

아스팔트-골재 혼합물의 레올로지적 특성

Rheological Characterization of Asphalt-Aggregate Mixtures

허정도* · 추상혁**

Huh, Jung Do · Choo, Sang Hyuk

1. 서론

과거에 아스팔트바인더에 대한 레올로지적 특성연구는 상당히 진행되어 왔지만, 혼합물에 대한 연구는 거의 전무하다. 아스팔트바인더의 특성은 아스팔트혼합물과는 확실히 다르다. 아스팔트바인더는 균일한 단일상(單一相) 물질처럼 거동하는 데 반하여 아스팔트 혼합물은 물질의 대부분을 차지하는 골재와 그 골재를 피복하고 있는 소량의 아스팔트바인더로 구성되어 있다. 이러한 혼합물은 두 개 이상의 물질이 혼재된 다상(多相) 복합체이며, 골재와 바인더의 접촉으로 인해 수많은 계면을 형성하고 있다. 바인더와 구분되는 상기 차이점은 혼합물에 독특한 레올로지적 특성을 부여하는 데 본 연구는 이를 규명하는 데 초점을 맞추고 있다.

혼합물의 레올리지를 연구하는 데 있어서 가장 큰 장애물은 현재 사용 가능한 모든 레오메터는 아스팔트혼합물의 성질을 측정하기에 적절하지 못하다는 점이다. 즉, 혼합물을 구성하고 있는 골재입자 크기가 기존의 레오메터 장비로 측정하기에는 너무나 커서 측정이 거의 불가능한 문제가 있다. 그러나 다행히도 Tayebali et al(1994)은 버클리대학에서 개발한 SST(Simple Shear Tester)장비를 이용하여 아스팔트혼합물의 동전단 성질을 측정하는 데 성공하였다. 본 연구에서는 그들의 데이터를 혼합물의 레올로지적 성질을 연구하는 데 활용하여 아스팔트혼합물의 특성방정식을 처음으로 개발하게 되었다. 또한 이 방정식을 이용하여 측정된 데이터에 대한 레올로지적 분석을 수행하여 방정식에 대한 검증을 제공하고 있다. 이러한 방정식은 혼합물의 유동거동을 예측하는 데 사용될 수 있을 것이다.

2. 다상유체(多相流体)를 위한 물질특성방정식 고찰

문헌을 보면 다상유체의 레올리지가동에 대한 연구는 크게 두 가지로 주된 흐름을 이루고 있다. 그 중 하나는 Bingham(1922)에 의해 제안된 식에 근거를 두고 있다. 그는 점토 서스펜션(suspension)의 유동거동에 대한 연구를 수행하였고, 그 결과 이 유체는 전단유동을 시작하기 전에 반드시 항복응력(yield stress)을 나타내 보임을 관찰하였다. 이러한 관찰을 토대로 그는 유명한 Bingham 소성방정식을 제안하였는데, 이 식은 뉴턴 전단응력 식에 항복응력 항을

* 정회원 · (주)드림테크 연구소 연구소장 · (031)244-7247 (E-mail: jung_huh@hotmail.com)

** 정회원 · (주)드림테크 연구소 · 선임연구원 · (031)244-7247



$$\tau = \tau_y + \mu \cdot \dot{\gamma} \tag{1}$$

여기서 τ , τ_y , μ and $\dot{\gamma}$ 는 각각 전단응력, 항복응력, 뉴턴점도 및 전단속도를 나타낸다. 식 (1)은 전단응력이 항복응력을 극복하여야만 뉴턴유동을 일으킬 수 있음을 나타내고 있다.

수년 후, Hershel and Bulkley(1926)는 비뉴턴유체의 유동을 기술하기 위하여 Bingham 식(식 (1))을 수정하여 뉴턴점도대신에 파워법칙의 점도를 도입하였다.

$$\tau = \tau_y + m \cdot \dot{\gamma}^n \tag{2}$$

여기서 m 은 제로전단점도(η_0)의 함수인 컨시스턴시 지수(consistency index)라 하며, n 은 전단민감 지수 (혹은 파워법칙 지수)라 불린다. 식 (2)는 식 (1)에 비하여 비뉴턴 유체의 특성을 나타내는 데 어느 정도 성공적이긴 하지만 아직도 미흡한 점이 많다.

