난연성 폼아스팔트 특성에 관한 연구

홍영근

수원대학교 신소재공학과

접수일(2012년 7월 24일), 수정일(2012년 7월 30일), 게재확정일(2012년 7월 31일)

Characterization of Flame-Retardant Foam Asphalt

Young-Keun Hong

Dept of Polymer Engineering, The University of Suwon, Suwon, Korea

(Received July 24, 2012, Revised July 30, 2012, Accepted July 31, 2012)

요약 : 본 연구에서 중온아스팔트를 제조하기 위하여 우레탄폼 제조기술과 유화아스팔트 제조기술을 이용하여 폼아스팔트를 제조하였다. 화재에 약한 폼 물질과 아스팔트의 취약점을 보완하기 위하여 난연제를 첨가하여 난연성 폼아스팔트를 제조하였다. 폼아스팔트의 표면은 구멍이 뚫려 있었고 내부구조는 열린 셀의 모양을 하고 있었다. NCO%가 높을수록 폼의 강도와 셀의 크기는 증가하였다. 아스팔트는 폼의 강도를 증가시켰다. 하지만 난연제는 폼의 강도를 떨어뜨렸다. 사용된 3가지 난연제(멜라민, 디메틸포스포네이트, 트리토릴포스페이트) 중에서 멜라민이 가장 난연효과가 적었고 트리토릴포스페이트가 가장 효과가 크게 나타났다.

ABSTRACT : This study was carried out to prepare a type of warm mix asphalt. Through urethane foam and emulsion asphalt preparation techniques a protocol of asphalt foam was made. Then three kinds of flame retardant agents were added in there to alleviate the inherent susceptibility of asphalt and foam material to flame and thus flame retardant asphalt foam was made. The internal structure of form asphalt was composed of open cell. The higher the NCO% brought the larger the cell and the stronger also. Asphalt increased the strength of the foam. Among the flame retardant agents employed tritortylphosphate was the most effective.

Keywords : foam asphalt, warm mix asphalt, asphalt emulsion, flame retardancy

I. 서 론

전 세계적으로 지구온난화 및 환경오염에 대한 문제가 이슈화되면서 다양한 방법으로 지구온난화 및 환경오염을 감소시킬 수 있는 방안에 많은 관심이 집중되고 있다. 이에 국가적으로도 ‘저탄소 녹색 성장’을 제시하고 산업적으로도, 연비가 높고 배출가스나 CO₂ 배출량이 적은 클린 디젤차, 하이브리드차, 전기자동차, 연료전지차 등의 친환경 차량, 그리고 풍력, 조력(潮力) 또는 태양빛을 이용한 친환경 발전 방법이 개발되고 있다. 도로포장 분야에서도 에너지 절감, 비용절감, 대기오염 최소화를 기본으로 하는 환경친화적인 포장재료 개발 및 이에 관한 연구가 진행되고 있다. 그중에는 중온 아스팔트(warm mix asphalt), 전기발전 아스팔트(energy harvesting asphalt), 차열성 아스팔트(cool asphalt) 등이 거론되고 있다.¹

중온 아스팔트는 일반 아스팔트인 가열 아스팔트(hot mix asphalt)보다 약 20% 정도의 온도저감 효과를 나타내고 있다. 즉 일반 아스팔트는 150 °C 이상의 고온에서 생산되고 있으나

중온 아스팔트는 아스팔트 용융온도인 121 °C 이하에서 생산되고 있다. 이에 따라 연료비를 30% 정도 절약할 수 있고 인체에 유해한 SO₃, H₂S 등의 가스 및 CO₂ 발생을 줄일 수 있다. 또한 중온 시공으로 인해 고온 시공에서 흔히 발생할 수 있는 혼합물의 연성화를 막을 수 있고 아스팔트의 산화가 적게 진행되어 저온균열 발생 가능성을 줄일 수 있다.²

