

# 하중주기시험을 이용한 원아스팔트 바인더의 유변학적 특성연구

## Rheological Characteristics of Original Asphalt Binder using Frequency-sweep Test

박태순\* · 김찬우\*\* · 이수희\*\*\*

Park, Tae Soon · Kim, Chan Woo · Lee, Su Hui

### 1. 서 론

아스팔트 바인더는 점탄성체로서 하중재하시간과 온도에 매우 민감한 재료이다. 따라서 아스팔트 바인더를 사용하여 제조된 복합재료의 역학적 특성은 온도 및 하중주기(load frequency)에 크게 영향을 받는다. 그러므로 실제적인 아스팔트 바인더의 역학적 특성은 포장체에 작용하는 하중재하시간과 온도를 고려한 조건들로부터 결정되어야 한다. 유변학 특성시험은 아스팔트 바인더의 이러한 재료특성을 시험할 수 있는 매우 편리한 시험방법이다. 유변학 특성시험으로부터 측정할 수 있는 유변학적 계수는 복합전단계수( $G^*$ ), 저장계수(Storage modulus,  $G'$ ), 손실계수(Loss modulus,  $G''$ ) 및 위상각 ( $\delta$ ) 등이 있다. 이들 유변학 계수는 아스팔트 바인더의 점탄성 특성 중 현재까지 발표된 이론 중에서 아스팔트 포장 두께를 결정하는데 직접적인 관계는 없으나 혼합물 배합 설계 전에 실내시험 또는 현장시험을 바탕으로 한 경험적인 관계식을 유도하거나 대상 지역과 교통특성을 고려하여 일정한 조건하에서의 혼합물의 성능을 예측 할 수 있는 간접적인 자료로서 이용될 수 있기 때문에 매우 중요하다.

본 연구에서는 국내에서 사용하고 있는 9종의 아스팔트 바인더에 대해 현행 물리적 시험을 실시하여 바인더별 침입도지수(PI)의 적용성을 검토하였으며 국내 포장체에 작용하는 하중재하시간을 고려한 바인더의 유변학적 특성을 분석하고자 Amplitude-sweep 시험과 Frequency-sweep 시험을 실시하였다. 국내의 교통 조건을 고려하여 포장체에 작용하는 하중시간을 0.01초, 0.02초 및 0.04초로 구분하여 주파수를 4Hz, 8Hz 및 16Hz로 환산한 복합계수, 저장계수, 손실계수 및 위상각을 산출하였다. 이는 shell(1978)에서 8Hz의 경우는 차량 속도 45km/hr ~ 68km/hr에 해당하는 것으로 보고한 것에 착안하여 국내의 차량에 대한 차량 속도를 적용한 아스팔트 바인더의 유변학적 특성을 분석하였다.

### 2. 시험재료 및 방법

#### 2.1 시험재료 및 준비

본 연구에서는 아스팔트 바인더의 물리적 시험과 유변학적 특성시험을 위해 국내의 대표적인 9종류의 아스팔트 바인더를 수집하여 사용하였다. 표 1은 시험에 사용된 9종류의 아스팔트 바인더에 대한 성능등급과 향후 구분을 위하여 코드로 표시하여 나타낸 것이다.

\* 정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 02-970-6506(E-mail:tpark@snut.ac.kr)

\*\* 정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 석사과정 · 02-970-6946(E-mail:brown77@empal.com)

\*\*\* 정회원 · 서울산업대학교 토목공학과 석사과정 · 02-970-6946(E-mail:puresuhui@empal.com)

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

## 2.2 시험 장비

본 연구에서는 아스팔트 바인더의 유변학적 특성시험을 위하여 독일 Physica사의 동적 전단 유동시험기 (Dynamic Shear Rheometer, DSR)를 사용하였다. 이 장비는 수퍼페이브 제1단계 바인더의 고온특성을 측정하는 시험장비로 사용되고 있다. 본 시험에서 사용된 동적 전단 유동시험기 (Dynamic Shear Rheometer, DSR)는 응용화학분야의 고분자연구에서 고무, 플라스틱, 페인트와 같은 점탄성재료의 유변학적 특성을 분석하기 위하여 활용되고 있는 장비로 이 장비를 사용하여 시험을 실시하였다.

