

# 개질 아스팔트바인더에 있어서의 항복응력

## Yield Stress Shown in Modified Asphalt Binders

허정도\* · 김한용\*\* · 손원표\*\*\*

Huh, Jung Do · Kim, Han Yong · Sohn, Won Pyo

### 1. 서론

개질 아스팔트바인더에 있어서의 항복응력이라는 특성은 문헌 상에 발표된 적이 없는 새로운 개념이다. 뿐만 아니라 이러한 항복응력이 개질 아스팔트에 존재하는 근본적인 이유가 무엇인지, 항복응력이 개질바인더의 물성에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서도 잘 알려져 있지 않다. 항복응력과 그 특성에 대한 이해를 증진시키고자 함이 본 연구의 목적 중 하나이다.

내유동성 개질아스팔트나 배수성용 개질아스팔트는 고점도 바인더를 요한다. 고점도 개질아스팔트는 대체적으로 높은 항복응력을 가진다. 항복응력이 어떻게 높은 점도를 달성하는 데 도움을 주는가를 이해시킴으로서, 고점도 개질아스팔트를 개발하기 위한 내부구조는 어떠해야 하며, 실제 측정된 개질아스팔트의 고점도를 해석하기 위한 방안에 대한 해답을 제공해 줄 것이다. 이러한 것이 본 연구의 또 하나의 목적이다.

### 2. 연구내용

#### 2.1 개질 아스팔트의 내부구조

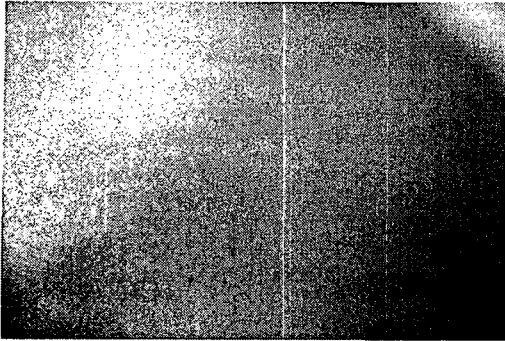
개질아스팔트의 표면 구조를 관찰하고자 형광현미경을 사용하였다. 개질아스팔트를 녹인 후 슬라이드 유리편에 소량을 입혀서 시편을 제작하고, 이 시편을 형광현미경의 촬영부위에 올려놓고 40배 배율로 확대하여 사진을 촬영하였다. 본 연구에 사용된 형광현미경은 인천과학고의 올림퍼스 1x71 모델이다. 이렇게 촬영된 사진 중에서 위에 네 다른 형광현미경 사진을 전시하였다.

위 사진 중에서 <그림 1>은 일반 스트레이트 아스팔트로서 내부에 아무런 입자가 없이 균일한 아스팔트로 구성되어 있는 것을 보여준다. 반면에 <그림 2>는 구상의 입자들이 아스팔트 베이스에 가지형상으로 연결되어 뻗어 있는 형상으로, 탄성을 어느 정도 가진 고점도 개질 아스팔트바인더에서 볼 수 있다. <그림 3>은 구상의 입자들이 아스팔트 베이스에 서로 뭉쳐서 큰 덩어리를 형성하고 있으며, 이 경우는 고점도 개질 아스팔트를 대변한다. <그림 4>는 일정한 두께를 가진 줄모양의 입자들이 아스팔트 베이스에 분산되어 있는 것으로, 주로 고무와 같이 탄성이 큰 재료에서 관측된다. 다시 말해서, <그림 1>은 단일상으로 되어 있으나 다른 그림들은 아스팔트와 고분자입자들로 구성된 하나 이상의 상 즉 다상을 이루고 있다. <그림 2>에서 <그림 4>를 살펴보면 설명한 바와 같이 입자의 형상이 모두 다르다. 이처럼 다양한 입자형상은 앞서 설명한 바와 같이 재료 마다 각기 다른 물성을 발현시킨다. 다상에서는 입자의 형상 외에도 입자의 크기, 입자간의 거리, 입자와 아스팔트 간의 표면장력 등이 베이스 아스팔트의 물성과 함께 다상재료의 성질을 결정하는 주요 요인이다. 따라서 형광현미경의 촬영을 통하여 내부구조를 관찰하는 것은 재료의 물질적 특성을 이해하는데 아주 중요하다.

