



단기노화 된 아스팔트 바인더의 유변학적 거동 특성에 관한 연구

A Study on the Rheological Behavior Properties of Short-term Aged Asphalt Binder

박 태 순*

Park, Tae Soon

Abstract

The penetration and viscosity tests have been used for the evaluation of the aged asphalt binder performance change. The improved test method has been required because the conventional tests could not evaluate the viscoelastic characteristics and the real behaviour of the aged asphalt binder. The conventional test methods using a different short term aged asphalt binder were tested and the test results were expressed as the penetration index and the residual penetration. The oscillatory and rotational mode tests were performed to find out the rheological characteristics of the short term aged asphalt binder in this study. The test results showed that the change of testing frequency, the speed of the vehicle effects the complex modules and phase angles. The creep compliance and shear viscosity also showed the different test results when the short term aged asphalt binders were tested. The rheological behavior should consider when the pavement design is conducted.

Keywords : aged asphalt binder, rheological properties, phase angle, creep compliance, shear viscosity

요 지

바인더의 노화로 인한 성능변화는 침입도 또는 점도시험을 실시하여 판정하여왔다. 기존의 시험방법으로 아스팔트 바인더의 점탄성 특성과 실제거동을 평가할 수 없기 때문에 새로운 분석방법이 요구되어 왔다. 본 연구에서는 기존시험 방법을 사용하여 침입도지수와 잔류침입도를 판정하였고, 양방향 반복회전 모드와 일방향 반복회전 모드 시험을 실시하여 단기 노화된 아스팔트 바인더의 유변학적 특성을 분석하였다. 시험결과 단기 노화된 아스팔트 바인더는 시험주기(frequency) 즉, 차량속도의 변화에 따라 서로 다른 복합계수와 위상각을 나타냈으며 단기 노화 전후의 크리프 컴플라이언스 및 전단점도 시험결과에도 영향을 미치는 것으로 나타나서 포장 설계시 이러한 특성이 고려되어야 한다.

핵심용어 : 단기 노화, 유변학 특성, 침입도, 점탄성, 위상각, 크리프 컴플라이언스, 전단점도

* 정희원 · 서울산업대학교 토목공학과 교수



1. 서론

바인더의 노화로 인한 성능의 변화 추정은 침입도 또는 점도시험을 실시하여 물리적인 결과를 비교하여 노화정도를 판정하여 왔기 때문에 그 결과 노화가 아스팔트 바인더의 점탄성특성과 실제 포장 성능에 어떻게 영향을 미치는지 알 수가 없었다. 아스팔트 바인더는 다양한 원유로부터 생산되고 서로 다른 정제과정을 거치기 때문에 노화전의 특성은 물론 노화 후의 특성도 서로 다르게 나타나게 된다. 아스팔트 바인더의 노화는 제조시에 발생하는 단기 노화와 공용 중에 발생하는 장기 노화로 구별된다. 이러한 노화 특성을 고려하여 미국의 일부 주정부 도로국, 유럽의 국가에서는 단기 노화된 아스팔트 바인더를 사용하여 바인더의 특성과 등급을 정하도록 규정하고 있다. 이러한 규정은 아스팔트 포장의 실제 거동은 플랜트에서 생산된 단기 노화된 바인더의 특성에 의해 결정되기 때문이다. 포장설계에 앞서 포장에 사용되는 아스팔트 바인더에 대한 검토는 생산과정을 고려해 볼 때 합리적인 방법이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 기존 시험방법을 사용하여 단기 노화된 9종의 아스팔트 바인더의 침입도지수, 잔류침입도를 비교 분석하였으며 정적 및 동적 하중 재하 상태와 온도와 시간의 모든 범위에서 주어진 아스팔트 바인더의 유변학적 특성시험을 실시하여 단기 노화 전후의 아스팔트 바인더의 점탄성거동을 비교 분석하고 주기변화에 따라 복합계수, 위상각, 크리프 컴플라이언스(Creep compliance) 및 전단점도의 변화에 대하여 비교 분석 하였다.

