



# 아스팔트바인더 유체를 위한 새로운 특성방정식

## New Constitutive Equations for Asphalt Binder Fluids

허 정 도\*

Huh, Jung Do

### Abstract

Almost most of literatures treat behaviors of asphalt binders as a homogeneous single-phase fluid, but this generalization turns out to be a serious mistake. This study introduces all the characteristic equations for asphalt binders, which are modified or unmodified. Especially, characteristic equations for a unhomogeneous multi-phase fluid for modified asphalts is first time proposed. Characteristics of each equations introduced are explained by employing dynamic shear testing data actually measured for specific asphalt binders. Differences of moving behaviors and characteristic equations between a homogeneous single-phase and a unhomogeneous multi-phase fluid are emphasized. These differences help us understand which characteristic equations must be used for a given asphalt fluid and what kinds of properties must be investigated for analysis of a specific asphalt binder. Results of this study provide how to analyse modified and unmodified asphalts, and informations necessary for binder grading.

*Keywords : characteric equations of asphalt binders, a single-phase homogeneous fluid, a multi-phase unhomogeneous fluid, dynamic shear testing data*

### 요 지

거의 대부분의 문헌에서 아스팔트바인더의 유동거동을 다룰 때, 단일상 균일 유체로 일률적으로 취급하는데 이로 인한 오류가 심각하다. 본 연구에서는 개질이던 스트레이트이던 아스팔트바인더의 유동과 관련된 특성방정식을 모두 소개하고, 특히 다상 불균일 유체의 특성방정식을 새로이 소개한다. 이러한 식들의 특징이 무엇인지를 실제 측정된 아스팔트바인더의 동전단시험 데이터를 이용하여 설명한다. 특히 단일상 균일 유체와 다상 불균일 유체와의 거동차이점과 특성방정식의 차이점에 대해 집중 부각한다. 이러한 차이는 아스팔트유체를 다룰 때 어떠한 특성방정식을 사용해야 하며, 특정 바인더를 분석하기 위해서는 어떤 물성을 조사해야 하는 지에 대해서 이해하게 한다. 본 연구는 개질바인더의 분석과 등급제정에 필수적인 정보를 제공한다.

*핵심용어 : 아스팔트바인더의 특성방정식, 단일상 균일 유체, 다상 불균일 유체, 동전단시험 데이터*

\* 정회원 · 인천대학교 첨단도로교통연구센터 수석연구원 · 공학박사



# 1. 서론

동 전단시험이나 정상상태시험을 통하여 측정된 물질의 레올로지 데이터(점도, 복합전단계수, 위상각, 주기, 전단속도 등)는 단순히 정성적으로 그 특성이 무엇인지 알기 위함이 목적이 아니고, 물질의 성질을 정량화하여 물성 데이터베이스를 확보하는데 주 목적이 있다. 이러한 목적을 위해서 특성방정식이 필수적이다. 허정도, 남영국<sup>(1)</sup>은 아스팔트바인더의 점도를 정량화하는 연구를 수행하여 아스팔트바인더점도 특성방정식을 발표한 바 있다. 이러한 특성방정식은 측정된 물성 데이터의 회귀분석에 사용되어 바인더특성을 규명하는 물질상수의 산정을 가능하게 한다. 예를 들어, 회귀분석결과 확보된 아스팔트바인더 물질상수는 아스팔트바인더의 등급제정에 필요한 정보를 제공한다.

개질아스팔트를 포함한 모든 아스팔트바인더는 크게 두 종류로 구분된다. 하나는 단일 상(single-phase)유체거동이고, 다른 하나는 다상(multi-phase)유체거동이다. 두 유체의 가장 큰 차이점은 단일 상 유체는 항복응력이 없는데 반하여 다상유체는 항복응력을 보인다는 차이가 있다.

또한 다 같은 단일 상 유체라 하더라도 지수법칙 유체나, 아니면 비 뉴턴유체나에 따라 두 종류로 나누어지며, 마찬가지로 다상유체도 유체유동이 지수법칙이나, 비 뉴턴 법칙이나에 따라 두 종류로 구분된다. 이처럼 유체의 유동특성을 정량화 하는데, 모두 네 다른 유동거동이 존재하며 네 다른 특성방정식이 고려된다. 이제 이들 네 다른 특성방정식과 각 방정식의 온도변화에 대한 영향을 살펴보자.

## 2. 단일상 유체의 새로운 특성방정식

본연구에서는 현재까지의 연구결과 중 비뉴턴 유체거동을 다루는 식들을 간략히 언급하고 여기에서 처음으로 제안하는 새로운 모델링 식에 대한 소개와

검증을 하려한다.

### 2.1 정전단점도의 이론 식

정 전단점도란 유체유동이 정상상태에 도달했을 때 측정된 유체점도를 말한다. 일반적으로 비뉴턴유체의 전단점도 데이터를 정량적으로 기술하기 위하여 비교적 사용하기에 간편한 Cross(1965)<sup>(1)</sup> 모델이 자주 선정된다. 이 외에도 많은 특성방정식들이 존재하지만 너무 복잡하여 현실성이 없으므로 여기서는 제외된다. Cross(1965)<sup>(1)</sup> 모델은 고분자 용액의 전단유동에 흔히 사용되는 모델로서 균일하고 단일 상으로 된 유체에 적용된다. 이 식은 세 물질상수( $\eta_0, \lambda, n$ )로 구성되어 비교적 간편하면서도 물질의 점도 특성을 잘 나타내고 있다고 평가된다.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^{1-n}} \quad (1)$$

위 식에서  $\eta_0$ 는 제로전단점도(zero shear viscosity) 또는 절대점도(absolute viscosity)라 부르며, 전단속도가 제로인 상태에서의 점도를 말한다.  $\lambda, \gamma, n$ 는 각각 이완시간, 전단속도 그리고 전단 민감지수를 나타낸다. 이완시간이란 유체분자가 외부로부터 전단응력을 받았을 때, 분자체인이 움직이는 데 소요되는 시간을 말하며, 전단 민감 지수는 흐름 중에 있는 분자체인의 유동저항지수를 나타낸다.

