



빛에 의한 아스팔트 개질에 관한 연구

강 현 승·홍 영 근[†]

수원대학교 신소재공학과

(2008년 12월 19일 접수, 2009년 1월 27일 수정, 2009년 3월 4일 수정 및 채택)

A Study on the Modification of Asphalt with Light

Hyun Seung Kang and Young Keun Hong[†]

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

E-mail : ykhong@suwon.ac.kr

(Received December 19, 2008, Revised January 27, 2009, Revised & Accepted March 4, 2009)

요약 : 여름철 아스팔트의 표면 온도 상승으로 인한 도로의 소성변형과 겨울철 온도 강하로 인한 도로균열이 도로안전운전을 위협하는 문제로 등장하면서 아스팔트 물성향상을 위한 아스팔트개질의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 소성변형 저항성을 증가시키기 위해 소성변형의 직접적인 원인인 햇빛을 이용하기 위해, 고분자중합에 사용되는 광개시제를 사용하여 개질아스팔트를 제조하였다. 인장시험기와 레오미터를 이용하여 기계적 물성과 유변적 물성을 실험한 결과 개질아스팔트는 자외선에 의한 분자간 결합으로 인해 인장강도와 저장탄성률이 크게 증가하였다. 열분석에서는 온도에 따른 잔류 무게 분율이 증가하는 거동을 보여 분자간 결합이 가교반응의 결과임을 나타내었다. 장시간 자외선조사 시험에서는 조사시간이 길어짐에 따라 그 물성이 증가되거나 유지되는 거동을 보임으로써 사용수명이 연장될 수 있는 효과를 나타내었다.

ABSTRACT : Recently, much attention has focused on the permanent deformation of roads in hot summer and cracks in cold winter, which are detrimental to safe driving. This leads to necessity of modification of asphalt to resist those deformation. In this study, a type of modified asphalt was prepared by addition of a photoinitiator which is activated by ultraviolet ray. The mechanical and rheological properties of photoinitiator-modified asphalt were examined using UTM and rheometer. Results showed that the modified asphalt was effected by ultraviolet and thus tensile strength and storage modulus increased, due to molecular attraction, with initiator content and irradiation dose. Thermal analysis showed less weight loss upon photoinitiator-modification and this indicated that the molecular attraction is the result of cross linking reaction between asphalt molecules induced by photoinitiator. According to long term ultraviolet curing test, properties of the photoinitiator-modified asphalt did not decrease or even increase for 20 years. This indicates that useful life of the asphalt could be extended by addition of photoinitiator.

Keywords : modified asphalt, photoinitiator, uv curing, rheological properties

I. 서 론

최근, 도로상의 차량 증가에 따라 안전운전이 더욱 요구되고 있고 도로의 불량은 안전운전과 더불어 정속운전을 크게 위협하고 있다. 이에 따라, 계절별 기후영향과 교통 조건에 대응하기 위해서는 기존의 온도에 취약한 순수아스팔트를 대체할 수 있는 새로운 아스팔트, 즉 개질아스팔트가 절실히 요구되고 있다. 아스팔트는 온도에 민감하여 고온에서는 쉽게 물러져 소성변형의 원인이 되고 저온 또는 상온에서는 취성을 나타내 균열발생의 원인이 된다. 특히 우리나라의 기후 여건상 소성변형이 많이 일어나는데 주로 발생하는 시기는 여름철의 이상 고온 현상이 지속되는 기간이며, 이 기간 동안 아스팔트 표층의 표면 온도는 약 60 °C 에서 70 °C 정도까지 상승하고

이때 발생한 소성변형은 차량의 훼손이나 운전자의 핸들조작을 어렵게 하여 안전에 큰 영향을 미친다. 이에 대한 대책으로 고온에서 더 단단한 아스팔트 혼합물을 얻고 교통 하중과 관계없는 저온 균열의 발생을 최소화하기 위하여 저온 또는 상온에서 더 유연한 아스팔트 혼합물을 얻는 것이 중요하며, 이에 대한 연구들이 국내에서도 몇몇 이루어지고 있다.^{1,2}

순수아스팔트를 개질하는 데에는 개질제(modifier)를 사용한다. 개질제의 가장 주요한 임무는 높은 주변온도에서 아스팔트에 영구변형(permanent deformation)이 일어나는 것을 막아주는 것이다. 이는 두가지 방법으로 이루어질 수 있다. 첫째는 아스팔트를 단단하게(stiffen)하여 아스팔트의 점탄성 반응을 늦추는 것이고, 둘째는 아스팔트의 탄성요소를 증가시켜 점성 요소를 감소시키는 것이다. 아스팔트의 탄성 요소가 증

