

간접인장시험의 포장공용성에 대한 새로운 응용

New Application of Indirect Tension Tests to Pavement Performance

허 정 도* 윤 무 희**
Huh, Jung Do Yoon, Moo Hee

1. 서론

지금까지 아스팔트혼합물에 대한 간접인장시험은, 마찰시편을 준비하여 25℃에서 50.8 mm/분의 속도로 측정하여 혼합물의 인장응력이나 압축응력을 계산하여 왔다. Roberts et al (1996)에 의하면 이러한 시험으로 혼합물의 습윤처리 전 후의 인장응력을 측정함으로써 수분 민감성을 평가하거나, 인장응력 값으로 아스팔트 혼합물의 균열발생 가능성을 평가할 수 있다고 설명하고 있다. 또한 간접인장시험의 파괴시에 얻어지는 인장 변형율은 균열발생 가능성을 예측하는 데 유용하다고 설명한다. 그러나, 상기 설명은 간접인장시험과 포장공용성(소성변형이나 피로균열)과의 관계를 구체적으로 규명하는 데는 실패하고 있다. 본 연구에서는 간접인장과 같은 단순시험이 소성변형이나 피로균열과 같은 포장 공용성을 정성적으로 나타낼 수 있음을 밝히고, 혼합물 배합설계에 사용되는 마찰시험을 대체할 유력한 대안이라 주장한다. 즉, 단순 간접인장시험이라는 하나의 시험을 통하여 특정 아스팔트혼합물의 소성변형은 물론이고 피로균열을 정성적으로 평가할 수 있다는 것은 특별한 매력이 아닐 수 없다. 소성변형과 피로균열은 각기 다른 역학적 메카니즘에 의해 지배됨으로 소성 변형 저항성은 우수하지만 피로균열 저항성이 약하거나, 반대로 소성변형 저항성은 약하나 피로균열 저항성이 우수한 경우가 허다하다. 이러한 아스팔트혼합물의 포장공용성 관련 특성 상 소성변형과 피로균열 저항성을 둘 다 동시에 측정할 수 있는 시험법의 개발은 혼합물 배합설계에 있어서 필요 불가결한 요소이다. 그러나 지금까지 소성변형 저항성만을 대변하는 마찰시험을 수행하여 배합설계를 행함으로써 피로균열이라는 또 다른 측면은 고려하지 못하였다. 그러나 간접인장시험은 하나의 시험으로 소성변형뿐만 아니라, 피로균열도 대변할 수 있다는 점에서 혼합물 배합설계를 한 차원 업그레이드 할 수 있는 측정법으로 평가된다. 특히 국내와 같이 환경적으로 더운 여름철과 추운 겨울철을 동시에 갖고 있는 지역에 있어서는 더욱 그러하다.

2. 이론적 전개

2.1 소성변형 예측

소성변형을 예측하는 데는 두 다른 시험법이 존재한다. 하나는 한정압력(confinement pressure) 하에서 시험하는 방법이고 다른 하나는 한정압력이 없는 상태에서 시험하는 방법이다. 한정압력 하에서 시험하는 방법에는 삼축압축 크립시험, 바퀴주행시험 및 혼합물 침입도시험 등이 있고, 한정압력이 아예 없거나 부분적으로 없는 상태에서 시험하는 방법에는 마찰시험, 간접인장시험 및 Kim's 시험 등이 있다. 그러나 이들 시험의 공통점은 그 형태에는 차이가 있으나 모두 재료의 파괴점(Material Damage Point)을 시험결과에 나타내 보인다는 점이다. 이것이 시사하는 바는 재료 파괴점은 시험방법과는 무관하며 재료 특성이라는 사실이다. 따라서 물질의 특성인 파괴점을 측정하는 방법에는 위에서 열거한 바와 같이 여러 다른 시험법이 존재할 수 있다. 재료공학이나 기계공학의 파괴역학(fracture mechanics)에서 재료의 구조를 파괴하기 위하여 소요되는 응력, 즉, 항복응력은 물질 고유의 특성으로 잘 알려져 있다.