### 2.2 정전단 응력식

일정한 응력 하에서 전단점도는 전단속도와 반비례함으로 전단 응력( $\tau$ )은 전단점도( $\eta$ )와 전단속도( $\dot{\gamma}$ )의 곱으로 표현된다. 따라서, 식 (1)을 적용하면 정전단 응력식은 다음과 같다.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} = \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^{1-n}} \quad (2)$$



### 2.3 동전단점도 이론식

위에서 소개된 식은 정상상태에 도달한 유체의 전단점도와 전단속도에 관한 식이다. 그러나 점도를 측정하는데 있어서 정 전단방법 이외에도 동 전단시험 방법이 있다. Cox-Mertz(1958)<sup>(2)</sup>는 정전단시험에서의 전단속도( $\dot{\gamma}$ )와 동전단시험에서의 주기( $\omega$ )를 동일하게 한다면, 정전단시험의 전단점도( $\eta$ )는 동전단시험의 복합점도( $\eta^*$ )와 일치한다고 주장하였다. 이 이론에 의하면 동 전단점도는 정 전단점도 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\eta^* = \frac{\eta_o^*}{1 + (\lambda\omega)^{1-n}} \quad (3)$$

위 식에서  $\eta^*$ ,  $\eta_o^*$ ,  $\lambda$ ,  $\omega$  및  $n$ 는 각각 복합 동전단 점도(complex dynamic viscosity), 복합 제로동전단점도(complex zero dynamic shear viscosity), 이완시간(relaxation time), 주기(frequency), 전단민감지수(shear susceptibility index)를 가리킨다.

### 2.4 동전단 응력식

앞서 언급한 Cox-Mertz(1958)<sup>(2)</sup>법칙에 의해 동전단시험에서 측정한 복합전단계수( $G^*$ )는 정전단시험에서의 응력( $\tau$ )과 동일하며 식 (2)와 식 (3)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$G^* = \eta^* \omega = \frac{\eta_o^* \omega}{1 + (\lambda\omega)^{1-n}} \quad (4)$$

### 2.5 동 점탄성 응력식

위의 식 (1)에서 식 (4)까지는 점도를 고려한 식들이다. 그러나 대부분의 비뉴턴유체는 유동 시에 점성보다는 점탄성 성질을 지니므로, 점성에 근거한 응력식보다는 점탄성 응력 식이 필요하다. 점성응력인  $G^*$  대신에 점탄성응력인  $G^*/\sin\delta$ 를 식 (4)에 삽입

함으로써 원하는 새로운 점탄성 식을 얻는 데 이 수식은 본 연구에서 처음으로 제안된다.

$$\frac{G^*}{\sin\delta} = \frac{\eta^*}{\sin\delta} \cdot \omega = \frac{\eta_o^*}{\sin\delta} \cdot \frac{\omega}{1 + (\lambda\omega)^{1-n}} \quad (5)$$

식 (5)는 고정온도에서의 점탄성응력과 주기와와의 관계를 표현하고 있다. 이 식에서 점탄성응력을 주기와 온도의 두 독립변수로 나타내려면  $\eta_o^*/\sin\delta$ ,  $\lambda$  및  $n$ 에 대한 온도표현을 각각 구하여 해당상수에 삽입하면 만족된다. 여기서 점탄성성질을 나타내는  $\sin\delta$  ( $=G''/G^*$ )는  $G''$ 와  $G^*$ 의 온도의존성이 거의 동일하므로 서로 상쇄되어 온도에 대한 변화가 무시된다. 따라서  $\eta_o^*/\sin\delta$ 에 대한 온도의존성은 실제로 복합 제로동전단점도( $\eta_o^*$ )와 동일하며, 이완시간( $\lambda$ )도 통상 복합 제로동전단점도의 함수이다. 복합 제로동전단점도는 아레니우스(Arrhenius) 온도법칙을 따르므로  $\eta_o^*/\sin\delta$  및  $\lambda$ 에 대한 온도의존성도 아레니우스(Arrhenius) 온도법칙을 따른다. 전단민감지수( $n$ )의 변화영역은 0.0-1.0 이며, 이 좁은 변화영역에 대한 온도의존성은 절대점도의 역순에 의한 일차 또는 이차 선형방정식의 표현으로 충분하다. 이들을 수식적으로 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{\eta_o^*}{\sin\delta} = \frac{\eta_{or}^*}{\sin\delta} \cdot \exp\left[\frac{E_\eta}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right]; \quad \ln\left(\frac{\eta_o^*}{\sin\delta}\right) = \ln(V_1) + \frac{W_2}{T} \quad (6)$$

$$\lambda = \lambda_r \cdot \exp\left[\frac{E_\eta}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right]; \quad \ln(\lambda) = \ln(V_2) + \frac{W_2}{T} \quad (7)$$

$$n = a + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2} \quad (8)$$

### 2.6 동전단 지수법칙(Power-Law)과 동전단 점탄성 지수법칙 모델

아스팔트바인더의 유동거동을 표현하는 데 있어서 식 (4)보다 더욱 간단한 특성방정식으로서 복합 동전단 지수법칙(파워법칙) 식이 있다. 이 식은 식 (4)에서 다음 조건이 성립될 때 주어진다.



$$(\lambda \cdot \omega)^{1-n} \gg 1 \quad (9)$$

이 때 복합 동전단계수에 대한 지수법칙은 다음과 같이 표현된다.

$$G^* = (\lambda^{n-1} \eta_o^*) \cdot \omega^n = K \cdot \omega^n \quad (10)$$

위 식에서 K는 컨시스턴시 지수(consistency index)라 부르며, 복합 제로동전단점도( $\eta_o^*$ )의 함수이다. 지수법칙을 따르는 복합 동전단 점탄성 응력 식은 식 (10)과 같이 하여 식 (5)로부터 얻어진다.

$$\frac{G^*}{\sin \delta} = \frac{K}{\sin \delta} \cdot \omega^n \quad (11)$$

식 (11)에서 온도에 대한 변화를 나타내는 변수는  $K/\sin \delta$ 와 n이며, n에 대한 표현은 이미 식 (8)에 나타내었다. 여기서,  $\sin \delta$ 는 온도변화와 무관함으로  $K/\sin \delta$ 는 복합 제로동전단점도의 함수이므로 아레니우스(Arrhenius) 온도법칙을 따른다 할 수 있다.

$$\frac{K}{\sin \delta} = \frac{K_r}{\sin \delta} \cdot \exp \left[ \frac{E_k}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right]; \quad \ln \left( \frac{K}{\sin \delta} \right) = \ln(V_3) + \frac{W_3}{T} \quad (12)$$

이상에서 단일상 유체에서의 점탄성 응력이 주기와 온도의 함수로서 어떻게 표현되는지에 대한 새로운 특성방정식이 제안되었다. 이 식은 균일한 단일상 아스팔트바인더의 레올로지특성을 기술하는 데 사용된다.