2. 재료 및 유변학 시험방법

2.1 시험재료 및 시험방법

본 연구에서는 국내에서 생산되고 있는 대표적인 9종류의 아스팔트 바인더를 수집하였다. 6종은 일반

스트레이트 아스팔트 바인더이며 3종은 온도 변화에 대한 민감성 저감과 내구성 증대를 위하여 원유 아스팔트에 고무계통의 열가소성 탄성중합체인 SBS (styrene-butadiene-styrene block co-polymer)가 첨가된 개질 아스팔트 바인더이다. 표 1은 유변학 특성시험을 수행하기 전에 9종류의 아스팔트 바인더에 대한 성능등급과 구분을 위하여 코드로서 표시한 것이다.

표 1. 시험에 사용한 아스팔트 바인더의 코드와 공용성 등급

	Code	성능등급(PG)
1	AB-1(AP3)	PG 64-22
2	AB-1'(AP5)	PG 64-22
3	AC-1	PG 70-22
4	AD-1	PG 76-22
5	AG-1	PG 82-22
6	AA-2	PG 58-22
7	AB-2	PG 64-22
8	AA-3	PG 58-22
9	AF-3	PG 64-16

시험 장비는 독일 피시카(Physica)사 동적 전단 유동시험기(Dynamic Shear Rheometer, DSR)를 사용하였다(그림 1 참조). 본 연구에서 사용된 동적 전단 유동시험기는 응용화학분야의 고분자연구에서 고무, 플라스틱, 페인트와 같은 점탄성재료의 유변학적 특성을 분석하기 위하여 사용되고 있는 장비를 사용하였다.

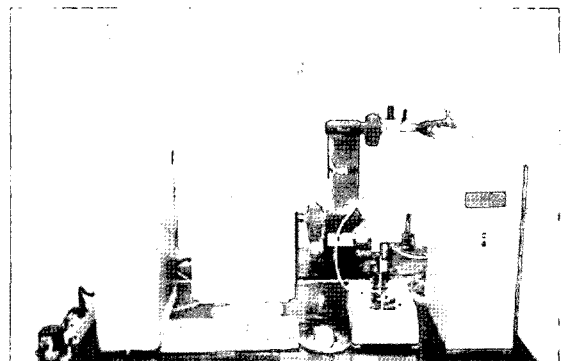


그림 1. 동적 전단 유동시험기(DSR)

여러 학자들이 점탄성 재료에 대한 유변학적 시험 방법에 대하여 논하여 왔다. 이 중에서 아스팔트 바인더를 측정하는 가장 대표적인 방법으로 Bahia와 Anderson (1995)이 신도로 연구계획(Strategic Highway Research Project, SHRP)을 수행하면서 사용한 방법의 일부가 현재 수퍼패이브 바인더 시험으로 제정되어 있다. 이들의 연구에 의하면 점탄성 특성을 결정하기 위한 여러 시험방법이 있지만 양방향 반복회전 모드(oscillatory mode)가 점탄성 재료의 특수한 거동을 측정할 수 있는 최적의 방법으로 추천되었다. 본 연구에서는 아스팔트 바인더의 유변학적 특성시험을 양방향 반복회전 모드 이외에 일방향 회전 모드(rotational mode)도 함께 실시하여 다양한 환경 및 조건하에서 아스팔트 바인더의 유변학적 특성을 분석하였다. 그림 2는 동적 전단 유동시험기의 두 가지 시험 모드를 나타낸 것이다.

