

## 아스팔트 피막두께 변화에 따른 중온 아스팔트의 접착성질에 관한 연구

### A Study of Warm-Mix Asphalt's Bonding Properties on the Change of Asphalt Film Thicknesses

유인상 Yoo, In Sang	정회원 · 국토해양부 공무원 · 주저자 (E-mail : lsyoo@mltm.go.kr)
조동우 Cho, Dong-Woo	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : dongwoocho@kict.re.kr)
황성도 Hwang, Sung Do	정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 · 공저자 (E-mail : sdhwang@kict.re.kr)
이석근 Rhee, Suk Keun	정회원 · 경희대학교 토목공학과 교수 · 공저자 (E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

#### ABSTRACT

Warm-Mix Asphalt(WMA) technologies have been developed since 15 years ago, which are internationally and domestically concerned with energy-saving and environmental-friendly technologies in public and private sectors of highway engineering. The performance of asphalt mass is traditionally evaluated by the penetration, viscosity, or Superpave tests. This research, however, is focused more on the properties depending on asphalt film thicknesses instead of evaluating asphalt mass behaviors by those tests. For this approach, a new testing protocol and analysis method are described by the bonding properties on each film thickness. This testing method and analysis tool are borrowed from those of DSR Moisture Damage test and applied by using ARES. The analysis results indicate that there is a limit film thickness between 200 $\mu$ m and 400 $\mu$ m, which causes significant changes of the properties. In addition, the results show that the property changes of Hot-Mix Asphalt(HMA) and WMA on the limit film thickness are also different. Therefore, it is suggested that the properties on thin film thicknesses between 200 $\mu$ m and 400 $\mu$ m should be considered in order to evaluate WMA properly.

#### KEYWORDS

Warm-Mix Asphalt, DSR, film thickness, ARES,  $G^*$ , shear stress

#### 요지

유럽에서 개발된지 약 15년 정도의 짧은 역사를 가지고 있는 중온 아스팔트 포장은 국내·외적으로 현재 가장 관심대상이 되는 에너지 절약과 환경보호를 추구하는 도로건설분야의 그린기술이다. 본 연구는 이러한 중온 아스팔트의 물성평가를 아스팔트 덩어리 전체 거동으로 고려한 기존 침입도, 점도, 그리고 수퍼페이브에 의한 아스팔트 시험방식으로부터 벗어나 아스팔트 피막 두께에 따른 물성평가로 시각을 바꾸어 새로운 프로토콜을 제시하고 결과분석에 따른 새로운 평가기준제안을 하는 것이 목적이다. 이를 위해 기존에 개발한 DSR Moisture Damage의 실험 및 분석의 기본틀을 ARES장비를 통해 각 피막두께별 물성을 측정하고 분석하였다. 분석결과를 통해 200 $\mu$ m와 400 $\mu$ m 사이에 물성의 급격한 변화를 볼 수 있는 한계피막두께가 존재하고 또한 가열아스팔트와 중온아스팔트가 가지고 있는 한계피막두께근처에서 발생하는 물성의 급격한 변화가 서로 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 이런 결과를 통해 기존 가열 아스팔트와 성질이 다른 중온 아스팔트를 제대로 평가하기 위해서는 200 $\mu$ m와 400 $\mu$ m 사이 피막두께의 물성평가를 고려해야한다는 것을 제안한다.

#### 핵심용어

중온 아스팔트, DSR, 피막두께, ARES,  $G^*$ , 전단응력

#### 1. 서론

1996년 유럽에서 도로 포장 기능공들의 작업환경을 개선하기 위해 처음 개발된 중온 아스팔트 포장 기술은 아스팔트의 점도를 낮추는 기술을 사용함으로써 기존의

가열 아스팔트 혼합물(Hot Mix Asphalt, HMA)보다 낮은 온도 조건에서도 아스팔트가 골재표면에 용이하게 코팅될 수 있게 하여 생산, 운반, 포설, 다짐 과정에서 작업효율을 향상시키는 기술이다(조동우 외, 2009). 미

국은 2002년에 유럽으로부터 중온 아스팔트 포장 기술을 도입한 후 현재는 현장 적용 및 장기 공용성 검증을 추진하고 있으며, 2008년부터 국가 표준화 작업을 진행하고 있다. 이에 반해 우리나라는 저탄소 중온 아스팔트 포장 공법에 대한 연구를 시작하지 4~5년 정도 되었지만 구미 선진국과는 아직도 약 10년 정도 되는 기술 개발경력의 차이를 보이고 있어 원천기술의 국산화 및 표준화를 위한 노력을 하고 있는 중이다. 이러한 노력중의 하나로 본 연구에서는 최근 국내 연구진에 의해 개발된 중온 아스팔트용 첨가제를 사용하여 피막두께가 아스팔트의 접착성능에 미치는 영향을 평가하고자 제안된 실내 시험방법으로 실험 및 분석을 실시하였다.

## 2. 아스팔트와 골재의 접착특성 시험법

### 2.1. 중온 아스팔트의 물성평가

중온 아스팔트의 물성 평가 방법은 기본적으로 가열 아스팔트의 물성을 평가하는 방법과 크게 상이하지 않다. 단지 가열 아스팔트보다 20~30℃ 정도 낮은 온도에서 사용하는 중온 아스팔트와 골재와의 코팅 정도에 문제가 없는지에 대한 검토가 필요하다. 그리고 만약 중온 아스팔트가 골재와의 코팅이 제대로 이루어지지 않았다면, 외부에 노출된 골재가 물과 접촉하면서 수분민감성 발생에 영향을 주는 점에 대한 확인이 필요하다. 따라서 이를 확인하고 사전시험을 통해 성능을 확인할 수 있는 시험방법이 필요하다. 이를 위해서는 온도 변화와 코팅하는 피막두께를 변화시키면서 중온 아스팔트의 물성을 조사할 수 있는 장비의 선택이 가장 중요한 요소가 되며, 이러한 아스팔트의 물성을 시험하기 위한 장비로서 동적전단유동기(Dynamic Shear Rheometer, DSR)를 선택했다. DSR은 고분자 물질의 점탄성체의 물성을 측정 분석하기 위한 정밀 장비로서, 국제적으로 아스팔트 기본 거동 특성을 파악하는데 사용하고 있다.

### 2.2. 기존 가열 아스팔트 유동물성 시험법

아스팔트 포장은 40℃보다 높은 온도 영역에서 영구 변형이나 러팅이 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 아스팔트의 러팅 저항성을 실내에서 평가하기 위한 시험방법이 발전하면서 많은 연구자들은 이의 측정 도구로서 동적전단유동기(Dynamic Shear Rheometer, DSR)를 사용하고 있다. 동적전단유동기(DSR)은 1987년과 1993년 사이에 Strategic Highway Research Program(SHRP)이 진행되면서 아스팔트의 점탄성 성

질을 평가하기 위한 시험도구로서 처음 제안되었다(Anderson, D. 등, 1994). DSR 시험은 두 개의 평행한 원형 금속판을 사용하여 아스팔트에 회전전단력을 작용시키고, 응력과 변형에 대한 거동으로 유동학적 물성을 측정하는 전형적인 회전유동기이다. 이러한 아스팔트의 점탄성적인 특징은 복소탄성계수(Complex Modulus,  $G^*$ )와 위상각(Phase Angle,  $\delta$ ) 또는 이러한 함수들의 조합들(Storage Modulus  $G'$ , Loss Modulus  $G''$  또는 Inverse of the Loss Compliance  $|G^*|/\sin\delta$ )에 의해 해석된다.

