

점탄성 물성을 이용한 아스팔트 혼합물의 피로수명 예측

Prediction of Fatigue Performance of Asphalt Mixtures Using Viscoelastic Material Properties

이 현 중* · 박 경 일**

1. 서 론

아스팔트 혼합물의 피로공용성 예측모델은 공용성에 기초한 아스팔트 혼합물의 배합설계법 혹은 역학적 포장두께 설계법을 구성하는 가장 중요한 요소중의 하나이다. 아스팔트 혼합물의 피로 특성을 규명하는데 있어 일반적으로 경험적 접근법과 역학적 접근법(empirical and mechanistic approaches)의 두 가지 해석방법이 주로 사용되어 왔다. 경험적 접근법에 있어 가장 흔히 사용되는 피로모델은 아스팔트 혼합물의 초기 응력 혹은 초기 변형률과 피로수명의 상관관계를 사용하는 것이다. 이 모델은 혼합물의 손상이 어떻게 진행되는가 하는 문제를 고려하지 않기 때문에 단지 주어진 시험조건하에서만 유효하며 모델계수를 산정하기 위해서는 특정 혼합물에 대해 항상 피로시험을 실시하여야 하는 단점이 있다.

반면, 파괴역학(fracture mechanics) 혹은 손상역학(damage mechanics)등에 기초한 역학적 피로모델은 경험적 접근법보다 복잡하지만 보다 다양한 하중 및 환경조건에 적용이 가능하다. 따라서, 보다 적은 량의 시험 혹은 간단한 물성시험만으로도 아스팔트 혼합물의 피로수명을 예측할 수 있는 장점이 있다. 또한 역학적 접근법의 근간이 되는 응력-변형률 관계는 포장 재료의 공학적 물성치들을 내포하기 때문에 혼합물의 피로수명과 재료의 물성치와의 상관관계를 확립하는데 기초가 될 수 있으며, 이러한 상관관계는 피로균열에 저항성이 큰 아스팔트 접합재 및 혼합물을 선택하거나 설계하는데 아주 유용하게 활용될 수 있다.

최근 Lee and Kim(1998a, 1998b)은 일련의 연구를 통하여 점탄성 이론과 연속체 손상역학(continuum damage mechanics)을 사용하여 아스팔트 혼합물의 일축 구성방정식을 개발하였으며, 이러한 구성방정식을 토대로 피로공용성 예측모델을 개발하였다(이현중, 1999; Lee 등, 2000). 일반 및 개질 아스팔트 혼합물 7종에 대한 시험연구결과 피로모델은 다양한 종류의 아스팔트 혼합물의 피로수명을 비교적 잘 예측할 수 있음이 검증되었으며, 기존의 경험적 모델과 유사한 형식을 가지나 모델의 계수를 공학적 물성치로 표현할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Lee 등(2000)이 개발한 역학적 피로공용성 예측모델을 바탕으로 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성을 사용하여 피로공용성 예측이 가능한 모델을 개발하였으며, 다양한 혼합물을 사용하여 모델의 검정을 실시하였다. 또한, 피로모델의

* 강릉대학교 토목공학과 조교수 (033-640-2419, hlee@knusun.kangnung.ac.kr)

** 강릉대학교 토목공학과 석사과정



활용방안에 대한 고찰을 실시하였다.

2. 피로공용성 예측모델

Lee 등(2000)이 제안한 피로균열 예측모델은 하중조건, 재료의 점탄성 물성, 손상 특성 등의 함수로서 다음과 같다.

$$N_f = Af |E^*|^{-2\alpha} (\epsilon_o)^{-2\alpha} \tag{1}$$

여기서,

$$A = \frac{(S_{1f})^p}{p(0.125IC_{11}C_{12})^\alpha} \tag{2}$$

$$\alpha = 1 + 1/m \tag{3}$$

$$p = 1 + (1 - C_{12})\alpha \tag{4}$$

f = 하중주기,

I = 초기 의사강성(1.0)

ϵ_o = 피로시험에 적용된 하중의 진폭,

S_{1f}, C₁₁, C₁₂ = 피로손상과 관련된 인자,

m = Creep Compliance와 시간의 대수관계 곡선의 직선구간 기울기.

식 (1)에서 보는바와 같이 피로수명은 하중조건(ϵ_o , f)과 재료의 점탄성 물성($|E^*|$, m) 그리고 피로손상과 관련된 인자들(S_{1f} , C_{11} , C_{12})의 함수이다. 피로손상과 관련된 인자들을 산정하는 절차는 지면관계상 본 논문에서는 생략하고 참고문헌(이현중, 1999, Lee 등, 2000)을 참조하기 바란다.

