



# 아스팔트포장 혼합물의 내부구조와 소성변형 저항물성

## The Internal Structure of Asphalt Pavement Mixtures and A Rut-Resistant Property

허정도\*

Huh, Jung Do

### 1. 서론

지금까지 아스팔트혼합물은 골재 분포도를 조정함으로써 조골재와 조골재 사이에 세 골재를 충전시켜 골재 간의 맞물림 (interlocking)을 극대화하고, 각 골재를 피복하고 있는 아스팔트바인더는 골재와 골재를 결합시키는 결합제 역할을 하여 골재의 이탈을 방지함으로써, 아스팔트포장의 전체적인 역학적 강도를 발전시킨다고 생각하여 왔다. 이러한 논리가 전혀 틀린 것은 아니지만 어디까지나 육안의 관찰에 근거한 피상적인 결과로서 혼합물의 역학적 구조형성과 이 구조형성에 작용하는 결합력을 간과하고 있다. 상기의 피상적인 접근은 과학적 원리와의 상당한 거리가 있으며 따라서 아스팔트포장의 각종 문제해결에 크게 도움이 안 된다. 실제, 아스팔트혼합물 내부에 일어나는 역학적 세부 메커니즘을 충분히 이해하여야 아스팔트포장에 일어나는 공용성 문제에 대한 새로운 해결방안이 가능할 것이다. 따라서 아스팔트포장의 내부구조형성과 이러한 구조가 아스팔트포장의 유동과 소성변형에 미치는 영향을 살펴보고자 함이 본 연구의 핵심내용이다.

### 2. 분산체의 내부응력

먼저 액체 속에 멀리 고립되어 있는 고체입자 사이에 작용하는 힘을 살펴보자. Israelachvili(1)에 의하면 극성액체 매체에 잠겨있는 고체입자 사이에 작용하는 van der Waals 힘은 세가지 유형, 즉, 유인, 배열 및 분산의 힘으로 구성된다고 보고하고 있다. 이들 중, 분산력은 다른 두 힘에 비해 훨씬 지배적으로 작용하고 있다. 반면에, 비극성 분자들로 이루어진 액체 매체에 고립되어 있는 고체입자들도 란든 분산력으로 알려진 Van der Waals 힘을 경험한다. 이러한 분산력은 항상 액체속의 입자들을 서로 끌어당기는 작용을 하고 있다. 이러한 분산력의 영향은 Otsubo & Umeya(2)가 지적한 바와 같이 입자 수가 많아져 액체 속 입자 간의 거리가 가까울수록 더욱 커진다. 즉,  $F/r^4$  로서 입자 간 거리의 네제곱으로 나눈 값에 해당하는 분산력이 입자상호 간을 끌어당기는 힘으로 작용함으로써 입자 간 거리가 가까워지면 (입자의 농도가 커지면) 흡인력은 기하급수적으로 커진다. 아래 <그림 1>은 고체입자간의 거리에 대한 입자 간의 힘의 크기를 보여준다.

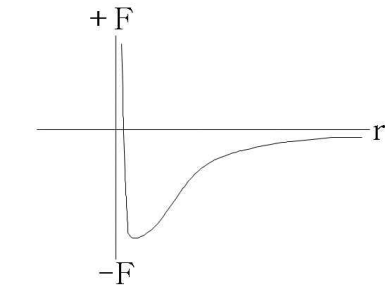
### 3. 아스팔트혼합물의 내부구조

온도가 10℃ 이상에서의 아스팔트 콘크리트 혼합물은 골재입자가 고농도로 분산되어 있는 다상유체로 고려할 수 있는데, 다상유체로 보는 이유는 골재들을 결합하고 있는 아스팔트바인더 중의 일부 분자들이 이 온도에서 완전히

\* 정회원 · (주)뉴페이브 대표이사 · 공학박사 · (032)573-6631 (E-mail: jung\_huh@hotmail.com)