Table 1. Advantages of Different Types of Modifiers¹²

Modifier	Permanent deformation	Thermal cracking	Fatigue cracking	Moisture damage	Ageing
Elastomers	✓	✓	✓		✓
Tire Rubber		✓	✓		
Plastics	✓				
Sulfur	✓				
Carbon black	✓				✓
Lime				✓	✓

가하면 아스팔트의 유연성이 향상된다.

위의 목적으로 사용되는 개질제는 크게 3가지로 나뉜다; 고무, 플라스틱 그리고 화학개질제이다. 고무류에는 SBS, SBR, SIS, SEBS, EPDM, 페타이어분말 등이 있고,^{3~5} 플라스틱류에서 열가소성 플라스틱으로는 EVA, PE, PP, PVC, PS, 페비닐 등이 있으며 열경화성플라스틱으로는 PU, 에폭시, 아크릴, 페놀수지 등이 있다.^{6~8} 화학개질제료로는 리그닌, 황 등이 있으며,⁹ 그 외 충전제로는 카본블랙, 석회 등이 있다.^{10,11} 이들 개질제들의 각각의 장점을 Table 1에 열거한다.¹² 고무류가 가장 광범위한 영역을 다루고 있음을 알 수 있다. 이는 고무류와 아스팔트가 *interpenetrating network*을 형성하고 있기 때문이다.¹³

아스팔트의 물성을 논하는 데에 있어, 최근 미국에서 수행된 전략적 도로연구사업(Strategic Highway Research Program, SHRP)의 연구 결과 중의 하나인 아스팔트의 공용성등급(PG grade)에서는 화학적 성분이 아닌 아스팔트의 물리적 특성을 이용한 분류기준을 사용하고 있다.^{14,15} 여기서 아스팔트의 중요한 물성으로 점탄성적인 특성이 있는데, 공용성 등급과 포장 공용성의 관계에서 점탄성응력($G^*/\sin \delta$)의 최소값을 1 kPa로 제한하여야 한다고 알려져 있다.¹⁶

본 연구에서는 아스팔트 포장도로에서 소성변형의 직접적인 원인이 되는 햇빛(가시선+자외선)을 오히려 아스팔트 물성 향상에 이용하고자, 불포화 저분자(주로 아크릴레이트, 메타크릴레이트) 중합에 사용되는 광개시제를 첨가하여 아스팔트를 개질하여 보았다. 광개시제가 혼합된 아스팔트를 자외선조사 시킨 후에 동적 전단 유변 물성 측정기(DSR, dynamic shear rheometer)를 이용하여 저온 또는 상온에서의 저장탄성률(G')과 고온에서의 점탄성응력($G^*/\sin \delta$)의 유변적 물성을, 만능재료 시험기(UTM)를 이용하여 기계적 물성을 알아보았다. 또한 실제 아스팔트 혼합물을 시공하였을 시에 오랜 시간동안 그 물성을 유지할 수 있어야 하기 때문에, 야외에서 장시간 받을 수 있는 자외선조사량을 계산하여 해당하는 연수만큼 조사시킴으로써 그 사용가능 연한을 알아보았다. 또한 열중량 분석기(TGA, thermogravimetric analyser)를 이용하여 가교반응을 알아보았다.

II. 실험

1. 재료 및 시약

순수아스팔트로는 우리나라에서 가장 널리 사용되는 AP-5 (침입도 60~70, SK정유)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 개질제로는 아크릴레이트, 메타크릴레이트 중합용 자외선 광개시제인 benzophenone(BP)을 사용하였으며 삼전화학에서 구입하였다.

2. 개질 아스팔트의 제조 및 자외선경화

아스팔트는 160 °C의 오븐에서 용융상태로 만들어 사용하였고, 아스팔트의 양은 실험 조건상 200 g으로 고정하였다. 데워진 아스팔트를 200 °C의 금속통에 넣고, BP를 함량 0.5 및 3%로 하여 아스팔트에 첨가하고, 5000 rpm의 속도로 1시간 동안 교반하였다. 자외선경화기(제일 UV사)에서는 수은 전구를 사용하였고 제원은 전구용량(W) 1000, 파장은 300~450 nm이며 조사량은 18 mW/cm² 이다. 자외선조사 시간은 30 및 90초 간격으로 조절하여 자외선경화를 실행하였다.