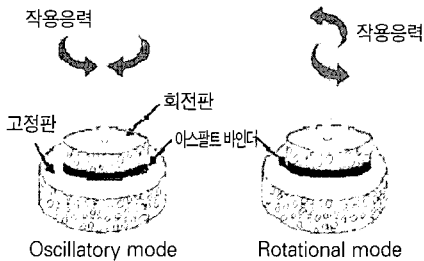


그림 2. 유변학적 시험 모드(mode)

일방향 회전 모드는 일정한 전단응력을 시료에 가하면서 시간의 경과에 따라 변화하는 크리프 컴플라이언스와 전단점도를 각 온도에서 측정하는 것이며, 양방향 반복회전 모드는 전단응력 또는 변형을 일정하게 유지시킨 상태에서 주기를 변화시키면서 복합계수, 저장계수, 손실계수 및 위상각을 시험결과로 도출하는 것이다. 그림 3은 본 연구에서 원 아스팔트 바인더(Original Binder, OB)와 단기노화 시킨 아스팔트 바인더(Aged Binder, AB)를 동적 전단 유동시험기를 사용하여 유변학적 특성시험을 통해 산출하려는 유변학 변수에 대한 흐름도를 나타낸 것으로 일방향 회전 모드와 양방향 반복회전 모드로 나누

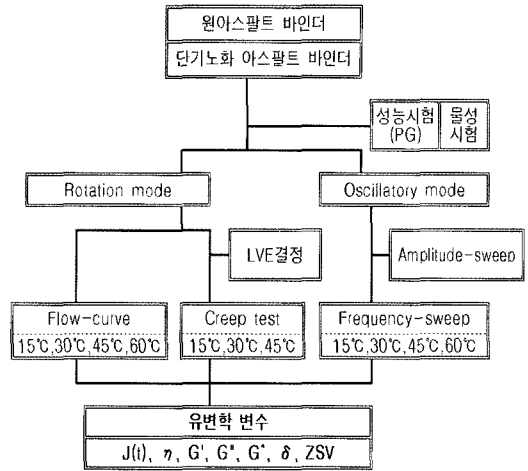


그림 3. 유변학 특성시험 흐름도

어 시험을 수행하였다.

2.2 유변학 특성 시험방법

2.2.1 양방향 반복회전모드

(1) Amplitude-sweep 시험

Frequency-sweep 시험을 수행하기 전 각각의 시험 온도에서 전단 변형(shear strain)을 변화시키면서 아스팔트 바인더의 선형점탄성 영역을 구하기 위한 Amplitude-sweep 시험을 실시하였다. 그림 4는 Amplitude-sweep 시험의 선형점탄성 영역을 결정하는 방법을 보여 주고 있다. 아스팔트 바인더의 시료에 따라 차이가 발생하지만 본 연구에서는 ASTM에서 정한 복합전단계수의 95%부근에서 선형점탄성 영역을 선정하였다.

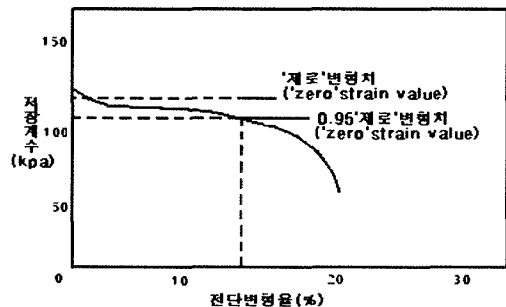


그림 4. Amplitude-sweep 시험의 선형점탄성 영역의 선정



(2) Frequency-sweep 시험

Frequency-sweep 시험은 Amplitude-sweep 시험에서 결정된 선형점탄성 영역 내에서 주파수를 변화시키면서 아스팔트 바인더의 복합계수(complex modulus, G^*), 저장계수(storage modulus, G'), 손실계수(loss modulus, G'') 및 위상각 (δ)을 도출하는 시험으로 본 연구에서는 주파수를 0.1 Hz에서 20 Hz로 변화시키면서 시험을 실시하여 복합계수, 저장계수, 손실계수 및 위상각을 구하였다. Amplitude-sweep 시험에서 구한 전단변형을 Frequency-sweep 시험에 적용시켜 (식 1)과 같이 주파수 F_r 또는 각 주파수 ω 를 가진 sinusoidal 비틀림과 sinusoidal 힘 $F(t)$ 를 시험에 가한다.