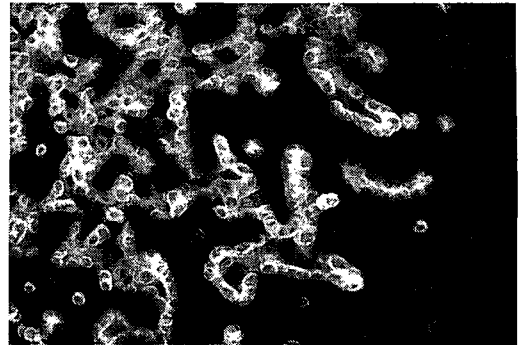
\* 정희원 · 인천대학교 ITS 연구센터 수석연구원 · 공학박사 (032)573-6631 (E-mail: jung\_huh@hotmail.com)

\*\* 정희원 · 경호엔지니어링 사장 · 공학박사 (031)560-5500 (E-mail: khy339@hanmail.net)

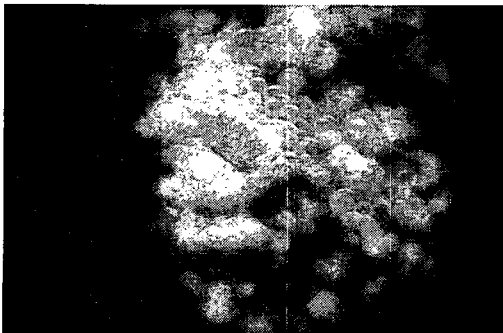
\*\*\* 정희원 · (주) 삼안기술공사 전무 · 공학박사 (02)509-4753 (E-mail: wpschon@samaneng.com)



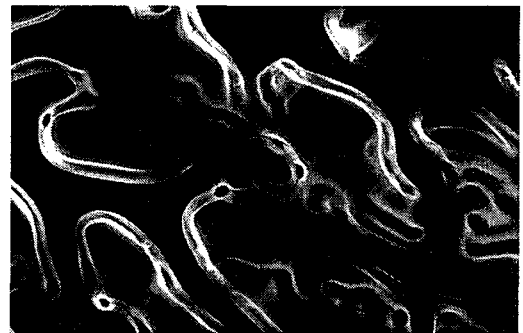
<그림 1> S-AP5.



<그림 2> S-1.

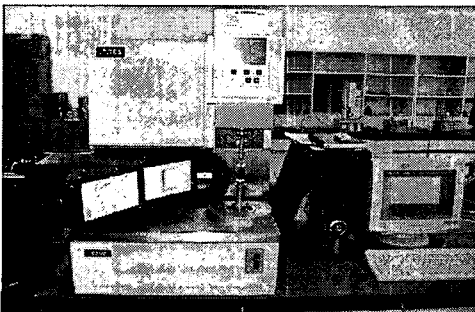


<그림 3> S-2.



<그림 4> S-3.

## 2.2 점도측정을 위한 DSR시험



<그림 5> DSR 측정 장비.

본 안에 바인더 시료 캔을 넣고 150℃에서 15분간 가열하여 용융시킨 후, 회전평판과 고정평판 사이에 거치 시킬 2-3mm 두께의 아스팔트 시편을 제작하였다. 측정조건은 25mm의 평판-평판 기구를 사용하였고, 시료를 이 평판 사이에 적재하여 시료두께를 1mm로 조정하고, 테두리를 깨끗하게 제거한 후 원하는 온도가 되도록 온도제어를 하여 그 온도에 도달하면 30분 동안 안정화 시켰다. 이상의 절차가 끝나면 실험조건이 완성된다. 실험목적은 각 해당온도에서 주기에 따른 복합계수를 측정(frequency sweep)하는 것이지만, 선형 점탄성조건을 만족시키기 위하여 최대 선형변형률 값을 먼저 찾아서 고정시킨 후에 주기에 따른 복합계수 시험을 실시하였다. 측정주기는 0.1~100 rad/초 범위에 국한시키고 낮은 주기 값에서 높은 값으로 주기를 증가시키며 측정하였다.