고정된 진동수와 온도에서  $|G^*|/\sin\delta$ 는 SHRP에 의해 아스팔트의 러팅 저항성의 한 척도를 줄 수 있는 미국 슈퍼페이브(Superpave) 시방서의 매개변수로서 SHRP에 의해 제안되었다(Anderson, D. 등, 1994; Bahia, H. U. 등, 1995). 그리고 복소탄성계수  $|G^*|$ 와 위상각  $\delta$ 의 조합은 아스팔트의 탄성적인 성질뿐만 아니라 그 강도를 알아볼 수 있는 것으로서 의미를 가진다. 이 매개변수는 개질하지 않은 재료들의 러팅 특성에서는 서로가 확연하게 구분되는 것으로 밝혀졌다. 그러나 최근의 연구에서  $|G^*|/\sin\delta$ 는 포장 아스팔트의 러팅 저항성을 판단하는데 그다지 효과적이지 않다는 것이 보고되고 있다. 특히 이러한 연구 결과는 좀 더 많은 고분자 개질 아스팔트에 대한 러팅 공용성을 검증하기 위한 시험을 통해 확인되고 있다(Philips, M. C. 등, 1996; Stuart, K. D. 등, 1997; Chabert, D. 등, 1996). 매개변수  $|G^*|/\sin\delta$ 의 실패는 Turner-Fairbank Highway Research Center에서 Accelerated Loading Facility(ALF) 시험을 통한 현장 시험자료에 의해 좀 더 확신하게 되었다(Stuart, K.D. 등, 1997).

그리고 NCHRP의 연구 과제를 수행하면서, 개질 아스팔트의 시험 분석으로부터 매개변수  $|G^*|/\sin\delta$ 와 그 혼합물의 러팅 시험 사이에 상관성이 나쁜 것으로 밝혀졌다(Bahia, H. U. 등, 2001). 이러한 아스팔트의 러팅 저항성 평가 기준의 적용에 대한 의문에 따라 슈퍼페이브 매개변수  $|G^*|/\sin\delta$ 의 개선 필요성이 대두되었고, 슈퍼페이브 매개변수를 대체하기 위한 많은 시도가 진행되고 있다(Boldin, M. G. 등, 2001; Shenoy, A., Discussion, 2001; Shenoy, A., 2001; Rowe, G.M. 등, 2002).

### 2.3. 중온 아스팔트 피막두께별 접착물성 연구를 위한 가정

아스팔트는 점탄성 물질이기 때문에 하중의 크기뿐만

아니라 하중 속도 및 온도변화에 민감하다. 이러한 아스팔트 물성을 측정하고 평가할 때 실제 아스팔트 포장재에서 존재하는 마이크론 단위의 아스팔트 피막두께가 아니라 덩어리져 있는 형태의 아스팔트 흐름이나 물성을 측정하는 것이 미국 수퍼페이브의 아스팔트 등급 시험의 주요한 대상이다(Anderson et al., 1994). 그러나 사실상 마이크론 단위의 피막두께를 통해 아스팔트가 자신의 기능을 수행한다는 것은 잘 알려진 사실이다(Read and Whiteoak, 2003; Campen et al., 1959).

이러한 사실에 기초하여 본 논문에서는 한 가지 가정을 하였다. 이 가정은 기존의 수퍼페이브에서 1mm로 고정된 덩어리 유동물성을 위한 피막두께 시험결과와는 달리 피막두께의 변화에 따른 접착면 물성 특이점이 존재한다는 것이다. 이러한 가정을 입증하기 위해 상기에 설명한 DSR Moisture Damage Test와 이 시험 분석 방법을 응용한 시험을 하였다.

#### 2.4. DSR을 이용한 아스팔트의 접착물성 실험방법

본 연구에서는 중온 아스팔트와 골재의 사이의 접착물성을 측정하기 위해 개발된 DSR Moisture Damage Test의 시험방법을 차용했다(Cho, D.W., Bahia, H. U., 2007; Cho, D.W., 2008). 본 실내 실험은 DSR Moisture Damage Test를 수정하여 실시하였고, 사용한 시험장비는 기존의 DSR Moisture Damage Test 방법에서 사용한 Paar Physica의 MCR300을 대체하여 Advance Rheometric Expansion System (ARES)장비로 실험을 수행하였다. 본 연구의 실내 실험에서 사용한 ARES는 Rheometric Scientific사의 Strain Control 모드로 작동되는 고분자 재료나 아스팔트 같은 유기물질의 유동학적 물성을 측정하는 장비이다.

본 실험에서 가장 중요한 특징은 아스팔트의 피막두께를 다양하게 변화시켜가면서 가열 아스팔트와 중온 아스팔트의 역학적 물성차이를 비교하는 것이다. 그리고 한 가지 주의할 점은 본 실험에서 사용하는 역학적인 실험방법은 기존의 SHRP에서 개발한 수퍼페이브 표준 아스팔트의 비파괴 모드와는 다른 파괴모드라는 것이다. 이러한 파괴모드 실험 방법은 작은 회전전단응력으로부터 큰 회전전단응력까지 점점 응력값을 높이면서 아스팔트의 선형 응답 영역을 확인하는 Stress Sweep 시험과 응력대신 변형률 값이 증가하는 Strain Sweep 시험방법이 있다. ARES는 Stress Control 방식으로 사용할 수 없고 오직 Strain Control 방식으로만 사

용할 수 있는 장비이기에 Strain Sweep 시험법으로 실험을 실시하였다. Strain Sweep 시험에서 사용한 증가율은 Linear Ramp방식으로 한 주기당 0.1%씩 증가시켰다. Strain Sweep 시험을 통해 시료에 작은 회전전단응력으로부터 큰 회전전단응력까지 시간 또는 반복 횟수가 늘어감에 따라 점차적으로 증가하고 가해진 반응을 측정한다. 이러한 Strain Sweep 시험을 통해 아스팔트 선형 구간안에서의 거동을 볼 수 있을 뿐만 아니라, 비선형 구간안에서의 거동을 볼 수 있기에 수퍼페이브의 표준 아스팔트 시험법으로 파악할 수 없는 아스팔트의 물성을 구할 수 있다.

#### 2.4.1. 실험재료

본 연구에서는 중온화 첨가제의 효과를 알아보기 위해 중온화 첨가제를 넣지 않은 대조군과 중온화 첨가제를 넣은 실험군 2종의 아스팔트를 사용하였다. 대조군으로서 아스팔트는 일반 아스팔트(PG64-22)를 사용하였으며, 실험군을 만들기 위해 이 일반 아스팔트에 아스팔트 중량 기준으로 3%를 섞은 저탄소 중온화 첨가제(KW3)는 폴리에틸렌계 왁스로서 아스팔트에 첨가되어 점도를 감소시키는 특징을 가진다.

KW3는 폴리에틸렌계 왁스로서 아스팔트의 유동성을 향상시켜 아스팔트 혼합물의 제조 온도 및 다짐 온도를 감소시킬뿐만 아니라 고온에서 발생하는 소성변형에 대한 저항성을 향상시킴과 동시에 아스팔트 혼합물의 저온 특성 저하현상을 억제할 수 있다. 일반적으로 폴리에틸렌계 왁스를 제조하는 방법은 다음과 같이 3가지 방법으로 분류할 수 있다. 이 중에서 본 연구에서는 피셔트로프슈법에 의해 제조된 왁스를 중온 첨가제로서 사용하였다.

- 폴리에틸렌 수지를 만드는 과정에서 나오는 저분자량의 부산물
- 폴리에틸렌 수지를 열분해시켜 분자량을 감소시키는 방법
- 피셔트로프슈법(Fischer Tropsch Synthesis)으로 제조하는 방법

그림 1과 그림 2는 사용된 중온 첨가제의 분자구조 및 재료를 나타내며, 표 1은 중온화 첨가제를 첨가한 중온 아스팔트의 품질시험 결과를 정리한 것이다.