다상유체의 비선형거동을 정확하게 기술하기 위한 노력의 일환으로 Casson(1959)은 또 다른 유동식을 제안하고 있는 데, 그의 식도 항복응력을 포함하고 있다는 점에서는 위와 동일하다.

$$\tau^{(1/2)} = \tau_y^{1/2} + (\eta\dot{\gamma})^{1/2} \tag{3}$$

이 식은 전단속도가 낮은 영역에서는 비교적 성공적으로 비뉴턴유체의 유동을 예측할 수 있지만, 전단속도가 커지면 오차를 유발한다고 알려져 있다. 다상유체의 레올러지거동에 대한 Bingham의 연구에서 출발한 이러한 학파는 모두 항복응력을 중요시하는 특징이 있으나 아직도 만족할만한 특성방정식의 개발에는 이르지 못하고 있다.

다상유체의 레올러지거동에 대한 또 하나의 학파는 Einstein(1911)의 희석 서스펜션(dilute suspension) 레올러지에 대한 연구에서 출발한다. 그는 용액에 고체입자를 점진적으로 조금씩 추가시키면 용액의 점도도 첨가된 고체입자함량에 따라 상대적으로 증가한다는 사실을 관찰하게 되었다. 이러한 관찰을 토대로 특정한 매체 내에서 작용하는 입자상호간의 동역학적인 힘의 균형 식을 도입하여 다상유체의 점도증가에 대한 이론식을 처음으로 개발하였다. 이 이론식은 다상유체의 고체입자함량에 따른 점도증가에 그 주안점이 있으며, 유동에 수반되는 항복응력은 전혀 고려하지 않는 특징을 가지고 있다.

$$\eta_s = \eta_b(1 + 2.5\phi) \tag{4}$$

여기서 s 와 b 는 다상유체와 순수용액을 각각 가리키며, ϕ 는 고체입자의 부피분율을 나타낸다. 식 (4)에서 혼합물의 점도는 용액의 점도와 입자함량의 함수로 표현되고 있다는 점을 유의하기 바란다. 이 식이 제안된 이래로 농축 서스펜션(concentrated suspension)의 레올러지적 거동을 표현하기 위하여 수많은 유사한 이론식들이 제안되었다. 몇 가지 예를 들면 다음과 같다.

Thomas(1965):

$$\eta_s = \eta_b\{1 + 2.5\phi + 10.05\phi^2 + A \exp(B\phi)\} \tag{5}$$



Eilers(1941):

$$\eta_s = \eta_b \cdot \frac{25}{17} \cdot \frac{\varphi^2}{(1 - \varphi/\varphi_m)^2} \tag{6}$$

Mooney(1952):

$$\ln\left(\frac{\eta_s}{\eta_b}\right) = 2.5 \frac{\varphi}{1 - c\varphi}; 1.35 < c < 1.91 \tag{7}$$

Maron and Pierce(1956)

$$\eta_s = \frac{\eta_b}{(1 - \psi/\psi_m)^2} \tag{8}$$

위 식에서 φ 와 φ_m 는 고체입자의 부피분율과 최대 분율을 나타낸다. 이 식들은 고체입자함량을 증가시키에 따라 처음에 바인더점도로부터 시작하여 어떻게 혼합물점도가 증가하는 가를 보여주며, 부피분율이 최대가 되었을 경우에 혼합물점도도 한계점에 도달함으로 그 이상 고체입자를 첨가할 수 없음을 시사하고 있다. 즉, 이 식들은 바인더점도와 혼합물점도 사이의 상관관계를 나타낸다. 위 식들을 통하여 혼합물점도가 알려지면, 전단응력은 다음과 같이 계산된다.

$$\tau = \eta_s \cdot \gamma \tag{9}$$

일반적으로 혼합물은 고체입자의 존재로 인하여 수많은 계면이 존재하는 데, Einstein형의 식들은 이들 계면에 의한 표면장력은 전혀 고려하지 않고 순수하게 입자상호간의 움직임에 의한 균형관계만을 고려하여 개발한 문제점이 있다. 따라서 이 모델들은 표면장력이 유동에 큰 영향을 미치는 낮은 전단 속도 영역에서는 심각한 오류를 발생한다. 한편 Bingham형의 식들은 점도와 고체입자함량과의 관계는 제공하지 못하지만 계면문제에 의해 발생한다고 믿어지는 항복응력을 표현하는 데는 성공하고 있다. 다상유체는 유동을 일으키기 전에 반드시 항복응력을 수반하는 점을 고려할 때 아스팔트혼합물 연구에 Bingham형의 식을 채택하는 것이 적절하다고 사료되어, 본 연구에서는 이 식을 기초로 한 새로운 이론식을 제안하고자 한다.