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) = 2\pi F_r \quad (\text{식 1})$$

2.2.2 일방향 회전 모드

(1) 크리프 시험(Creep test)

크리프 시험은 시료에 일정한 하중을 가하면서 시간의 변화에 따라 나타나는 크리프 컴플라이언스를 시험결과로 구한다. 크리프 시험에서는 우선 각각의 시험온도에 대하여 하중을 변화시키면서 그 아스팔트 바인더가 가지고 있는 선형점탄성 영역을 구해야 한다. 이렇게 구해진 하중을 사용하여 다음 단계인 크리프 시험을 실시하는데, 본 연구에서는 온도를 15°C, 30°C, 45°C, 60°C로 변화시키면서 수행하였다. 하지만 시험온도 60°C에서는 온도가 높아서 아스팔트 바인더의 탄성특성이 작아져 시험결과 신뢰성이 낮고 오차를 발생시키기 때문에 60°C를 제외한 나머지 온도에서 시험을 실시하였다. 그림 5는 선형점탄성 영역의 하중조건을 보여주고 있다. 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 하중조건에 의해서 크리프 컴플라이언스는 일정하게 수렴하다가 어느 순간 그래프가 전과는 다른 값 차이를 보인다. 이러한 관계로부터 선형점탄성 영역을 찾아낸 후 시험을 실시하였다.

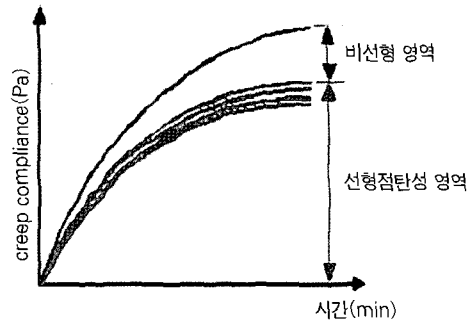


그림 5. 점탄성 영역의 하중조건

또한 크리프 시험 후 시간-온도 중첩원리를 적용하여 저온에서 고온까지의 넓은 범위의 마스터커브(Master curve)로부터 실제로 환경적인 요소들을 결부시킨 하중조건을 재현하였다.

(2) 흐름 시험

흐름 시험(Flow curve test)은 아스팔트의 전단 점도를 측정하기 위해 사용되는 시험법이다. 일반적으로 점도시험에 사용되어 왔던 시험장치는 gravity-flow viscometer와 vacuum-capillary viscometer이다. Gravity-flow viscometer (ASTM D 2170)는 135°C 이상의 온도에서 실시되며, vacuum-capillary viscometer (ASTM D 2171)는 60°C 와 135°C 사이에서 수행된다. 60°C 보다 낮은 온도에서 시험할 경우에는 cone-plate viscometer (ASTM D 3205)을 사용한다. 전형적인 점도시험의 한계는 각각의 시험에서 단지 한 온도에 대한 점도값을 찾는다는 것이며 전단변형률값을 알 수 없다는 것이다. 그러므로 이러한 점도시험 방법으로는 아스팔트 바인더의 온도에 따라 전단변형률에 따른 점도 값을 적절하게 묘사할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 하중이 장시간에 재하되면 아스팔트 바인더는 점성유체로 거동하기 때문에 이를 모사할 수 있는 흐름 시험을 실시하였다.



3. 시험결과 및 고찰

3.1 물성시험 결과

표 2는 각 시료에 대한 성능등급 및 물리적 시험결과를 정리한 것이다.

