

도로포장용 아스콘으로 쉘의 재활용

홍영호[†] · 권영진^{*}

혜전대학 의료재료과, *호서대학교 소방방재학과
(2006년 8월 16일 접수, 2006년 11월 7일 채택)

Recycling of Shingle Waste for Pavement Asphalt Concrete

Young-Ho Hong[†] and Young Jin Kwon^{*}

Department of Bio-Materials, Hyejeon College, Hongsung 350-702, Korea

*Department of Fire & Disaster Protection Engineering, Hoseo University, Asan 330-713, Korea

(Received August 16, 2006; accepted November 7, 2006)

쉘 중 함유된 아스팔트 성분의 재활용 기술의 개발은 쉘의 처리 비용의 감소와 경제적인 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 아스팔트 쉘을 도로 포장용 아스콘으로 재활용하기 위한 기초적인 연구를 수행하였다. 이를 위하여 순수한 아스팔트분과 재활용된 아스팔트 혼합물의 열적 특성, 점성 그리고 침입도를 측정하였다. 연구 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다. DSC 분석에 의하면 처리 조건에 관계없이 분리된 쉘의 열적 특성은 유사한 결과를 보였다. 또한 쉘에서 분리된 아스팔트분의 멜팅은 170 °C 부근에서 발생하였다. 분리된 아스팔트분을 중량비로 1~5% 까지 혼합한 후에 침입도를 측정한 결과 도로 포장용 아스팔트분의 기준에 적합한 것을 확인할 수 있었다.

Recycling of asphalt including shingle is much important for economic aspects such as a decrease of treatment cost. This research was carried out in order to process the recycled shingle to asphalt concrete which is a pavement material. Pure asphalt and the mixture of recycled asphalt were tested in terms of the thermal characteristics, viscosity, and penetration. DSC analysis indicates that the thermal characteristics of separate shingle showed similar properties regardless of processing conditions. Melting of asphalt separated from shingle occurred at 170 °C. The viscosity and penetration of the 1~5 wt% of mixed recycling asphalt and raw material asphalt are suitable for the pavement material standard.

Keywords: asphalt concrete, penetration, shingle, viscosity

1. 서 론

지붕재로 주로 사용되고 있는 아스팔트 쉘은 생산 공정과 노후된 쉘의 교체작업에서 폐기성 물질로 발생한다. 쉘 폐기물은 버려지는 형태의 폐기물, 생성공정에서 발생하는 파편으로 구분된다. 이러한 폐기성 쉘은 Hot Mixed Asphalt (HMA) 공정의 새로운 원료 대체 물질로 가치가 인정받고 있다. 쉘 폐기물을 재활용 하게 되면 아스팔트 쉘의 scrap 생성에 따른 처리비용을 낮출 수 있으며, HMA 공정에서 비용을 절감할 수 있다[1-3]. 쉘에 포함되어 있는 아스팔트분의 농도는 19~36 wt%로 도로포장용 물질중의 아스팔트분의 농도 5~6 wt%에 비하여 현저하게 높다. 이러한 관점에서 쉘중에 함유되어 있는 아스팔트분을 재활용 한다면, 처리 비용이 절감되어 경제적인 가치는 매우 크다[4].

아스팔트 쉘 폐기물의 87%는 기준에 지붕재로 사용되고 있는 쉘의 개·보수 과정에서 발생되며, 13%는 제조공장에서 제품을 제조하는 과정에서 발생된다고 조사되었다[5]. 기존의 처리공법은 발생된 폐기물을 매립하거나 재생하여 처리하고 있다. 매립의 경우 매립지의

확보 및 매립 후 안정성의 확보 등 여러 가지 문제점을 가지고 있으므로 효율적인 방법으로 재활용 하는 기술의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다[6,7]. 제조공정에서 발생하는 쉘 scrap은 복합재료 형태로 존재하기 때문에 쉘 제조 공정에 원료로 사용하기에는 많은 문제점을 지니고 있어 지금까지 국내의 생산 공정에서는 재활용 되지 못하고 폐기물과 동일하게 처리 하고 있다[8]. 쉘의 재활용에 관한 연구는 1990년 이후 많은 연구들이 진행되었다[9,10].