3. 시편 제조 및 기계적 거동 관찰

뜨거운 상태의 개질된 아스팔트를 실리콘 고무틀에 부어 시편을 제작하고 이를 사용시까지 냉온(-10 °C) 보관하였다. 인장강도의 측정은 만능재료시험기(UTM, Daekyung Co.)를 사용하였으며, 냉각기를 사용하여 -10 °C로 고정하였다. 이는 상온에서는 아스팔트가 너무 늘어나 인장시험이 어려웠고, 여러 번의 실험 결과 -10 °C 상태가 가장 적당하였다. 인장속도는 상대적으로 저속인 10 mm/min으로 시험하였으며, 시료장악(grip)거리는 7 cm로 고정하였다.

4. 유변물성의 분석

아스팔트의 유변학적 특성을 파악하기 위하여 동적 전단 유변 물성 측정기, MCR300(Physica Co.)을 이용하여 아스팔트의 전단속도에 따른 점도특성을 측정하였다. 시험 방법은 25 mm 평형판 동적전단 방법을 이용하였고, 시료의 크기는 지름 25 mm, 두께 1 mm의 원형 아스팔트를 사용하여야 하기 때문에, 두께를 맞추기 위하여 고정 플레이트에 직접 아스팔트를 쏟아 붓는 방법을 이용하였다. 실험온도(약 25 °C)에서의 시료의 주파수 변화에 의한 저장탄성률(G')을 측정하기 위하여 0.1 rad/sec(0.0159 Hz)에서 100 rad/sec까지 측정하였다. 아스팔트의 소성변형의 주요인자인 점탄성응력($G^*/\sin \delta$)은 온도변화(25~175 °C)에서 측정하였으며, 이때 angular frequency는 10 rad/sec로 고정하였고, 온도는 5 °C/min의 속도로 진행시켰다.

5. 장시간 자외선경화

본 실험은 실제적으로 아스팔트가 시공 되었을 시 장시간 동안 아스팔트가 태양 빛에 의해 그 물성이 증가하거나 유지 될 수 있는 지를 확인하기 위하여 실험하였다. 실제 우리나라에 1년동안 조사되는 자외선양은 대략 $106.9 \text{ mW/m}^2 (\text{sec}^{-1})$ 이고,¹⁷ 시편이 자외선조사기 내부에서 받는 조사량은 $18 \text{ mW/cm}^2 (\text{sec}^{-1})$ 이다. 조사기에서의 10초 조사는 야외에서의 하루와 동등하다. 이를 연수로 계산하여, 각각 1년에서 20년까지 자외선조사시켰다.

6. 열분석

아스팔트의 개질에 따른 열적 특성을 확인하기 위하여 열분석을 하였다. TGA(Netzsch)를 사용하여 $25 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 구간에서 승온 속도 $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$ 으로 분석그림을 얻은 다음, 각 시료의 열분해 정도를 비교하였다. 실험 중 산화를 방지하기 위해 TGA내부를 고순도의 질소 상태로 유지하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기계적 거동의 관찰

순수아스팔트에 BP를 각각 0.5, 3% 첨가하고 각각 30, 90초 동안 자외선조사시켰다. 개질된 아스팔트의 인장시험 결과를 Table 2에 나타내었다. 전체적으로 BP의 함량과 자외선 조사 시간에 비례하여 강도(인장강도)와 강성(모듈러스)이 증가하였다. 강도가 증가한 것만큼은 아니나 인성(일의 양) 또한 증가하였다. 일반적으로 물질을 빛을 쬐이면 그 물질의 물성은 감소한다. 왜냐하면 물질을 이루는 분자의 절단(scission)이 일어나기 때문이다. 이는 특히 탄화수소화합물에서 크게 나타난다.¹⁸ 아스팔트는 90~95%가 여러 형태의 탄화수소들로 이루어져 있음에도 불구하고 BP에 의해 이들 분자들이 반응하여 서로 화학적 잡아당김(attraction)을 야기하게 되고 이에 따라 아스팔트가 단단(stiff)하여졌다고 사료된다. 이는 BP가 주로

Table 2. Tensile Properties of Modified Asphalts with BP (at -10 °C)