침입도 지수는 온도 민감성을 나타내었는데 침입도 지수는 25℃에서의 침입도와 아스팔트 바인더의 연화점에서의 침입도는 800이라는 가정으로부터 결정된다. 침입도 지수는 산화되지 않은 원아스팔트와 밀접한 관계를 가지고 있으며 개질 아스팔트에도 사용될 수도 있으나 그 결과는 매우 다르게 나타날 수도 있다. 일반적으로 포장용 아스팔트 바인더의 경우 침입도 평균지수는 +1~-1 사이의 값을 나타내는 것으로 알려져 있다. 표 2에서 볼 수 있는 것처럼 개질 아스팔트 바인더는 평균지수를 훨씬 넘는 것으로 나타나 침입도 지수의 기본가정이 개질 아스팔트 바인더에서는 적용되지 않음을 알 수 있다.

3.2 잔류 침입도비

원 아스팔트와 RTFO에 의해 단기 노화된 9개의 아스팔트 바인더에 대한 침입도를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 볼 수 있는 것처럼 잔류 침입도는 개질 아스팔트 바인더보다 일반 아스팔트 바인더가 더 큰 차이를 보였다. 일반 아스팔트 바인더는 단기

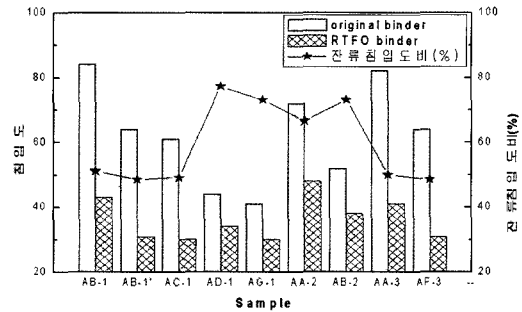


그림 6. 잔류 침입도비

노화 후에 50%를 넘는 침입도 감소를 보였지만 개질 아스팔트 바인더는 70%이상의 잔류 침입도비를 나타냈다.

3.3 유변학 시험결과

3.3.1 양방향 반복회전 모드

(1) Amplitude-sweep 시험

Amplitude-sweep 시험으로부터 9개 시료에 대한 단기 노화 후의 선형점탄성 영역을 결정하였다. 표 3은 각 시료에 대한 선형점탄성 영역을 원 아스팔트와 단기 노화된 아스팔트 바인더를 비교한 것이다. 표 3에서 볼 수 있는 것처럼 단기 노화를 거친 아스팔트 바인더는 원 아스팔트보다 높은 선형점탄성 영역을 나타내고 있다. 이는 적절한 개질과 단기노화는 아스팔트 바인더를 더욱 탄성적으로 거동하게 한다는 사실을 보여주는 결과이다.

표 2. 물리적 시험과 PG시험 결과

	Code	성능등급	침입도	침입도 지수 (PI)	연화점 (R&B)	인화점 (℃)
1	AB-1(AP3)	PG 64-22	84	-0.98	46	298
2	AB-1' (AP5)	PG 64-22	64	-0.88	52	309
3	AC-1	PG 70-22	61	0.91	57	318
4	AD-1	PG 76-22	44	3.78	79	328
5	AG-1	PG 82-22	41	4.44	85	326
6	AA-2	PG 58-22	72	-1.12	47	346
7	AB-2	PG 64-22	52	-1.34	49	332
8	AA-3	PG 58-22	82	-0.92	47	289
9	AF-3	PG 64-16	64	-1.2	48	303



표 3. 각 시료의 선형점탄성 영역

	Code	아스팔트공용성 등 급	변형률(strain) (%)	
			원아스팔트 바인더	단기 노화 후 아스팔트 바인더
1	AB-1(AP3)	PG 64-22	8	15
2	AB-1'(AP5)	PG 64-22	8	15
3	AC-1	PG 70-22	10	20
4	AD-1	PG 76-22	10	20
5	AG-1	PG 82-22	10	20
6	AA-2	PG 58-22	7	12
7	AB-2	PG 64-22	8	12
8	AA-3	PG 58-22	7	12
9	AF-3	PG 64-16	7	12