3. 혼합물의 미세구조와 항복응력의 정의

아스팔트바인더는 여러 분자의 복잡한 혼합물로서 극성그룹(아스팔텐과 극성 방향족화합물)과 비극성그룹(대부분 지방족과 약간의 포화 고리화합물)으로 크게 나눌 수 있다. 극성그룹은 골재와의 전기적인 친화력으로 인해 고체입자표면에 유인되어 접촉되는 반면에 비극성그룹은 입자표면에서 떨어져 위치한 다른 비극성화합물과 어울린다. 그 결과 혼합물 전체를 고려해 볼 때, 전기적으로 균형을 이룬 안정된 구조를 형성한다. 이렇게 전기적으로 안정된 구조는 아스팔트바인더를 매체로 하여 입자들 간에 강한 결집력을 형성한 삼차원의 망상구조 형태를 띈다. 이렇게 안정된 구조하에서는 외부로부터 응력을 받으면, 통상 이 구조를 유지하고자하는 저항력을 보인다.



즉, 외부응력이 다상유체에 작용하면, 이 혼합물은 응력을 받는 즉시 탄성체처럼 탄성변형을 보여 변형에 저항하다가, 가해진 응력이 혼합물입자사이에 존재하는 응집력을 초과하면 삼차원의 망상구조는 파괴되기 시작하고 이로 인해 탄성저항을 잃게 된다. 이 시점에서 입자사이에 존재하던 응집력이 파괴되어 입자개개의 움직임이 자유로워지고, 따라서 추가적으로 가해지는 외부응력은 혼합물의 전단유동을 일으키는 데에 소모된다. 망상구조의 응집력을 파괴시키고 초기의 유체유동을 가능하게 하는 응력을 여기서는 항복응력이라고 정의한다. 이 항복응력은 각 혼합물의 응집력에 따라 그 크기가 달라지며, 또한 응집력은 바인더점도, 계면접착력, 입자크기, 존재하는 계면의 크기, 온도 등에 따라 달라진다.

4. 혼합물의 새로운 특성방정식 구성

다상유체의 유동은 항복응력의 대가를 치루어야만 가능하다. 다시 말하면, 가해진 전단응력에서 항복응력을 제한 잔여 응력만이 유체의 유동에 직접적으로 기여하는 데, 그 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 혼합물의 항복응력에 해당하는 응력이 초기 다상유체의 응집력을 파괴하는 데 손실되기 때문이다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \tau_y = \eta \cdot \dot{\gamma} \tag{10}$$

일반화된 뉴턴 점도모델 (Generalized Newtonian Viscosity Model)이 식 (10)의 점탄성 다상유체의 유동특성을 기술하기 위하여 채택된다. 이 모델에서는 전단점도가 전단속도의 함수로 표현된다. 어떠한 일반화된 뉴턴 점도모델도 식 (10)에 사용이 가능하나 여기서는 실제응용에 널리 사용되는 Cross모델(1979)이 적용하기가 간편하여 선택된다. 이 모델에 대한 자세한 내용은 허정도와 남영국(1999)의 논문에서 다루고 있으니 참조하기 바란다.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}} \tag{12}$$

여기서 λ 와 n 는 각각 이완시간(relaxation time)과 전단민감지수(shear susceptibility index)를 나타낸다. 식 (11)은 아스팔트바인더의 점도를 기술하는 데 적당하다고 허정도와 남영국(1999)은 보고하고 있다. 이제 식 (10)과 (11)을 결합하면 항복응력의 특성을 지닌 혼합물 특성방정식이 구성된다.

$$\tau = \tau_y + \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}} \tag{12}$$

일반적으로 전단응력은 전단점도와 전단속도의 곱으로 표현된다. 식 (12)를 이러한 형식으로 다시 쓰면 혼합물점도의 표현이 얻어진다.

$$\tau = \eta_s \dot{\gamma} \text{ and } \eta_s = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^{1-n}} \tag{13}$$

식 (13)에서 전단속도가 아주 작아질 때 유한한 값을 가진 항복응력으로 인하여 혼합물 전단점도(η_s)



는 무한대로 커진다는 사실을 유의하기 바란다.