### 3. 다상유체의 새로운 특성방정식

일반적으로 고분자개질 아스팔트바인더의 특성은 스트레이트 아스팔트와는 전혀 다르다. 스트레이트 아스팔트는 균일한 단일상(單一相) 물질처럼 거동하는 반면에 고분자개질 아스팔트는 고분자물질이 미세입자로서 아스팔트에 점점이 분산되어 있는 다상유체의 형태를 보이는 경우가 대부분이다. 스트레이트 아스팔트와 구분되는 상기 차이점은 개질아스팔

트에 독특한 레올로지적 특성을 부여한다.

#### 3.1 다상유체(多相流體)를 위한 물질특성방정식

일반적으로 다상유체는 서로 다른 상의 존재로 인하여 수많은 계면이 존재하고, 각 계면에는 표면장력이 작용하며 이로 인해 모세관압력이 형성됨으로 전체유체가 응집력을 가진 하나의 물질처럼 거동한다. 다상유체가 유동을 일으키기 위해서는 이러한 응집력이 파괴되어 유동할 수 있는 상태로 전환되어야 하는데, 이러한 구조변화를 위해서는 응력이 요구되고 이를 항복응력이라 정의한다. 즉, 가해진 전단응력에서 최초의 구조변화를 위해 소요된 항복응력을 제한 잔여 응력만이 유체유동에 직접적으로 관여하며 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau - \tau_y = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (13)$$

식 (13)에서 전단점도는 Cross모델(1965)<sup>(1)</sup> 식 (1)을 사용하면, 항복응력을 지닌 다상유체의 특성방정식이 구성된다. 즉,

$$\tau = \tau_y + \frac{\eta_o \dot{\gamma}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}} \quad (14)$$

#### 3.2 다상유체(多相流體)의 새로운 점탄성 특성방정식

점탄성유체는 전단응력( $\tau$ ) 대신에 점탄성응력( $G^*/\sin \delta$ )을, 제로전단점도( $\eta_o$ ) 대신에 점탄성 제로동전단점도( $\eta_o^*/\sin \delta$ )를, 전단속도( $\dot{\gamma}$ ) 대신에 주기( $\omega$ )를 식 (14)에 삽입하면 된다.

$$\frac{G^*}{\sin \delta} = \left( \frac{G^*}{\sin \delta} \right)_y + \frac{\eta_o^*}{\sin \delta} \cdot \frac{\omega}{1 + (\lambda \omega)^{1-n}} \quad (15)$$

식 (15)는 균일한 단일 상 아스팔트바인더에 적용되는 식 (5)와 동일하지만 다상유체의 특징인 항복응력 항, ( $G_y^*/\sin \delta$ )이 추가되어 있는 점이 다르다.

식 (15)에서 온도변화를 고려하면,  $\eta_o^*/\sin \delta$ ,  $\lambda$ , n



에 대한 온도법칙을 삽입하여야 하는데, 이들은 이미 식 (6), (7) 및 (8)에서 밝힌 바 있다. 그러므로 항복 응력 항,  $(G^*/\sin\delta)_y$ 에 대한 온도변화 식만을 여기서 제시한다. 항복응력 항도 편리상 아레니우스법칙을 따른다고 가정하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_y = \left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_r \cdot \exp\left[\frac{E_y}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right]; \quad \ln\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_y = \ln(V_4) + \frac{W_4}{T} \quad (16)$$

### 3.3 다상유체(多相流體)를 위한 점탄성 지수법칙

다상유체의 유동 시에 지수법칙을 따른다면 식 (14)의 점도표현에 지수법칙 모델(식 (10))을 적용하여 이 유체의 유동거동을 기술하게 된다. 이 식은 Hershel and Bulkley(1926)<sup>(3)</sup> 식으로 알려져 있다.

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (17)$$

식 (17)에 해당하는 복합전단계수( $G^*$ )에 대한 표현은 아래와 같다.

$$G^* = G^*_y + K \cdot \omega^n \quad (18)$$

식 (18)의 양변에  $\sin\delta$ 로 나누면 다상유체를 위한 새로운 점탄성 지수법칙이 얻어진다.

$$\frac{G^*}{\sin\delta} = \left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_y + \frac{K}{\sin\delta} \cdot \omega^n \quad (19)$$

식 (19)에서 온도변화를 고려하면  $(G^*/\sin\delta)_y$ ,  $K/\sin\delta$ ,  $n$ 에 대한 온도법칙이 알려져야 하는데, 이들은 이미 식 (16), (12) 및 (8)에 밝힌 바 있어 이들을 이용하면 된다.

## 4. 분석 및 해석

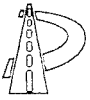
### 4.1 아스팔트바인더 시료와 소성변형온도 영역에서의 동전단시험

국내에서 판매되거나 생산되는 17개의 스트레이트 및 개질 아스팔트바인더를 선정하여 동전단시험을 수행하였다. 선정된 바인더를 다음과 같이 표현한다.