각기 다른 개질아스팔트를 4가지 다른 온도(40, 50, 60, 70℃)와 주기범위(0.1-100 rad/s)에서 동전단 레오메터(DSR : Dynamic Shear Rheometer)를 사용하여 물성을 측정하였다. 사용된 동전단레오메터(Dynamic Shear Rheometer)는 미국 Rheometrics사의 Rheometric Asphalt Analyzer(HICT/ARES 3-A27) 실험장치(이하 DSR장비로 명명)이며, 시료를 측정평판에 장착하고 실험조건을 컴퓨터에 입력하면 내장된 프로그램에 의하여 자동으로 측정을 수행하는 장비이다. 이 장비에 대한 그림이 <그림 5>에 나타나 있다.

측정절차는 다음과 같다. 측정시편을 만들기 위해 오



2.3 점도 데이터의 정량적 분석

아스팔트바인더의 물성으로서 점도에 대한 경험은 오래 되었고, 지금도 점도를 사용하고 있지만 아직도 정확한 이해에 도달한 것 같지는 않다. 근본적인 이유는 스트레이트 아스팔트와 같은 단일 상 유체에 대한 점도지식으로 고분자개질 아스팔트와 같은 다상 유체의 점도를 취급하려 하기 때문이다. 두 유체는 서로 다른 거동특성을 보인다.

앞서 형광현미경을 통한 개질아스팔트의 내부구조를 관찰한 바와 같이 개질아스팔트는 스트레이트 아스팔트와는 달리 단일 상이 아니고 아스팔트에 고분자입자가 분산된 크게 두 상으로 구성되어 있다. 이처럼 두 상으로 구성된 유체는 두 다른 상 사이에 수많은 계면과 표면장력이 존재하고 이로 인해 단일 상 유체와는 전혀 다른 거동을 보인다. 이 때문에 개질 아스팔트내부의 입자형상이나 입자간의 거리, 입자크기, 입자표면의 표면장력 등이 베이스인 스트레이트 아스팔트의 물성과 함께 개질 아스팔트의 물성에 지대한 영향을 미친다. 특히, 정지되어 있는 다상유체를 유동시키고자 할 때는 분산된 입자에 의해 형성된 구조를 파괴해야 유동이 가능하므로, 유동의 시작에는 단일 상 유체와 전혀 다른 거동특성을 보이게 된다. 이러한 특성이 다상 유체의 유동을 일으키는 데 필요한 항복응력으로 표현된다. 2003년 한국 도로포장공학회 정기학술대회에서 허정도의(2003)<sup>1</sup>가 발표한 “아스팔트바인더의 레올로지적 거동특성”에 대한 논문에서 다상 유체를 취급하기 위한 특성식이 소개된 바 있다.

1. 스트레이트 아스팔트와 같이 단일 상 유체에 있어서의 전단응력과 전단점도:

$$G^* = \eta^* \cdot \omega = \frac{\eta_0 \cdot \omega}{1 + (\lambda \cdot \omega)^{1-n}} \tag{1}$$

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \cdot \omega)^{1-n}} \tag{2}$$

식 (1)과 (2)에서  $G^*$ ,  $\eta^*$ ,  $\omega$ ,  $\eta_0$ ,  $\lambda$  및  $n$  는 각각 전단응력, 전단점도, 주기, 제로전단점도, 이완시간 그리고 전단 민감 지수를 표시한다. 제로전단점도( $\eta_0$ )는 유동 중의 유체의 저항을 나타내며 클수록 소성변형에 대한 저항성이 크다. 전단 민감 지수( $n$ )는 작을수록 비뉴턴 유체를 나타내고 소성변형 저항성이 탁월한 바인더가 된다.