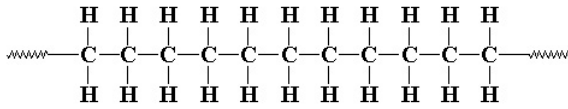
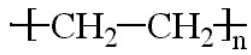


그림 1. 폴리에틸렌 왁스의 분자 구조



그림 2. 폴리에틸렌 왁스

표 1. 증온 첨가제를 첨가한 증온 아스팔트의 품질시험 결과

시료 구분	시험 항목		증온 아스팔트	온도(°C)
Original (노화이전)	135°C 점도(cP)		376	135
	동적전단 탄성계수 $G^* / \sin \delta$ (kPa)		1.072	64
RTFO (단기노화)	동적전단 탄성계수 $G^* / \sin \delta$ (kPa)		2.598	64
PAV (장기노화)	크리프 스티프니스	Stiffness (MPa)	195.33	-12
		m-value	0.32	-12
PG 규격			64-22	

## 2.4.2. ARES 시험기의 Strain Sweep 시험

본 시험은 일반 DSR 장비를 사용해서 정해진 1mm 피막두께에서 물성을 확인하는 방법에서 벗어나 아스팔트 피막두께를 일정하게 변화시키면서 다양한 피막두께에 따른 아스팔트의 물성을 확인할 수 있는 방법이다. 이 시험에서는 피막두께 변화를 줄 때의 가열온도를 60°C 하나로만 고정하고 90°C 같은 높은 온도는 사용하지 않았다. 그리고 실제 시험 온도는 수퍼페이브의 기준으로 25mm 직경의 시료 사용 시 제안한 가장 낮은 온도인 40°C에서 실시하였다. 이 시험을 통해 피막두께 1mm(1000 $\mu$ m), 0.8mm(800 $\mu$ m), 0.6mm(600 $\mu$ m), 0.4mm(400 $\mu$ m), 0.2mm(200 $\mu$ m)까지 5종류의 피막두께별 물성평가 실험을 실시하였다. Strain Sweep 시험을 위한 과정은 다음과 같다.

- 스핀들과 금속 플레이트를 조립하고 조립된 플레이트를 ARES 본체에 장착한다.
- 아세톤(Acetone)으로 금속 플레이트의 표면을 깨끗하게 닦는다.
- Zero Gap을 사용해서 스핀들의 위치를 고정하고 기록한다.
- 시험을 하기 전 가열온도인 60°C에서 금속 플레이트를 10분간 예열한 후 아스팔트를 금속 플레이트에 올려놓고 다시 60°C에서 10분간 가열한다.
- 가열이 끝나면 1.00mm+50 $\mu$ m 피막두께까지 스핀들을 내리고 다시 60°C에서 5분간 가열하고 옆으로 흘러나온 아스팔트를 작은 주걱(spatula)으로 제거한다(trimming).

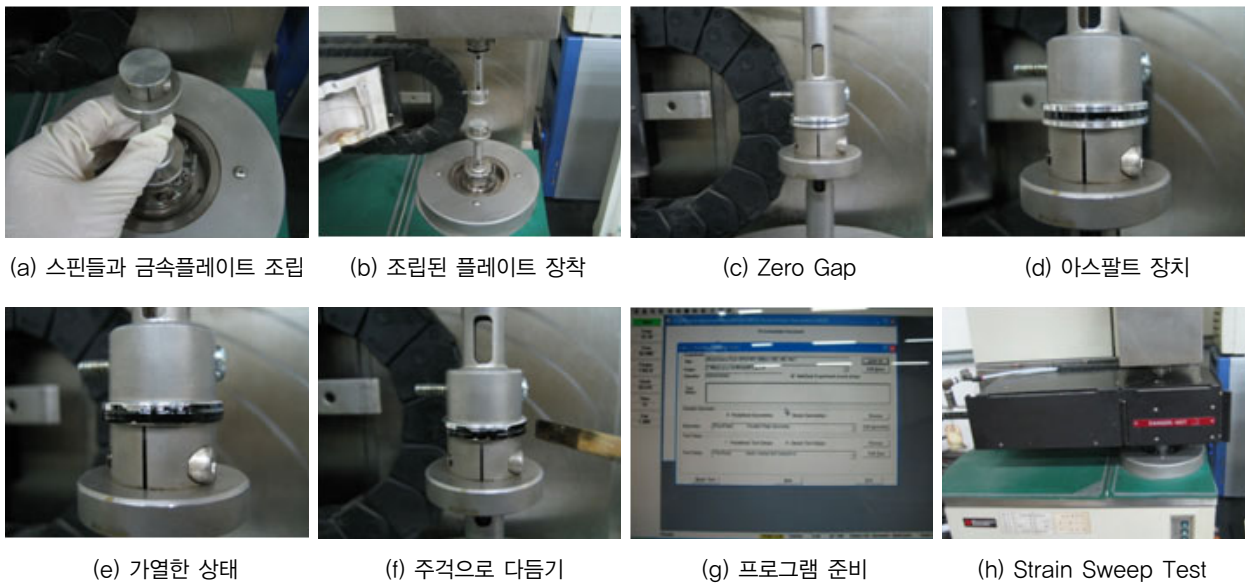


그림 3. 아스팔트의 Strain Sweep 시험 준비과정

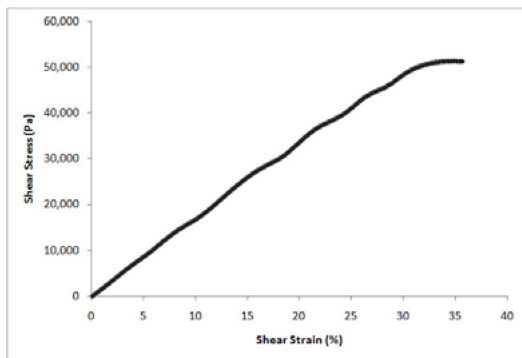
- 6) 시료준비 후 1.0mm 피막두께까지 스핀들을 다시 내리고 시험 온도인 40℃로 온도를 맞추고 10분간 가열을 한다.
- 7) 10Hz의 진동수와 40℃시험온도에서 Strain Sweep Test를 실시한다.
- 8) 다른 피막두께를 위한 시험도 위의 과정을 반복한다. 다듬기 위한 피막두께는 결정된 피막두께 +50 $\mu$ m를 사용한다.

그림 3은 아스팔트 Strain Sweep 시험의 전체과정을 보여주고 있다.

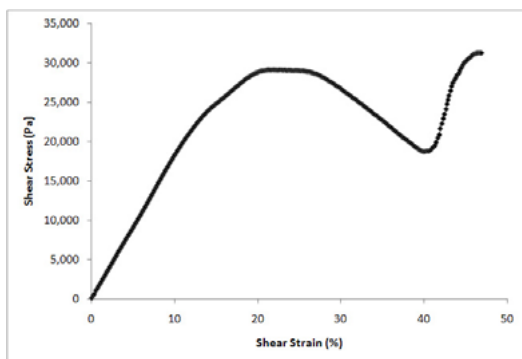
### 3. Strain Sweep 시험에 의한 피막두께별 접착물성 실험결과

#### 3.1. Strain Sweep 시험결과 분석조건

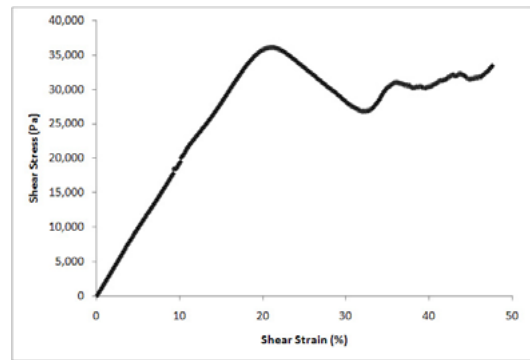
본 실험에서 사용한 시험방법은 응력이 아니라 변형률 (Shear Strain)을 점점 높이는 Strain Sweep 시험으로서 높은 응력상태에서는 Stress Sweep 시험보다 훨씬 큰 폭으로 응력을 증가시킨다. 이렇게 증가하는 응력상황에서는 그림 4의 (a)와 같은 일부 제한된 조건(얇은 피막)의 실험을 제외하고는, 그림 4의 (b), (c), (d), (e)등처럼