- A-개질제 3%+V사 AP-5 97% ..... A 바인더
- A-개질제 6%+V사 AP-5 94% ..... B 바인더
- A-수정개질제 5%+V사 AP-5 95% ..... B1 바인더
- C-개질 아스팔트바인더 ..... C 바인더
- D-개질제 5%+V사 AP-5 95% ..... D 바인더
- D-개질제 9%+V사 AP-5 91% ..... E 바인더
- G-개질제 4%+V사 AP-5 96% ..... F 바인더
- G-개질제 8%+V사 AP-5 92% ..... G 바인더
- H-개질제 5%+V사 AP-5 95% ..... H 바인더
- H-개질제 9%+V사 AP-5 91% ..... I 바인더
- J-개질제 5%+V사 AP-5 95% ..... J 바인더
- J-개질제 9%+V사 AP-5 91% ..... K 바인더
- L-개질 아스팔트바인더 ..... L 바인더
- V사 AP-3 ..... M 바인더
- V사 AP-5 ..... N 바인더
- W사 AP-3 ..... O 바인더
- W사 AP-5 ..... P 바인더

위의 바인더 중 A-개질제(A, B), A-수정개질제(B1), D-개질제(D, E), G-개질제(F, G), H-개질제(H, I), J-개질제(J, K)에 대한 바인더시료들은 이들 재료와 V사의 AP-5(AC-20에 해당하는 스트레이트 아스팔트바인더)를 각각 지정된 중량 백분율에 해당하는 함량만큼 150℃의 혼합용기에 넣고 고속 강력전단시험기로 30분 동안 혼합하여 만들었으며, C-바인더와 L-바인더 그리고 스트레이트 아스팔트(M, N, O, P-바인더)는 각 생산회사에서 제공하여 준 것을 그대로 시료로 사용하였다.

위의 바인더를 5가지 다른 온도(40, 45, 50, 55, 60℃)와 주기범위(0.1-100 rad/s)에서 동 전단 레오미터(DSR : Dynamic Shear Rheometer)에 의하여 측정하였다. 측정하기 전에 먼저 측정시료를 만들어 측정평판에 삽입하였는데 그 과정을 살펴보면, 오븐 안에 바인더 시료 캔을 넣고 바인더가 충분한



유동성을 가질 수 있을 때까지 가열한다. 본 실험에서는 140℃에서 15분간 가열하는 조건을 선택하였다. 가열된 아스팔트 바인더로 평판과 평판 사이에 거치시킬 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 frequency sweep을 하는 것이지만 이를 위해 선형변형을 범위를 먼저 알아야 함으로 40℃에서 Strain sweep 시험을 실시하였다. 이 시험을 행하여 복합계수 값이 95%범위의 선형변형을 유지하는 최대변형을 값을 구하였다. 선형점탄성조건을 만족시키기 위하여 이 최대변형을 값을 고정시키고 frequency sweep 시험을 실시하였으며, 측정주기는 0.1~100 rad/초 범위에 국한시키고 낮은 값에서 높은 값으로 주기를 증가시키며 점탄성 성질을 측정하였다. 사용된 동전단레오메터(Dynamic Shear Rheometer, DSR)는 미국 Rheometrics 사의 Rheometric Asphalt Analyzer(HICT/ARES 3-A27) 실험 장치이며, 시료를 측정평판에 장착하고 이상에서 언급한 모든 실험조건을 컴퓨터에 입력하면 내장된 프로그램에 의하여 자동적으로 실험을 수행하여 측정된 데이터를 제공해주었다.

#### 4.2 단일 상 아스팔트바인더를 위한 동전단시험 데이터분석

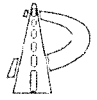
소성변형온도영역에서 단일 상 균일 아스팔트바인더에 대하여 측정된 동 전단 시험데이터를 조사한 결과 현저하게 목격되는 특징 중의 하나는 동전단계수( $G^*$ )와 주기( $\omega$ )와의 관계가 지수법칙을 따른다는 사실이다. 즉 소성변형온도영역에서 단일 상 아스팔트 바인더는 스트레이트이던, 개질이던 상관없이 모두 지수법칙의 지배를 받으며 항복응력이 관찰되지 않

는다. 이러한 사실은 위에서 제시한 식 (10), (11), (8) 및 (12)의 적용을 가능하게 한다. 본 연구에서 측정된 시료 중 A, B, B1, D, E, F, G, H, I, M, N, O가 단일상 유체에 속하지만 거의 비슷한 유동거동을 보임으로 하여, 이들 중 대표적으로 M과 I-바인더에 대한 동전단시험 데이터를 분석하기로 한다.

여기서 M-바인더는 측정온도에서 점성이 대부분인 AP-3 스트레이트 아스팔트로서 점성유체를 대변하고, I-바인더는 어느 정도의 탄성을 보유하고 있는 개질바인더로서 점탄성성질을 대변한다. 동전단 시험데이터 중에서, 식 (10)으로  $G^*$ 를(그림 1과 2), 식 (11)로  $G^*/\sin\delta$ 를(그림 3와 4) 예측하였다. 각 그림들 중 데이터는 기호로, 회귀분석한 결과는 선으로 표시하였다. 각 그림에서 보여주는 우수한 예측결과들은  $G^*$ 는 식 (10)을,  $G^*/\sin\delta$ 는 식 (11)을 따른다는 사실을 입증하며, 소성변형온도영역에서 모든 아스팔트바인더는 지수법칙을 따르고 있음을 확인시켜 준다. 회귀분석 결과 얻어진 물성상수들은 표 1에 수록되어 있다.

표 1에 보고된  $K/\sin\delta$ 와  $n$  상수는 식 (12)와 식 (8)을 사용하여 온도변화에 대하여 회귀분석을 실시하였고 그림 5와 6에 데이터와 함께 표현되어 있으며, 회귀분석결과는 표 2에 나타내었다. 온도변화에 대한 우수한 예측은  $K/\sin\delta$ 와  $n$ 가 온도의존식 (12)와 식 (8)을 따름을 명백히 하고 있다.