이러한 연구들이 주로 쉘을 파쇄하여 재활용하는 공정으로, 파쇄 중간단계에서 발생하는 분진 등에 의한 2차적인 오염을 초래할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하고 파쇄에 소요되는 비용 등으로 인하여 경제적인 문제점 등을 개선하기 위하여 본 연구에서는 쉘을 물리화학적 방법으로 분리하여, 분리된 아스팔트 성분에 대한 용융특성을 분석하며, 압축강도 등 기계적 물성을 분석하여 신재와 비교한 물성 검토를 통하여 재활용 하였을 경우의 물성에 대한 예측을 하고자 하였다.

본 연구에서는 쉘을 처리하여 생성된 아스팔트분을 도로 포장용으로 활용하기 위한 연구를 진행하기 위하여 아스팔트분을 분리하기 위한 최적의 공정을 설정하였다. 설정된 조건에 의하여 분리된 아스팔트분에 대한 기초 물성 분석을 통하여 도로 포장용으로 활용하기

† 주 저자 (e-mail: yhhong@hj.ac.kr)

위한 검토를 진행 하였으며, 점도 분류에 의한 도로포장용 아스팔트 분류기준에 따라 침입도 및 점도 데이터를 활용하여 도로 포장용으로 재활용 가능성에 대한 검토를 진행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 아스팔트 쉼글을 구성하는 각 성분을 개별적으로 분리하여 재활용 하기 위하여 쉼글을 구성성분으로 분리하는 실험을 실시하였다. 수용액 상태에서 쉼글을 분리하기 위하여 산 및 알칼리에 대한 쉼글의 물성변화에 대한 검토를 통하여 쉼글의 분리에 관한 구체적인 실험을 실시하였다. 분리된 아스팔트분에 대한 기초물성 분석 및 재생성분과 신재생성분을 혼합하여 혼합특성에 따른 물성분석을 실시하여 도로포장용 아스콘으로의 재활용 가능성에 대한 검토를 실시하였다. 도로포장용 아스팔트 품질기준은 KS M 2201 (침입도 분류에 의한 기준)과 KS M 2208 (점도 분류에 의한 기준)에 따른다[11,12]. 본 연구에서 실시한 물성 분석은 침입도, 겔보기 밀도, 인열 특성, 인장강도, 신율, 모듈러스, 인성, 점도 등을 분석하였으며 구체적인 실험 과정은 다음과 같다.

2.1. 쉼글의 분리

화학적 방법으로 쉼글을 분리하기 위하여 황산, 질산, 염산 등의 산성물질을 이용하여 5%에서 40% 까지의 농도를 가진 용액을 제조하여 이를 자체 제작한 반응기에 넣고 여기에 쉼글을 넣은 후 교반하여 용액 중에서 쉼글 구성 성분을 분리하였다.

분리된 물질의 물성 분석을 위하여 DSC를 이용하여 물성 분석을 하였으며, 쉼글에서 분리된 아스팔트분의 물성은 점도를 측정하여 비교 분석하였다.

2.2. 물성 분석

아스팔트분과 분리된 물질의 아스콘으로의 재활용 가능성에 대한 평가를 위하여 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 물성분석을 실시하였다.

2.2.1. 재활용 쉼글의 물성분석

산 처리하여 분리한 쉼글을 도로포장용 아스콘으로 재활용하기 위하여 아스팔트분과 쉼글을 혼합하여 사용하는 것이 가장 경제적인 방법이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 순수한 아스팔트분에 쉼글에서 분리된 아스팔트분을 혼합하여 혼합율에 따른 아스팔트분의 기초 물성을 분석하여 도로 포장용으로 재활용하는 가능성에 대한 검토를 진행하였다.

2.2.2. 침입도 분석

침입도는 아스팔트분의 연화 정도를 나타내는 값으로 아스팔트 침입도 시험은 KS M 2252에 준하여 실시하였다[13]. 침입도 시험 조건은 25 °C에서 100 g의 하중으로 5 sec간 하는 것을 기준으로 하고 있는데 본 연구에서는 이러한 조건을 유지하면서 실시하였다. 침입도는 0.1 mm 단위를 침입도 1로 하여 나타내었다. 즉, 침입도는 항온 수욕조 에서 일정 온도로 유지된 시료에 규정된 침이 일정 시간 내에 진입하는 길이를 0.1 mm 단위로 측정한다.