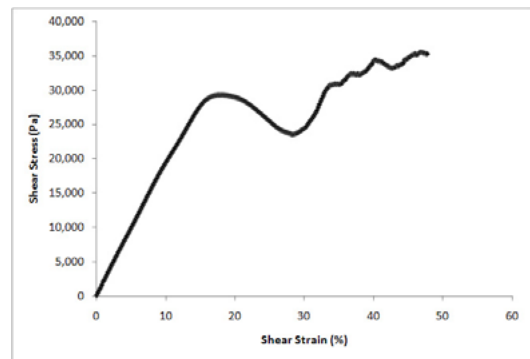
(a) 200 $\mu$ m의 피막두께



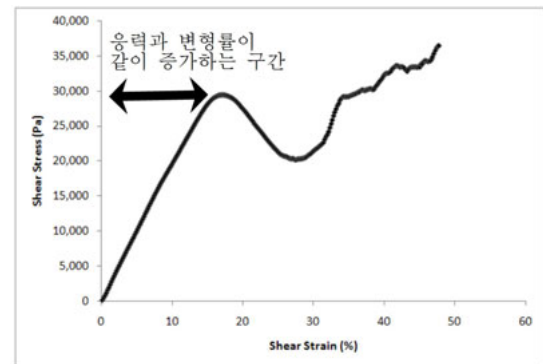
(b) 400 $\mu$ m의 피막두께



(c) 600 $\mu$ m의 피막두께



(d) 800 $\mu$ m의 피막두께



(e) 1000 $\mu$ m의 피막두께

그림 4. 피막두께에 따른 응력과 변형률의 곡선들

그 응력들에 따른 항복곡선이 보이는 구간이 나타난 다음, 아스팔트변형이 소폭 회복하거나 2차 항복곡선 구간이 나타나는 현상이 발생한다. 이러한 불규칙적인 변화 구간에서 결과값을 구하는 것은 분석에 어려움이 있기 때문에, 그림 4의 (e)처럼 응력과 변형률이 같이 증가하는 구간 사이의 결과값들을 사용하여 분석을 실시하였다.

#### 3.2. 아스팔트 피막두께 변화에 따른 복소탄성계수( $G^*$ )와 전단응력 변화 분석

SHRP에서 개발한 슈퍼페이브(Superpave) 표준 아

(그림 계속)

스팔트 시험은 아스팔트의 피막두께와 상관없이 아스팔트가 점성으로서 흐르는 성질과 탄성으로서 형태를 유지하는 능력을 가장 잘 보일 수 있는 조건이 되는 시험 피막두께로 1mm를 정하고 그 1mm의 간격 내 틀에서 아스팔트의 러팅 저항력을 평가판단하는 시험을 수행한다(Anderson et al., 1994). 그러나 실제 아스팔트와 골재로 이루어진 혼합물에서는 이러한 1mm의 피막두께에서 평가한 아스팔트 물성보다는 골재와 같이 붙어 있는 마이크로 크기의 얇은 피막두께 하에서의 물성이 아스팔트 혼합물의 공용성과 더 밀접한 관련을 가지고 있다(Read and Whiteoak, 2003, Campen et al., 1959).

본 실험에서는 기존 금속 플레이트를 사용하여 가열 아스팔트 PG64-22와 중온 아스팔트 PG64-22+KW3

두 종류의 아스팔트를 60℃에서 각 200 $\mu$ m, 400 $\mu$ m, 600 $\mu$ m, 800 $\mu$ m, 1000 $\mu$ m 피막두께로 설치하고, 40℃의 시험온도에서 Strain Sweep을 실시하였다. 표 2는 이러한 시험온도 및 피막두께 변화에 따른 선형점탄성 복소탄성계수( $G^*$ ), 85% 선형점탄성  $G^*$  및 85% 선형점탄성  $G^*$ 에서의 전단응력을 분석하여 정리한 값이다.

표 2에서  $G^*$ 값들을 상호 비교하여 값의 차이가 10%를 훨씬 넘는 실험값들은 취소선을 넣어 실제 결과값 분석에 사용하지 않았음을 표시하였다. 이 표에서 선형점탄성  $G^*$ 값은 최소값 172,420Pa에서부터 최대값 225,220Pa 사이에 분포하고 있다. 선형점탄성  $G^*$ 값에서 PG64-22 아스팔트는 200 $\mu$ m 피막두께에서만 200,000Pa 이하의 값인 184,035Pa의 값이 보이는 반면, PG64-22+KW3의 아스팔트는 400 $\mu$ m와 1000 $\mu$ m에

표 2. 아스팔트 피막두께에 따른 선형점탄성  $G^*$ , 85%  $G^*$ , 및 85%  $G^*$ 에서의 전단응력 값들

아스팔트	세팅 온도 (°C)	실험 온도 (°C)	아스팔트 피막두께 ( $\mu$ m)	실험반복 횟수번호	선형 점탄성 $G^*$ (Pa)	선형점탄성 $G^*$ 의 평균값 (Pa)	85%선형 점탄성 $G^*$ (Pa)	85% 선형 점탄성 $G^*$ 평균값 (Pa)	85% 선형 점탄성 $G^*$ 에서 전단응력 (Pa)	85% 선형 점탄성 $G^*$ 에서 전단응력 평균값 (Pa)
PG64-22	60	40	200	1	179,220	<b>184,035</b>	152,880	160,875	51,192	53,206
				2	188,850		168,870		55,219	
				3	256,280		217,460		<del>37,586</del>	
			400	1	180,530	<b>216,340</b>	153,110	185,010	<del>-27,171</del>	43,863
				2	216,580		184,320		43,933	
				3	216,100		185,700		43,793	
			600	1	210,070	205,120	178,260	174,697	35,827	35,460
				2	202,890		173,120		35,388	
				3	202,400		172,710		35,166	
			800	1	200,460	202,030	170,420	171,910	29,276	31,071
				2	209,020		177,340		31,071	
				3	196,610		167,970		32,866	
			1000	1	204,000	200,377	174,040	170,627	29,409	29,304
				2	203,380		173,270		27,880	
				3	193,750		164,570		30,622	
PG64-22+KW3	60	40	200	1	233,750	<b>182,425</b>	178,090	163,010	54,693	51,568
				2	192,430		163,690		49,218	
				3	172,420		162,330		53,917	
			400	1	218,050	<b>214,010</b>	185,300	180,003	37,330	39,324
				2	225,220		185,410		40,967	
				3	198,760		169,300		39,675	
			600	1	205,370	192,470	174,470	163,313	33,987	33,370
				2	188,420		159,270		32,619	
				3	183,620		156,200		33,503	
			800	1	182,460	188,360	154,570	159,830	30,500	29,829
				2	194,260		165,090		29,157	
				3	228,770		193,930		30,193	
			1000	1	197,630	206,175	167,500	174,640	25,734	28,324
				2	233,840		198,890		27,341	
				3	214,720		181,780		30,914	

서만 200,000Pa이 넘는 값을 나타내어 전체적으로 PG64-22가 PG64-22+KW3보다는 약간 높은 선형점탄성  $G^*$  값을 보이는 경향이 있음을 알 수 있다.

이러한 선형점탄성  $G^*$  값을 분석하면서 관찰된 내용은 다음과 같다. PG64-22의 선형점탄성  $G^*$ 가 변화하는 경향을 살펴보면 1000 $\mu\text{m}$ 에서부터 800 $\mu\text{m}$ , 600 $\mu\text{m}$ , 그리고 400 $\mu\text{m}$ 까지 두께가 감소하면서 선형점탄성  $G^*$  값이 점점 증가하다가 200 $\mu\text{m}$ 에서 급격하게 뚝 떨어지는 것을 볼 수 있다. 가열 아스팔트인 PG64-22에 중온화 유기첨가제인 KW3을 혼입한 중온 아스팔트인 PG64-22+KW3는 PG64-22가 보여주는 두께에 따른 증가 변화 경향과는 다르지만 역시 가정한 한계 피막두께와 관련 있는 400 $\mu\text{m}$ 와 200 $\mu\text{m}$ 사이에서는 PG64-22처럼 선형점탄성  $G^*$  값이 급격하게 감소하는 경향을 보여주고 있다. 본 실험에서는 일반 가열 아스팔트(PG64-22) 한 종류와 여기에 중온화 첨가제를 섞은 중온 아스팔트(PG64-22+KW3)만을 사용했기에 상기의 시험결과만으로 아스팔트의 일반적인 거동 특성으로 정의하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 논문에서 고찰한 여러 가지 가정이나 추정은 본 실험의 사용 재료를 근거로 이루어진 것이다. 이러한 분석을 통해 발견된 중요한 현상은 PG64-22와 PG64-22+KW3 두 가지 아스팔트 모두 400 $\mu\text{m}$ 의 피막두께에서 선형점탄성  $G^*$  값이 최대가 되고, 200 $\mu\text{m}$ 의 피막두께에서는 최소값으로 변화한다는 것이다. 이러한 일부 피막두께에서  $G^*$  값이 최대가 되는 결과로 판단컨데, 선형점탄성  $G^*$ 와 관련하여 특정한 물성값을 변화시키는 한계 피막두께가 존재한다는 추정을 할 수 있다. 만약에 이러한 한계 피막두께가 존재한다면 본 실험 결과를 통해 200 $\mu\text{m}$ 과 400 $\mu\text{m}$  사이에 있을 것으로 가정을 할 수 있다.

