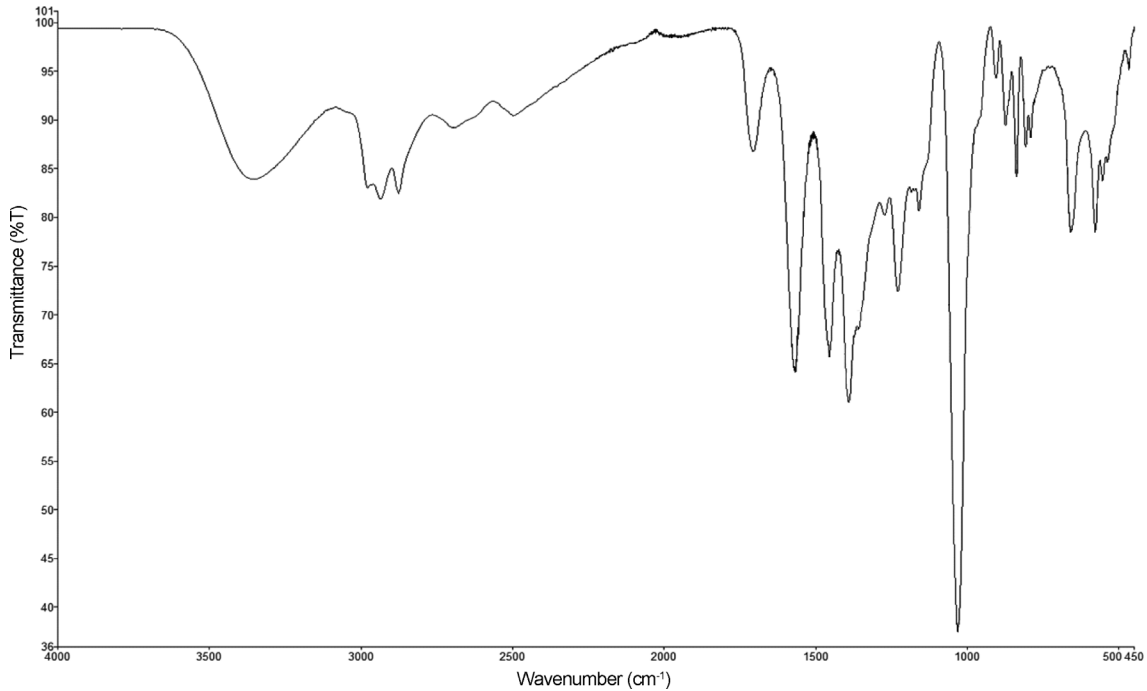


Figure 4. FT-IR spectrum of DMPA/TEA.

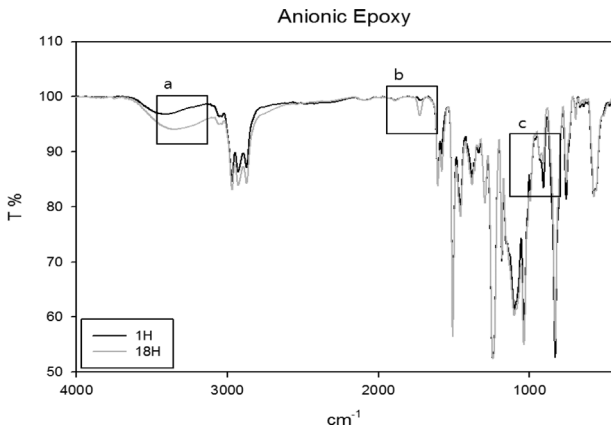


Figure 5. FT-IR spectra of anionic epoxy compounds with spectral regions: a; hydroxyl peak, b; ester peak, c; epoxide peak.

피크를 나타낸다.¹⁴ 이로써 DMPA와 TEA가 반응하였다는 것을 알 수 있다.