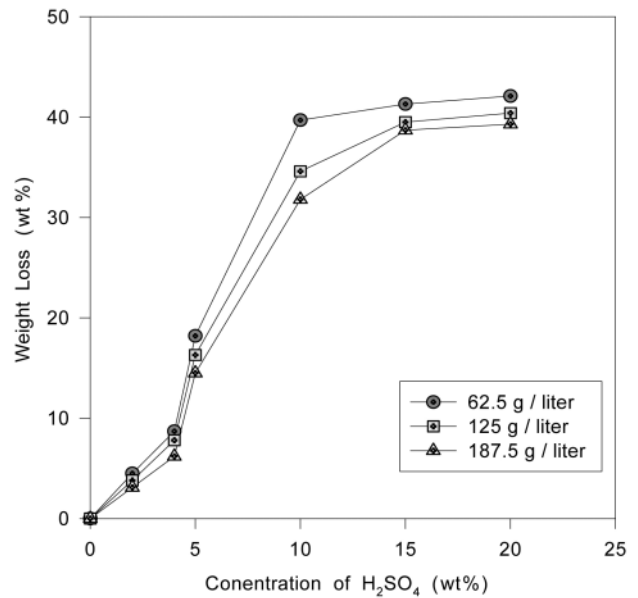


Figure 1. Weight loss of the shingle against the H₂SO₄ concentration.

2.2.3. 아스팔트 물성 측정

산으로 처리한 쉼글에서 분리한 아스팔트분을 아스콘으로 재활용 하기위한 물성분석을 위하여 본 연구에서는 10%의 황산용액으로 교반속도가 1000 RPM인 반응조에서 6일 동안 처리하여 분리된 아스팔트분을 이용하여 순수한 아스팔트와 처리한 쉼글에서 얻어진 아스팔트분을 중량비로 1%에서 7%까지 혼합하여 도로 포장용 아스팔트 성분의 기초 물성 분석을 통하여 아스콘으로 재활용 가능성에 대한 검토를 진행하였다. 이때 측정된 값으로는 DSC 분석, Strength의 변화, 침투도의 측정 그리고 점성 등을 비교하여 물성을 비교 검토 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 아스팔트 쉼글의 분리특성

쉼글을 도로포장용으로 재활용 하기 위하여 쉼글 구성성분을 분리하는 공정의 최적화를 위하여 분리조건에 따른 분리 효율을 비교하였다. 쉼글의 분리는 반응기에 산성용액을 넣고 상부에서 교반을 시키는 형태로 진행하였을 때 조건의 변화에 따른 분리효율을 Figure 1에 나타내었다. 선행연구를 통하여 쉼글의 분리에는 황산을 이용하는 것이 효율적이라는 것을 알 수 있었다[14].

황산용액의 농도 변화가 쉼글의 분리효율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 무게비로 2%에서 20%까지 황산용액 4 liter 중에 쉼글을 62.5, 125 g 그리고 187.5 g/liter의 비율로 함침시킨 후 황산용액의 농도변화가 분리효율에 미치는 결과를 무게 변화율로 나타낸 결과가 Figure 1이다. 본 연구에서는 황산의 농도가 10% 이상에서는 쉼글의 구성성분이 분리 되어 쉼글 구성성분 중 약 40% 정도가 황산용액에 의하여 쉼글에서 분리되어짐을 확인 하였다. 이때 분리되는 성분은 쉼글 표면의 착색사 성분으로 쉼글을 구성하는 아스팔트분을 제외한 나머지 성분들은 분리된다고 할 수 있다. 이때 사용된 쉼글의 양에 대하여는 쉼글의 양이 증가할수록 처리 효율은 감소하는 결과를 보이고 있다.

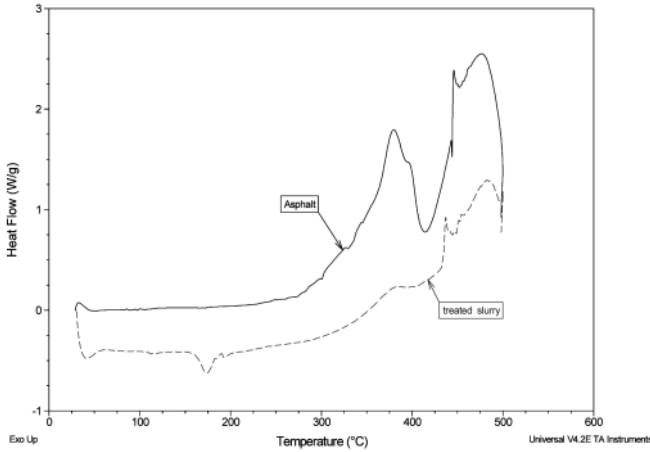


Figure 2. DSC of asphalt and recycled asphalt.