선형점탄성  $G^*$ 의 값으로부터 15% 손실하고 85%만큼 남은 값을 표현한 85% 선형점탄성  $G^*$ 의 경향은 선형점탄성  $G^*$ 의 값과 크게 다르지 않다. 기본적으로 이전에 분석한 선형점탄성  $G^*$  값으로부터 유도한 값이기 때문이다. 단지 여기에서 한 가지 다시 한번 고찰해야 할 사항은 85% 선형점탄성  $G^*$  값은 그 자체의 값보다 85% 선형 점탄성  $G^*$ 가 나타나는 전단응력값을 찾기 위해 필요한 수치이다. 즉 85% 선형점탄성  $G^*$ 에서의 전단응력은 전단응력과 선형점탄성  $G^*$ 를 나타낸 그래프에서 선형구간과 비선형구간을 나누어주는 일종의 한계점으로 사용된다(Cho, 2008).

표 2에서 마지막으로 정리된 내용은 상기에서 언급한 선형구간과 비선형구간을 나누어주는 한계점으로써

85% 선형점탄성  $G^*$ 에서의 전단응력 값들이다. 우선 이 전단응력 값들을 분석하면서 관찰된 첫 번째 현상은 일반 아스팔트 PG64-22와 중온 아스팔트 PG64-22+KW3 사이에서 보이는 전단응력 값들이 전반적으로 큰 차이는 없다는 것이다. 이것은 가열 아스팔트 PG64-22와 중온 아스팔트 PG64-22+KW3의 성능이 큰 차이가 나지 않는다는 하나의 증거가 될 수 있다. 한편 이 전단응력 값들은 28,324Pa의 최소값으로부터 53,206Pa의 최대값까지 약 2배에 이르는 큰 변화를 볼 수 있다. 이러한 점을 고려해 볼 때 이 한계점의 전단응력 값들은 선형점탄성  $G^*$  값보다 훨씬 민감도가 높은 상태로 변화한다는 것을 알 수 있다. 실제로 각 두께에 따른 한계점의 전단응력 값을 비교해 보기 위해 각 피막두께별 한계점의 전단응력 값의 차이를 구하고 그 차이의 비율을 계산하는 민감도 분석을 실시하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 85% 선형점탄성  $G^*$ 에서의 전단응력 값 민감도 분석

아스팔트	세팅 온도 (°C)	실험 온도 (°C)	아스팔트 피막 두께 ( $\mu\text{m}$ )	85% 선형점탄성 $G^*$ 에서의 전단응력의 평균값(Pa)	각 피막 두께별 전단응력 값의 차(Pa)	각 피막두께 별 전단응력 값의 차이가 전체전단응력에서 차지하는 비율(%)
PG64-22	60	40	1000	29,304	-	-
			800	31,071	1,767	6
			600	35,460	4,389	14
			400	<b>43,863</b>	<b>8,403</b>	<b>24</b>
			200	<b>53,206</b>	<b>9,343</b>	<b>21</b>
PG64-22+KW3	60	40	1000	28,324	-	-
			800	29,829	1,505	5
			600	33,370	3,541	12
			400	<b>39,324</b>	<b>5,954</b>	<b>18</b>
			200	<b>51,568</b>	<b>12,244</b>	<b>31</b>

민감도 분석을 하기 전에 우선 이 한계점 전단응력 값의 경향을 살펴볼 필요가 있다. 표 3은 표 2의 85% 선형점탄성  $G^*$ 에서의 전단응력의 평균값을 다시 정리해서 보여주고 있다. 표 3을 살펴보면 일반 아스팔트 PG64-22에서 피막두께가 1000 $\mu\text{m}$ , 800 $\mu\text{m}$ , 600 $\mu\text{m}$ , 400 $\mu\text{m}$ , 200 $\mu\text{m}$ 에 이르면서 29,304Pa에서 53,206Pa까지 점점 증가하는 경향을 볼 수 있다. 중온 아스팔트 PG64-22+KW3도 1000 $\mu\text{m}$ 에서부터 200 $\mu\text{m}$ 까지 피막두께가 얇아지면서 28,324Pa으로부터 51,568Pa까지 점점 증가하는 경향이 보인다. 이렇게 한계점의 전단응력 값이 증가하는 경향은 선형점탄성  $G^*$ 에서 보이는 한계 피막두께와는 관계없이 독립적으로 나타나는 값으로

보인다. 그러나 각 한계점의 전단응력 값의 증가폭과 관련한 경향은 한계 피막두께와 관련한 경향을 보여줄 가능성이 있으므로 다음에서 분석한 증가폭에 대한 고찰 결과를 통해 한계 피막두께와 관련한 추정을 기술할 것이다.

이러한 전단응력 값이 증가하는 경향을 좀 더 자세히 살펴보기 위해서는 민감도 분석을 할 필요가 있다. 표 3에서 이 민감도 분석을 위해 전단응력의 평균값들의 차이를 구해서 넣었다. 예를 든다면 표에서 보이는 PG64-22의 800 $\mu\text{m}$  피막두께 줄에 있는 각 피막두께별 전단응력 값의 차이 1,767Pa는 800 $\mu\text{m}$ 의 피막두께에서 보이는 전단응력 값인 31,071Pa에서 1000 $\mu\text{m}$ 의 피막두께에서 보이는 전단응력 값인 29,304Pa을 뺀 값이다. 그 다음에 보이는 4,389Pa 또한 600 $\mu\text{m}$ 의 전단응력 값에서 800 $\mu\text{m}$ 의 전단응력 값을 뺀값으로 PG64-22+KW3 또한 같은 방식으로 계산하였다. 표 3에서 가장 오른쪽에 있는 항목인 ‘각 피막두께 별 전단응력 값의 차이가 본래 전단응력에서 차지하는 비율’은 두께를 변화시켰을 때 변한 전단응력 값이 변화되기 전 피막두께의 전단응력 값에서 상대적으로 어느만큼의 비중을 차지하고 있는지 확인하기 위해서 제시한 변화 값이다.

표 3에서 보이는 ‘각 피막두께별 전단응력 값의 차이’에서 보이는 PG64-22의 1,767Pa, 4,389Pa, 8,403Pa, 9,343Pa의 증가폭과 PG64-22 + KW3의 28,324Pa, 29,829Pa, 33,370Pa, 39,324Pa, 51,568Pa의 증가폭을 살펴볼 때 상당히 흥미로운 결과를 보여주고 있다. 단지 일정한 정도의 증가폭이 아닌 전단응력 값 사이의 증가폭 또한 점점 증가하는 경향을 보이고 있기 때문이다. ‘각 피막두께별 전단응력 값의 차이’처럼 자체 응력값 차이에 의한 절대 증가폭뿐만 아니라 전체 응력 값과 비교를 한 상대 증가폭 또한 민감도 분석을 위해서 필요한 요소가 될 수 있다. 이러한 상대 증가폭을 확인하기 위해서 위에서 이미 언급한 ‘각 피막두께별 전단응력 값의 차이가 본래 전단응력에서 차지하는 비율’의 항목을 만들었고, PG64-22의 피막두께 1000 $\mu\text{m}$ 와 800 $\mu\text{m}$ 사이에서 보이는 6%는 그 옆에 보이는 800 $\mu\text{m}$ 와 1000 $\mu\text{m}$  사이의 전단응력 값의 차이인 1,767Pa이 피막두께 1000 $\mu\text{m}$ 의 전단응력 값인 29,304Pa에서 어느 정도의 비율을 차지하고 있는지 나타내는 값이다. 그 아래에 보이는 14% 또한 600 $\mu\text{m}$ 와 800 $\mu\text{m}$  사이의 전단응력 값 차이가 800 $\mu\text{m}$ 의 31,071Pa로부터 어느정도 비율을 차지하는 지를 나타낸다. PG64-22+KW3의 항목에서 보이는 5%, 12% 등등도

모두 같은 계산법을 사용해서 구해진 값이다.