중온 아스팔트를 제조하는 방법에는 현재 크게 세 가지로 분류되고 그 안에서 주로 다섯 가지 기술이 사용되고 있다. 첫 번째로는 아스팔트와 수분 사이에서 발생하는 거품효과를 이용하는 방법으로 Aspha-Min, WAM-Foam, Advera WMA가 있다. 두 번째로는 유기첨가제를 사용하는 방법으로 Sasobit, Asphaltan B가 있다. 마지막으로 화학첨가제를 사용하는 방법으로 Evotherm이 있다.^{3,4}

1) Aspha-Min이라 불리는 합성 제올라이트(sodium aluminum silicate)를 공장 혼합과정에서 첨가하여 폼아스팔트를 제조한다. 제올라이트는 자기 무게의 21%의 물을 내부에 머금고 있다가 82~182 °C 온도에서 이를 방출한다. 믹싱(혼합물 제조) 과정에서 제올라이트는 아스팔트와 함께 투입되면 아주 가는 물보라를 만들며 아스팔트를 팽창시켜 아스팔트폼이

*Corresponding Author. E-mail: ykhong@suwon.ac.kr

제조된다.

2) WAM-Foam이라 불리는 아스팔트를 공장 혼합과정에서 사용하여 폼아스팔트를 제조한다.(여기서 WAM = warm asphalt mix) WAM-Foam은 두 가지 독립된 요소, 즉 연질아스팔트와 폼 형태의 경질아스팔트로 구성된 아스팔트로서 아스팔트 혼합물 생산온도를 낮추는 역할을 한다. 혼합물 생산 첫 번째 단계에서 연질아스팔트는 약 110 °C에서 골재를 완전히 덮어씌운다. 경질아스팔트는 두 번째 단계에서 연질아스팔트로 피복된 골재와 폼 형태로 섞인다. 골재와의 혼합 과정에서 가열된 경질아스팔트에 노즐로 찬 물을 쏘게 되면 급속한 수분 증발로 인해 폼의 부피는 더욱 커지게 된다.

3) Advera WMA이라 불리는 합성 제올라이트를 공장 혼합과정에서 첨가하여 폼아스팔트를 제조한다. (여기서 WMA = warm mix asphalt) Advera WMA는 합성 제올라이트(sodium aluminum silicate)이며 자기 무게의 18~21%의 물을 내부에 머금고 있다가 99 °C 이상의 온도에서 물을 방출한다. 방출된 물은 가열된 아스팔트와 만나 아스팔트폼을 형성한다. 이로 인해 작업성이 향상되고 생산온도와 시공온도를 일반 가열아스팔트보다 대개 10~21 °C 낮출 수 있다.

4) Sasobit, Asphaltan B 등의 유기첨가제(왁스)를 공장 또는 현장 혼합과정에서 첨가하여 제조한다. Sasobit은 분자량이 1,000 정도이며 아스팔트 유동향상제(flow improver)이다. Sasobit은 용융온도가 99 °C이며 116 °C에서 아스팔트에 완전히 용해되어 아스팔트 점도를 떨어뜨린다. Sasobit은 결정성이 높고 Fischer-Tropsch 공정에서 나오는 석탄가스로부터 만들어진 긴 사슬 탄화수소물로서 일명 Fisher-Tropsch 파라핀 왁스로 불리운다. Asphaltan B는 Montan왁스와 고분자량 탄화수소물과의 혼합체이다. Asphaltan B는 Sasobit와 같은 용융점(99 °C)를 가지며 Sasobit과 같이 아스팔트 유동향상제의 역할을 하여 생산온도를 낮추어주며 다짐성(compaction)과 소성변형(rutting) 저항성을 증진시킨다.

5) Evotherm이라 불리는 유화첨가제를 공장 혼합과정에서 첨가하여 제조한다. Evotherm으로 만들어진 유화아스팔트는 공장에서 가열된 골재와 혼합된다. 이렇게 하면 38 °C 정도의 생산온도 저감 효과를 볼 수 있으며 고온아스팔트(hot mix asphalt) 경우와 같은 골재피복성, 작업성, 골재 접착성과 향상된 다짐성이 보장된다.