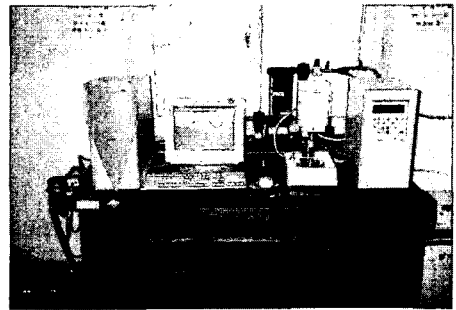


사진 1. 동적 전단 레오메타

## 2.3 시험방법

### 2.3.1 물리적 시험 방법

수집한 9종에 대한 물리적 특성시험을 위해서 침입도 시험, 연화점 시험, 인화점 시험을 실시하였으며 침입도와 연화점으로부터 침입도지수(Penetration Index, P.I)를 구하였다. 침입도 시험은 ASTM D 5(KS M 2252)에 규정을, 연화점시험은 ASTM D 36(KS M 2250)에 따라 링과 불(R&B)방법으로 측정하였으며 인화점 시험은 클리블랜드 오픈컵(Cleveland Open Cup(ASTM D 92, KS M 2010))규정에 따라 수행하였다.

### 2.3.2 유변학 특성시험 방법

Bahia와 Anderson (1995)의 연구에 의하면 아스팔트의 점탄성 특성을 결정하기 위한 여러 시험 방법이 있지만 양방향 반복회전 모드(oscillatory mode)가 점탄성 재료의 특수한 거동을 측정할 수 있는 최적의 방법으로 추천하였다. 표 2는 일반 레오메타(rheometer)로 측정할 수 있는 아스팔트 바인더의 유변학 측정시험법들을 양방향 반복회전 모드(oscillatory mode)외에 일방향 회전모드(rotational mode)로 나누어 나타낸 것이고 그림 1은 동적 전단 유동시험기의 두 가지 시험모드를 나타낸 것이다.



표 2. 유변학 특성시험법

Test	Mode	Input	Information
크리프 시험 (creep test)	일방향회전모드 (rotational mode)	전단 응력 일정	변형/강성도 계수
흐름 시험 (flow curve)	일방향 회전모드 (rotational mode)	전단 응력 일정	점도/항복응력
진폭 시험 (amplitude sweep)	양방향 반복회전모드 (oscillatory mode)	여러 온도에서 전단 응력 증가.	선형 점탄성 영역 (LVE 선정)
주파수 시험 (frequency sweep)	양방향 반복회전모드 (oscillatory mode)	여러 온도에서 frequency를 증가	점탄성특성 계수산출
시간변화 시험 (time-test)	일방향/양방향 반복회전모드	frequency와 전단 응력 일정	시간과 온도의 함수로써의 특성파악
온도변화 시험 (temp-test)			

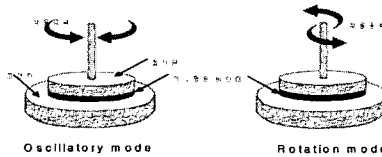


그림 1. 동적전단유동시험기의 시험 모드

양방향 반복회전모드는 전단응력 또는 변형을 일정하게 유지시킨 상태에서 주기를 변화시키면서 복합계수, 저장계수, 손실계수 및 위상각을 시험 결과로 도출하는 방식이다. 본 연구에서는 국내의 교통 조건을 고려하여 포장체에 작용하는 하중시간을 0.01초, 0.02초 및 0.04초로 구분하여 주파수를 4Hz, 8Hz 및 16Hz로 환산한 복합계수, 저장계수, 손실계수 및 위상각을 15℃, 30℃, 45℃ 및 60℃에서 시험하였다. Shell(1976) 연구소의 연구 결과에 의하면 8Hz의 경우는 차량 속도 45km/hr ~ 68km/hr에 해당하는 것으로 보고하고 있다. 표 3은 Frequency-sweep 시험과 Amplitude-sweep 시험에 사용된 시험 조건이다.