Figure 5는 에폭시와 anionomer(DMPA/TEA) 반응 시 반응 시간에 따라 얻어진 IR 그래프이다. 진한 선은 1시간, 흐린 선은 18시간 반응한 그래프인데 c 구역을 보면 시간이 지날수록 에폭사이드 피크인 915 cm^{-1} 에서 감소하고, COO^- 피크인 1558 cm^{-1} 에서 새로 나온 것을 보아 에폭시와 anionomer가 반응한 것으로 판단된다. 또한 a 구역을 보면 3370 cm^{-1} 의 OH 피크가 증대한 것으로 보아 에폭사이드기가 반응하면서 OH가 만들어졌고, b 구역의 1720 cm^{-1} 의 C=O 피크가 증대한 것으로 보아 에폭시가 anionomer와 반응한 것으로 판단된다.

2. 개질아스팔트의 인장 물성

인장강도는 물질의 내구성을 나타내는 값이고, 신율은 물질의 탄성을 나타내는 값이다. Figure 6과 7에서, 에폭시 또는 DMPA와 반응시킨 에폭시를 첨가한 개질아스팔트의 기계적 성질은 순수아스팔트의 물성과는 큰 차이가 없었다. 이는 DMPA를 첨가하여 형성된 수소결합(즉 양쪽 두 수산기 사이, 수산기와 카르복실기 사이, 두 카르복실기 사이)이 기계적 물성에는 큰 효과가 없음을 가리킨다. 하지만 anionomer (DMPA/TEA)와 반응시켜 얻은 이온성 에폭시 수지가 첨가된 개질아스팔트는 순수아스팔트보다 물성이 크게 높아짐을 확인할 수 있다. 인장강도 면에서는 1.23 MPa에서 2.04 MPa가 되어

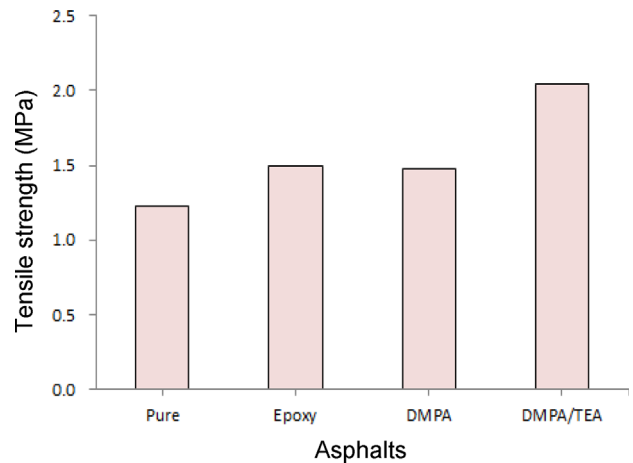


Figure 6. Tensile strength of asphalts.

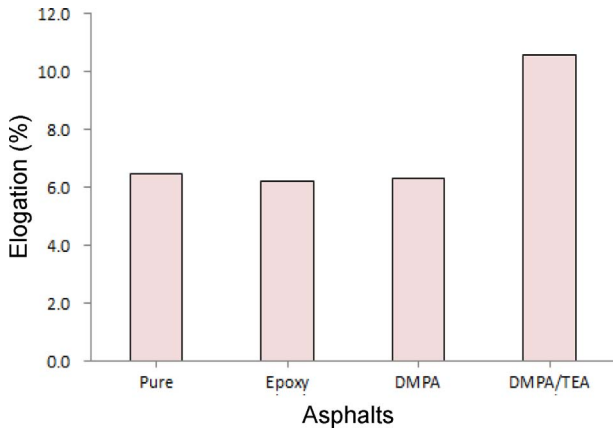


Figure 7. Elongation (%) of asphalts.

63% 내구성이 증가하였고 신율 면에서는 6.5%에서 10.6%가 되어 63% 탄성이 증가하였다. 이는 이온결합의 효과로 여겨진다.