고체화하지 않고 액체 상태로 존재하고 있기 때문이다. 특정 혼합물에서 아스팔트바인더는 극성그룹 (아스팔텐과 극성 방향족)과 비극성그룹 (대부분 포화 탄화수소와 환상 탄화수소)으로 구성되어 있다. 극성그룹은 골재표면의 반대 극성을 가진 산화물에 서서히 유인되어 접촉하는 데, 이는 두 극성 사이에 존재하는 전기적 흡인력 (즉, 런던 분산력)에 기인한다. 이를 과학적으로 측정할 수 있는 물성으로 표현하면, 골재와 아스팔트바인더의 경계면에서의 표면장력( $\gamma$ )이라 할 수 있으며 흡인력의 정도에 따라 접촉각( $\theta$ )을 나타낸다. 한편 비극성그룹은 골재표면과는 반대로 위치하여 비극성그룹끼리 함께 결합한다. 게다가 아스팔트바인더로 피복된 고농도의 골재입자들은 각기 곡률반경을 가지고 있어서, 상기 표면장력과 곡률반경( $r_1$ =일차 곡률반경;  $r_2$ =이차 곡률반경)은 골재와 아스팔트바인더 사이에 모세관압력( $P_c$ )을 생성하여 골재와 골재 간에 강한 결합력을 형성한다.



(그림 1) 분산 체의 입자간격에 따라 작용하는 힘의 크기

$$P_c = \gamma \cdot \cos\theta \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

상기 모세관압력이 모든 골재입자와 아스팔트바인더 사이에 작용함으로써 전기적으로 안정된 혼합물구조를 형성한다. 이러한 구조물은 Otsubo & Umeya(2)가 언급한 바와 같이 강한 응집체 (혹은 골재와 골재를 연결하는 삼차원의 연결구조)를 만들어 쉽게 파괴되지 않는다. 다시 말하면, 아스팔트 콘크리트 혼합물과 같은 다상유체는 아스팔트바인더로 모든 골재입자들을 결합함으로써 삼차원의 망상구조를 형성하는 데, 이러한 구조를 형성하는 물리적 힘은 모세관압력에서 찾을 수 있다. 입자와 입자 간의 거리가 가까워질수록 곡률반경은 더욱 작아져서 모세관압력이 커질 수 있고, 또한 골재와 아스팔트바인더 간의 표면장력이 커져도 모세관 압력이 커질 수 있다. 모세관압력이 커지면 아스팔트혼합물 전체의 결합력은 더욱 증가한다.

이러한 모세관압력의 원리를 이용하여 Gillespie & Settineri(3)는 두개의 동일한 구형입자를 다리처럼 연결해 있는 모세관액체에 작용하는 접착력을 이론적으로 계산하고 있다. 이러한 표현은 입자의 곡률반경이 복잡한 형태를 취함으로써 이론식도 복잡한 형태를 취하고 있다.

또한 Methrotran & Sastry(4)는 크기가 다른 두개의 고체입자를 연결하는 시계추모양의 액체에 대한 접착력을 계산하는 이론식을 유도한 바 있다. 이들 표현들은 아스팔트 콘크리트 혼합물의 내부구조에 작용하는 결합력에 대한 통찰력을 제공한다.

### 3. 아스팔트혼합물의 변형특성과 항복응력

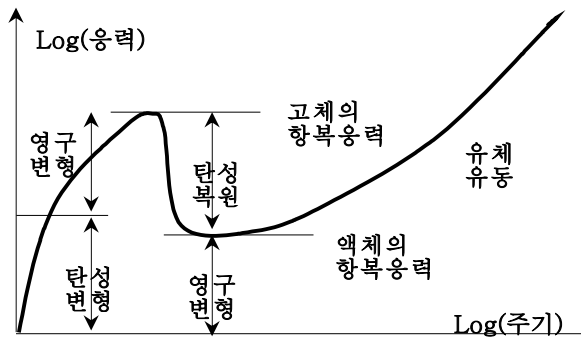
상기 삼차원의 망상구조를 가진 아스팔트 콘크리트 혼합물에 특정 전단응력을 가하면, 이 혼합물은 변형 초기에 탄성변형을 보인다. 이 탄성변형의 크기는 아스팔트바인더의 화학적 특성 (표면장력, 점도, 등)과 골재특성(골재함량, 형상, 크기 및 분포도, 등)에 따라 달라질 수 있다. 이러한 탄성변형은 전단응력에 저항하는 혼합물의 망상구조를 표현하며, 망상구조는 아스팔트바인더의 접착력에 기인한다, <그림 2>에 보이는 것처럼 어느 정도 탄성변형이 진행되는 동안 바인더분자의 일부가 골재표면에서 분리되면서 서서히 영구변형이 일어나기 시작한다. 그러나 대부분의 혼합물은 원래의 망상구조를 그대로 유지하고 있어서 구조자체에 큰 변화는 없다. 그러나 적용응력이 마침내 특정 혼합물의 전체 구조력을 초과하면, 망상구조를 형성하던 접착력에 심각한 파괴가 일어난다. 이러한 구조의 파괴점은 아스팔트바인더와 골재를 결합하고 있는 접착력의 완전한 이완을 의미한다. 이러한 구조 파괴점에서의 응력을 고체의 항복응력이