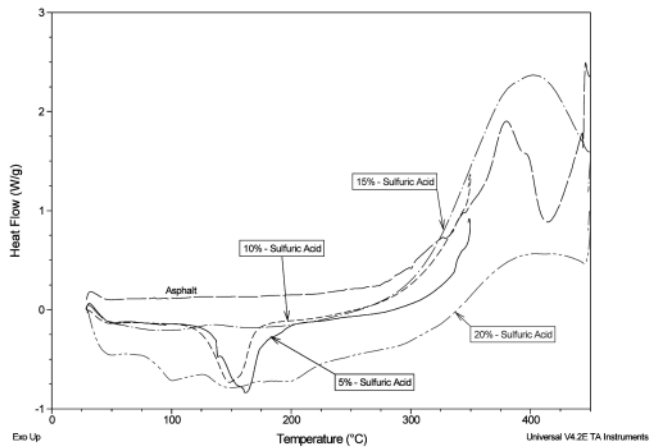


Figure 3. DSC of various treatment H₂SO₄ concentration in recycled asphalt.

3.2. DSC 특성 분석

황산을 이용하여 섬글을 아스팔트분이 함유된 성분과 착색사 성분이 함유된 성분으로 분리 하였을 때 생성된 아스팔트분에 대한 DSC 특성을 분석하여 그 결과를 Figure 2와 3에 나타내었다.

섬글을 산처리 해서 생성된 slurry 형태의 아스팔트분에 대한 DSC 분석 특성을 Figure 2에 나타내었다. 그림에서 살펴보면 DSC 분석 초기 온도에서 시작과 함께 curve는 deflection을 보인다. 270 °C 부근까지 아스팔트분은 멜팅(melting)현상 없이 유리전이(glass transition)현상만이 발생하고 있다. 그러나 섬글에서 분리되어진 아스팔트분은 170 °C 부근에서 멜팅 현상이 발생하는 것으로 미루어 재 활용시 에너지 비용을 현저하게 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 아스팔트분의 분해(decomposition) 온도가 380 °C 정도에서 형성되는 것에 비하여 처리하여 생성된 물질은 430 °C 정도에서 분해가 시작되므로 내 열성에서 보다 안정적인 상태를 이루고 있다고 할 수 있다.

섬글을 재활용하기 위하여 황산으로 처리할 때 사용된 황산의 농도 변화에 따라 생성되는 아스팔트분의 DSC 특성을 아스팔트와 비교하여 그 결과를 Figure 3에 나타내었다. 그림에서 살펴보면 5 wt%의 황산과 10%의 황산으로 처리하였을 경우에는 melting 현상이 나타난다. 특히 10 wt%의 황산으로 처리하였을 경우에는 150 °C의 비교적 낮은 온도에서 melting 현상이 발생한다. 이는 5 wt%의 황산으로 처리한

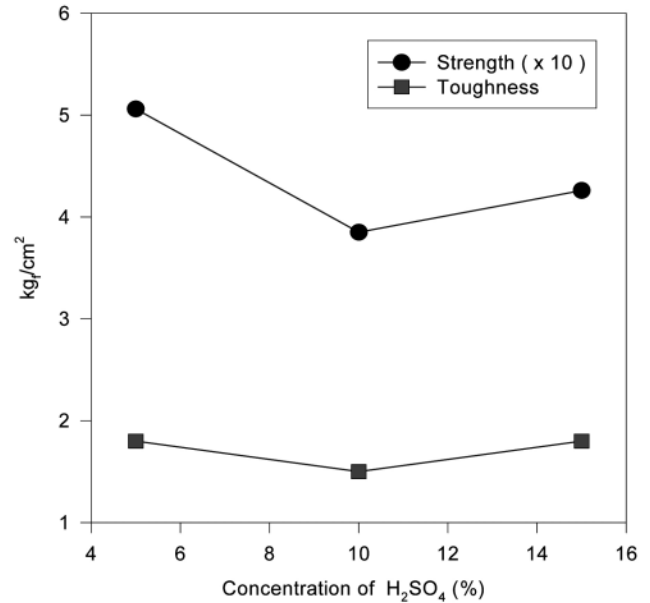


Figure 4. Strength and Toughness of asphalt with treatment concentration.