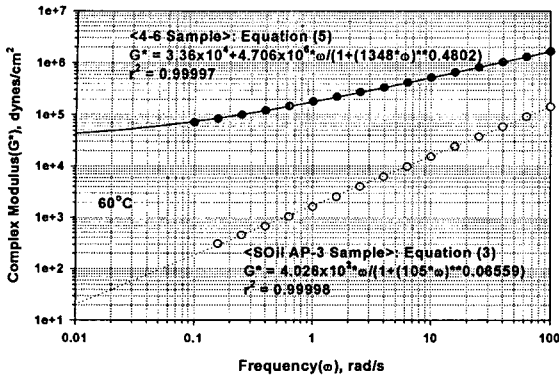
2. 개질아스팔트와 같이 다상 유체에 있어서의 전단응력과 전단점도:

$$G^* = \eta^* \cdot \omega = G_y + \frac{\eta_0 \cdot \omega}{1 + (\lambda \cdot \omega)^{1-n}} \tag{3}$$

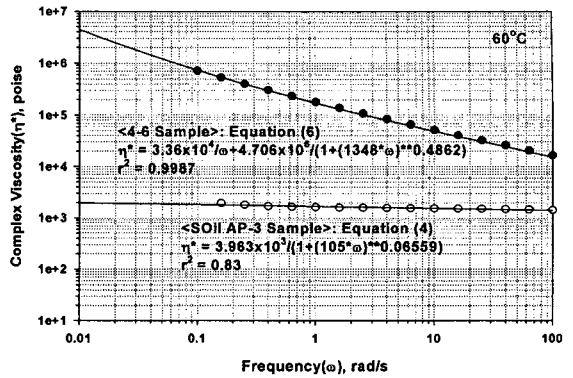
$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} = \frac{G_y}{\omega} + \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \cdot \omega)^{1-n}} \tag{4}$$

각 부호는 위와 동일하고,  $G_y$  는 항복응력을 나타낸다. 여기서 유의할 점은 단일 상 유체와 다상 유체의 수학적 표현상의 차이는 전자는 항복응력 항이 없는 데 반하여, 후자는 이 항을 가지고 있다는 점이 유일하게 다르다. 이러한 차이는 분산된 고분자입자의 유무와 관련이 있다

식 (1), (2), (3) 및 (4)를 이용하여 단일 상 유체와 다상 유체의 응력과 점도의 차이를 위 그림에서 알아 본다. 그림에서 기호는 데이터를 선은 식 (1), (2), (3) 및 (4)를 이용한 회귀분석 결과를 표시한다. 위 그림에서 검게 채워진 기호는 다상유체(고분자개질 아스팔트)를, 색깔이 없는 기호는 스트레이트 아스팔트의 데이터를 나타낸다. 위 그림에서 우수한 회귀분석결과들은 식 (1), (2), (3) 및 (4)가 각각 해당 데이터를 잘 예측하고 있음을 보여준다.



<그림 6> 다상과 단일 상 유체의 응력비교.



<그림 7> 다상과 단일 상 유체의 점도비교.

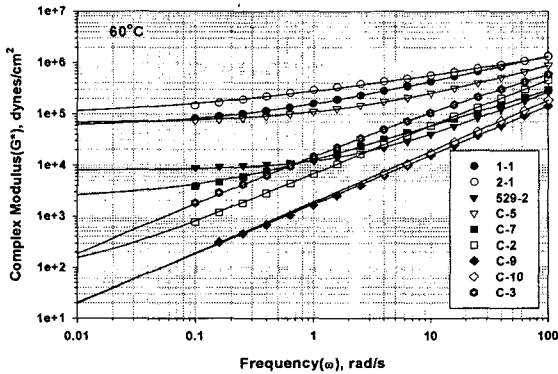
<그림 6>에서 다상유체(검은 원)는 주기가 작아짐에 따라 응력이 일정값(항복응력 값)에 수렴하는 데 반하여, 단일 상 유체(빈 원)는 제로에 접근한다. 즉, 정지되어 있는 단일 상 유체를 움직이려고 하면 적용하는 응력에 비례하여 유체유동이 일어나는 반면에, 정지되어 있는 다상 유체를 움직이려고 하면 일정한 응력(항복응력) 이상의 응력을 작용시키지 않으면 유체는 움직이지 않음을 시사한다. 이러한 현상은 단일상의 경우에는 식 (1)로, 다상인 경우에는 식 (3)으로 설명된다. 식 (1)에 있어서, 주기(ω)가 제로에 접근하면, 응력(G\*)은 제로가 된다. 반면에 식 (3)에 있어서는 주기(ω)가 제로에 접근하면, 응력(G\*)은 항복응력(G<sub>y</sub>)이 된다.