M과 I의 차이를 읽을 수 있도록 동일한 물성에 대한 그림은 연이어서 도시하였다.  $G^*$ (그림 1과 2)과  $G^*/\sin\delta$ (그림 3과 4)를 따로 표시한 이유는 상호 간의 차이를 조사하기 위해서이며, 온도변화에 대한  $K/\sin\delta$ 와  $n$  상수의 표현은  $G^*/\sin\delta$ 가 온도에 따라 어떻게 변화하는가를 알기 위해서이다. 동일한 바인더에 대하여  $K/\sin\delta$ 가  $K$ 와 비교하여 상대적으로 크다는 의미는 탄성성질이 그만큼 크다는 뜻이며,  $n$ 가 작아도 상대적으로 탄성성질의 증가를 시사한다. 실제로 탄성성질이 상대적으로 큰 I-바인더의  $n$ -값은 약 0.64인 데 반하여 스트레이트 바인더인 M의  $n$ -값은 0.9이상임을 그림 6을 통해 알 수 있다.



특정 바인더의 탄성 값은  $\sin\delta$ 의 대소에서 비롯되며, 이를 알아보기 위하여  $\sin\delta$  값을 그림 7에 나타내었다. 일반적으로 탄성이 적고 점성이 큰 바인더의 경우(M-바인더), 주기가 낮을 때 완전한 점성을 나타내다가( $\sin\delta=1.0$ ), 주기가 증가함에 따라 약간의 탄성성질(1.0보다 약간 작아짐)이 발생한다. 이러한 현상은 주기가 증가함에 따라 바인더 체인이 유동방향으로 약간 늘어남에 기인한다. 그러나 이와는 달리 탄성이 상대적으로 큰 I-바인더는  $\sin\delta$  값이 0.9 이하임을 볼 수 있다. 이 때문에 점성이 큰 스트레이트 아스팔트바인더(M-바인더)의 경우에는  $K$ 와  $K/\sin\delta$ 의 값에 거의 차이가 없는 대신에(그림 1과 3을 참조), 탄성이 다소 존재하는 I-바인더는  $K/\sin\delta$ 가  $K$ 보다 약간 커짐을 볼 수 있다(그림 2와 4를 비교).

이 의미는 탄성이 어느 정도 있는 바인더(I-바인더)를 제외한 점성이 대부분인 스트레이트 아스팔트바인더(M-바인더)의 경우는  $G^*$ 와  $G^*/\sin\delta$  값에 거의 차이가 없으므로 점탄성변수인  $G^*/\sin\delta$ 대신에 점성변수인  $G^*$ 를 사용해도 무방함을 시사한다.

그림 5, 6 및 7을 참조하면, 탄성성질을 갖도록 개질한 I-바인더는 스트레이트 아스팔트인 M-바인더와 비교하여  $K/\sin\delta$ 값이 크고(그림 5),  $n$ 값은 작고(그림 6),  $\sin\delta$ 값도 작음(그림 7)이 관측된다. 이러한 의미는 I-바인더가 M-바인더에 비하여 점탄성응력인  $G^*/\sin\delta$ 가 크고, 더욱 비선형적이며, 탄성이 다소 증가한 사실을 나타낸다. 아울러  $K/\sin\delta$ 의 온도감응성(온도식의 기울기)에서 I-바인더가 M-바인더에 비하여 다소 적다(그림 5)는 것은 온도가 낮아