아스팔트 혼합물은 유기물질인 아스팔트, 무기물질인 골재 그리고 공기로 채워진 공극으로 구성된 삼상의 다른 상으로 구성되어 있다. 이 때문에 각기 다른 상의 경계면에서 계면장력(surface tension)이 존재하고 이

* 정회원 · 인천대학교 첨단도료교통연구센터 수석연구원 · 공학박사 · (032)573-6631 (E-mail: jung_huh@hotmail.com)

** 정회원 · 동아건설 인천갑문 현장소장, 인천대학교 박사과정 수료 · (032)761-9715 (E-mail: willyoon@hanmail.net)

로 인해 모세관 압력(capillary pressure)이 생기고 각 골재를 결합시키는 결합력이 형성된다. 항복응력이란 이 결합력을 파괴하는 데 소요되는 응력으로 정의될 수 있다. 이러한 물질고유의 성질인 파괴점에서의 응력, 즉, 항복응력이 소성변형깊이를 나타내는 대표적인 재료물성임을 허정도(2005)가 밝히고 있다. 다시 말하면, 마찰시험, 간접인장시험 또는 Kim's 시험에 있어서 재료구조의 파괴를 경험하게 하는 피크 값은 다른 어떤 물질 고유의 성질인 항복응력을 측정하는 것이다. 다만 측정하는 조건과 방법의 차이로 인하여 상대적인 값에서 상당한 차이가 있을 수 있지만 근본적으로는 서로 연관성을 가질 수밖에 없다. 일례로서,

Bonvino(1990)는 마찰안정도(S)와 간접인장응력(σ_i)과의 사이에 서로 상관관계가 존재하며 이를 그림 1을 통해 보여 주고 있다. 이 때의 상관관계식은 다음과 같다;

$$\sigma_i = 1.351 + 0.5934 \cdot S \quad ; \quad r^2 = 0.9697 \quad (1)$$

이를 확인하기 위하여 본 저자도 19mm 표준 밀입도 혼합물에 대한 마찰공시체를 만들어서 마찰안정도 시험과 간접인장 시험을 수행하였으며, 위에서 언급한 상관관계를 확인할 수 있었다. Kim Test의 변형강도와 마찰안정도 혹은 간접인장응력 사이에도 서로 상관관계가 존재할 것으로 사료되나 불행히도 데이터가 없어 확인할 길이 없다. Kim's Test를 고안한 김광우 등(2002)은 시험결과 얻어진 변형강도와 바퀴주행시험에서 얻어진 영구변형과의 사이에 밀접한 상관관계가 존재한다고 주장하고 있다. 이것은

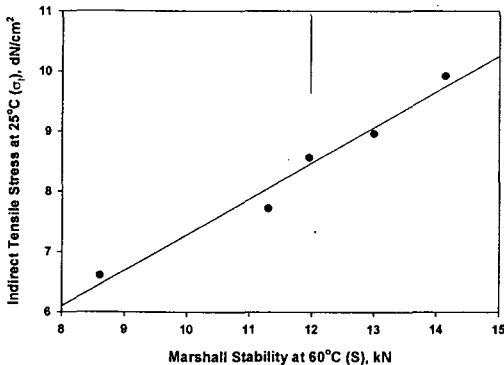


그림 1. 마찰안정도와 간접인장 응력과의 관계

충분히 예견되는 일이다. Kim's Test도 간접인장시험이나 마찰안정도와 같이 항복응력을 측정하는 것이며, 이 항복응력은 소성변형저항성을 나타내는 물질의 특성이기 때문이다.

삼축 압축 크립 시험, 반복동하중시험, 바퀴주행 시험 혹은 혼합물 침입도 시험은 상기에서 언급한 간접 인장 시험, 마찰 시험 혹은 Kim's Test와는 다르게 하중-변형 곡선 상에 최대 값(peak value)을 보이지 않는다. 그 주된 이유는 한정압력(confinement pressure)의 표시방법이 마찰, 간접인장 및 Kim's 시험과는 다를 뿐이다. 이러한 시험에 있어서의 재료 파괴점(항복점)은 그림 2(삼축 압축 크립시험), 3(반복동하중시험) 및 4(혼합물 침입도 시험)와 같이 응력-변형 곡선 상에 선형변형을 보이던 곡선이 갑자기 급격한 변형으로 선회하는 점으로 표시된다. 그림 2와 3은 Kaloush and Witzac(2002)의 연구결과에서 발췌한 것이고 그림 4는 밀입도 표준 19mm에 대해 본 저자가 직접 실험한 혼합물 침입도시험 결과이다. 그림 2에서는 Flow Time, 그림 3에서는 Flow Number 그리고 그림 4에서는 파괴하중에 대한 표현을 나타내고 있지만, 근본적으로 모두 특정 혼합물의 항복응력(파괴점)에 대한 표현을 하고 있다. 이러한 사실은 주어진 아스팔트 혼합물에 대한 소성변형 저항성은 그 혼합물의 항복응력(파괴점에서의 응력)을 측정함으로써 정성적으로 알 수 있다는 결론에 도달한다. 복잡한 응력계산은 포장구조설계에 필요하지만, 단순한 역학시험(간접인장, 마찰시험, Kim's 시험)으로 소성변형 저항성을 쉽게 알아볼 수 있다는 것은 혼합물 배합설계에서 큰 이점이 아닐 수 없다.