표 3. Frequency-sweep 과 Amplitude-sweep 시험조건

mode	control parameter	Unit	Gradient	Start value	End value
Amplitude sweep -Low frequency	전단변형	%	Ramp log	0.1	200
	주기	Hz	일정	10	
Amplitude sweep -high frequency	전단변형	%	Ramp log	0.1	200
	주기	Hz	일정	100	
frequency sweep	주기	Hz	일정	Amplitude sweep 시험으로 구한 선형점탄성 영역의 strain	
	주기	Hz	Ramp log	20	0.01



### 3. 시험결과 및 분석

#### 3.1 물리적 시험 및 공용성 등급 시험결과

표 2는 국내 9종의 시료에 대해 공용성등급 및 물리적 시험 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 물리적 시험 결과 중 침입도지수(PI)는 온도 감온성을 평가하기 위한 지수이며, 25℃에서의 침입도와 아스팔트 바인더의 연화점에서의 침입도는 800이라는 가정으로부터 결정된다. PI지수는 산화되지 않은 원아스팔트와 밀접한 관계를 가지고 있으며 개질아스팔트에 사용될 수도 있으나 그 결과는 매우 다르게 나타날 수 있다. 일반적으로 포장용 아스팔트 바인더의 경우 PI지수는 +1 ~ -1 사이의 값을 갖는다. 표 2에서 개질아스팔트 바인더의 침입도지수(PI)는 3.78~4.44 범위로 나타났으며, 이것은 포장용 아스팔트 바인더의 평균지수를 훨씬 넘는 것으로 나타나 PI지수의 기본가정이 개질아스팔트 바인더에서는 적용되지 않음을 알 수 있다.

표 2. 물리적 시험과 공용성등급 시험결과

	Code	성능등급	침입도	침입도지수 (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

#### 3.2 선형점탄성 영역의 결정

Amplitude-sweep 시험으로부터 9종의 시료에 대한 선형점탄성 영역을 결정하였다. 선형점탄성 영역을 구하는 방법은 여러 학자들이 제시한 방법이 있으나 본 연구에서는 90%부근에서의 변형율을 선형영역에 해당 하는 변형율로 결정하였다. 표 3은 각 시료에 대한 선형점탄성 영역을 나타낸 것이다. 일반 및 개질아스팔트 바인더의 선형 점탄성 영역은 변형률이 7~10%범위로 나타났다.

표 3. 각 시료의 선형점탄성 영역

	Code	아스팔트공용성 등급	변형율(strain) (%)
1	AB-1(AP3)	PG 64-22	8
2	AB-1'(AP5)	PG 64-22	8
3	AC-1	PG 70-22	10
4	AD-1	PG 76-22	10
5	AG-1	PG 82-22	10
6	AA-2	PG 58-22	7
7	AB-2	PG 64-22	8
8	AA-3	PG 58-22	7
9	AF-3	PG 64-16	7

#### 3.2 Frequency-sweep 시험 결과

본 연구에서는 Frequency-sweep 시험을 통해서 4Hz, 8Hz, 16Hz에 해당하는 복합계수( $G^*$ ), 저장계수( $G'$ ), 손실계수( $G''$ ) 및 위상각( $\delta$ )을 구하였다. 8Hz는 하중시간 0.02초에 해당하고, 포장설계시의 차량속도 48km/hr ~ 64km/hr의 범위에 해당한다 (shell, 1978). 또한 4Hz는 10km/hr ~ 40km/hr(추정치)와 16Hz는 70km/hr ~ 100km/hr(추정치)로 정하여 시료에 대한 유변학적 계수들을 산출하였다. 표 4는 30℃와 60℃에서 각 하중주기에 대한 유변학 계수들을 정리한 것이고 그림 2와 그림3은 각각의 온도(15℃, 30℃, 45℃ 및 60℃)에



서 구한 복합계수와 위상각을 TTS(Time-Temperature Superpositon)를 이용하여 마스터 곡선으로 나타낸 결과이다.