4. 분석 및 해석

최근에 Harvey et al(2000)이 발표한 논문에 의하면 아스팔트혼합물에 대하여 단순전단시험(Simple Shear Test, SST) 장비로 전단주기시험(Shear Frequency Sweep)을 행한 데이터를 발표하고 있다. 이 시험은 세 다른 온도 (20, 40 및 57°C)와 낮은 세 전단 변형율 (0.0001, 0.0005 및 0.001)에서 복합전단 계수를 주기의 함수로 측정하였다. 이 데이터 중 전단 변형율을 0.0005로 고정시키고 세 다른 온도에서 측정된 데이터를 취하여 식 (12)의 타당성을 검증하였다. 그림 1에 이들 데이터는 기호로 나타내고 회귀분석한 결과는 선으로 표시하고 있다. 그림에서 보듯이 식 (12)가 혼합물의 전단유동거동을 예측하는 데 성공적임을 알 수 있다. 이러한 예측을 통하여 혼합물의 특성을 규정하는 고유의 물리적 성질인 항복응력(τ_y), 혼합물 제로전단점도(η_0), 이완시간(λ) 그리고 혼합물 전단민감지수(n)가 산정된다. 그림 1의 회귀분석을 통하여 얻어진 이들 물질 상수들은 참고로 표 1에 수록되어 있다.

이들 물성 중에서 아스팔트바인더와 혼합물 사이에 다른 점이 있다면 혼합물은 항복응력이 있는 데 반하여 바인더는 이 성질이 없다는 것이다. 따라서 항복응력이 있는 경우의 영향을 알아보기 위하여, 표 1에서 40°C에 해당하는 제로전단점도, 이완시간, 전단민감지수를 취하여 고정시키고, 항복응력만을 변화시켜가며 그 값을 도표로 그렸다. 그 결과를 그림 2에서 보여주고 있다. 항복응력이 있을 때와 없을 때는 주기(혹은 전단속도)가 낮을 때 그 영향이 극대화되고 주기가 높아지면 미미해진다는 사실이 목격된다.

그림 1에 나타난 결과를 식 (13)으로 표현하면 항복응력에 따라서 혼합물점도가 어떻게 변화하는가를 알아볼 수 있다. 식 (13)에 의한 결과는 그림 3에서 보여준다. 이 그림에서 항복응력이 존재하면 낮은 주기에서 혼합물점도가 증가하게 됨을 알 수 있으며, 증가하는 경향은 항복응력이 클 때가 작을 때보다 더욱 커진다.

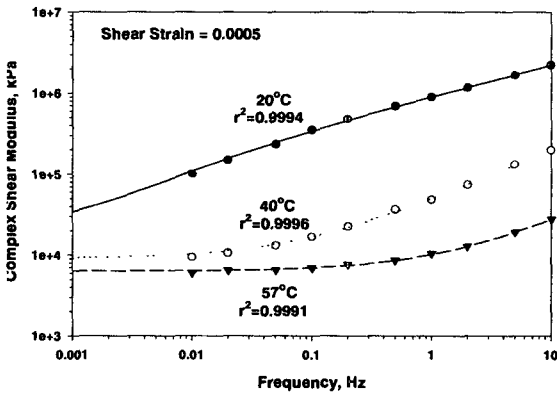


Fig 1. Rheological characteristics of asphalt mixtures and regression by Eq.(12).

표 1. 식 (12)의 회귀분석에서 얻은 상수 값

온도	τ_y	η_0	λ	n	r^2
20°C	18,000	2.178e7	172.7	0.385	0.9994
40°C	9,200	2.005e5	34.70	0.615	0.9996
57°C	6,400	1.246e4	11.76	0.670	0.9991



항복응력이 혼합물점도에 미치는 영향을 더 자세히 알아보기 위하여 그림 2의 경우를 복합전단계수 대신에 복합전단점도의 항으로 표현하였다. 그 결과는 그림 4에서 보여주고 있다. 그림 4에서 항복응력이 제로인 경우(아스팔트 바인더와 같은 단일 유체)에는 전단속도가 감소함에 따라 점도도 일정한 값에 접근하는 경향을 보이지만, 항복응력이 있는 다상혼합체의 경우에는 전단속도가 감소함에 따라 점도는 오히려 증가하는 추세를 보인다. 그리고 이 추세는 항복응력이 클수록 더 커진다.