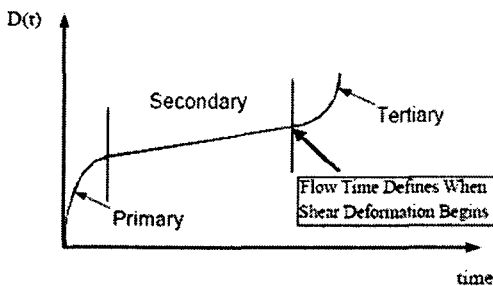


그림 2. 삼축압축시험에서의 파괴점

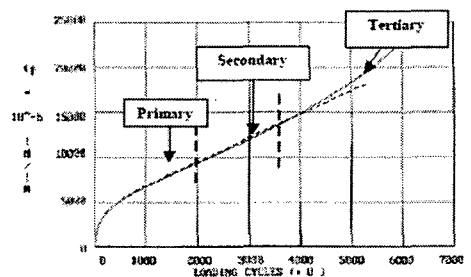


그림 3. 반복동하중시험에 있어서의 파괴점

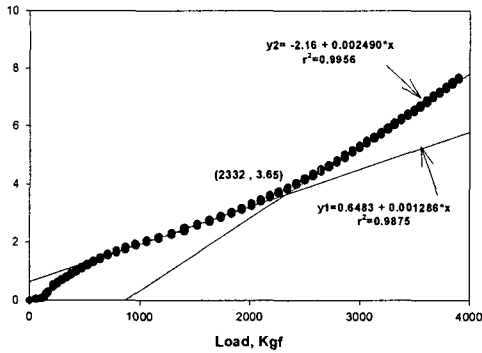


그림 4. 혼합물 침입도시험에서의 파괴점

그 후 Dijk and Visser(1977)도 벤딩 빔 피로시험을 통하여 피로균열에 이르는 소모에너지와 적용하중 수 사이의 상관성을 연구하였다. 그 결과 표 1에 표시된 물질상수 값들을 얻었다. 식 (2)를 변화시켜 균열발생을 일으키는 하중 수에 대한 표현으로 바꾸면 다음과 같다.

2.2 피로균열 예측

Dijk(1975)은 피로 또는 파괴균열을 일으키는 데 필요한 단위 부피당의 소모에너지(W_{fat})와 그 때까지의 적용하중 수(N_{fat})를 그래프로 그린 결과 주어진 아스팔트 혼합물에 대해서는 시험방법(2 혹은 3-점 벤딩시험), 온도변화(10-40°C), 주기변화(10-50 Hz), 변형제어 혹은 하중제어와 무관하게 아래 식에 의해 지배된다고 보고하고 있다.

$$W_{fat} = A \cdot N_{fat}^z \quad (2)$$

상수 A와 지수 z의 값은 각기 다른 아스팔트 혼합물에 대하여 벤딩 빔 피로시험을 하여 구하였으며, 표 1에 이 값들을 보고하고 있다.

$$N_{fat} = \left(\frac{1}{A} \right)^{1/z} \cdot W_{fat}^{1/z} \quad (3)$$

표 1과 2에서 보듯이 혼합물 물성의 변화, 즉, 골재크기와 분포도가 변하거나 아스팔트바인더의 종류와 함량이 변하면 물질상수 A와 z의 값도 달라짐으로 혼합물마다 각기 다른 식이 얻어진다. 불행히도 현재까지는 A와 z가 혼합물 물성의 어떤 함수로 구성되어 있는지 정확히 밝혀진 바가 없음으로, 이 값들을 정확하게 구할 방법이 없다. 다행히 A와 z를 알지 못하더라도 식 (3)을 모든 혼합물에 적용하기 위하여 근사적인 방법을 취할 수 있으며, 이는 A와 z의 평균값을 사용하는 것이다. 이렇게 하여 얻은 식에는 어느 정도의 오차가 포함되어 있음을 유의하기 바란다. 표 1의 평균값을 취하면 식 (3)은 다음과 같다.