Figure 8은 각 아스팔트의 인장강도 값을 이용하여 구한 자가치유성을 나타내고 있다. 여기서 치유능(healing efficiency)은 아래의 식으로 구하였다.

$$\text{치유능(\%)} = \text{치유기간 후의 강도/본래 강도} \times 100$$

3가지 아스팔트 모두 휴식시간이 길어질수록 치유정도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 대개 휴식시간이 6시간 이상 경과되면 약 70% 정도의 치유율을 나타냈다. 12시간이 지나면서 순수아스팔트, 수소결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트 그리고 이온결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트 간에 차이가 나타나기 시작하였다. 24시간이 지난 후 순수아스팔트는 79%의 치유능을 보였으나, 수소결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트는 86%의 치유능을 보였다. 이온결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트는 초기 치유시간(1시간)에서는 치유능이 40%

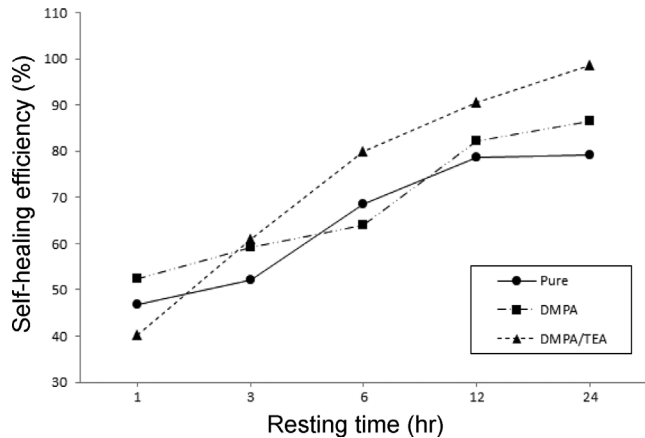


Figure 8. Healing tendency of asphalts based on their tensile strength.

로 낮지만 시간이 지날수록 점증적으로 증가하여 24시간이 지난 후에 100%의 치유능을 나타내었다. 치유능 선이 거의 직선인 것으로 보아 치유능은 휴식시간에 비례함을 알 수 있다 (휴식시간 24시간 안에서). 여기서 흥미로운 점은 순수아스팔트도 어느 정도의 치유능력을 갖고 있다는 것이다. 이는 아스팔트 특유의 접착 특성에 기인한다고 알려져 있다.¹⁵

3. 개질아스팔트의 충격 물성

고분자 재료에 충격거동의 연구는 높은 변형속도에서 재료가 동적하중에 견딜 수 있는 능력을 알아보는 데에 그 의미가 있다. 충격시험방법에는 여러 종류가 있으나, 본 실험에서는 Izod test로 notch 시험편을 사용하므로 본질적으로 균열개시보다는 균열성장에 요구되는 에너지를 측정한다.

Figure 9는 개질제 종류에 따른 개질아스팔트의 충격강도를 나타낸 것이다. 충격강도는 인장시험과 비슷한 결과를 나타내었다. 충격강도는 재료의 내충격성에 대한 정도를 가리키

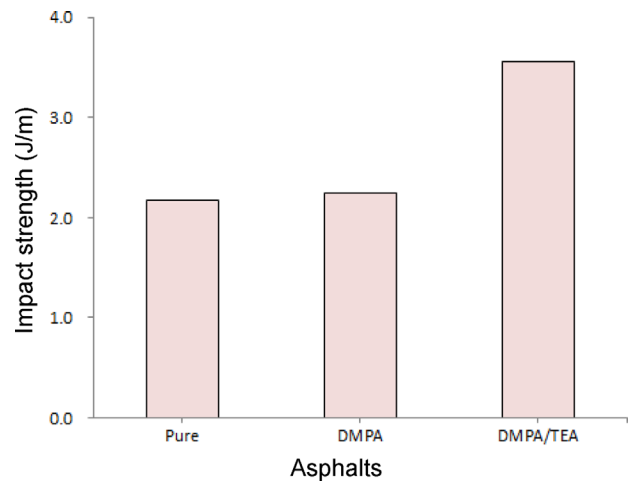


Figure 9. Impact strength of asphalts.