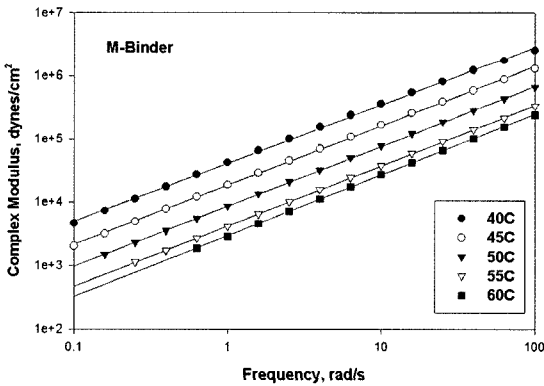


그림 1. M-바인더의 복합전단계수에 대한 식 (54)의 회귀분석결과

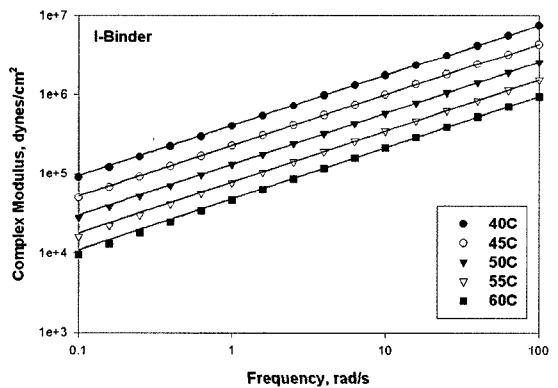


그림 2. I-바인더의 복합전단계수에 대한 식 (54)의 회귀분석결과

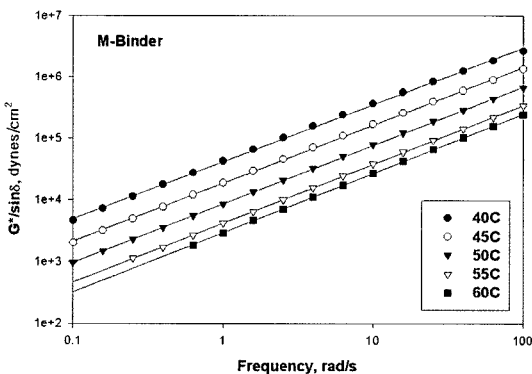


그림 3. M-바인더의  $G^*/\sin\delta$ 에 대한 식 (55)의 회귀분석 결과

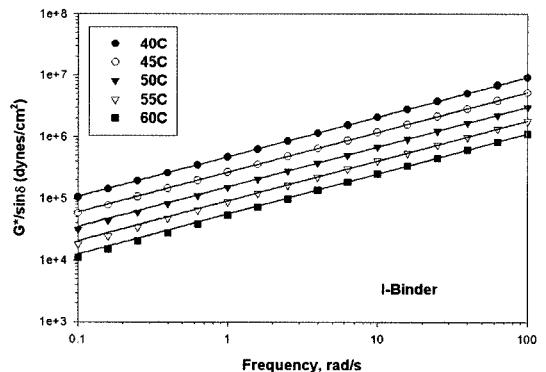


그림 4. I-바인더의  $G^*/\sin\delta$ 에 대한 식(55)의 회귀분석 결과

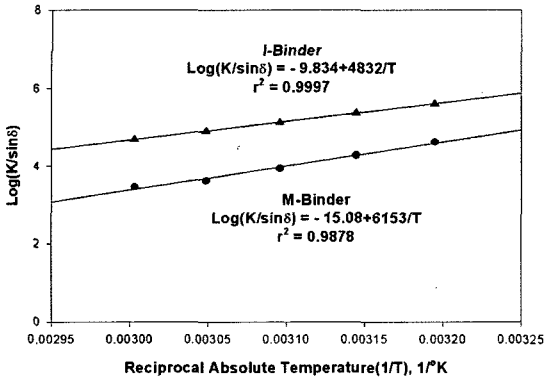
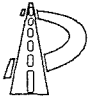


그림 5. M와 I-바인더의  $K/\sin\delta$ 에 대한 식 (56)의 회귀분석결과

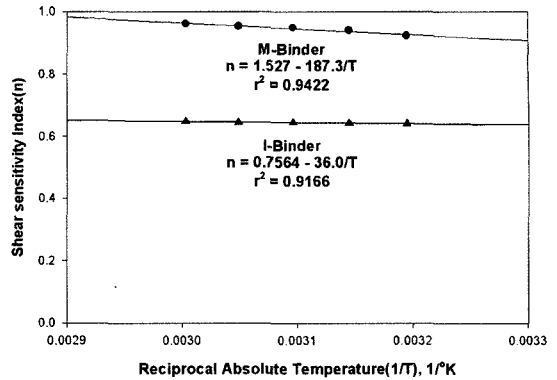


그림 6. M-바인더의 전단민감지수에 대한 식 (53)의 회귀분석결과

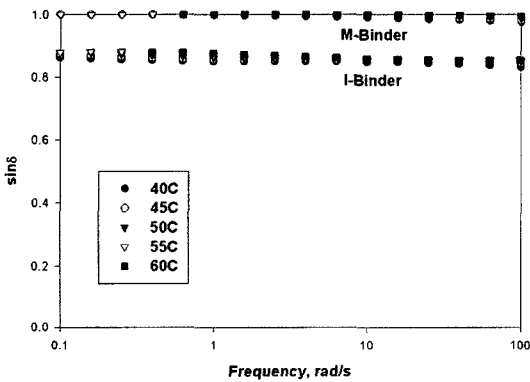


그림 7. 주기함수로서의 M-바인더의  $\sin\delta$  값

저도 유연성을 다소 확보할 수 있음을 지적한다. 이상의 모든 결과는 향상 정도의 크기는 다르지만, 고분자개질에 의해서 바람직한 방향으로 아스팔트의 물성개선이 이루어졌음을 의미하며, 스트레이트 아스팔트바인더를 개질할 때 어떤 물성이 향상될 수 있는가를 명시해준다.

이상에서 단일상이나 단일상처럼 거동하는 아스팔트바인더에 대한 분석을 새로운 특성방정식으로 시도하였다. 이러한 접근은 아스팔트의 특성을 규명하는데 중요한 도구를 제공한다. 다음은 다상유체에 대한 분석을 시작하고자 한다. 여기서 다상이라고 함

표 1. 식 (10)과 (11)에 의한 회귀분석결과

바인더	온도(℃)	그림 1과 2 (식 (10))			그림 3과 4 (식 (11))		
		Log(K)	n	r <sup>2</sup>	Log(K/sinδ)	n	r <sup>2</sup>
M	40	4.617	0.9205	0.99935	4.619	0.9241	0.99942
	45	4.268	0.9398	0.99968	4.270	0.9421	0.99971
	50	3.937	0.9481	0.99988	3.937	0.9498	0.99991
	55	3.623	0.9540	0.99995	3.624	0.9550	0.99995
	60	3.469	0.9614	0.99994	3.469	0.9624	0.99995
I	40	5.611	0.6331	0.99997	5.675	0.6412	0.99994
	45	5.358	0.6408	0.99999	5.425	0.6441	0.99998
	50	5.120	0.6439	0.99999	5.188	0.6446	0.99993
	55	4.895	0.6449	0.99998	4.963	0.6456	0.999973
	60	4.684	0.6468	0.99997	4.748	0.6491	0.999951





표 2. 표 1의  $\text{Log}(K/\sin\delta)$ 와  $n$  데이터에 대한 회귀분석 결과

바인더	그림 5 (식 (12))			그림 6 (식 (8))		
	$\text{Log}(V_3)$	$W_3 (= E_K/R)$	$r^2$	a	b	$r^2$
M	-15.08	6153	0.9878	1.527	-187.3	0.9422
I	-9.834	4832	0.9997	0.7564	-36.0	0.9166

은 상이 하나 이상으로 구성된 물질을 말하며, 균일하지 않는 재료를 통틀어서 말한다. 대부분의 개질 아스팔트는 소성변형온도에서 다상유체에 속하지만, 일부 개질 아스팔트는 단일상처럼 거동한다. 그 주된 이유는 아스팔트에 분산된 고분자 상이 베이스 아스팔트와 비교하여 점도에서 거의 차이가 없으면 단일상처럼 거동한다고 사료된다.