PG64-22에서는 6%, 14%, 그리고 24%까지 증가하다가 400 $\mu\text{m}$ 와 200 $\mu\text{m}$  사이에서 약간 감소하는 경향을 보이고 있고, PG64-22+KW3는 5%, 12%, 18%, 그리고 31%까지 계속해서 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과를 가지고 볼 때 피막두께가 얇아지면서 전단응력의 상대적인 증가폭 또한 대체적으로 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

상기에 한계두께와 증폭값 사이의 관계에 대한 분석 및 추정을 한다는 내용을 언급한 적이 있다. 여기서 그 증폭값이 한계두께와 어떠한 관계가 있을 수 있는지 분석을 해보고 그 분석한 결과를 통해서 어떠한 추정을 하고자 한다. 우선 PG64-22에서 보이는 ‘각 피막두께 별 전단응력 값의 차이’를 보면 피막두께 1000~800 $\mu\text{m}$ 와 800~600 $\mu\text{m}$ 까지 그 전단응력값의 차이가 4,389Pa에서 1,767Pa을 뺀 값인 2,622Pa만큼 증가했고, 800~600 $\mu\text{m}$ 로부터 600~400 $\mu\text{m}$ 까지 4,014Pa만큼 증가하다가, 600~400 $\mu\text{m}$ 로부터 400~200 $\mu\text{m}$ 까지 940Pa만 증가하는 경향을 보이고 있다. 이 경향에서 일반 가열 아스팔트로서 PG64-22는 한계두께로 가정된 400~200 $\mu\text{m}$ 사이에서부터 한계점 전단응력 값이 증가되는 폭이 줄어드는 특성을 가지고 있는 것을 추정할 수 있다.

중온 아스팔트 PG64-22+KW3는 PG64-22와 비교할 때 400 $\mu\text{m}$ 까지 비슷한 추세를 보이다가 400 $\mu\text{m}$ 을 넘기면서 약간 다른 경향을 보이고 있다. 1000~800 $\mu\text{m}$ 에서 800~600 $\mu\text{m}$ 까지 전단응력 값의 차이값은 3,541Pa에서 1,505Pa을 뺀 값인 2,036Pa의 증가폭을 보이고, 800~600 $\mu\text{m}$ 에서 600~400 $\mu\text{m}$ 까지 2,413Pa의 증가폭을 보이다가, 600~400 $\mu\text{m}$ 에서 400~200 $\mu\text{m}$ 까지 6,298Pa의 더 큰 폭의 증가를 보였다. 일반 아스팔트 PG64-22에서는 한계두께로 가정된 400~200 $\mu\text{m}$  사이에서 증가폭이 감소하는 경향을 보인 반면에, 중온 아스팔트 PG64-22+KW3는 그 한계두께에서 증가폭 또한 증가하는 경향을 보인 것이다. 이전에 설명을 했던 것처럼 PG64-22+KW3는 PG64-22 일반 아스팔트에 중온 첨가제인 KW3를 첨가시킨 중온 아스팔트이다. 그러므로 중온 아스팔트 PG64-22+KW3가 일반 아스팔트 PG64-22의 전단응력 값의 차이 경향과 다르게 보이는 것은 KW3의 영향에 의한 것임을 확인할 수 있다.

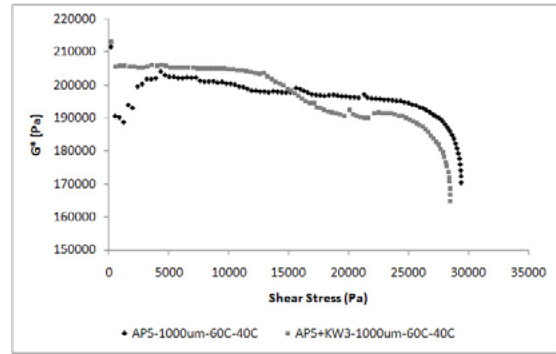
여기서 이전에 고찰한 선형점탄성  $G^*$ 와 관련해서 전단응력을 포함한 고찰을 다시 해서 정리해보고자 한다. 두 종류의 아스팔트의 피막 두께가 1000 $\mu\text{m}$ , 800 $\mu\text{m}$ ,



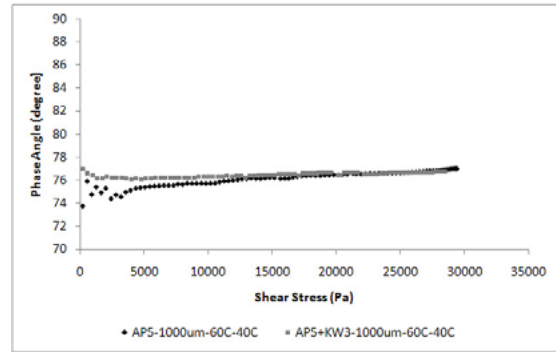
600 $\mu\text{m}$ , 400 $\mu\text{m}$ 까지 변할 때 PG64-22와 PG64-22+KW3의 선형점탄성  $G^*$ 는 전혀 다른 증가 경향을 보이는 반면, PG64-22와 PG64-22+KW3의 한계점 전단응력은 둘 다 비슷한 경향을 보인다. 그리고 400 $\mu\text{m}$  이하의 얇은 피막이 되면서부터 PG64-22와 PG64-22+KW3의 선형점탄성  $G^*$ 는 둘 다 값이 갑작스럽게 떨어지는 비슷한 경향을 보이고 있고 PG64-22와 PG64-22+KW3는 한계점 전단응력의 증가폭이 비슷하던 경향이 바뀌면서 PG64-22는 증가폭이 줄어드는 추세를 그리고 PG64-22+KW3는 증가폭이 늘어나는 추세를 보이고 있다. 이처럼 한계두께로 가정된 피막두께는 아스팔트 피막두께와 아스팔트 성질이 서로 상호 연관되면서 피막두께의 변화에 따라 아스팔트의 물성변화가 급격하게 보이는 하나의 한계점처럼 보인다.

측정한 값 중 대표가 되는 값을 가지고 재료 물성을 분석하는 것은 정량적인 방식으로 가장 이해하기 쉽고 명쾌한 방법이 될 수 있겠지만, 재료의 물성변화가 항상 일관적이고 명쾌하게 보이는 것은 아니기에 단지 한 점이나 일부분의 값으로 그 전체를 대표한다고 주장하기가 쉽지 않은 경우가 있다. 아스팔트의 물성 또한 그러한 변화가 다양한 성질을 가지고 있기에 지금까지 보인 선형점탄성  $G^*$ 나 85% 선형구간의 한계점인 선형점탄성  $G^*$ 에서의 전단응력을 보고 분석하는 것만으로 연구한 아스팔트의 물성변화를 알 수 있다고 할 수 없을 것이다. 그러므로 지금부터는 아스팔트의 선형구간으로부터 비선형 구간까지 전체적인 그래프를 보고 비교함으로써 정성적인 분석을 시도하고자 한다.