이러한 경향은 동일한 측정 데이터에 대하여 점도를 나타낸 <그림 7>에서도 잘 표현되어 있다. 주기가 감소함에 따라 단일 상 유체(빈 원)는 일정한 점도(제로 전단 점도) 값에 수렴하는 반면에, 다상 유체(검은 원)의 점도는 점점 증가하는 경향이 나타난다. 정지상태의 단일 상 유체는 일정한 점도(제로전단점도)를 가지지만, 항복응력을 가진 다상 유체의 점도는 주기의 감소와 더불어 현저히 증가하여 항복응력 이상의 힘을 적용하지 않으면 움직이기가 불가능하다. 이러한 현상은 단일상의 경우에는 식 (2)로, 다상인 경우에는 식 (4)로 표현된다. 즉, 식 (2)에 있어서, 주기(ω)가 제로에 접근하면, 점도(η\*)는 일정한 값인 제로전단점도(η<sub>0</sub>)가 되는 반면에, 식 (4)에 있어서는 주기(ω)가 제로에 접근하면 점도(η\*)는 (G<sub>y</sub>/ω + η<sub>0</sub>)가 되어 점점 증가한다.

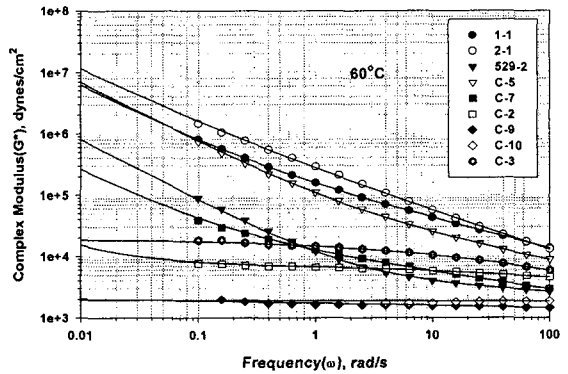
따라서 <그림 6>과 <그림 7>에서 얻은 결론은 항복응력이 큰 개질아스팔트 일수록 유동에 저항하는 힘이 커짐으로 소성변형 저항성이 우수할 것이다. 이러한 항복응력이라는 물성은 개질 아스팔트에 있어서 고분자입자들이 아스팔트베이스에 분산된 결과에 의해 생긴 현상이라 할 수 있다. 이상의 개념은 본 연구에서 처음으로 주장되며, 고점도 개질바인더를 개발하기 위해서는 어떠한 물성을 증가시켜야 하는가에 대한 해답을 제시한다. 고분자입자가 분산되어 있는 개질 아스팔트가 좋다거나 그렇지 않고 균일 상으로 만드는 것이 바람직하다는 논란에 중지부를 찍을 수 있다.

이러한 관점에서 각 개질 아스팔트에 대한 레올러지적 특성을 이해하기 위하여, 개질아스팔트에 대한 DSR 측정데이터와 회귀분석 결과를 아래 그림에 나타내고 그 차이를 비교하였다. <그림 8>과 <그림 10>의 데이터 회귀분석에는 식 (1)과 식 (3)을, <그림 9>와 <그림 11>의 데이터 회귀분석에는 식 (2)와 식 (4)을 적용하였다. 회귀분석 한 결과는 <표 1>에 수록되어 있다. <그림 8>과 <그림 10>의 회귀분석에서 얻어진 상수 중 항복응력(G<sub>y</sub>)과 제로 전단점도(η<sub>0</sub>)는 클수록, 이완시간(λ)과 전단민감지수(n)는 적을수록 소성변형 저항성이 우수하다. 이러한 관점에서 2-1, 4-10, 4-32, 529-1 및 P 9% 등이 소성변형에 우수한 개질아스팔트임을 알 수 있다.