$$N_{fat} = 1.529 \times 10^{-7} \cdot W_{fat}^{1.515} \quad (4)$$

식 (4)는 비록 근사식이긴 하지만 공학적인 오차범위 내에서 혼합물의 피로균열을 예측하는 데 아주 유용한 식이 될 수 있다. 식 (4)는 균열이 일어날 때의 에너지(W_{fat})만의 함수임으로, 특정 아스팔트 혼합물에 대하여 이 에너지를 구하여 식 (4)에 대입하면 피로균열을 발생시키는 주행회수에 대한 예측이 가능해진다.

간단하게 소모에너지(dissipated energy)를 측정하는 방법 중 하나로서 간접인장시험이 적극 추천된다. 간접인장에 의한 측정방법은 단순파괴시험이나 반복파괴시험 두 방법이 있으나 정성적으로 피로균열 저항성을 알고자할 때는 단순시험만으로도 충분히 그 기능을 발휘할 수 있다. Kim & Wen(2002)도 피로균열 저항성을 측정하기 위한 단순시험으로서 LVDT 변형을 게이지를 이용하여 인장응력과 변형율을 구하고, 이로부터 에너지를 구하는 약간 복잡하나 정밀한 방법을 취하고 있다. 그들의 결과를 West track 현장시험가속시험장의 코아의 피로균열과 비교하여 상호간의 우수한 상관성을 강조하고 있다.

그러나 본 연구에서는 복잡한 방법 보다는 단순한 간접인장시험을 통하여 파괴시의 인장응력과 변형으로부터 소모에너지를 계산하여 식 (4)에 의하여 피로균열을 예측하는 방법을 처음으로 주장한다.



표 1. 아스팔트 혼합물의 피로균열시험에서의 물질상수 A와 z의 값

문헌	아스팔트 혼합물	A, joule/m ³	z
Dijk(1975)	Asphalt Concrete, AC-I	6.76x10 ⁴	0.63
	Asphalt Concrete, R526	4.96x10 ⁴	0.59
	Macadam Mix, R507	1.08x10 ⁴	0.68
	Rolled Asphalt Mix, RA	8.73x10 ⁴	0.58
	Base Course	1.16x10 ⁴	0.67
Dijk & Visser (1977)	Mix 1	3.02x10 ⁴	0.718
	Mix 2	3.13x10 ⁴	0.691
	Mix 3	1.88x10 ⁴	0.697
	Mix 4	1.81x10 ⁴	0.637
	Mix 5	1.28x10 ⁴	0.610
	Mix 6	6.46x10 ⁴	0.630
	Mix 7	2.89x10 ⁴	0.662
	Mix 8	2.48x10 ⁴	0.699
	Mix 10	1.48x10 ⁴	0.706
	Mix 12	1.20x10 ⁴	0.716
	Mix 13	2.14x10 ⁴	0.642
	전체 혼합물의 평균 값	3.15x10 ⁴	0.660

3. 결론

단순한 간접인장시험을 통하여 파괴시의 피크 인장응력 값은 소성변형 예측에, 소모에너지는 피로균열 예측에 사용될 수 있음을 보였다. 이러한 사실은 간접인장시험이 혼합물 배합설계에 있어서 아주 유용한 도구가 될 수 있음을 시사한다. 지금까지는 소성변형 저항성을 측정하는 방법만 존재하였지만 피로균열 저항성도 하나의 시험에 의해 동시에 예측하는 것이 가능할 수 있기 때문이다.

감사의 말씀

본 연구는 건설교통부의 연구를 총괄하는 건설교통기술평가원의 재정적 지원을 받아 수행된 과제의 일부 결과임을 밝히고 두 기관에 심심한 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Dijk, WV(1975), "Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes," AAPT, Vol.44, pp. 38-74.
2. Dijk, WV and Visser, W(1977), "The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design," AAPT, Vol.46, pp. 1-40.