그림 5에서부터 그림 9에 보이는 그래프들은 일반 아스팔트 PG64-22와 중온 아스팔트 PG64-22+KW3의 각 피막두께별 전단응력 변화에 따른  $G^*$ 의 값 변화와 위상각 변화를 보여주고 있다. 우선 그림 5의 (a)와 (b)에서는 우리가 일반적으로 동적전단시험장비를 가지고 아스팔트를 시험할 때 적용하는 두께인 1000 $\mu\text{m}$ (즉 1mm)를 가지고 Strain Sweep 시험을 한 결과이다. 이 그래프를 보면 15000Pa의 전단응력값에서부터 PG64-22+KW3가 PG64-22보다  $G^*$ 값이 떨어지는 것이 나타난다. 이런 현상이 발생한 원인을 살피는 것은 상당히 힘들고, 또한 분석의 간단성을 피하기 위해, 피막두께 1000 $\mu\text{m}$ 의 그래프에서 선형구간과 비선형구간을 같이 가지고 있는 15000Pa 이후의 그래프 형태가 피막두께 1000 $\mu\text{m}$ 의 일반적인 경향이라고 간주하고 분석을 시작하겠다.



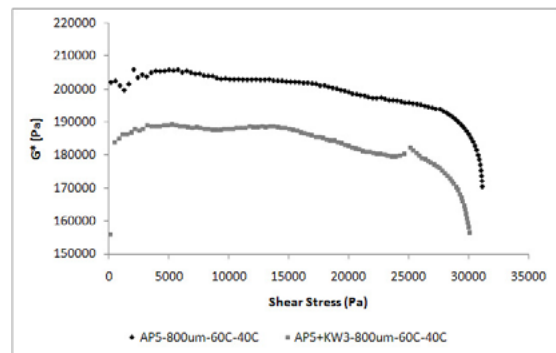
(a) 피막두께 1000 $\mu\text{m}$ 의  $G^*$ 값 변화



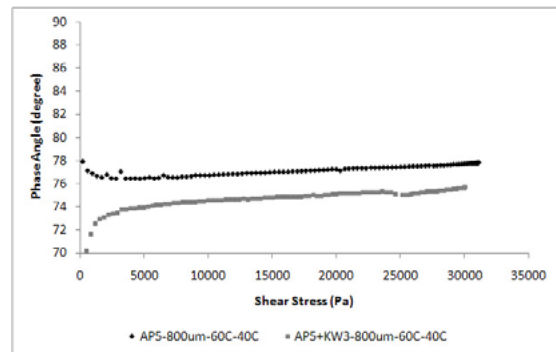
(b) 피막두께 1000 $\mu\text{m}$ 의 Phase Angle값 변화

\* 확실하게 구분하기 위한 범례표시: Ex) PG64-22-200 $\mu\text{m}$ -60C-40C, PG64-22+KW3-600 $\mu\text{m}$ -60C-40C, PG64-22 또는 PG64-22+KW3: 아스팔트 종류, 200 $\mu\text{m}$  또는 600 $\mu\text{m}$ : 아스팔트 피막두께, 앞의 온도 60C: 세팅 온도, 뒤의 온도 40C: 시험 온도

그림 5. 피막두께 1000 $\mu\text{m}$ 에서 Strain Sweep 시험 결과들

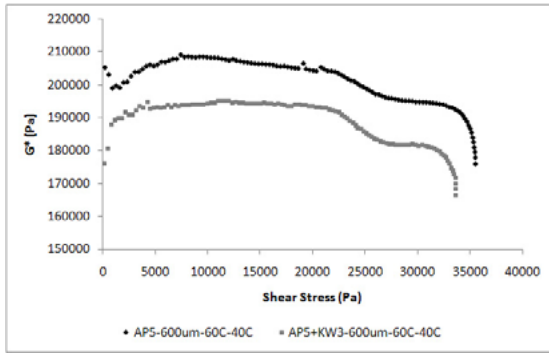


(a) 피막두께 800 $\mu\text{m}$ 의  $G^*$ 값 변화

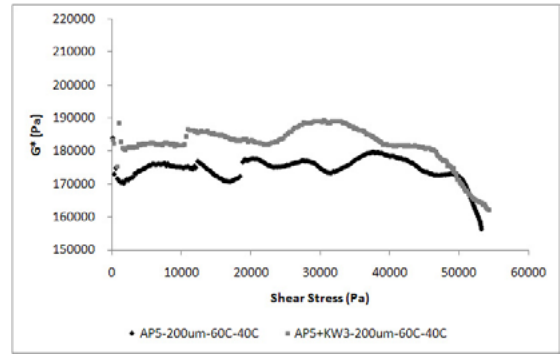


(b) 피막두께 800 $\mu\text{m}$ 의 Phase Angle값 변화

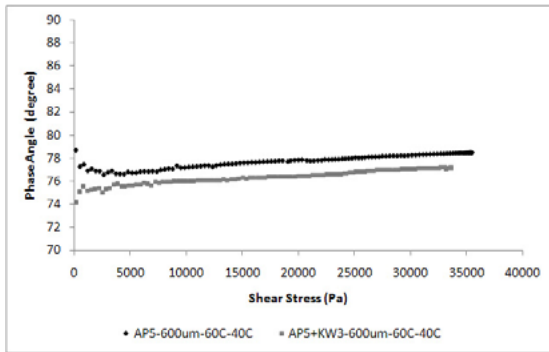
그림 6. 피막두께 800 $\mu\text{m}$ 에서 Strain Sweep 시험 결과들



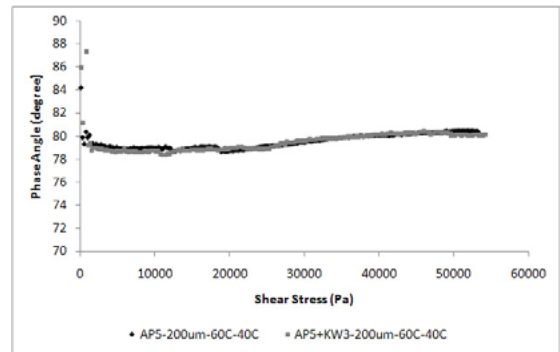
(a) 피막두께 600 $\mu\text{m}$ 의  $G^*$ 값 변화



(a) 피막두께 200 $\mu\text{m}$ 의  $G^*$ 값 변화



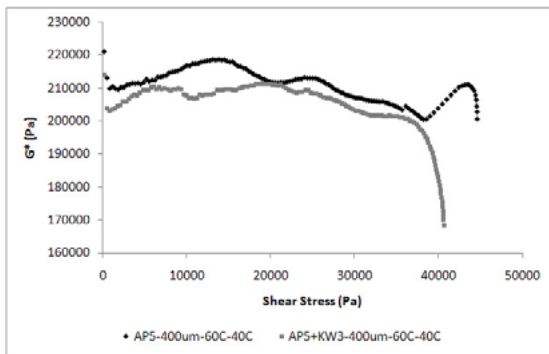
(b) 피막두께 600 $\mu\text{m}$ 의 Phase Angle값 변화



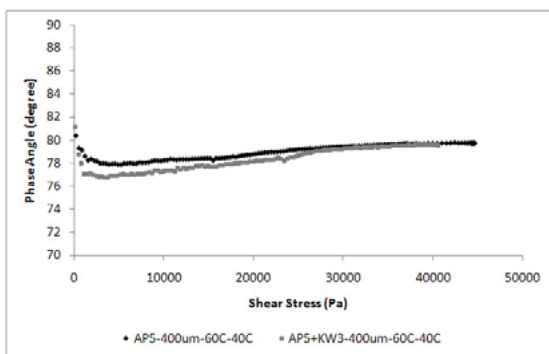
(b) 피막두께 200 $\mu\text{m}$ 의 Phase Angle값 변화