물질이 보이는 melting 온도보다도 약 20 °C 정도가 낮은 온도이다. 이러한 결과로 미루어 섬글을 도로포장용 아스콘으로 재활용하기 위하여 Hot Mixed Asphalt Plant와 같은 공정에 사용하려 한다면 아스팔트분을 분리할 때 사용되는 황산의 농도가 10 wt%일 때가 최적의 상태라고 할 수 있을 것이다.

3.3. 섬글에서 분리된 아스팔트분의 물성분석

섬글을 황산으로 처리하여 생성된 아스팔트분의 물성을 만능재료 시험기(UTM)를 이용하여 인장강도, 신율(elongation percentage), 모듈러스(modulus) 그리고 인성(toughness) 등을 분석하였다.

Figure 4는 황산의 처리 농도에 따른 아스팔트분의 인장강도와 인성 값을 나타낸 결과이다. Figure 4에서 살펴보면 5 wt%의 황산을 이용하여 분리 생성된 아스팔트분의 인장강도가 가장 높은 값을 보였으며, 상대적으로 10 wt%의 황산으로 처리하여 분리된 아스팔트분의 인장강도가 가장 작은 값을 보였다. 이러한 결과는 아스팔트분의 구조적인 특성으로 판단되며, 10 wt%의 황산으로 처리하였을 때 아스팔트분의 구조적인 변화에 의하여 인장강도가 감소하는 결과를 보이는 것으로 판단되어진다. 황산의 처리 농도에 따른 인성의 변화를 살펴보면 5 wt%의 황산과 15 wt%의 황산으로 처리된 섬글에서 분리한 아스팔트분의 인성은 1.8인데 비하여 10 wt%의 황산으로 처리한 경우에는 인성이 1.5의 값을 보이고 있다. 즉, 처리조건에 따라 인성이 변화하여 10 wt%의 황산으로 처리한 경우에는 인성이 감소하는 결과를 보이고 있다.

Figure 5는 황산의 처리 농도에 따른 아스팔트분의 신율과 모듈러스의 변화를 나타낸 것이다. 신율은 외부 하중에 대한 재료의 연실 정도를 나타내는 값으로 신율이 증가하면 재료의 연실정도가 높다고 할 수 있다. 그림에서 살펴보면 5 wt%부터 15 wt%의 농도를 가진 황산을 이용하여 분리 생성된 아스팔트분의 신율은 처리에 사용된 황산의 농도에 관계없이 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 이는 아스팔트분의 연실정도는 외부적인 요인에 큰 영향을 받지 않는다고 할 수 있다. 황산을 이용하여 섬글을 처리한 후 분리 생성되어진 아스팔트분의 모

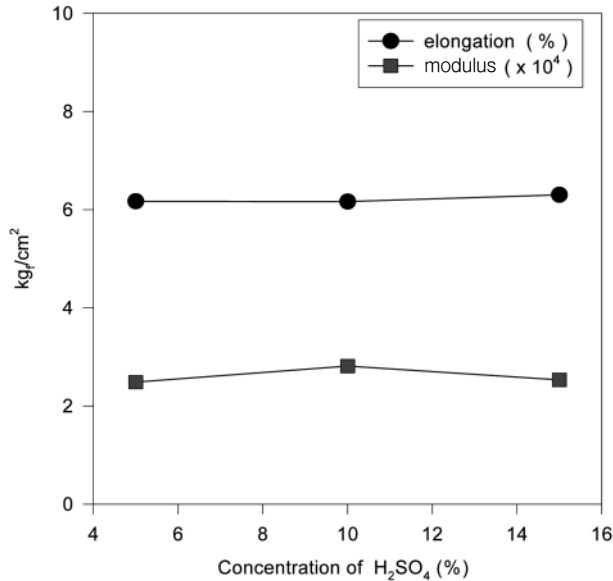


Figure 5. Elongation and modulus of asphalt with treatment concentration.

들러스는 처리에 사용된 황산의 농도에 관계없이 24850에서 28105 까지의 값으로 10 wt%의 황산으로 처리 하였을 경우에 가장 높은 결과를 보이고 있다. 10 wt%의 황산으로 처리한 아스팔트분과 비교할 때 5 wt% 황산으로 처리한 경우에는 약 13%의 차이를 보이고 있으며, 15 wt%의 황산으로 처리한 경우에는 약 11%의 차이를 보이고 있다. 이러한 결과로 미루어 10 wt%의 황산으로 처리한 경우가 특정 신장에 대한 인장 응력이 가장 우수하다고 할 수 있다.