폼아스팔트는 대개 뜨거운 아스팔트에 아스팔트 무게의 1~5% 되는 찬 물을 분사시킴으로써 제조된다. 아스팔트와 찬 물은 수증기가 되면서 아스팔트 거품에 갇히게 된다. 결국 얇은 막으로 둘러싸인 아스팔트폼은 액체 상태의 아스팔트보다 10배 가량 큰 표면적을 갖게된다. 그러나 이 고폭창 폼은 오래 가질 못한다.⁵

폴리우레탄은 분자 중에 우레탄 결합을 가진 것으로서 디이소시아네이트와 폴리올과의 반응에 의해서 만들어진다. 이 수지는 강인하고 내마모성, 내유성 및 내용제성이 뛰어나고 고

무탄성이 있으므로 발포체(foam), 탄성체, 도료, 접착제, 탄성 섬유 및 합성피혁 등에 이용되고 있다.⁶

우레탄 폼은 이소시아네이트와 알코올과의 반응에서 물을 이용하여 제조하고 있다. 이소시아네이트기가 알코올기와 반응하여 우레탄기를 형성하는데 이때 물이 있으면 가수분해되고 우레아가 만들어 지면서 CO₂ 가스가 발생된다. 발생한 CO₂ 가스에 의해 발포가 이루어진다.⁷

본 연구에서는 개질 중온아스팔트를 개발하고자 하는 목적으로 우레탄 폼 기술을 이용하여 폼아스팔트를 제조하고 그 물성을 알아보았다. 우레탄 폼 제조방법에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 전구물질(prepolymer) 합성법을 따랐다. 전구물질 합성법은 먼저 이소시아네이트와 폴리올을 반응기에서 반응시키고 그 다음 공정에서 사슬연장제를 투입하고 온도를 올리고 저어주면 폼이 형성된다.⁸ 제2공정에서 사슬연장제로서 폴리올 투입 시 유화아스팔트를 더해주고 반응을 진행하면 폼아스팔트가 얻어진다. 여기에 우레탄과 아스팔트는 천성적으로 불에 취약해 폼아스팔트에 난연성을 부여하는 방안을 강구하여 보았다.

II. 실험

1. 시약 및 재료

본 연구에서 우레탄 합성 시에 사용된 이소시아네이트는 MDI(삼점화합)이었고 폴리올은 polyesterpolyol(MW 2000, 화인케미칼)이었으며 반응촉매로는 아민계열의 TEDA(triethylenediamine, Air Product)가 사용되었다.

폼아스팔트 제조 시에 사용된 아스팔트(straight asphalt)는 AP-5(침입도 60~70)이며 계면활성제로는 C-450(양이온계면활성제, 동진화학)이 사용되었다.

난연제로는 melamine, diethyl ethylphosphonate 및 tritolyl phosphate를 Sigma에서 구입하여 사용하였다.

사용된 약품은 모두 정제과정 없이 구입한대로 사용하였다.

2. 우레탄 합성

디이소시아네이트와 폴리올을 반응시킨 후 사슬연장제와 반응시키는 순서로 중합하였다. 먼저 4구 플라스크에 TDI를 투입하고 맨틀을 이용하여 60 °C로 예열한다. 예열이 되면 폴리올을 넣고 질소를 투입시키면서 3000 rpm으로 두 시간 동안 교반하여 전구물질을 얻는다. 투입 시 온도가 60 °C를 넘으면 급격하게 발열반응하므로 이소시아네이트와 폴리올 모두 60 °C이하에서 투입하고 온도를 서서히 올려 75~80 °C에서 반응시킨다.