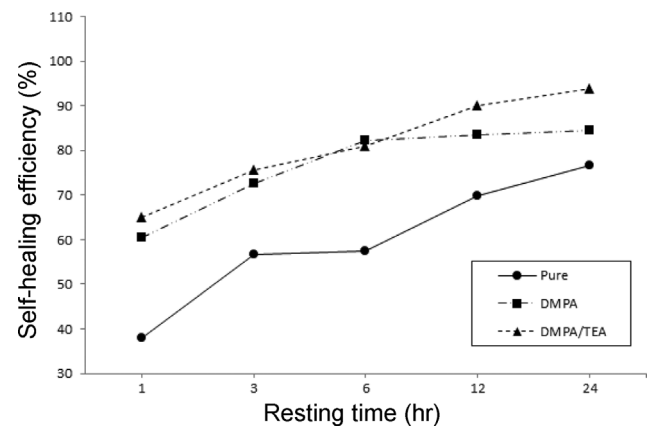


Figure 10. Healing tendency of asphalts based on impact strength.

는데 탄성이 높은 물질은 충격이 가해질 시 외부에너지를 흡수하여 충격에너지를 골고루 퍼지게 하기 때문에 충격강도가 높다. 순수아스팔트는 2.17 J/m를 보였으나 이온결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트는 3.56 J/m 충격강도를 보여 탄성을 가진 이온결합에 의해 충격강도가 64% 증가하였다.

Figure 10은 각 아스팔트의 충격강도를 이용하여 구한 자가치유성을 보여주고 있다. 3가지 아스팔트 모두 휴식시간이 길어질수록 치유정도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 휴식시간이 24시간이 지난 후 순수아스팔트에서는 70%의 치유능을 보였으나, 수소결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트는 85%의 치유능을 보였으며 이온결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트는 99%의 치유능을 나타내었다.

4. 개질아스팔트의 유변 물성

G^* (복소전단탄성률)는 물질의 내구성을 나타내며 값이 높을수록 물성이 우수함을 뜻한다. $G^*/\sin\delta$ 는 물질의 소성변형에 대한 저항을 나타내며 값이 높을수록 소성변형에 대한 저항이 크다는 것을 뜻한다.

Table 1은 3가지 아스팔트의 복소전단탄성률을 나타낸 것이다. 저온영역(-5°C)에서는 이온결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트가 순수 아스팔트에 비해 그 값이 17% 증가하였으나 실온(20°C)에서는 35%, 고온(60°C)에서는 27% 증가하여 실온에서 내구성이 가장 크게 증가하였음을 알 수 있다.

Table 2는 3가지 아스팔트의 $G^*/\sin\delta$ 를 나타낸 것이다. 저온영역(-5°C)에서는 이온결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트가 순수 아스팔트에 비해 그 값이 14% 증가하였으나 실온(20°C)에서는 54%, 아스팔트 소성변형온도(60°C)에서는 60% 증가하여 온도가 높을수록 소성변형에 대한 저항이 커짐을 알 수 있다.

Figures 11, 12는 저온과 실온에서의 각 아스팔트의 복소전단탄성률을 이용하여 구하여진 자가치유성을 보여주고 있다.

Table 1. Complex Shear Moduli of Asphalts

	G^* (MPa)		
	-5°C	20°C	60°C
Pure	9496.62	1917.74	2.41
Ap + (Epoxy + DMPA)(5%)	10056.13	1917.74	2.47
Ap + (Epoxy + DMPA/TEA)(5%)	11158.36	2725.89	3.85

Table 2. $G^*/\sin\delta$ of Asphalts

	$G^*/\sin\delta$ (MPa)		
	-5°C	20°C	60°C
Pure	86586.61	2532.25	2.42
Ap + (Epoxy + DMPA)(5%)	87288.94	3745.14	2.47
Ap + (Epoxy + DMPA/TEA)(5%)	99105.38	3911.58	3.87