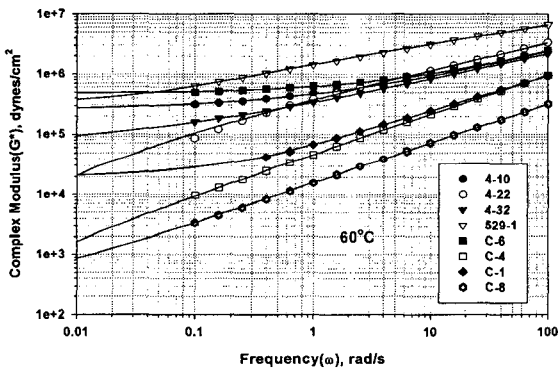
일반적으로 소성변형은 차량속도가 낮을 때 더 큰 영향을 받는다. 도시의 버스 정거장이나 교차로의 정지선에 소성변형이 심하게 생기는 이유는 이 때문이다. 다상유체인 개질 아스팔트의 경우인 식 (2)와 (4)를 다시 고려해 보면, 주기가 아주 적을 때(즉, 차량속도가 아주 느릴 때) 오른쪽의 첫째 항은 둘째 항과 비교하여 상당히 커지고, 주기가 커질 때(즉, 차량속도가 빠를 때)는 첫째항의 영향이 감소함을 알 수 있다. 첫째 항은



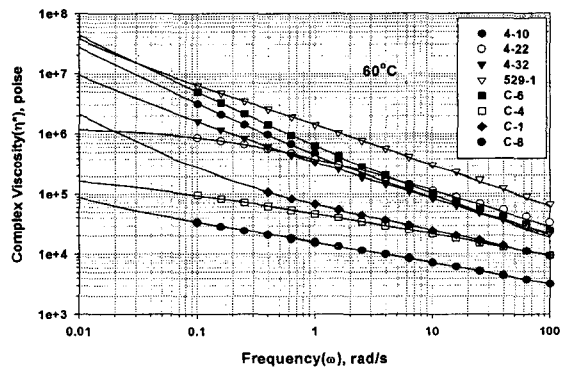
<그림 8> 각 개질아스팔트의 응력비교.



<그림 9> 각 개질아스팔트의 점도비교.



<그림 10> 각 개질아스팔트의 응력비교.



<그림 11> 각 개질아스팔트의 점도비교.

유동의 시작에 대한 저항을 나타내고, 둘째 항은 유동 중의 흐름에 대한 저항을 나타낸다. 특히 첫째 항이 유동의 시작에 대한 저항을 나타냄으로, 소성변형의 시작을 방해하는 핵심적인 역할을 담당하며, 특정온도에서의 개질아스팔트의 점도를 비교할 경우에는 주기가 낮을 때(예를 들어, 0.1 rad/s)의 점도를 취해 비교해야 하는 이유이다. 그러나 현재 미국의 SHRP 규정에서는 주기가 10 rad/s 일 때의 점도를 규정점으로 정하고 있는데 이는 유동 중의 저항을 비교하는 것이다. 아래 <표 2>에는 각종 개질아스팔트의 점도를 60°C, 0.1과 10 rad/s에서 측정된 값을 보여주고 있다. 한편 단일상 유체를 나타내는 식 (1)과 (3)의 경우는 유동의 시작에 대한 저항 항은 아예 존재하지 않고, 흐름에 대한 저항만을 보여주며 이 경우 제로전단점도 값이 크고 전단민감지수 값이 적을수록 소성변형 저항성이 우수하다.

<그림 8>과 <그림 10>에서 항복응력이 큰 개질 아스팔트가 <그림 9>와 <그림 11>의 낮은 주기에서 점도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 항복응력이 원인이라는 것을 이미 설명하였다.