(2) Frequency-sweep 시험결과

본 연구에서는 단기 노화시킨 아스팔트 바인더의 Frequency-sweep 시험을 실시하여 8Hz에 해당하는 복합계수(G^*), 저장계수(G'), 손실계수(G'') 및

위상각(δ)을 구하였다. 8Hz는 하중시간 0.02초에 해당하고, 포장설계시의 차량속도 48km/hr~64km/hr의 범위에 해당한다(Shell, 1978). Frequency-sweep 시험을 통해서 8Hz뿐만 아니라 원하는 차량속도에서의 아스팔트 바인더의 여러 변수를 산출할 수 있다. 그림 7은 8Hz, 15°C에서의 단기 노화 전후의 아스팔트 바인더의 복합계수와 위상각을 비교한 그래프이다.

그림 7에서 보이고 있는 것처럼 노화 후의 복합계수가 노화전보다 전반적으로 크게 나타났으며 위상각은 반대 결과를 나타내었다. 개질 아스팔트에 비해 일반 아스팔트가 노화후의 거동특성의 변화가 더 크게 나타났다. 또한 같은 성능등급(Performance Grade:PG)을 가진 아스팔트 바인더라 하더라도 복합계수(G^*)와 노화의 정도는 서로 다른 값을 보이고 있는 것으로 시험결과 나타났다. 이러한 결과로 아스팔트 바인더의 유종, 성분 및 채취 조건 등에 기인한

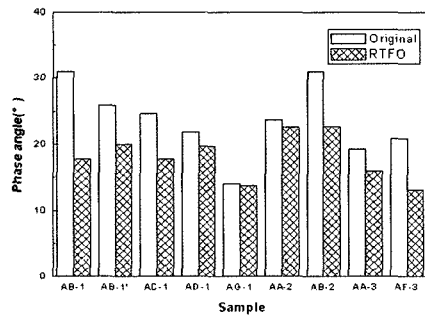
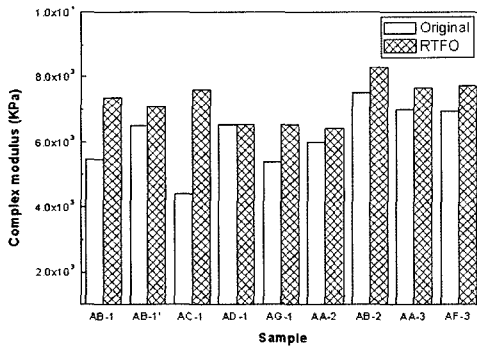


그림 7. 노화 전후의 아스팔트 바인더의 비교

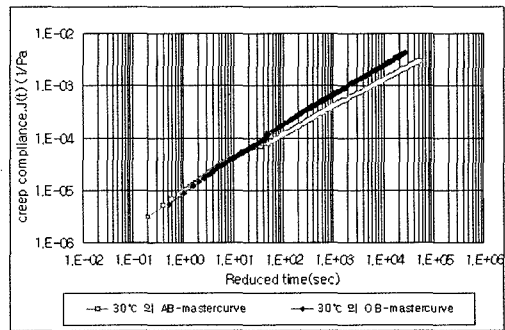
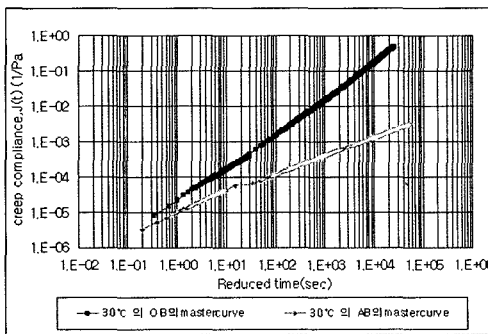


그림 8. AB-1(PG 64-22)의 노화전후의 크리프 컴플라이언스 비교

그림 9. AG-1(PG 82-22)의 노화전후의 크리프 컴플라이언스 비교



것으로 보다 더 상세한 원인분석을 위해서는 아스팔트 바인더의 성분분석 및 화학시험 등이 요구된다.