중합을 하기 전에 식(1)을 이용하여 임의의 NCO%에 따른 TDI와 폴리올의 투입량을 계산한다. 본 실험에서는 당량비에

따른 투입량 계산이 아닌, NCO%에 따른 투입량을 계산하여 중합하였다.^{3,12}

$$NCO\% = \frac{4200 \times f(x) \times \left(\frac{x}{Mw_x}\right) - 4200 \times f(y) \times \left(\frac{y}{Mw_y}\right)}{x + y} \quad (1)$$

x : weight of isocyanate, y : weight of polyol

Mw_x : molecular weight of isocyanate

Mw_y : molecular weight of polyol

f : functionality(x & y)

3. 유화아스팔트 제조

유화아스팔트를 제조하기 위해서 먼저 유화수를 제조 후 스트레이트 아스팔트를 분산시켰다. 유화수는 물 중량 100에 계면활성제 2.5가 들어가 있다. 여기에 용융된 스트레이트 아스팔트를 100을 넣고 10분간 4000 rpm으로 강하게 교반하여 유화아스팔트를 얻었다.

4. 폼아스팔트 제조

위에서 얻어진 전구체에 폴리올의 물비를 index(NCO/OH)=1로 하여 섞고 여기에 유화아스팔트를 사용된 폴리올 100(무게)에 대해 20(아스팔트 10), 30 및 50 첨가하여 40 °C에서 교반 속도 3000 rpm으로 10초정도 교반하여 발포시켰다. 50%보다 더 많이 유화아스팔트를 첨가하면 그에 따라 물 또한 많아지므로 폼은 단단하지 않고 끈적이며 형태를 갖추지 못하였다. 결국 폼아스팔트를 제조하기 위해서는 Table 1과 같은 제조법이 마련되었다.

Table 1. Recipe for Preparation of Form Asphalt

NCO%	polyol (g)	prepolymer		asphalt emulsion % (asphalt, g)
		polyol(g)	MDI(g)	
14.4	102	33.3	24.9	20(13.5)
				30(20.3)
				50((33.8)
16.4	102	33.3	39.9	20(13.5)
				30(20.3)
				50((33.8)
18.4	102	33.3	49.5	20(13.5)
				30(20.3)
				50((33.8)
20.4	102	33.3	62.2	20(13.5)
				30(20.3)
				50((33.8)

5. 물성 분석

인장시험은 개뼈(dog-bone) 형태로 만들어진 인장시편을 제작하고 이들을 만능시험기(Daekyung Co.)를 사용하여 20 °C에서 시험을 진행 하였다. Clamp의 간격은 7 cm로 하였으며 crosshead speed는 10 mm/min였다. 결과값은 시편 7개중 최고 값, 최소값을 제외한 나머지 5개의 평균값을 취하였다

압축시험은 정육각형(50x50x50mm) 형태로 만들어진 압축시편을 제작하고 만능시험기(Lloyd Instrument, LR50k type)를 사용하여 20 °C에서 실시하였다. crosshead speed는 10 mm/min이며 7개의 시편을 측정하여 그중 최고값, 최소값을 제외한 나머지 5개의 평균값을 압축강도로 표시하였다.

폼아스팔트 내부구조는, 만들어진 압축시편의 표면과 시편을 예리한 커트칼로 표면과 평행하게 잘라낸 파단면을 주사전자현미경(SEM, JEOL)을 사용하여 조사하였다.

폼아스팔트의 난연성은, Perkin Elmer사의 Thermogravimetric Analyzer(TGA)를 사용하여 산화를 배제하기 위해서 질소 충전시키고 25~600 °C 구간에서 승온속도 10 °C/min으로 하여 온도-무게 변화량의 곡선을 구하여 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 우레탄폼 인장특성