Sample	Tensile strength (N/mm ²)	Work-done (N-mm)	Modulus (N/mm ²)
AP	0.390	43.24	40.3
AP+BP0.5(30s)	0.452	42.11	50.5
AP+BP0.5(90s)	0.458	43.97	57.9
AP+BP3(30s)	0.570	45.69	60.4
AP+BP3(90s)	0.582	49.11	60.7

아크릴 등의 저분자를 연결(불포화탄소에 라디칼을 형성시켜 중합)하는 데에 사용되고 있는데, 중합이 아닌 다른 방법으로 아스팔트 분자들을 연결시키는 데에도 사용이 가능함을 보여 준다.

2. 유변학적 특성

아스팔트에 BP를 첨가하여 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서의 저장탄성률(G')과 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $175 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지의 온도구간에서의 점탄성응력($G^*/\sin \delta$)을 구하고 이를 각각 Figure 1과 2에 나타내었다. 먼저, 순수아스팔트(BP가 첨가되지 않은 아스팔트)에서는 자외선조사한 것이 아니한 것에 비해 저장탄성률은 차이가 거의 없고, 점탄성응력은 약간 증가하였다. 이는 아스팔트에 아직 존재하고 있는 약간의 휘발성 물질이 자외선조사에 따른 열에 휘발되었다고 생각된다. 하지만 아스팔트에 BP를 첨가하였을 경우 저장탄성률과 점탄성응력이 확연히 증가하였으며 BP의 양이 늘

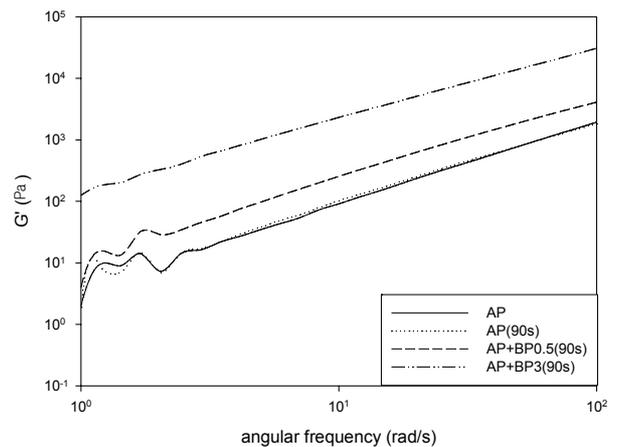


Figure 1. Rheological properties, G' of modified asphalts with BP.

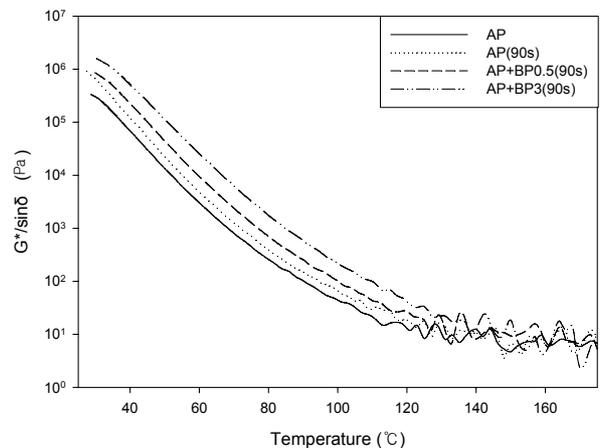


Figure 2. Rheological properties, $G^*/\sin \delta$ of modified asphalts with BP.

어날수록 비례적으로 더욱 큰 증가를 나타내었다. 저장탄성률은 10 rad/s에서 5 kPa 이상을 보여 균열에 대한 저항성이 증대되었고, 점탄성응력은 아스팔트의 소성변형이 일어나는 온도인 60 °C에서 기준치인 1 kPa를 상회하여 소성변형에 대항하는 내구성이 향상되었음을 보여주고 있다. 이는 BP가 첨가되고 자외선조사시켰을 시에는 아스팔트안의 여러 종류의 탄화수소들이 BP에 의해서 화학적 잡아당김 반응이 일어나 물성이 증가되었다고 여겨진다. 점탄성응력($G^*/\sin \delta$) 값이 1 kPa에 해당하는 온도가 물질의 소성변형 온도를 뜻한다. Figure 2에서 보면, 순수아스팔트는 이 온도가 67 °C를, BP(3%)로 개질된 아스팔트는 82 °C를 가리키고 있다. 개질된 아스팔트의 소성변형 온도가 크게 상승하였다. 이는 아스팔트가 BP로 개질됨으로써 열에 대한 내구성이 크게 향상되었음을 나타내고 있다.