3.3.2 일방향 회전 모드 시험

(1) 크리프 컴플라이언스

시간 경과에 따른 아스팔트 바인더의 점탄성 특성을 나타내는 크리프 시험결과를 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 그림 8과 그림 9는 샘플 AB-1과 AG-1의 마스터커브를 기준온도를 달리하여 나타낸 것이다. 샘플 AG-1은 PG 82-22이며 샘플 AB-1은 PG 64-22의 성능등급을 나타내는 아스팔트 바인더이다.

일반 아스팔트인 AB-1은 노화전후 시간의 변화에 따라 크리프 컴플라이언스의 차이가 크게 나타나고 있어서 크리프 컴플라이언스를 설계변수로 사용할 경우 바인더의 노화를 반드시 고려해야 한다. 한편

개질 아스팔트인 AG-1은 일반 아스팔트 바인더에 비하여 노화전후의 변화가 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다.

(2) 전단점도

그림 10과 그림 11은 30℃의 샘플 AB-1과 샘플 AG-1의 흐름 시험, 그림 12와 그림 13은 60℃에서의 흐름 시험을 나타낸 결과이다.

일반 아스팔트 바인더의 경우 30℃에서는 노화전후의 전단점도차가 크게 나타나고 있다. 반면 개질 아스팔트 바인더의 경우는 크게 점도차가 발생하지 않고 있다. 이러한 개질 아스팔트의 현상은 60℃에서도 동일하게 유지하고 있다. 노화 바인더의 경우, 온도변화에 의한 전단점도 차는 일반 아스팔트에서는 약 100배 정도의 차를 보이고 있으나 개질 아스팔트의 경우 약 10배 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다.