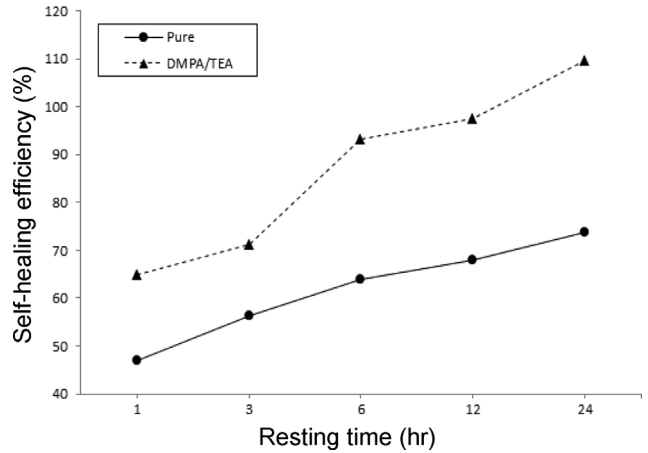


Figure 11. Healing efficiency of asphalts based on complex moduli at -5°C.

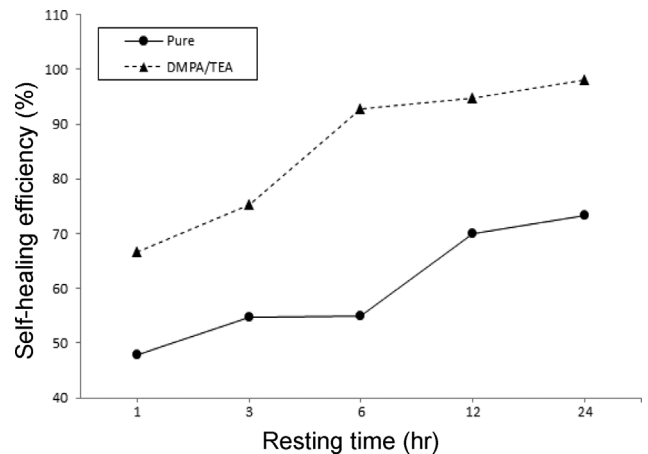


Figure 12. Healing efficiency of asphalts based on complex moduli at 20°C.

주위온도에 상관없이 순수아스팔트는 휴식시간 24시간이 지난 후 72%의 치유율을 보였지만 이온결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트는 본래의 물성을 다시 갖게 되는 103%의 자가치유율을 보였다.

Table 3에 위에서 행해진 3가지 방법에 의하여 얻어진 자가치유능을 정리하였다. 평균적으로 저온 또는 실온에서 순수아스팔트는 73%의 치유율을, 이온결합 에폭시 수지 첨가 개질아스팔트는 101%의 자가치유율을 보였다. 유변 물성에 기초한 자가치유율이 가장 조작성(잘랐다가 다시 붙이는 과정)

Table 3. Healing Efficiency(%) of Asphalts with 24 Hours of Rest Period

Criterion	Anionic epoxy-asphalt	Straight asphalt
Tensile strength	100	79
Impact strength	99	77
Complex modulus	103	72

이 덜 작용하였고 또한 균열계면 접촉면적이 상대적으로 가장 넓었기 때문이 아닐까 여겨진다.

Conclusion

본 연구에서는 순수아스팔트가 갖는 고온에서의 하중에 의한 소성변형 문제와 저온에서의 취성문제를 해결하며 또한 자가치유능력을 갖는 아스팔트를 개발하고자 이온성 에폭시 수지를 합성하고, 이의 첨가가 아스팔트의 자가치유 특성에 미치는 영향을 살펴 보았다.

인장 시험을 통하여 음이온 에폭시 수지로 개질시킨 아스팔트의 개질효과와 자가치유성을 확인하였다. 인장강도 면에서는 1.23 MPa에서 2.04 MPa가 되어 63% 내구성이 증가하였고, 24시간의 치유기간이 지난 후 순수아스팔트에서는 79%의 치유능을 보였으나, 음이온 에폭시로 개질시킨 아스팔트는 100%의 치유능을 나타내었다.

충격 시험을 통하여 개질시킨 아스팔트의 개질효과와 자가치유성을 확인하였다. 순수아스팔트는 2.17 J/m를 보였으나 음이온 에폭시로 개질된 아스팔트는 3.56 J/m 충격강도를 보여 음이온고분자에 의해 충격강도가 64% 증가하였다. 휴식시간 24 시간이 지난 후 순수아스팔트에서는 70%의 치유능을 보였으나, 음이온 에폭시로 개질시킨 아스팔트에서는 99%의 치유능을 나타내었다.