#### 4.3 다상(多相) 아스팔트바인더를 위한 동전단시험 데이터 분석

다상유체의 점탄성 지수법칙에 따라 거동하는 개질 아스팔트바인더는 본 연구에서 측정된 시료 중 C, J, K & L이 해당되지만, 거의 동일한 거동특성을 보임으로 하여 여기서는 대표적으로 J-바인더에 대해서 분석한다. 그림 8은  $G^*$ 을 그림 9는  $G^*/\sin\delta$  데이터를 보여준다. 그림 8의  $G^*$ 는 식 (18)을, 그림 9의  $G^*/\sin\delta$ 는 식 (19)를 적용하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석 결과는 그림 8과 9에 표현되어 있으며 구해진 물질상수들은 표 3에 기록되어 있다. 그림 8과 9의 우수한 예측결과는 다상유체의 지수법칙인 식 (18)과 식 (19)의 타당성을 입증해준다. 다상유체인 J-바인더의 데이터를 나타내는 그림 8 및 9를, 단일상유체인 I-바인더의 데이터를 나타내는 그림 2 및 4와 서로 비교할 때, 특기할 사항은 주기가 감소하면 그림 2 및 4에서는 전단응력이 계속해서 감소하는 반면에, 그림 8과 9에서는 일정한 값으로 수렴하는 차이가 있다. 앞서 설명하였지만 주기가 낮을 때 응력이 일정한 값에 수렴하는 것은 항복응력이 있기 때문이다. 이러한 항복응력의 존재로 인하여 개질아스팔트인 J-바인더에 대해서는 항복응력을 가진

식 (18)과 (19)가 사용되었다. 항복응력은 일반 단일상 스트레이트 아스팔트에서는 찾아볼 수가 없다.

그림 8과 9를 살펴보면 응력과 항복응력은 온도가 상승하면 감소하는 것이 관측된다. 이제 온도에 대한 변화를 알아보기 위하여 그림 9의 데이터를 식 (19)에 의해 회귀분석하여 얻은 표 3에 수록된 물질상수들( $G^*y/\sin\delta$ ,  $K/\sin\delta$ ,  $n$ )을 각기 해당하는 온도의존식으로 회귀분석을 실시하였다. 즉,  $G^*y/\sin\delta$ 는 식 (16)으로,  $K/\sin\delta$ 는 식 (12)로,  $n$ 는 식 (8)을 사용하였으며, 그 결과를 그림 10( $G^*y/\sin\delta$ ,  $K/\sin\delta$ )과 11( $n$ )에 표시하였고 산정된 물질상수는 표 4에 기록하였다. 각 그림과 표 4에 나타난 우수한 예측결과는 이들 식의 정당성을 입증하고 있다. 그림 10에서 온도가 상승하면(역 절대온도는 감소함) 항복응력 항( $G^*y/\sin\delta$ )과 점도 항( $K/\sin\delta$ )은 모두 기하급수적으로 감소하며, 특히 점도 항이 더욱 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 온도가 상승하면 항복응력이 작아져 비교적 낮은 응력에서 유동이 시작되고, 일단 유동이 시작되면 더욱 낮아진 점도로 인하여 유동이 훨씬 용이해진다는 의미를 내포한다. 한편, 온도가 상승하면 전단민감지수( $n$ )는 직선으로 다소 감소함을 보이며, 이는 비뉴턴거동이 뉴턴거동에 조금씩 가까워진다는 뜻이다.

그림 8의  $G^*$ 을 그림 9의  $G^*/\sin\delta$  데이터와 비교하면, 주기가 작을 때 두 데이터 상호간에 상당한 차이가 있음이 관측된다. 이 차이는 주기가 작을 때  $\sin\delta$ 값이 1보다 훨씬 떨어지는 데에 기인한다. 주기가 작을 때,  $\sin\delta$ 값이 작아지는 것은 아래 문단에서 설명하는 바와 같이 항복응력의 존재와 관련이 있다. 따라서 항복응력이 있는 아스팔트바인더는 전단응력( $G^*$ ) 대신에 점탄성응력( $G^*/\sin\delta$ )을 사용해야 더욱

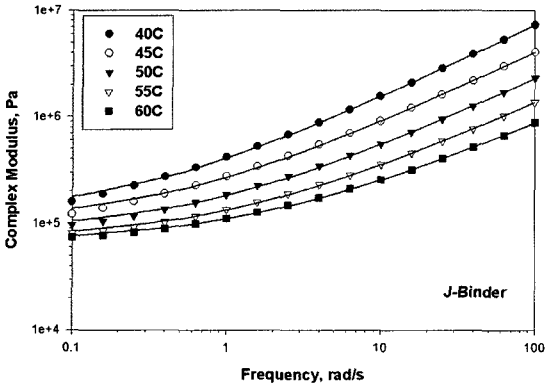


그림 8.  $G^*$  for J (식 (20))

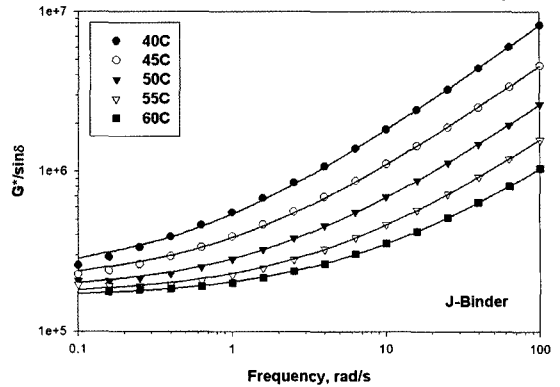


그림 9.  $G^*/\sin\delta$  for J (식 (21))

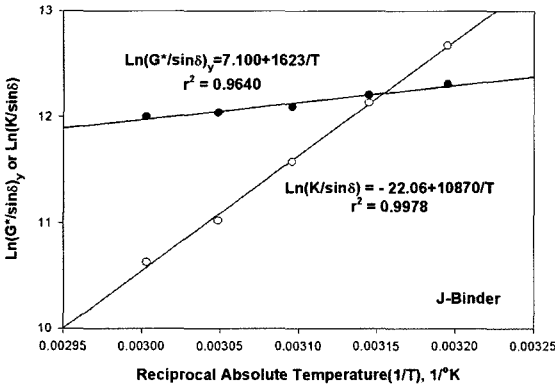


그림 10.  $K/\sin\delta$  for J (식 (16) & (12))