물과 이소시아네이트의 반응에 따라 발생하는 CO₂ 가스에 의한 화학적 방법으로, NCO% 비율을 14.4, 16.4, 18.4 및 20.4로 달리하면서 우레탄폼을 제조하였다. 폴리올과 전구체가 만나자마자 3000 rpm 교반에 의해 10초 만에 따뜻한 폼이 만들어졌다. 표면에는 스킨이 형성되어 매끈하였다. 부피는 2배 가량 부풀었다. 부푼 폼을 비교해 봤을 때는 18.4%부터 폼형성이 잘 되었다. NCO% 14.4에서는 폼형성이 덜 됨을 알 수 있었다. 그 인장 특성을 Figure 1에 나타내었다. Figure 1에서 보면 인장물성은 NCO% 16.4에서 떨어졌다가 대체로 NCO%가 높아지면서 다시 상승하였다. NCO% 16.4에서는 탄성이 강하고 그 이후로는 소성이 강하였다. 이는 NCO% 16.4에서부터 폼형성이 원활히 되고 그 이후부터 NCO%가 높아질수록 경질 영역(hard block)을 형성하는 이소시아네이트가 많아지면서 생긴 결과라 여겨진다.

2. 아스팔트폼 기계적 성질

앞에서 NCO% 14.4 발포체는 발포가 부족하였으므로 16.4, 18.4 및 20.4%에 대해서만 아스팔트를 제조법대로 첨가하여 아스팔트폼을 제조하였다. 그러나 16.4%에서는 아스팔트폼형성이 어려웠다. 일단 우레탄폼이 원활히 형성되어야 아스팔트를 받아들일 수 있는 것으로 보였다. 폼아스팔트의 인장성

Figure 1. Tensile properties of urethane foam prepared in this lab.

Figure 2. Tensile strength of asphalt foam prepared in this lab.

Figure 3. Compressive strength of asphalt foam prepared in this lab.

험을 실시하고 그 결과를 Figure 2에 나타내었다. 아스팔트의 양에 따라 인장강도는 증가하였다. 다만 절대 수치로는 NCO% 20.4보다 18.4에서 더 높게 나타났다. 최대 강도수치는 NCO% 18.4와 아스팔트 함량 50%에서 나타났다(1.8 N/mm²).

발포체의 두 번째 주요 기계적 성질은 내압축성이다. 따라서 폼아스팔트의 압축실험을 실시하고 그 결과를 Figure 3에 나타내었다. 압축강도 결과에서 보듯이 NCO% 함량이 높고 아스팔트의 양이 많은 시편에서 가장 큰 수치(0.654 MPa)를 나타내었다. 상온에서의 아스팔트의 강성이 발포체의 강도 증가에 기여했으리라 여겨진다. 지금까지의 기계적 성질로 본 바람직한 아스팔트폼의 구성은 NCO% 18.4 또는 20.4에 아스팔트 함량 50%으로 받아들여졌다. 둘 중에 작업성은 18.4% 것이 더 나았다.

3. 아스팔트폼 미세구조

먼저 시편의 표면을 전자현미경으로 관찰한 결과를 Figure 4에 나타내었다. 시편에서 현상의 간격을 두고자 18.4 % 짜리는 제외하였다. 모든 조성에서 아스팔트는 잘 분산되어 있는 것으로 보인다. NCO%가 증가함에 따라 그리고 아스팔트의 양이 많아질수록 구멍의 수는 줄어들면서 그 크기는 더 커지는 것을 알 수 있다. 이는 아스팔트의 양의 증가는 물의 양의 증가를 수반하므로(왜냐하면 사용하는 아스팔트는 기실 유탄 아스팔트이므로) NCO%가 증가와 함께 배출되는 CO₂ 가스의 양도 증가하므로 구멍의 크기가 더 커지는 것으로 여겨진다. 또한 구멍의 생성은 CO₂ 가스 배출 방향과 같은, 즉 바닥의 수직 방향으로 진행되었음을 알 수 있다. 이는 제조된 아스팔트폼은 도로에서 투수성을 가질 수 있음을 시사한다.

이번에는 아스팔트폼의 파단면을 관찰한 결과를 Figure 5에 나타내었다. 모든 조성에서 아스팔트는 잘 분산되어 있다. 모

Figure 4. Surface morphology of asphalt foam prepared in this lab.

두 open-cell 형태의 기공을 가졌다. 이에 따라 완벽한 투수성을 지니게 됨을 알 수 있다. 표면 구조와 마찬가지로 NCO%가 증가함에 따라 그리고 아스팔트의 양이 많아질수록 셀의 수는 줄어들면서 그 크기는 더 커지는 것을 알 수 있다.