앞서 언급한 하중조건, 재료물성, 피로손상 특성들이 혼합물의 피로수명에 어떤 영향을 미치는가를 파악하기 위하여 일반 및 4종의 다른 개질 아스팔트 혼합물에 대한 일축인장 크립 및 피로시험 결과를 사용하여 분석하였다. 본 연구에 사용된 시험결과는 인천 국제공항의 시험도로에 적용된 혼합물로서 실내시험과 관련된 자세한 사항은 참고문헌(Lee 등, 1998)을 참고하기 바람, 피로해석결과를 정리하면 표 1과 같다. 식 (2)를 보면 계수 A는 α 와 p, S_{1f}, C₁₁, C₁₂ 등 다양한 인자의 함수로서 이들은 서로 상호관련(coupled)되어 있어 실제 피로시험결과를 사용하여 각 인자가 미치는 영향을 분석하였다.

표 1. 피로해석결과 및 모델계수

Mixture	S19	GIL	SBR	SMA	SBS
$ E^* $ (MPa)	1,435	1,665	1,364	1,420	1,369
α	2.92	3.27	3.13	2.72	3.50
C ₁₁	0.00399	0.00517	0.01064	0.00445	0.00370
C ₁₂	0.44	0.40	0.36	0.47	0.46
p	2.635	2.962	3.003	2.442	2.890
S _{1f}	21,130	36,898	21,629	24,383	46,259
A	4.56E21	6.13E24	8.54E22	1.18E20	7.48E25

표 1에서 보는바와 같이 식 (2)의 분자에 위치한 S_{1f}의 값은 일반적으로 10000 이상의 큰 값을 가지나, C₁₁, C₁₂의 값은 1 이하의 작은 값을 갖는다. 또한, α 는 일반적으로 2.5~3.5의 값을 가지며 p는 α 에 비례하는 값으로 α 보다는 약간 작은 값을 갖는다. 따라서, 분모에 있는 C₁₁, C₁₂의



값이 S1f의 값에 비해 훨씬 작기 때문에 A의 값은 α 와 S1f의 값에 큰 영향을 받으며, S1f의 값도 거의 α 에 비례하기 때문에 결과적으로 A와 α 는 밀접한 관계를 띄게 된다. 즉, 계수 A는 혼합물의 피로손상 인자(C11, C12)와 점탄성 물성에 영향을 받지만 피로손상 인자보다 점탄성 물성의 영향을 훨씬 크게 받고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 A와 α 의 관계를 그림으로 나타내면 그림 1과 같고, 그림에서 보는 바와 같이 R2 값이 0.992로서 굉장히 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서, A와 α 는 다음의 관계가 성립함을 알 수 있다.

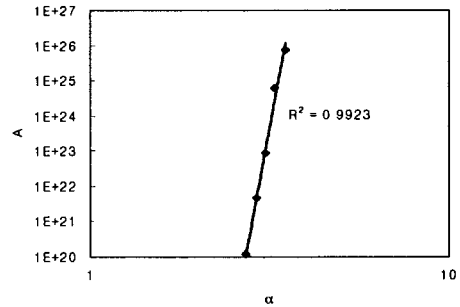


그림 1. A와 α 의 관계

$$A = a\alpha^b \tag{5}$$

식 (5)를 식 (1)에 대입하여 피로모델을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$N_f = a\alpha^b f |E^*|^{-2\alpha} (\epsilon_o)^{-2\alpha} \tag{6}$$

피로모델 식 (1)과 (6)을 비교해 보면 식 (1)은 아스팔트 혼합물의 종류를 달리할 때마다 피로시험을 실시하여 모델의 계수를 산정하여야 하는 반면, 식 (6)은 한 혼합물에서 구한 모델의 계수를 다른 혼합물에도 적용할 수 있다는 큰 장점이 있다. 즉, 어떤 혼합물의 피로시험을 통해 모델의 계수가 결정되면 골재의 입도나 바인더의 종류가 다른 혼합물에도 동일한 피로모델을 적용하여 피로수명을 예측할 수 있다. 단, 크립시험은 각 혼합물마다 실시하여야 한다. 따라서, 피로시험을 실시하지 않고도 간단한 크립시험만으로 특정 혼합물의 피로수명을 예측할 수 있는 것이다. 또한, 피로모델의 계수를 산정하는 것도 보다 간편하며 이를 요약 정리하면 다음과 같다.