유변 시험을 통해 개질시킨 아스팔트의 개질효과와 자가치유정도를 확인하였다. 순수아스팔트보다 음이온 에폭시로 개질시킨 아스팔트의 복소전단탄성률이 저온영역(-5°C)에서는 음이온 에폭시로 개질시킨 아스팔트가 순수 아스팔트에 비해 17% 증가하였으나 실온(20°C)에서는 35% 증가하였다. 주위 온도에 상관없이 순수아스팔트는 휴식기간 24 시간이 지난 후 72%의 치유율을 보였지만 음이온 에폭시로 개질시킨 아스팔트는 103%를 보였다.

이러한 개질효과와 자가치유성은 음이온 에폭시 수지에 존재하는 이온결합의 강한 분자간결합력에 기인한다 하겠다.

Acknowledgments

본 연구는 국토교통부의 건설기술혁신사업과 관련하여 국토교통과학기술진흥원의 지원(12CCTI-C063988-01-000000)으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. J. H. Collins and M. G. Bouldin, "Long and Short Term Stability of Straight and Polymer Modified Asphalts", *Rubber World*, **206**, 32 (1992).
2. Self healing materials concept and application, second edition-version 2013, NL Agency.
3. P. Wang, S. Lee, and J. P. Harmon, "Ethanol-induced crack healing in poly(methyl methacrylate)", *J. Polym. Sci. B*, **32**, 1217 (1994).
4. C. B. Lin, S. Lee, and K. S. Liu, "Methanol-Induced crack healing in poly(methyl methacrylate)", *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 1399 (1990).
5. J. S. Shen, J. P. Harmon, and S. Lee, "*Rubber Chem. Technol.*", **57**(3), 652 (1984).
6. V. C. Li, Y. M. Lim, and Y. W. Chan, "Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite", *Composites Part B*, **29**, 819 (1998).
7. J. Raghavan and R. P. Wool, "Interfaces in repair, recycling, joining and manufacturing of polymers and polymer composites", *J. Appl. Polym. Sci.*, **71**, 775 (1999).
8. S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle, J. S. Moore, M. R. Kessler, S. R. Sriram, E. N. Brown, and S. Viswanathan, "Autonomic healing of polymer composites", *Nature*, **409**, 794 (2001).
9. K. S. Toohey, N. R. Sottos, J. A. Lewis, J. J. Moore, and S. R. White, "Self-healing materials with microvascular networks", *Nature Mater.*, **6**, 581 (2007).
10. S. H. Cho, H. M. Anderson, S. R. White, N. R. Sottos, and P. V. Braun, "Polydimethylsiloxane-Based Self-Healing Materials", *Adv. Mater.*, **18**, 997 (2006).
11. A. Garcia, M. Bueno, J. N. Contreras, and M. N. Partl, "Induction healing of dense asphalt concrete", *Constr. Building Mater.*, **49**, 1 (2013).
12. O. C. Mullins, H. Sabbah, J. Eyssautier, A. E. Pomerantz, L. Barré, A. B. Andrews, Y. Ruiz-Morales, F. Mostowfi, R. McFarlane, L. Goual, R. Lepkovicz, T. Cooper, J. Orbulescu, R. M. Leblanc, J. Edwards, and R. N. Zare, "Advances in Asphaltene Science and the Yen-Mullins Model", *Energy Fuels*, **26**(7), 3986 (2012).
13. W. J. Macknight and R. D. Lundberg, "Elastomeric Ionomers", *Rubber Chem. Technol.*, **57**(3), 652 (1984).
14. S. K. Lee, S. H. Jeon, and T. Ree, "Fourier-Transform Infrared Studies of Ionomeric Blend and Ionic Aggregation", *Bull. Korean Chem. Soc.*, **7**(4), 267 (1986).
15. Y. Tan, L. Shan, Y. R. Kim, and B. S. Underwood, "Healing characteristics of asphalt binder", *Constr. Build. Mater.*, **27**, 570 (2012).