라 정의한다. 그러나 여기서 고체라 함은 고체와 같은 거동을 보이지만 탄성과 영구변형을 보이기 때문에 엄격히 말해서 고체에 가까운 또 하나의 점탄성 액체라 함이 알맞을 것이다. 어쨌던 여기서의 고체라 명명한다. 재료의 구조가 파괴되면 골재는 구속하던 결합력으로부터 해방되어 자유롭게 움직일 수 있다. 이 때 혼합물에 가해진 전단응력 중에서 탄성변형에 해당하는 응력은 구조의 파괴와 더불어 즉시 복원이 이루어지지만, 영구변형에 해당하는 응력은 복원되지 않고 그대로 남는다. 외부응력에 반응하는 이러한 변형과 파괴거동은 거의 고체의 거동과 동일하다. 따라서 변형초기의 아스팔트혼합물(다상유체)의 거동은 점탄성 변형과 파괴라 할 수 있다.

이제 파괴점 이전의 초기응력 중 영구변형을 일으키는 데 소모된 응력(잔존응력)을 초과하는 전단응력을 혼합물에 가하면 구속으로부터 자유롭게 된 혼합물은 전적으로 유체유동을 일으킨다. 이때부터 고체변형에서 벗어나 유체유동이 일어난다고 볼 수 있다. 따라서 아스팔트혼합물 (다상유체)은 외부응력을 받으면 고체변형과 유체유동을 동시에 보이는 물질이라 정의할 수 있다. 이것은 전적으로 물질의 상이 두개 이상으로 구성되어 있어서 각기 다른 상 사이에 수많은 경계면을 형성하는 데에 기인한다. 이처럼 유체유동을 가능하게 하는 최소의 응력을 유체유동을 위한 항복응력이라 정의한다. 상기에서 설명한 응력과 전단속도와의 역학적 관계를 <그림 2>가 표현해주고 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 완전한 재료파괴와 탄성복원이 이루어진 이후부터는, 유체유동의 항복응력보다 큰 전단응력을 아스팔트혼합물에 가하면 항복응력을 초과하는 응력만큼 유체유동을 일으킨다. 통상적으로 대부분의 데이터 측정은 주기(혹은 전단속도)범위가 10-2/s-102/s 이내에서 이루어짐으로 파괴점이나 그 이전의 변형곡선에 대한 데이터는 측정되지 않는다. 변형의 전 과정을 측정하기 위해서는 측정주기범위가 대략 10-8/s-102/s는 되어야 한다. 선택된 주기범위에 따라 해당하는 측정데이터 값을 얻게 됨으로 원하는 데이터를 얻기 위해서는 주기범위를 올바르게 선택해야 된다.



<그림 2> 다상유체의 변형 메커니즘

전체 변형곡선을 보기 위해서는 낮은 주기에서 측정해야함으로 오랜 측정시간을 필요로 한다. 이상은 다상유체로서 탄성성질을 일부 가지고 있는 아스팔트혼합물의 전형적인 유동거동을 분석하였다.