3. 열분석

순수아스팔트와 BP로 개질된 아스팔트의 열중량분석 결과를 Figure 3에 나타내었다. Figure 3의 열분해 곡선을 보면, 순수아스팔트는 40 °C서부터 280 °C까지의 온도영역에서 길고 약한 중량감소를 보이고 있다. 이는 아스팔트내의 분자길이와 짧은 용매성 분자들의 탈산(desorption)을 나타낸다.¹⁹ 즉, 아스팔트를 구성하는 원래의 짧은 분자들이거나, 또한 비교적 긴 분자(asphalten)들이 주변온도가 증가함에 따라 열에 약한 부분부터 분해되어 더욱 짧은 분자로 분해되면서 기화한 것으로 사료된다. 순수아스팔트는 360 °C 근처에서 BP개질아스팔트보다 먼저 열분해되기 시작하였다. 잔재가 30% 남은 지점에서부터 BP개질아스팔트가 순수아스팔트보다 높은 온도에서 분해가 진행되고 있다. 최종분해 온도는 순수아스팔트는 482 °C, BP개질아스팔트는 492 °C에서 나타났다. TGA 분석에서 최종분해온도 상승은 경화가 일어났음을 뜻한다.²⁰ 이는 광개시제로 첨가된 BP가 자외선에 의하여 벤조일 라디칼로 분해

되고 이 개시제 라디칼들이 아스팔트 내에서 아스팔트분자간 가교반응을 유도하여 가교체를 형성하였기 때문인 것으로 사료된다.²¹ 이는 위에서 언급한, 아스팔트 분자들을 연결하는 화학방법이 곧, 중합반응이 아닌 가교반응(벤조일 라디칼이 아스팔트분자에서 수소를 탈취함에 따라 아스팔트분자 라디칼이 형성되고 이 아스팔트분자라디칼들이 서로 반응하여 가교체를 형성하는)이었음을 가리킨다.

4. 장시간 UV경화 시험

본 실험에서는 BP로 개질된 아스팔트로 도로포장했을 시의 포장의 수명을 예측해 보고자, 지금까지의 짧은 조사시간이 아닌, 야외에서와 동등하게 긴 시간으로 자외선조사시켰다. 그에 따라 실제적으로 야외에서 받는 연간 총조사량을 알아내어 그 양만큼 자외선조사기 안에서 조사시켰다. 계산에 의하면, 야외에서의 한 달은 조사기에서 15분에 해당하고 1년은 3시간, 20년은 60시간에 해당한다. 먼저 Table 3의 기계적 물성을 보면, 순수아스팔트는 해가 지남에 따라 강도, 인성 및 강성 모두 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 BP개질아스팔트의 경우에는 3 항목 모두 증가하였다. 이는 앞에서와 같이 BP에 의한 아스팔트분자의 화학적 가교반응에 기인한 것으로 사료된다. 보통 자외선경화에 있어서 광개시제의 투입양이나, 자외선조사량에 따라 기계적인 물성, 특히 인장강도가 초기에 증가하였다가 최대점을 지나면서 떨어진다.²² 그러면서 그 물질은 부서지기 쉽게 된다. 이는 자외선절단에 따른 사슬의 절단에 기인한다.¹⁸ BP개질아스팔트의 경우에는 20년이 지나도 물성의 저하가 없는 것으로 보아 BP의 혼입량은 적당하였고 BP는 자기의 역할(가교형성)을 충실히 이행하였으며 거기에 가교결합 또한 적당히 형성된 것으로 보인다. Figure 4와 5의 유변적 물성 또한 기계적 물성과 비슷한 거동을 나타내고 있다. BP가 첨가되었을 경우 탄성률, 즉 저장탄성률이 해가

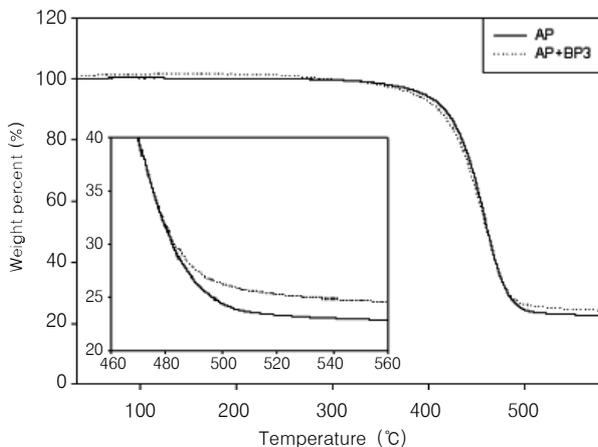


Figure 3. TGA thermograms of modified asphalts.