이와 같이 만능재료시험기를 통하여 5 wt%, 10 wt% 그리고 15 wt%의 황산으로 처리한 성글에서 분리된 아스팔트분에 대한 인장강도, 신율, 모듈러스, 그리고 인성(Toughness) 등에 관한 분석 결과를 종합하면, 신율과 모듈러스의 경우에는 10 wt%의 황산으로 처리하였을 경우가 가장 우수하였으며, 인장강도와 인성은 5 wt%의 황산으로 처리 하였을 때 가장 우수한 결과를 나타내었다. 도로포장용 아스콘으로 사용되는 아스팔트의 물성을 고려한다면 신율과 모듈러스 값이 우수한 10 wt% 황산으로 처리한 성글에서 분리된 아스팔트분을 재활용 하는 것이 가장 효율적이라고 판단된다.

3.4. 아스콘용 아스팔트의 활용성

앞서 실시한 성글에서 분리된 아스팔트분에 대한 물성 분석 결과 신율과 모듈러스 값이 우수한 10 wt% 황산으로 처리한 성글에서 분리된 아스팔트분을 도로포장용으로 재활용하기 위하여 아스팔트분과 일정 비율로 혼합하여 인장강도, 침입도 그리고 점도를 분석하여 가장 이상적인 재활용 재료에 대한 자료를 얻고자 하였다.

Figure 6은 10 wt%의 황산으로 성글을 처리한 후 분리된 아스팔트분을 순수한 아스팔트분에 중량비로 1%에서 7%까지 혼합한 다음에 생성된 sheet의 인장강도를 측정된 결과이다. 그림에서 보면 본 연구에서 사용한 순수한 아스팔트분의 인장강도는 약 25.6 kg/cm²으로 나타났으며, 1%의 재생 아스팔트분을 혼합하였을 경우에는 인장강도가 25.7 kg/cm²으로 거의 일정한 결과를 보여주고 있다. 3%의 재생 아스팔트분을 혼합하였을 경우에는 인장강도가 26.2 kg/cm²으로 약 2.3% 정도가 증가하며, 5%의 재생 아스팔트분을 혼합하였을 경우에는 인장강도가 26.3 kg/cm²으로 약 2.7%의 인장강도의 세기가 증가하였다.

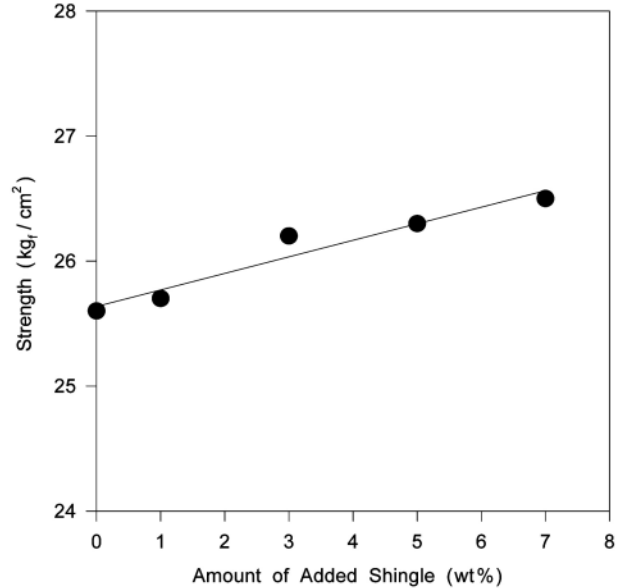


Figure 6. Strength change of asphalt with amount of recycled shingle.

7%의 재생 아스팔트분을 혼합하였을 경우에는 인장강도가 26.5 kg/cm²으로 약 3.5% 정도의 인장강도가 증가하여 본 연구에서 실시한 실험 결과에 의하면 재생된 아스팔트분을 이용하였을 경우에도 인장강도에는 큰 변화를 보이지 않는다는 사실을 확인하였다. 따라서 재생된 아스팔트를 1%에서 7%까지 혼합하여도 아스팔트의 가장 기초적인 물성인 인장강도가 유지되므로 일정량의 재생성분을 혼합하여 도로 포장용으로 활용 하여도 물성이 충분하게 유지될 수 있을 것으로 기대된다.