- 1) 크립시험자료를 사용하여 먼저 각 혼합물의 m 값을 구한 다음 α 값을 계산한다.
- 2) 크립시험 데이터로부터 피로시험을 실시한 하중주기에서의 $|E^*|$ 를 역산정한다.
- 3) 위의 1)과 2)에서 구한 α 와 $|E^*|$ 를 식 (6)에 대입하고 피로시험 데이터를 사용하여 각각의 변형을 진폭에서 피로수명(Nf) 값을 식(6)에 대입하여 $A = a\alpha^b$ 값을 산정한다.
- 4) 각각의 변형을 진폭에서 얻어진 A 값을 평균하여 해당 혼합물의 A 값으로 한다.
- 5) 이상의 과정을 다른 종류의 혼합물에 대해서도 반복 실시하고 3개 이상의 혼합물 데이터를 사용하여 식 (5)의 A에 대한 계수 a와 b를 구한다.

3. 피로모델의 검증

식 (6)의 피로모델 검정을 위하여 표 2에서 보는바와 같이 6종의 아스팔트 혼합물에 대한 일축인장



크립 및 피로시험을 실시하였다. 골재입도는 일반 밀입도, Superpave 입도, SMA 입도의 세 가지 입
표 34. 피로모델의 검정에 사용된 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성 및 계수 A (f = 10Hz)

Mixture	[E*], MPa	α	A	비교	
A	Superpave입도 + AP5	24,370	2.587	5.98×10^9	A = 0.0111 $\alpha^{25.496}$ (R ² = 0.999)
B	밀입도 + SBS 아스팔트	23,676	3.174	2.68×10^{12}	
C	Superpave입도 + SBS 아스팔트	27,310	3.564	5.22×10^{13}	
D	SMA입도 + AP5 + Fiber	21,318	2.493	-	-
E	SMA입도 + SBS 아스팔트	22,704	3.381	-	-
F	SMA입도 + SBS 아스팔트 + Fiber	22,807	3.381	-	-

도와 아스팔트 바인더는 일반 아스팔트(AP-5)와 SBS 개질 아스팔트를 사용하였다. 혼합물의 배합설계와 피로시험 및 크립시험에 대한 상세한 사항은 참고문헌(이현중 등, 2000)에 수록되어 있다. 6종 혼합물의 시험 데이터중 3종혼합물(A, B, C)에 대한 시험 데이터는 피로모델의 계수산정을 위해 사용되었고 나머지 3종혼합물(D, E, F)의 시험 데이터는 피로모델의 검정에 사용되었다.

3종의 혼합물에 대한 시험결과를 사용하여 앞서 언급한 절차를 통해 피로모델의 계수를 산정하였으며 표 2와 같다. 표 2에 주어진 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성과 피로모델 식 (6)을 사용하여 피로모델의 계수산정에 사용되지 않은 혼합물(D, E, F)에 대한 피로수명을 예측하였으며 실측한 피로수명과 그림 2에 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 실측한 피로수명과 예측한 피로수명이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

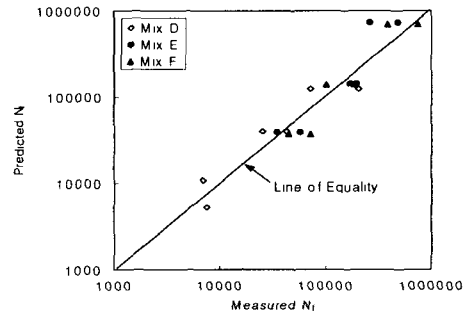


그림 2. 실측한 피로수명과 피로모델 식(6)으로 예측한 피로수명의 비교

4. 역학적 피로모델의 적용

이미 서론에서도 언급하였지만 아스팔트 혼합물의 피로공용성 예측모델은 공용성에 기초한 혼합물의 배합설계와 역학적 포장두께 설계법의 중요한 요소가 된다. 본 연구에서 제시한 역학적 피로공용성 예측모델을 활용 가능한 분야에 대해 소개하고자 한다.

4.1 등가단축하중계수(Equivalent Single Axle Load Factor, ESALF)

ESALF는 크기가 다른 축하중을 하나의 대표 축하중으로 환산하는데 사용되는 계수로서, 포장의 해석 및 설계에 사용되는 중요한 개념이다. 현재 AASHTO 포장설계법에서는 AASHO 도로시험에서 얻어진 시험데이터를 회귀분석하여 ESALF를 산정하여 사용하고 있으나, 이론적인 방법에 의해 ESALF



를 산정할 수도 있다. 본 연구에서는 피로균열을 기준으로 ESALF를 산정하는 방법을 소개한다.