일본의 배수성포장용 고점도 개질아스팔트는 20,000 Pa.s 이상을 규정하고 있지만, 실제로는 60°C의 점도가 100,000 Pa.s의 고점도 개질아스팔트를 사용하고 있다고 Nakanishi et al(2002)<sup>2</sup>는 언급하고 있다. 또한 고점도 바인더가 배수성포장에 필수적임을 보고하고 있다. 그러나 이 점도 값에 대한 주기가 언급되지 않아 본 연구에서는 0.1 rad/s라고 가정한다. <표 2>를 참조하면, 60°C, 0.1 rad/s에서 100,000 Pa.s 이상을 넘어가는 개질아스팔트는 529-1, 4-10, 4-32, 2-1의 네 종류이며, 50,000-100,000 Pa.s의 범위에 있는 개질아스팔트는 4-22, 1-1, 4-6, 2-3, 1-2의 다섯 종류이며, 20,000-50,000 Pa.s의 범위에 있는 개질아스팔트는 1-3, 4-4, 4-5,



4-21, 4-31, 4-35, 4-36, 1-11, 1-12, 1-21, 1-22, 2-12의 12종류이다. 20,000 Pa.s 이하의 점도를 가진 개질 아스팔트는 배수성포장에 적합한 개질아스팔트라고 하기가 어렵다. 즉, 포장을 시공한 후 얼마 되지 않아 소성변형으로 인한 공극 막힘이 일어나 배수기능의 지속이 어려울 것으로 예상된다.

표 1과 표 2를 비교해 보면 항복응력이 큰 개질바인더가 0.1rad/s에서의 점도도 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 낮은 주기에서 큰 점도를 얻으려면 항복응력을 증가시킬 필요가 있다. 항복응력을 증가시키려면 고분자입자의 형상과 크기, 입자간의 거리 및 입자표면에서의 표면장력 등이 중요하므로 이에 대한 개선이 필요하다.

<표 1> 개질아스팔트의 응력데이터에 대한 회귀분석결과 얻어진 상수 값

시료 명	항복응력 $G_y$	제로전단점도 $\eta_0$	이완시간 $\lambda$	전단민감지수 $n$	$r^2$
1-1	$5.855 \times 10^4$	$6.163 \times 10^5$	$3.147 \times 10^1$	0.5226	0.999996
2-1	$1.015 \times 10^5$	$2.745 \times 10^6$	$8.441 \times 10^1$	0.3982	0.998875
4-10	$2.590 \times 10^5$	$4.785 \times 10^6$	$4.340 \times 10^2$	0.4912	0.999850
4-22	---	$3.750 \times 10^6$	$5.536 \times 10^1$	0.4509	0.999751
4-32	$7.056 \times 10^4$	$6.632 \times 10^6$	$2.752 \times 10^2$	0.4370	0.999998
529-1	$3.300 \times 10^5$	$5.698 \times 10^6$	$8.258 \times 10^0$	0.3298	0.999583
529-2	$8.035 \times 10^3$	$1.401 \times 10^4$	$1.196 \times 10^3$	0.8724	0.999937
C-1	$2.040 \times 10^4$	$1.237 \times 10^5$	$2.888 \times 10^0$	0.5524	0.999986
C-2	$8.000 \times 10^1$	$7.850 \times 10^3$	$3.794 \times 10^{-3}$	0.6766	0.999994
C-3	---	$1.919 \times 10^4$	$6.490 \times 10^{-2}$	0.5649	0.999995
C-4	---	$3.798 \times 10^5$	$2.053 \times 10^2$	0.6308	0.999998
C-5	$6.726 \times 10^4$	$8.137 \times 10^5$	$2.674 \times 10^3$	0.6319	0.999834
C-6	$4.795 \times 10^5$	$2.047 \times 10^6$	$3.592 \times 10^2$	0.5578	0.999620
C-7	$2.325 \times 10^3$	$1.495 \times 10^5$	$6.677 \times 10^3$	0.7069	0.999982
C-8	$3.500 \times 10^2$	$1.078 \times 10^5$	$1.227 \times 10^2$	0.6280	0.999981
C-9	---	$4.067 \times 10^3$	$1.416 \times 10^2$	0.9348	0.999980
C-10	---	$3.180 \times 10^3$	$1.200 \times 10^{-12}$	0.9864	0.999780