4. 난연성 폼아스팔트

먼저 인장강도 면에서 가장 좋았고 압축강도 면에서도 우수하였던 NCO% 18.4 그리고 아스팔트 함량 50% 짜리를 기본으로 하고 여기에 난연제 세 가지(melamine, diethyl ethylphosphonate, tritolyphosphate)를 각각 사용된 폴리올에 대해 2%(1.35g), 5%(2.03g) 및 10%(3.38g)를 첨가하여 아스팔트폼을 제조한 후 이들에 대한 인장특성을 조사하였다. 그 결과를

Figure 6에 나타내었다. 알려진 바, tritolyphosphate(TP)는 고분자 분해가 발생하기 전에 수산기를 배출하여 가스 상에서의 분해를 지연하고 탈수작용으로 폴리인산화하여 화재발생 표면에 재(char)를 형성함으로써 산소 또는 가연성 가스를 차단하고 희석하여 난연효과를 발휘한다.⁹

Figure 6을 보면 난연제가 첨가되었을 시 아스팔트폼의 인장강도는 세 가지 모두 난연제의 함량이 증가함에 따라 감소하였다. 신장률과 일의 양(Work-done)에서도 같은 경향을 나타내었다. 모듈러스란 가해진 힘을 늘어난 길이로 나눈 값으로 재료가 탄성체에 가까울수록 모듈러스의 값은 작고 소성체에 가까울수록 모듈러스의 값은 크다. 난연제의 함량이 높아질수록 아스팔트폼은 소성체에 가까워지고 이는 모듈러스의 증가를 나타내었다.

Figure 5. Internal morphology of asphalt foam prepared in this lab.

이들을 열분석기(TGA)를 사용하여 난연성을 조사하였다. 그 결과를 Figure 7, 8, 9 및 10에 나타내었다.

Figure 7을 보면, 열분해 과정은 두 단계로 나누어져 있음을 알 수 있다.¹⁰ 제1 단계(A step)는 99 °C에서 시작하여 92 °C (M2), 91 °C(M5), 90 °C(M10)에서 끝났다가 제2 단계(B step)에서 M10부터 시작되어 22 °C(M2), 21 °C(M10), 20 °C(M5)에서

거의 끝난다. 잔유율은 16% 근처로 모두 비슷하였다. 지금까지 보면 세 가지 함량 중 M5가 난연성이 가장 좋은 것으로 보인다. 특이한 점은 순수 아스팔트(AP)가 오히려 난연성이 다른 것보다 나아 보였다. 제1 단계에서 아스팔트 자체보다 우레탄이 포함된 M 계열이 먼저 분해되었고 제2 단계에서도 M10이 제일 먼저 분해되었다. 이는 우레탄의 짧은 사슬들이

Figure 6. Tensile properties of flame retardant agent-added asphalt foam prepared in this lab.

아스팔트의 그것보다 더욱 불에 취약하다는 것을 의미한다.¹¹

Figure 8을 보면, DE 체계 역시 열분해 과정은 두 단계로 나누어져 있음을 알 수 있다. 다만 제1 단계에서는 DE2가 먼저 분해되기 시작하였고 제2 단계에서는 DE5가 먼저 시작하였다. 잔유율에서는 DE10>DE5>DE2 순서였다. 세 가지 함량

Figure 7. TGA graph of melamine(M)-added asphalt foam prepared in this lab.

Figure 8. TGA graph of diethylethylphosphonate(DE)-added asphalt foam prepared in this lab.

Figure 9. TGA graph of tritolylphosphate(TP)-added asphalt foam prepared in this lab.

Figure 10. TGA graph comparison of three flame resistant agent(10%)-added asphalt foams prepared in this lab.