그림 7. 피막두께 600 $\mu\text{m}$ 에서 Strain Sweep 시험 결과들

그림 9. 피막두께 200 $\mu\text{m}$ 에서 Strain Sweep 시험 결과들



(a) 피막두께 400 $\mu\text{m}$ 의  $G^*$ 값 변화



(b) 피막두께 400 $\mu\text{m}$ 의 Phase Angle값 변화

그림 8. 피막두께 400 $\mu\text{m}$ 에서 Strain Sweep 시험 결과들

피막두께 1000 $\mu\text{m}$ 로부터 400 $\mu\text{m}$ 까지 그림 5, 그림 6, 그림 7, 그리고 그림 8까지 피막이 얇아지는 동안 PG64-22와 PG64-22+KW3의 전단응력이 증가함에 따라서 보여지는  $G^*$  값은 전체적으로 PG64-22가 PG64-22+KW3보다 좀 더 큰 값을 보이고 있고, 또한 PG64-22가 PG64-22+KW3보다 좀 더 넓은 전단응력 범위를 가지고 있는 것으로 보인다. 그러므로 1mm 같은 두꺼운 피막두께를 사용해서 아스팔트 시험을 하게 될 경우  $|G^*|/\sin\delta$  같은 기존의 기준으로는 PG64-22+KW3와 같은 중온 아스팔트의 성능이 떨어져 보이는 것으로 나타나게 된다. 그러나 그림 9와 같은 피막두께 200 $\mu\text{m}$ 의 값을 살펴보면, 오히려 중온 아스팔트 PG64-22+KW3가 일반 아스팔트 PG64-22의  $G^*$  값보다 좀 더 큰 값을 가지고 있고 전단응력범위 또한 거의 같던지 혹은 약간 더 넓은 범위를 보이고 있는 것으로 나타났다. 이처럼 실제 아스팔트 포장상태와 유사한 조건이 될 수 있는 얇은 피막두께에서는 두꺼운 피막두께와 전혀 다른 물성 결과가 나오기에 기존의 아스팔트 시험방법 대신에 이러한 피막두께를 고려한 새로운 방식의 시험법이 필요할 것이다.

그리고 또한 그래프의 변화 형태를 살펴보면 그림 5

부터 그림 6, 그리고 그림 7까지는 어느 정도 부드럽게  $G^*$ 의 그래프가 그려져서 물성의 변화 상태가 안정적인 느낌을 가지게 되지만 그림 8의 그래프는 왔다 갔다 하는 상당히 불안한 형태를 띠기 시작하면서 그림 9의 그래프에서는 더 불규칙하게 왔다 갔다 하는 형태를 보여 주고 있다. 이러한 불규칙한 움직임은 아스팔트 물질 자체만의 거동이 아닌 피막두께가 얇아지면서 생성되는 접촉면 사이의 마찰이 어느 정도 영향을 미치고 있다는 추정을 가능하게 한다. 그림 5부터 그림 9까지 그래프에서 보이는 피막두께별 위상각 값은 전단응력이 증가함에 따라 아주 약간 증가하는 경향만 보일 뿐 그다지 특별한 분석을 필요로 하는 현상 같은 것이 발견되지는 않았다.

#### 4. 결론

본 연구는 일반 가열 아스팔트보다 낮은 온도에서 생산하고 포설하며 다지는 아스팔트의 성능을 기존 가열 아스팔트 덩어리 물성을 평가하는 것에서 벗어나 새로운 형태의 성능평가 방법을 찾기 위한 노력의 결과이다. 이러한 결과들을 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

1. 아스팔트의 피막두께 변화에 따른 영향에서 85% 선형점탄성  $G^*$ 에서의 전단응력 값은 일반 가열 아스팔트 PG64-22 그리고 중온 아스팔트 PG64-22+KW3 사이에서 별 차이가 없다. 또한 선형점탄성  $G^*$ 와는 달리 85% 선형점탄성  $G^*$ 에서의 전단응력 값은 피막두께 변화에 따라 특성적이면서 안정적인 변화 추세를 보여준다.
2. 아스팔트의 피막두께에 따른 전단응력을 관찰한 결과 200 $\mu\text{m}$ 와 400 $\mu\text{m}$  피막두께 사이에 일반 가열 아스팔트 PG64-22와 중온 아스팔트 PG64-22+KW3의 물성이 변하는 한계 두께가 존재한다는 것을 알 수 있다.
3. 또한 정성적인 분석을 통해본 중온 아스팔트는 1,000 $\mu\text{m}$ 에서 400 $\mu\text{m}$ 까지의 두께에서는 가열 아스팔트의 보다 낮은  $G^*$ 값을 보이다가 400 $\mu\text{m}$ 에서 200 $\mu\text{m}$ 에 이를 때는 역전하는 현상을 보이고 있다. 이는 중온 아스팔트와 가열 아스팔트의 피막두께에 따른 물성변화가 다음을 확인할 수 있는 부분이다.
3. 그러므로 기존의 1mm 피막두께보다는 400 $\mu\text{m}$ 나 200 $\mu\text{m}$ 의 피막두께에서 아스팔트와 골재의 접촉면 사이의 물성을 측정하면 실제 포장체의 피막두께를 모사 하는 것뿐만 아니라 중온 아스팔트의 성능을 제

대로 평가할 수 있는 방법이 될 것이다.

5. 향후 연구과제로서 아스팔트의 피막두께뿐만 아니라 접착하는 골재의 종류와 골재표면 거칠기 및 수직력(normal force), 그리고 또한 온도변화에 따른 아스팔트와 골재사이 피막 물성의 변화를 추적하는 것이 필요하다.
6. 본 논문에서 수행한 실험은 제한된 시료를 사용하였으므로 상기의 시험 및 평가 프로토콜의 기준에는 일부 재료별로 제한이 있을 수 있다.

#### 참고 문헌

- 조동우, 황성도, 임광수(2009). "유럽의 저탄소 중온 아스팔트 포장(WMA)의 기술현황", *한국도로학회지*, 제11권 2호, pp.20-25
- Anderson, D. A., Button, J. et al.(1994). "Binder Characterization and Evaluation Volume 3: Physical Characterization." *Strategic Highway Research Program*, National Research Council, Washington, D.C.
- Bahia, H. U., Hanson, D. I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M. A. and Anderson, R. M. (2001). "Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design." *In: National Cooperative Highway Research Program NCHRP Report 459*. Transportation Research Board-National Research Council, National Academy Press, Washington DC
- Boldin, M. G., DongrÈ, R. and D' Angelo, J.(2001). "Proposed refinement to the superpave high temperature specification parameter for performance graded binders", *Transportation Research Record*, No. 1766, pp.40-46
- Campen, W.H., Smith, J.R., Erickson, L.G.and Mertz, L.R. (1959). "The relationship between voids, surface area, film thickness and stability in bituminous paving mixtures" *Proc Assoc Asph Pav Tech*, Vol 28, P 149, Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, Seattle
- Chabert, D, Triquigneaux, J-P, and Vaniscote, J-C (1999). "Rheology of elastomer binders and rutting resistance of bituminous mixes." *In: Proceedings of the Eurobitume workshop 99, European asphalt association*, The Netherlands, Paper No.028
- Cho, D.W., Bahia, H. U.(2007). "Effect of Aggregates' Surface and Water on Rheology of Asphalt Films." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No 1998, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.10-17
- Cho, D.W.(2008). "Study of Asphalt-Aggregate Bond in Simple Simulation Using the Dynamic Shear Rheometer" Ph.D Dissertation, University of Wisconsin, Madison, WI
- Philips, M.C., and Robertus, C.(1996). "Binder rheology and asphaltic pavement permanent deformation; the zero-shear

- viscosity." *In: Proceedings of the Euraspalt & Eurobitume Congress*, European Asphalt Association, The Netherlands
- Read, J. and Whiteoak, D.(2003). *The Shell Bitumen Handbook*, 5th edition, Shell Bitumen
- Rowe, G.M., D' Angelo, J., Sharrock, M.J.(2002). "Use of the zero shear viscosity as a parameter for the high temperature binder specification parameter." *3rd international symposium on binder rheology and pavement performance*, San Antonio, TX
- Shenoy, A., Discussion on the paper by Bouldin, M. G., DongrÈ R, D' Angelo, J. titled (2001) "Proposed refinement to the superpave high temperature specification parameter for performance graded binders." *Transportation Research Record*, No. 1766, pp.46-47
- Shenoy, A.(2001) "Refinement of the superpave specification parameter for performance grading of asphalt" *J. Transportation Eng* 127(5), pp357-362
- Stuart, K.D. and Mogawer. W.S.(1997). "Validation of asphalt binder and mixture tests that predict rutting susceptibility using FHWA accelerated loading facility." *J Assoc Asphalt Paving Technol* 66, pp.109-152

접 수 일 : 2011. 7. 5

심 사 일 : 2011. 7. 7

심사완료일 : 2011. 10. 17