<표 2> 60℃, 0.1과 10 rad/s에서의 개질아스팔트의 점도

시료명	60℃ 점도, Pa.s		시료명	60℃ 점도, Pa.s	
	0.1 rad/s	10 rad/s		0.1 rad/s	10 rad/s
1-1	80,659	4,306	3-20	5,908	1,387
1-2	50,769	3,062	4-4	29,883	2,485
1-3	23,406	3,401	4-5	35,994	3,110
1-7	17,997	2,432	4-6	71,200	5,187
1-9	14,137	1,861	4-9	15,594	2,243
1-11	23,396	2,499	4-10	311,950	9,242
1-12	29,082	4,089	4-15	4,544	1,338
1-13	10,048	1,600	4-16	8,154	2,065
1-14	3,622	1,388	4-21	49,064	3,935
1-15	2,251	909	4-22	85,332	11,326
1-19	6,801	1,328	4-30	5,260	1,239
1-21	24,445	2,130	4-31	20,500	3,227
1-22	23,468	3,179	4-32	159,930	8,306
1-24	19,173	2,498	4-35	26,605	3,083
1-26	11,486	1,639	4-36	34,835	3,939
1-29	6,982	1,251	529-1	630,770	31,029
1-32	4,486	1,179	529-2	8,871	399
2-1	145,480	5,683	C-7	3,860	581
2-3	57,469	3,107	C-8	3,351	721
2-12	27,205	3,544	C-3	1,813	1,050
C-4	9,612	2,149	C-1	25,466	2,457

3. 결론

일반적으로 개질 아스팔트는 스트레이트 아스팔트와 다른 유동거동을 보이는 데 그 이유는 내부구조가 다르기 때문이다. 각 아스팔트의 내부구조를 관찰하기 위하여 형광현미경 사진을 촬영하였다. 그 결과 각기 다른 개질 아스팔트는 각기 다른 내부구조를 가지고 있음이 관측되었다. 이러한 내부구조의 특성은 각 개질 아스팔트의 물성과 직접적인 관련이 있음을 밝혔고, 이러한 특성은 항복응력이라는 항으로 표현됨을 나타내었다.

개질 아스팔트의 유동거동을 예측하기 위하여 특성방정식을 소개하였으며, 이 식들로 실제로 측정된 응력과 점도 데이터를 회귀분석한 결과는 우수한 상관성을 보였다. 이러한 회귀분석을 통하여 항복응력이 구해지며, 이 값은 낮은 주기에서의 점도를 증진시키는 데 직접관련이 있음을 제시하였다. 낮은 주기에서의 점도가 소성변형의 시작과 관련이 있음으로 항복응력은 소성변형 저항성을 대변하는 인자임을 발견하였다. 따라서 소성변형 저항성이 우수한 개질 아스팔트를 개발하기 위해서는 항복응력이 큰 개질 아스팔트를 개발하는 것이 요구된다.



### 감사의 글

본 연구는 건설기반기술혁신 (산학연 공동연구 개발) 사업과 한국형포장설계법 개발 연구사업의 재정적 지원을 받아 이루어진 것으로 본 연구를 가능하게 한 건설교통부와 건설교통기술평가원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 허정도, 김한용, 조규태, 손원표 (2003), "아스팔트바인더 유체를 위한 특성방정식 모델링", 한국도로포장공학회, 학술발표회 논문집, pp. 83-90.
2. Nakanishi H, Kawanaka T, Ziqing L, Baocum H(2002), "Study on Improvement in Durability and Function of Porous Asphalt Pavement", 4th Intern. Conf. on Road & Airfield Pavement Technology, Kunming, China, Proceedings Vol. II, pp. 965-973.