표 4. 하중주기에 따른 유변학 계수(30℃/60℃)

시료명	PG grade	주기 (frequency, Hz)	30℃				60℃			
			G*(kPa)	G'(kPa)	G''(kPa)	δ(°)	G*(kPa)	G'(kPa)	G''(kPa)	δ(°)
AB-1(AP3)	PG 64-22	4	551	195	515	69.3	4.54	1.9	4.53	86.5
		8	1,020	443	923	64.3	9.74	2.8	9.72	85.9
		16	1,560	730	1,420	60.4	18.7	3.1	18.6	85.6
AB-1'(AP5)	PG 64-22	4	876	341	807	67.1	6.41	410	6.4	86.3
		8	1,590	777	1,390	60.8	13.8	1.01	13.7	85.8
		16	2,350	1,440	1,980	54.8	24.9	1.99	24.7	85.3
AC-1	PG 70-22	4	14.7	3.02	14.4	78.2	4.41	978	4.3	77.2
		8	21.1	3.37	20.8	79.2	7.88	1.72	7.68	77.4
		16	27.2	4.98	27.2	79.1	12.5	2.88	12.6	77.9
AD-1	PG 76-22	4	468	201	422	64.5	20.6	8.32	18.8	66.1
		8	836	397	736	61.6	37.4	14.4	34.6	67.3
		16	1,300	663	1,140	58.3	62.1	22.4	56.5	68.3
AG-1	PG 82-22	4	347	148	314	64.7	24.4	10.0	22.3	65.8
		8	623	282	555	63.1	44.2	17.0	40.8	67.4
		16	960	441	884	60.9	69.6	25.5	66.4	68.2
AA-2	PG 58-22	4	515	175	484	70.1	4.47	0.263	4.46	86.6
		8	957	394	872	65.7	9.62	0.624	9.60	86.2
		16	1,590	743	1,310	59.5	16.0	0.935	16.0	86.7
AB-2	PG 64-22	4	1,140	427	2,430	68.1	8.64	18.9	35.0	84.1
		8	2,090	1,030	1,820	60.7	18.9	12.3	18.8	86.2
		16	2,980	1,740	1,060	57.8	38.7	3.54	32.2	86.2
AA-3	PG 58-22	4	778	314	712	66.2	6.84	0.548	6.82	85.4
		8	140	687	1,220	60.7	14.8	0.138	14.7	84.6
		16	2,100	1,250	1,720	55.4	28.4	3.10	2.75	83.8
AF-3	PG 64-16	4	74.8	14.0	73.4	79.2	16.2	1.79	16.1	83.7
		8	150	33.1	147	77.3	34.0	4.52	33.7	82.4
		16	258	66.2	248	74.9	63.3	94.9	57.6	81.4

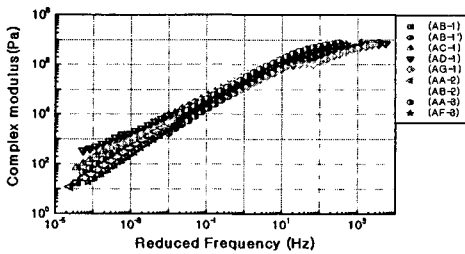


그림 2. complex modulus의 마스터 곡선

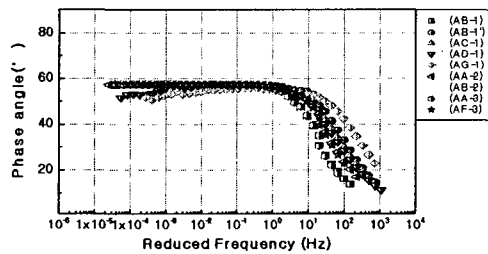


그림 3. phase angle의 마스터 곡선

표 4 및 그림 2와 3의 시험결과를 살펴보면 몇 가지 특징을 발견하게 된다. 우선, 온도와 상관없이 하중 주기(frequency, Hz)가 증가할수록 복합계수(G\*)는 증가하고 있으며, 이에 따른 위상각(δ)은 저온에서는 주기의 증가에 따라 감소하지만, 고온에서는 거의 변화하지 않고 있다. 이는 지금까지 거론하여 왔던 아스팔트 바인더의 점탄성 특성을 잘 나타내주고 있는 시험결과로서 포장설계에 복합계수(G\*)를 사용 시 온도 및 하중주기를 고려한 시험결과를 사용하는 것이 바람직하다.