Table 3. Effect of Long Cure Time on Tensile Properties of Modified Asphalt with BP (at -10 °C)

Sample	Tensile strength (N/mm ²)	Work-done (N-mm)	Modulus (N/mm ²)
AP	0.390	43.24	40.3
AP(1year)	0.342	42.19	48.8
AP(5year)	0.329	42.52	47.9
AP(10year)	0.321	42.21	44.5
AP(20year)	0.311	42.11	43.6
AP+BP3(1year)	0.491	43.99	50.3
AP+BP3(5year)	0.542	52.11	55.2
AP+BP3(10year)	0.556	51.81	58.0
AP+BP3(20year)	0.559	51.99	57.8

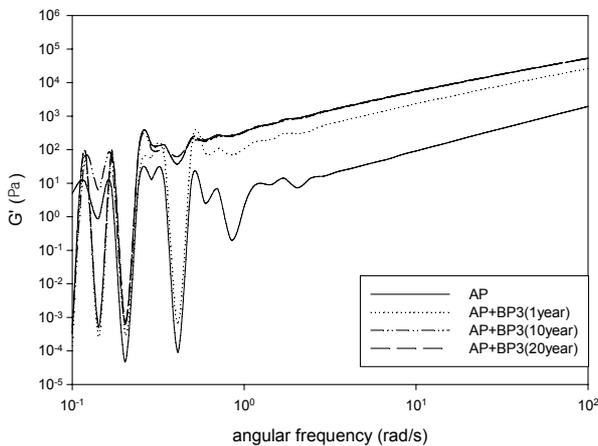


Figure 4. Effect of long cure time on G' of BP modified asphalt.

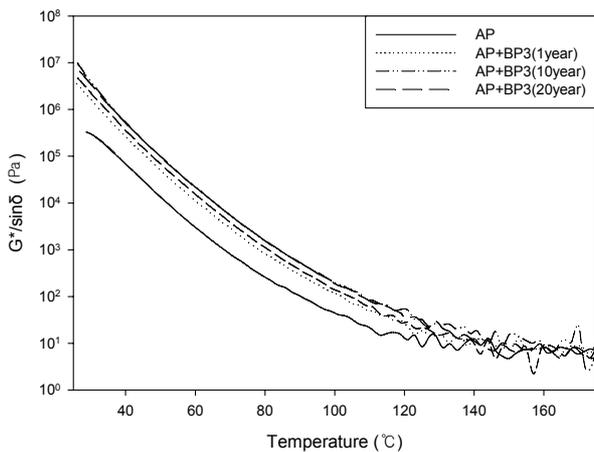


Figure 5. Effect of long cure time on G*/sin δ of BP modified asphalt.

지남에 따라(자외선조사 시간이 길어질수록) 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 다시, BP가 첨가됨에 따라 자외선에 의한 가교반응이 일어나 탄성적인 부분이 증가되어 그 물성이 향상되었다²¹고 사료된다. 그리고 점탄성응력 또한 조사시간 20년까지 그 물성을 유지하였다. 즉, 20년이 지나도록 소성변형온도가 내려가지 않았다. 이는 아스팔트의 수명(소성변형온도저하에 따른)이 보통 8년이라고 알려져 있는데 BP를 첨가하여 개질시켰을 때 적어도 20년 동안은 초기의 소성변형온도가 그대로 유지될 수 있음을, 따라서 BP개질아스팔트의 수명은 20년 또는 그 이상이 될 수 있음을 의미한다.

IV. 결 론

순수아스팔트는 시간이 지나면서 공기 중의 산소에 의한 산화, 햇빛(특히 자외선)에 의한 분자절단, 그리고 아스팔트 내 짧은 사슬인 오일류의 증발에 따른 건조화 등에 의해 노화되어 물성이 감소한다. 이는 아스팔트의 균열발생과 소성변형

을 야기시키고, 결국 아스팔트의 수명을 급격히 단축시킨다.