Table 2. Thermal Degradation Temp(TDT) and Residual Rate of Each 10% Flame Resistant Agent(FDA)-added Asphalt Foam prepared in this Lab.(N/A= not applied, means straight asphalt)

FDA	TDT(°C)	Residual(%)
N/A	408	15.4
Melamine	400	16.2
Diethylethylphosphonate	405	17.2
Tritolylphosphate	415	17.9

중 DE10이 난연성이 가장 좋은 것으로 보인다.

Figure 9를 보면, TP 체계 역시 열분해 과정이 두 단계로 나누어져 있음을 알 수 있다. 다만 제1 단계에서는 TP5가 먼저 분해되기 시작하였고 제2 단계에서도 TP5가 먼저 시작하였다. 잔유율에서는 TP10=TP5>TP2로 나타났다. 세 가지 함량 중 TP10이 난연성이 가장 좋은 것으로 보인다.

Figure 10에 각각에서 가장 좋아 보이는 함량 10% 시료들을 비교하였다. Figure 10에서는 M10이 분해온도가 가장 낮고 잔유율에서는 TP10이 가장 높아 보인다. 이를 다시 Table 2에 수치화 하였다. Table 2에서 보면 TP10이 조성 중 가장 우수함을 알 수 있다. 그래도 다른 발포체 난연 연구¹²에 비해서는 난연 효과가 낮다. 이유를 찾는다면 다른 연구에서는 난연제를 10~20 phr 사용하였다. 반면에 본 연구에서는 1~5 phr 사용되었다.

IV. 결 론

본 연구는 우레탄폼에 유화아스팔트를 섞고 거기에 난연제

를 투입하여 난연성 폼아스팔트를 제조하는 연구이다. 본 연구에서 얻어진 가장 큰 결과는 아스팔트폼으로 새로운 중온아스팔트를 개발하였다는 것이다. 아스팔트폼의 내부구조는 open cell로 구성되어 있었다. 따라서 본 아스팔트폼은 투수성을 갖는다. 아스팔트는 폼의 강도를 증가시켰다. NCO%가 높을수록 폼의 강도와 셀의 크기가 증가하였다. 그러나 난연제는 폼의 강도를 떨어뜨렸다. 열분해 온도와 잔재(잔유율)를 비교해보면 난연제 중에는 tritolylphosphate가 가장 효과가 있었다. 보다 큰 난연효과를 갖기 위해서는 난연제의 양을 2~4배 늘려야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. E. Crews, "Growth in Warm-Mix Asphalt Technology", Caltrans District 5 Warm-Mix Asphalt Innovation Project Open House and WMA Workshop, Morro Bay, CA (2008).
2. R. M. Anderson, G. Baumgardner, and G. Reinke, "Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies", NCHRP 9-47, Interim Report, National Cooperation Highway Research Program, Washington D.C. (2008).
3. R. Bonaquist, "Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt", NCHRP 9-43, Interim Report, National Cooperation Highway Research Program, Washington D.C. (2008).
4. NAPA "Warm-Mix Asphalt: Contractors' Experiences", IS-134, National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland (2008).
5. NAPA "Warm Mix Asphalt-Best Practices", QIP-125, National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland (2007).
6. G. Oertel, *Polyurethane Handbook*. New York: Macmillan Publishing Co., Inc. 1985.
7. H. Ulrich, *Chemistry and Technology of Isocyanates*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1996.
8. C. Hapburn, "Polyurethane Elastomers", Elsevier Science, New York, 1992.
9. E. A. Collins, J. Bares, and F. W. Billmeyer, "Experiments in Polymer Science", John Wiley & Sons, N.Y., 1993.
10. E. A. Turi, "Thermal Characterization of Polymeric Materials", Academic Press, N.Y., 1983.
11. B. Son, T. S. Hwang, and D. C. Goo, "Fire Retardation Properties of Polyurethane Nanocomposite", *Polymer(Korea)*, **31**, 404 (2007).
12. S. C. Moon, J. K. Choe and H. W. Jo, "Influence of Flame Retardants for Flame Retardancy & Foaming Properties of the NBR/GTR Foams", *J. Korean. Ind. Eng. Chem.*, **15**, 244 (2004).