또한, 같은 성능등급(Performance Grade : PG)을 가진 아스팔트 바인더라 하더라도 하중주기에 따라 복합



계수( $G^*$ )가 서로 다른 값을 보이고 있는 것으로 시험결과 나타났다. 이러한 결과는 아스팔트 바인더의 유종, 성분 및 채취 조건 등에 기인한 것으로 보다 더 상세한 원인분석을 위해서는 아스팔트 바인더의 성분분석, 화학시험 등이 필요하다.

고온성능등급이 높은 아스팔트 바인더라 하더라도 반드시 복합계수( $G^*$ )가 크게 나타나지는 않고 있으나, 위상각은 온도가 상승할수록 성능등급이 낮은 아스팔트 바인더에 비해 낮게 나타났다. 또한 시료에 따라 위상각의 변화가 일정치 못한 경우가 발생하고 있는데 이는 다른 시료에 비하여 아스팔트 바인더의 품질이 안정치 못하여 나타난 현상으로 판단된다.

#### 4. 결 론

국내 포장체에 작용하는 하중재하시간을 고려한 아스팔트 바인더의 유변학적 특성을 분석하기 위해 하중주기에 따른 유변학 특성시험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 유변학 특성 시험은 현행 물리적 시험방법으로부터 분석할 수 없는 온도 및 시간의 변화에 따른 점탄성 특성을 하중주기에 따라 분석할 수 있음은 물론 물리적 특성시험과 동시에 실시함으로써 아스팔트 바인더의 성능을 재료의 특성에 맞게 현실적으로 정확한 분석을 실시할 수 있었다.
- (2) 같은 성능등급의 아스팔트 바인더라 하더라도 복합계수( $G^*$ )는 하중주기(주행속도)와 온도의 변화에 따라 서로 다른 수치를 보이고 있다. 이는 포장설계 시 아스팔트 바인더의 복합계수를 설계변수로 사용하는 것이 타당하며 다양한 설계를 위하여 필요하다는 것을 입증해주는 시험결과이다.
- (3) 고온등급이 높은 아스팔트 바인더의 경우 성능등급이 낮은 아스팔트 바인더에 비하여 복합계수가 낮은 경우가 있었으나 위상각( $\delta$ )의 변화와 각의 크기가 작아서 탄성체거동이 우수한 것으로 나타났다.
- (4) 같은 등급의 아스팔트 바인더라 하더라도 메이커와 출하시기에 따라 복합계수와 위상각( $\delta$ )의 변화가 심하여 아스팔트 바인더의 철저한 품질관리가 요구된다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부(2002), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능개선 연구", 1차년도 최종보고서, pp.163 ~ 265
2. 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
3. Bahia H.U, Anderson, D.A (1967), "Isothermal low-temperature physical hardening of Asphalt binders", Proceedings of the International symposium on the chemistry of bitumens, pp.553 ~ 569
4. Goodrich, O.L. (1991), "Asphaltic Binder Rheology, Asphalt Concrete Rheology And Asphalt Concrete Mix Properties ", Asphalt Paving Technology vol 60, pp.80 ~ 82
5. Huang, Y, H, (1993), "Pavement Analysis and Design", Prentice-Hall, Inc
6. Poel, V.D, (1954), "A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data", Journal of Applied Chemistry
7. When S.H., "The Rheology Properties of Asphalt Binders Modified SBS and EVA", Second International Conference on Road & Airfield Pavement Technology, pp.464 ~ 465