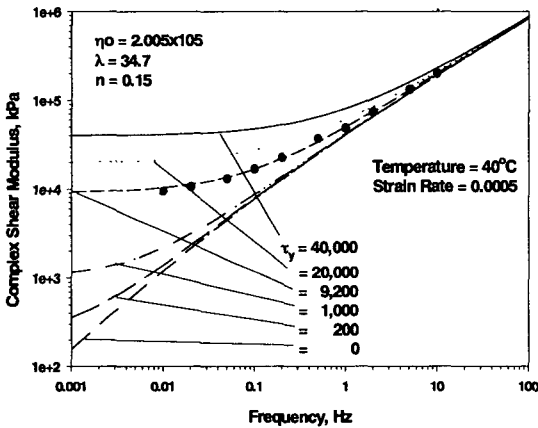


Fig 2. Yield stress effect on asphalt mixtures

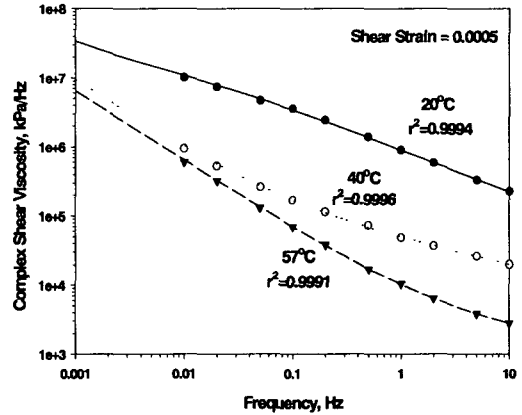


Fig 3. Rheological characteristics of asphalt mixtures and regression by Eq.(13)

5. 결론

다상 유체인 아스팔트혼합물은 아스팔트바인더와 같은 단일 유체와는 전혀 달리 특이한 레올로지적 유동특성을 보인다. 즉, 아스팔트바인더의 유동에서 찾아볼 수 없는 항복응력이라는 개념이 혼합물의 유동거동에 나타난다. 이 응력이 존재하는 이유는 골재와 아스팔트바인더 사이에 수많은 경계면이 존재하고 있으며 이 경계면에 작용하는 접착력이 삼차원의 망상구조를 형성하기 때문인 것으로 믿어지며, 혼합물이 유동을 일으키기 전에 반드시 이 구조를 파괴하는 데 필요한 항복응력을 극복해야만 유동이 가능해 진다. 이러한 개념에서 출발하여 혼합물의 물질특성방정식을 만들었으며, 이 방정식이 혼합물의 유동거동을 예측하는 데 성공적임을 보여주었다. 또한 이 특성방정식은 네가지 물질상수(항복응력, 혼합물 제로전단점도, 혼합물 이완시간, 혼합물 전단민감지수)를 가지고 있으며 이들에 따라 혼합물의 유동특성이 결정된다. 본 연구에서는 이들 중 항복응력에 관한 분석을 실시하여 항복응력이 복합전단 계수와 복합전단점도에 미치는 영향을 알아보았다. 그 결과 주기가 낮은 영역에서 항복응력이 이들 두 변수에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 특히 혼합물에 자주 나타나는 비 선형특성은 이 항복응력에 책임이 있는 것처럼 보인다.



참고문헌

1. 허정도 · 남영국(1999), "아스팔트 도로포장을 위한 바인더점도 데이터베이스 구축", 대한토목학회 논문집, 제 9권, 제 3-4호, pp. 629-636.
2. Bingham, E.(1922), "Fluidity and Plasticity", McGraw-Hill, New York, pp. 215
3. Casson, N.(1959), "Rheology of disperse systems", Editor C.C.Mill, Pergamon, London, pp. 84
4. Cross, M.M.(1979), Rheological Acta, Vol. 18, pp. 609
5. Eilers, H.(1941), Kolloid-Z., Vol. 97, pp. 313
6. Einstein, A.(1911), Annual Phys., Vol. 34, pp. 591
7. Harvey, J., I. Guada and F. Long(2000), "Effects of material properties, specimen geometry, and specimen preparation variables on asphalt concrete tests for rutting", AAPT, Vol. 69, pp. 236-268
8. Hershel, H. and R. Bulkley(1926), Proc. Am. Soc. Test. Mater., Vol. 26(2), pp. 621
9. Maron, S.H. and P.E. Pierce(1956), J. Colloid Science, Vol. 11, pp. 80-95
10. Mooney, M.(1952), J. Colloid Science, Vol. 6, pp. 162
11. Tayebballi, A.A., B.-W. Tsai and C.L. Monismith(1994), "Stiffness of asphalt-aggregate mixes", SHRP-A-388, National Research Council, Washington, D.C., pp. 35-47, 93-101
12. Thomas, D.G.(1965), J. Colloid Science, Vol. 20, pp. 267