Figure 7은 아스팔트분에 성글에서 분리한 재생 아스팔트분이 중량비로 1~7% 혼합된 시료를 대상으로 25 °C 정도의 온도에서 침입도를 측정하여 나타낸 결과이다. 그림에서 살펴보면 아스팔트분은 침입도가 45이며 여기에 1%의 재생 아스팔트가 혼합된 경우 침입도는 42로 침입도가 감소하는 결과를 보이고 있으며 첨가된 재생 아스팔트분이 증가할수록 침입도는 약간씩 감소하는 결과를 보이고 있다. 이는 재생아스팔트 생성과정에서 아스팔트분의 구조가 파괴되기 때문에 나타나는 결과로 판단된다. 침입도 40 이하인 스트레이트 아스팔트는 주로 공업용 등에, 침입도 40을 넘는 것은 주로 도로 포장용 및 수리 구조물용으로 사용한다. 따라서 본 연구범위에서는 5%까지의 성글에서 분리된 아스팔트분을 재생 사용하여도 도로 포장용으로 적합하다고 할 수 있다.

Figure 8은 재생성분이 혼합된 아스팔트분의 혼합비율에 따른 점성 변화를 나타낸 그림이다. 본 연구의 실험에서 사용된 초기 아스팔트분의 점도는 125 Pa · sec로 KS M 2208의 점도 분류에 의한 기준표에 따르면 AC-10에 속하는 물질이다. 1%의 재생 아스팔트분을 혼합하였을 경우에는 점도는 120.9 Pa · s의 값을 보이며, 3%의 재생 아스팔트분을 혼합하였을 경우에는 점도가 118.7 Pa · s을 보인다. 5%의 재생 아스팔트분을 혼합하였을 경우에는 점도가 107.8 Pa · s을 나타내며, 7%의 재생 아스팔트분을 혼합하였을 경우에는 점도가 103.1 Pa · s로 점도 분류에 의한 AC-10의 범위(100±20)을 벗어나지 않는다. 이러한 사실로부터 재생 아스팔트분을 혼합하여도 도로 포장용으로 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

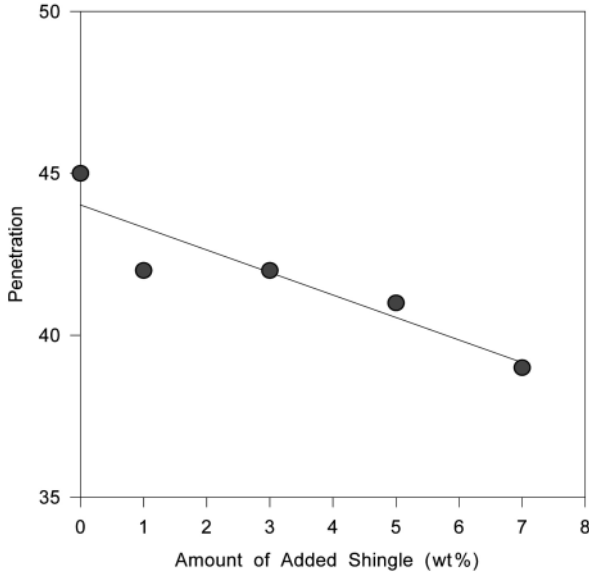


Figure 7. Penetration change of asphalt with amount of recycled shingle.

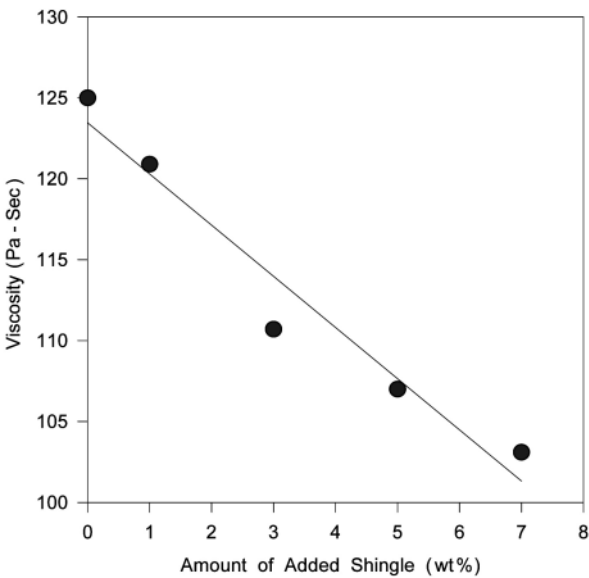


Figure 8. Viscosity change of asphalt with amount of recycled shingle.