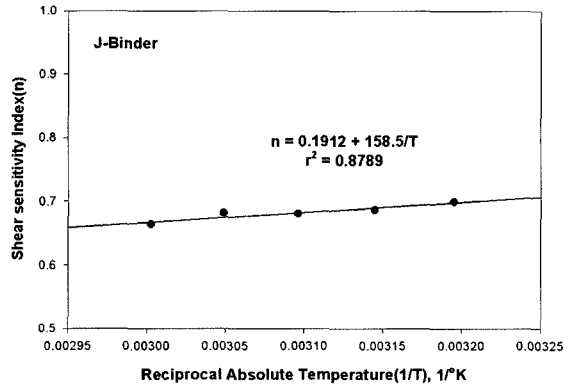


그림 11.  $n$  for J (식 (8))

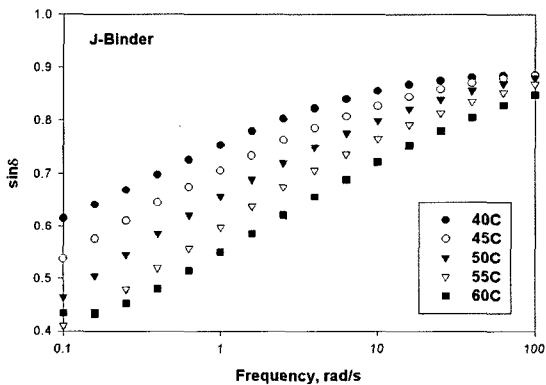


그림 12.  $\sin\delta$  for J

정확한 특성방정식이 구해진다.

마지막으로 탄성성질을 조사하기 위하여  $\sin\delta$ 를 주기의 함수로 그림 12에 표현하였다. 항복응력이

없는 경우(그림 7)와 항복응력이 있는 경우(그림 12)의  $\sin\delta$ 를 비교하면 상당한 차이가 발견된다. 그림 7에서는 주기에 관계없이 비교적 균일하고 작은 탄성( $\sin\delta$ 가 1에 가까움)을 보이는 반면에, 그림 12에서는 주기가 낮은 영역에서 탄성이 상당히 크다 ( $\sin\delta$ 가 1보다 훨씬 작아짐). 이러한 탄성은 온도가 상승하면 감소하기 보다는 오히려 증가하는 추세를 보이고 있다. 낮은 주기에서 큰 탄성을 보이다가 주기의 증가와 더불어 점차 감소하는 것은 전단시험의 초기유동이 시작될 때 응집체 구조를 형성하고 있던 시편재료가 유동을 일으키기 위하여 파괴되는 과정에서 탄성적으로 늘어났다가 전단유동이 일어나면서 점차 복원되는 것(항복응력 현상)과 관련이 있는 것으로 믿어진다. 다시 말해서 낮은 주기에서 작은  $\sin$



표 3. 식 (18)과 (19)에 의한 J-바인더 데이터의 회귀분석결과

J 바인더	온도 (°C)	그림 8 (식 (18))				그림 9 (식 (19))			
		$G'_y$ (dynes/cm <sup>2</sup> ) x10 <sup>9</sup>	K x10 <sup>9</sup>	n	r <sup>2</sup>	$G'_y/\sin\delta$ x10 <sup>9</sup>	K/sin $\delta$ x10 <sup>4</sup>	n	r <sup>2</sup>
	40	11.83	28.87	0.6973	0.99998	2.207	31.93	0.6994	0.99997
	45	10.29	16.60	0.6880	0.99993	1.994	18.56	0.6863	0.99993
	50	8.373	9.786	0.6773	0.99989	1.782	10.61	0.6805	0.99994
	55	7.041	6.190	0.6597	0.99987	1.691	6.096	0.6816	0.99985
	60	6.621	4.337	0.6357	0.99985	1.626	4.117	0.6637	0.99996

표 4. 표 3의 데이터에 대한 회귀분석 결과

J 바인더	그림 10 (식 12)	Ln(V <sub>3</sub> )	W <sub>3</sub> (=E <sub>K</sub> /R)	r <sup>2</sup>
			-22.06	10870
J 바인더	그림 10 (식 16)	Ln(V <sub>4</sub> )	W <sub>4</sub> (=E <sub>y</sub> /R)	r <sup>2</sup>
		7.100	1623	0.9640
J 바인더	그림 11 (식 8)	a	b	r <sup>2</sup>
		0.1912	158.5	0.8789

δ값은 J-개질아스팔트가 유동이 시작되기 전에 응집체의 구조를 형성하고 있다는 증거를 설명하는 반면에, 일반 스트레이트 아스팔트는 재료 간의 응집력이 거의 없는 상태라고 말할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004년 건설교통부 산학연 공동연구사업과 관련하여 한국건설교통기술평가원의 재정적 지원을 받아 수행되었기에 본 연구를 가능케 한 두 기관에 감사드립니다.

## 5. 결론

모든 아스팔트바인더는 크게 나누어 균일한 단일상을 가지는 바인더와 불균일한 다상 형태를 취하는 바인더로 구분된다. 이들 두 다른 아스팔트바인더의 구조는 유동거동에서도 차이가 있음을 지적하였고 각각에 대한 특성방정식을 새로이 제안하였다. 대체적으로 아스팔트바인더는 항복응력을 가지고 있으나(불균일 다상유체나) 없으나(균일한 단일상 유체나) 하는 차이가 있긴 하지만, 소성변형온도영역에서는 모두 지수 법칙에 따라 거동함을 밝혔다. 또한 온도변화를 고려한 특성방정식도 제안하였고, 동전단실험데이터를 통하여 제안식들이 타당함을 입증하였다. 이상의 결과들은 각 바인더의 특성을 정량화 하는데 기여할 것이다.

#### 참고문헌

1. Cross, M.M.(1965), "Rheology of Non-Newtonian Fluids: A New Flow Equation for Pseudoplastic Systems", *J. of Colloidal Sci.*, 20, pp. 417-437; Cross, M.M. (1979), *Rheological Acta*, Vol. 18, pp. 609.
2. Cox, W.P. and Mertz, E.H.(1958), *J. Polymer Science*, Vol. 28, pp. 619-622.
3. Hershel, H. and R. Bulkley (1926), *Proc. Am. Soc. Test. Mater.*, Vol. 26(2), pp. 621.

(집수 : 2004. 11. 25)