다상유체라 하더라도 고체와 유체를 합쳐서 하나의 항복응력을 가지는 경우도 있다. 앞에서는 고체와 유체의 항복응력이 제 각기 따로 분리되어 있는 경우를 살펴보았다. 하나의 항복응력이나 아니면 둘이나 하는 것은 전적으로 다상유체의 점탄성성질 중 탄성성질에 달려있다. 전적으로 점성인 다상유체는 재료파괴 후 탄성복원이 전혀 없으므로 고체와 유체의 항복응력이 일치하게 되어 하나의 항복응력만을 보일 것이다. 반면에 점성과 탄성이 함께 있는 점탄성 다상유체는 고체의 항복응력과 유체의 항복응력을 각각 따로 나타내며, 고체 항복응력이 액체 항복응력에 비하여 탄성복원에 해당하는 만큼 크게 나타난다. 이러한 측정을 통해서 점탄성 다상유체의 점성과 탄성의 상대적인 크기를 측정하는 것도 가능하리라 예상된다.

일반적으로 항복응력은 많은 변수들의 함수이다. 예를 들어, 바인더와 입자와의 경계면에서의 표면장력 (경계면에서의 접착력 형성), 바인더의 점도(입자의 유동수반), 바인더와 입자 사이의 점도차이(입자가 기체, 액체 혹은 고체냐에 따라 입자의 변형도 일어남), 입자의 농도, 크기, 형상 및 분포도(입자의 표면적, 곡률반경, 입자간의 거리차이에 영향), 다상재료의 온도(바인더의 점도와 표면장력에 영향), 등을 들 수 있다. 이러한 변수들은 삼차원의 망상구조를 강하게 혹은 약하게 구성하여 점탄성성질을 보이는 데, 상당한 탄성성질이 있어서 파괴에 저항하는 힘이 클수록 강한 망상구조를 형성한다고 볼 수 있다.



#### 4. 소성변형과 항복응력과의 관계

다상유체(아스팔트혼합물)의 소성변형은 유체의 항복응력(점성)보다는 고체의 항복응력(점탄성)에 직접적으로 관련되어 있다고 보는 것이 타당하다. 그 이유는 고체의 항복응력이 먼저 일어난 후에 유체의 항복응력이 일어나며 고체의 항복응력(점탄성)을 극복해야만 유체의 항복응력(점성)이 결정되기 때문이다. 또한 일반적으로 고체의 항복응력이 유체의 항복응력보다 탄성변형만큼 크므로 극복하기가 더욱 어렵다. 이처럼 고체의 항복응력이 소성변형에 저항하는 아스팔트혼합물의 내부응력이라 할 수 있으므로 포장의 소성변형을 고려할 때, 유체의 항복응력(점성)보다는 고체의 항복응력(점탄성)을 고려함이 타당하다. 상기 논리에 따르면 고체의 항복응력이 클수록 소성변형저항성은 더욱 커지기 때문에 고체의 항복응력을 키우기 위해서는 강한 삼차원의 망상구조를 형성하는 것이 중요하며, 이러한 망상구조는 전적으로 점탄성성질의 크기에 달려있다.

#### 5. 결론

아스팔트포장의 소성변형과 관련된 포장재료 내부의 세부구조를 처음으로 제안하였다. 아스팔트 콘크리트 혼합물은 골재와 바인더 사이의 모세관압력이 존재하며 이에 의해 삼차원의 망상구조를 형성하고 있음을 밝혔다. 이러한 망상구조는 외부응력을 받으면 고체항복응력과 액체항복응력을 보임을 설명하였다. 소성변형과 관련된 재료의 성질은 고체항복응력임을 또한 주장하였다.

#### 참고문헌

1. J.N. Israelachvili, "Intermolecular and surface forces", Acad. Press, 1985, New York, pp. 137-160.
2. Y. Otsubo and K. Umeya, "Rheological Properties of Silica Suspensions in Polyacrylamide Solutions", J. Rheol., 1984, Vol. 28(2), pp. 95-108.
3. T. Gillespie and W.J. Settineri, "The Effect of Capillary Liquid on the Force of Adhesion between Spherical Solid Particles," J. Coll. & Interfacace Sci., 1967, Vol. 24, pp. 199-202.
4. V.P. Mehrotra & V.S. Sastry, "Pendular Bond Strength between Unequal-Sized Spherical Particles," Powder Tech., 1980, Vol. 25, pp. 203-214.