본 연구에서는 아스팔트에 개질재로서 고분자중합에 사용되고 있는 자외선 개시제를 첨가함으로써, 아스팔트가 시간이 지날수록 햇빛에 의해 노화되는 것이 아니라, 자외선 개시제에 의해 빛을 받으면서 아스팔트 내에 가교반응이 형성되어 아스팔트는 더욱 강인하여져 고온소성변형과 저온취성균열이 방지되어 장시간 우수한 물성을 유지할 수 있는, 하중이나 열에 대한 내구성이 크게 향상된 개질아스팔트를 제조하였고, 이를 실험으로 나타내었다. 실험에서 기계적 성질(인장강도 등)과 유변적 성질(저장탄성률 등)은 자외선개시제의 긍정적 영향을 같이 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 수원대학교 환경청정기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 황성도, 김영진, 유인균, “아스팔트 포장의 신재료 기술 개발”, 한국건설기술연구원, 보고서, 86 (2000).
2. 조윤희, 이관호, “소성변형 제어를 위한 아스팔트 혼합물 및 포장기술”, 한국도로포장공학회, 2(2), 49 (2000).
3. D.N. Little, J.W. Button, and R.M. White, Investigation of Asphalt Additives, FHWA/RD-87-001, Texas Transportation Institute (1986).
4. M.A. Caltabiano, “Reflection Cracking in Asphalt Overlays”, Thesis, University of Nottingham (1990).
5. M.B. Ko and Y.K. Hong, “Improvement of Deformation Resistency of Asphalt by Modification with Tire Rubber”, *Elastomer*, 43(2), 72 (2008).
6. S.S. Tremelin, Neoprene Modified Asphalt, Report of DuPont, 121 (1982).
7. T.S. Shuler and R.D. Pavlovich, Characterization of polymer modified binders, New Mexico State Highway Department, Report 52001 (1987).
8. K.S. Kim and Y.K. Hong, “A Study on the Storage Stability of Waste Vinyl-Modified Asphalt”, *Elastomer*, 43(3), 191 (2008).
9. J.H. Denning and J. Carswell, Improvements in roller asphalt surfacings by the addition of sulphur, Report 963, Transport and Road Research Laboratory (1981).
10. F.S.R. Rostler, R.M. White, and E.M. Dannenburg, “Carbon Black as a Reinforcing Agent for Asphalt”, *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technology*, 55, 376 (1986).
11. H. Plancher, E.L. Green, and J.C. Petersen, “Reduction to Oxidative Hardening of Asphalt by Treatment with Hydrate Lime”, *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technology*, 45, 1 (1976).
12. S.F. Brown, R.D. Rowlett, and J.L. Boucher, “Asphalt Modification”, *Proceedings of The US Strategic Highway Research*

- Program, 181 (1990).
13. U.L.F. Isacson and L.U. Xiaohu, "Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers", *Journal of Materials Science*, **34**, 3737 (1999).
 14. S.R. Tangella, J. Craus, J.A. Deacon, and C.L. Monismith, "Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures", Thesis, University of California, Berkeley, California (1990).
 15. "Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction", Second Edition, NAPA Education Foundation (1996).
 16. 고석범, 박태순, 김수심, "아스팔트포장의 소성변형 방지를 위한 설계 기준 개발", 한국도로포장공학회 정기학술 발표지, **17** (2001).
 17. 조희구, 이방용, 이준석, 박선옥, "한국전역의 자외선복사 계절기후", *한국기상학회지*, **37**(5), 525 (2001).
 18. K.J. Saunders, "Organic Polymer Chemistry", Chapman & Hall, London, 1988.
 19. E.A. Collins, J. Bares, and F.W. Billmeyer, "Experiments in Polymer Science", John Wiley & Sons, N.Y., 1993.
 20. E.A. Turi, "Thermal Characterization of Polymeric Materials", Academic Press, N.Y., 1983.
 21. G. Polacco, J. Stastna, and P. Michalica, "Memory Functions in Polymer Modified Asphalts", *Journal of Applied Polymer Science*, **104**, 2330 (2007).
 22. M.A. Ali, M. Khan, and K.M.I. Ali, "Relationship between Mechanical Properties and Glass Transition Temperature of UV Cured Polymer", *Polymer Plastics Technology and Engineering*, **37**, 175 (1998).