4. 결 론

본 연구에서는 아스팔트 쉑글을 구성하는 각 성분을 개별적으로 분리하여 재활용 하는 방법에 대한 연구를 위하여 쉑글을 황산용액을 사용하여 구성성분으로 분리하는 실험을 실시하였다. 분리된 아스팔트분에 대한 기초물성 분석을 통하여 아스팔트분의 특성을 분석하였다. 재생성분과 신재성분을 혼합하여 혼합특성에 따른 물성분석을 실시하여 도로포장용 아스콘으로의 재활용 가능성에 대한 검토를 실시하였다.

분리된 아스팔트 성분과 신재를 혼합하여 재활용에 따른 물성 분석 및 DSC를 이용하여 열적 특성 등의 분석을 실시하였다. 이러한 연구 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 구할 수 있었다.

- 1) 아스팔트분과 쉑글을 산처리 해서 만들어진 slurry 형태의 아스

팔트분에 대한 DSC 분석 특성에 의하면 270 °C 부근까지 아스팔트분은 멜팅(melting)현상 없이 유리전이(glass transition)현상만이 발생하고 있다. 그러나 쉑글에서 분리되어진 아스팔트분은 170 °C 부근에서 멜팅 현상이 발생하는 것으로 미루어 재 활용시 에너지 비용을 현저하게 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 아스팔트분의 분해(decomposition) 온도가 380 °C 정도에서 형성되는 것에 비하여 처리하여 생성된 물질은 430 °C 정도에서 분해가 시작되므로 내열성에서 보다 안정적인 상태를 이루고 있다고 할 수 있다.

- 2) 아스팔트에 대하여 중량비로 1%에서부터 5%까지 재생 아스팔트가 혼합된 경우 침입도가 약간 감소하는 결과를 보이고 있는데 이는 재생아스팔트 생성과정에서 아스팔트분의 구조가 파괴되기 때문에 나타나는 결과이다.

- 3) 재생성분이 혼합된 아스팔트분의 혼합비율에 따른 점성변화를 살펴보면 본 연구에서 사용된 초기 아스팔트분의 점도는 125 Pa · sec이며, 1%에서 7%의 재생 아스팔트분을 혼합하였을 경우에 점도는 120.9 Pa · s에서부터 103.1 Pa · s로 재생 아스팔트분을 혼합하여도 도로 포장용 기준인 100±20에 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

감 사

본 연구는 충남환경기술개발센터 기술개발사업(과제번호: CN-05-3-50-54)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. B. Mallick, M. R. Teto, and W. S. Mogawer, Evaluation of Use of Manufactured Waste Asphalt Shingles in Hot Mix Asphalt, *Technical Report*, Chelsea Center for Recycling And Economic Development Technical Research Program, Massachusetts (2000).
2. P. S. Kandhal, Waste Materials in Hot Mix Asphalt, *NCAT (National Center for Asphalt Technology) Report*, No.92-6, Alabama (1992).
3. D. E. Watson and P. S. Kandhal, Performance of Recycled Hot Mix Asphalt Mixture, *NCAT Report*, No.95-1, Alabama (1995).
4. D. Krivit, Manufacturer Shingle Scrap Recycling, *Final Report*, Solid Waste Management Coordinating Board, Minnesota (2004).
5. D. K. Janisch and C. Turgeon. Minnesota Experience Using Shingle Scrap in Bituminous Pavements, *Final Report*, Minnesota Department of Transportation, Minnesota (1996).
6. P. T. Williams, Waste Treatment and Disposal, 2nd ed. 171, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester (2005).
7. P. A. Vesilind, Introduction to Environmental Engineering, 402, PWS Publishing Company, Boston (1997).
8. 한국자원리사이클링학회, 리사이클링백서, 181, 문지사, 서울 (1999).
9. D. I. Hanson, K. Y. Foo, and T. A. Lynn, Evaluation of Roofing Shingles in HMA, *Technical Report*, NCAT, No. 97, Alabama (1997).
10. G. W. Steele, C. E. Antle, and D. A. Anderson, Hot Mix Asphalt Laboratory Model Proficiency Sample Program, *Technical Report*, National Research Council, Washington (1994).
11. 한국표준협회, 스트레이트 아스팔트, KS M 2201 (2002).
12. 한국표준협회, 점도 분류에 의한 도로포장용 아스팔트, KS M 2208 (2002).
13. 한국표준협회, 역청재료의 침입도 시험 방법, KS M 2252 (1987).
14. 홍영호, 아스팔트쉑글의 분리특성, *환경관리학회지*, 12, 139 (2006).