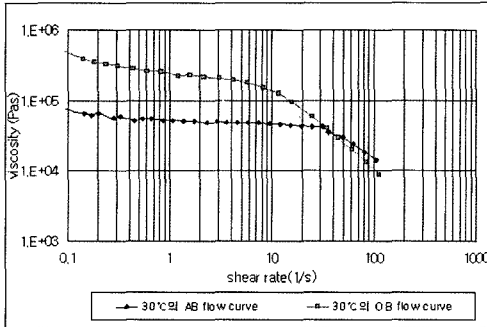


그림 10. 샘플 AB-1의 흐름 시험결과

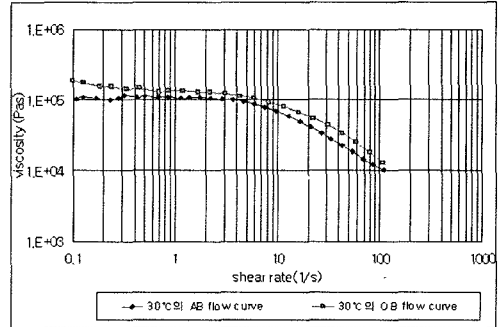


그림 11. 샘플 AG-1의 흐름 시험결과

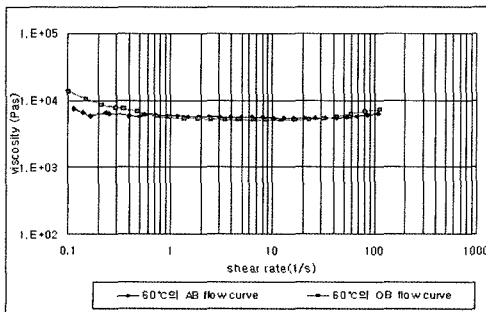


그림 12. 샘플 AB-1의 흐름 시험결과

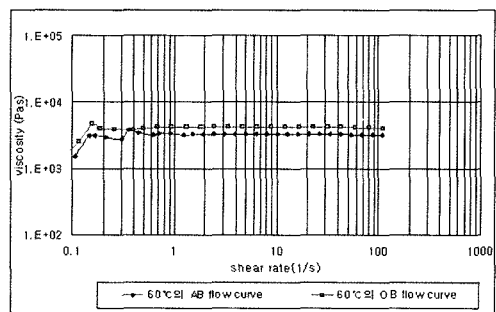


그림 13. 샘플 AG-1의 흐름 시험결과



4. 결론

본 연구에서는 원 아스팔트 바인더와 단기 노화시킨 9조의 아스팔트 바인더에 대하여 일방향 회전 모드와 양방향 반복회전 모드로 유변학 특성시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 단기 노화된 아스팔트 바인더의 선형점탄성 영역은 노화전과 비하여 높은 값을 나타냈으며 개질 아스팔트 바인더는 일반 아스팔트 바인더에 비교하여 그 범위가 더욱 크게 나타나서 적절한 단기노화와 개질은 탄성거동에 도움을 준다는 사실을 보여주었다.
- (2) 8Hz(차량속도 48km/시간~64km/시간)에서 실시한 frequency-sweep 시험으로부터 나타난 결과는 단기 노화후의 복합계수가 노화전보다 크게 나타났으며 동일한 성능등급의 아스팔트 바인더라 하더라도 복합계수가 다르게 나타나서 아스팔트 바인더의 유종 및 성분 분석 또는 화학조성비의 구분이 요청된다.
- (3) 크리프 컴플라이언스의 경우 일반 아스팔트는 단기노화후 그 차이가 크게 발생하고 있어서 설계변수로서 사용할 경우 단기노화의 영향을 고려해야 한다. 한편, 개질아스팔트 바인더의 경우는 이러한 현상이 발생하지 않았다.
- (4) 온도변화에 따른 전단점도는 낮은 온도에서는 일반 아스팔트가 단기 노화 후에 크게 영향을 받고 있으며 고온에서는 일반 및 개질 아스팔트 모두 영향을 나타내지 않았다.

참고문헌

1. 장갑식, 김태훈, 송기원, 박영훈, "폴리에틸렌옥사이드 수용액의 유변학적 특성 평가(V)-크리프 및 크리프 회복거동-", 한국섬유공학회지 제39권 제 6호, pp.660~670, 2002
2. 박태순, 고석범, 윤수진, "하중주기 시험을 이용한 아스팔트 바인더의 유변학적 특성연구", 한국도로학회

- 2003 학술발표회 논문집, pp103~108, 2003
3. 박태순, 윤수진, "말뚝 부마찰력 저감용 역청재료의 유변학적 특성", 한국지반공학회지 Vol.19 No.4, pp191~200, 2003
4. 윤수진, "시간 및 하중효과를 고려한 아스팔트 바인더의 유변학적 특성에 관한 연구", 서울산업대학교 대학원 석사논문, 2003. 8
5. Asphalt Institute Superpave Series No.1 (1995), "Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing", Asphalt Institute Executive Offices and Research Center, U.S.A, pp.12.
6. Bahia, H. U., Anderson, D. A. (1995), "Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties", *Transportation Research Record* No. 1488, pp.32~39.
7. Goodrich, O.L. "Aphaltic Binder Rheology, Asphalt Concrete Rheology And Asphalt Concrete Mix Properties", *Asphalt Paving Technology vol 60*, pp.80~82, 1991,
8. John J. A., William J. M. (1983), "Instruction to Polymer viscoelasticity", John Wiley&Sons, Inc., New York , pp.44.
9. Pfeiffer, J.P. "Properties of Asphaltic Bitumen", Ed., Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 1950
10. Poel, V.D. "A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data", *Journal of Applied Chemistry*, May, 1954
11. When S.H., "The Rheology Properties of Asphalt Binders Modified SBS and EVA", *Second International Conference on Road & Airfield Pavement Technology*, pp.464~465

(접수 : 2005. 11. 22)