ESALF는 표준하중이 1회 통과할 때 포장이 받는 손상에 대한 x크기의 축하중이 1회 통과할 때 포장이 받는 손상의 비율로서 정의되며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$ESALF = \frac{Damage_x}{Damage_s} = \frac{N_s}{N_x} \tag{7}$$

여기서, N_s 는 어떤 포장체가 피로균열에 의해 파괴가 발생할 때까지 작용된 표준하중 회수이며, N_x 는 동일한 포장체가 피로균열에 의해 파괴가 발생할 때까지 작용된 x크기의 하중 회수이다. 식 (6)과 (7)을 조합하면 동일한 재료에 대해서는 결국 다음 식을 얻을 수 있다.

$$ESALF = \left(\frac{\epsilon_x}{\epsilon_s}\right)^{2a} \tag{8}$$

식 (8)에서 보느냐와 같이 ESALF는 포장의 두께(ϵ)와 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성(α)의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. $2a$ 는 크립시험을 통해 산정할 수 있으며, 일반 아스팔트 혼합물의 경우 25°C의 온도조건에서 약 5.0~6.0의 값을 가진다. Shell에서 수행한 피로시험 결과에 의해 제시한 실험 값은 5.671로서 유사함을 알 수 있다.

4.2 공용성에 기초한 아스팔트 혼합물의 배합설계

아스팔트 혼합물의 배합설계시 피로공용성을 고려하기 위해서는 아스팔트 혼합물의 피로모델을 사용하는 것이 반드시 필요하다. 기존의 경험적 피로모델은 아스팔트 혼합물의 종류가 달라지거나 동일 혼합물일지라도 바인더의 함량이 달라지면 피로시험을 반드시 실시하여야 모델계수를 산정할 수 있다. 예를 들어 어떤 특정 혼합물의 배합설계를 실시한다고 하였을 때 적어도 5개의 다른 아스팔트 함량을 고려하여야 하며, 각 아스팔트 함량에 대해 적어도 3개의 다른 하중크기에서 2회 이상의 피로시험을 실시하여야 한다. 따라서, 필요한 총 시험회수는 30회 이상이 되며, 이는 굉장히 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 반면 본 연구에서 제안한 역학적 피로모델을 사용하면, 하나의 아스팔트 함량에 대해서만 피로시험을 실시하여 모델계수를 산정하고 나머지 아스팔트 함량에 대해서는 크립시험만으로도 피로수명을 예측할 수 있기 때문에 피로시험회수를 6회로 줄일 수 있다.

역학적 피로모델은 공용성에 기초한 아스팔트 바인더의 시방을 연구하는 분야에도 활용될 수 있다. 즉, 식 (6)을 보면 아스팔트 혼합물의 피로수명은 a 가 크고(m 은 작고) $|E^*|$ 는 적은 값을 가지는 경우 큰 것을 알 수 있다. 이는 Superpave의 아스팔트 바인더의 시방규격에서 피로수명인자 $G^*\sin \delta$ 와도 유사한 개념이다. Superpave에서는 $G^*\sin \delta$ 의 값이 작을수록 피로저항성이 우수한 것으로 제시하고 있으며, 이는 결국 바인더의 강성이 작고 위상각이 작은 것이 피로저항성이 유리하다. m 과 위상각 δ 은 밀접한 관계를 가지는데 재료가 완전 탄성체이면 $m=\sin \delta=0$ 이고 완전한 점성이면 $m=\sin \delta=1.0$ 이다. 따라서 Superpave의 피로인자는 역학적 개념에서 보면 잘 선택된 것으로 여겨지나 실제 적용에 있어 신뢰성이 떨어지는 것으로 평가(이현중 등, 2000)된 이유는 식 (6)에서 보듯이 바인더의 강성보다 위상각의 역할이 큰데도 불구하고 단순히 G^* 와 $\sin \delta$ 를 곱한 형식을 취하기 때문인 것으로 사료된다. 식 (6)에서처럼 실제 아스팔트 혼합물의 피로거동은 단순히 $G^*\sin \delta$ 에 반비례하는 것이 아니라 복잡한 거동을 띄고있기 때문이다. 만약 $G^*\sin \delta$ 대신 다음 식과 같은 유사한 인자를 사용한다면 보다 신뢰



성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

$$N_f \propto \frac{v^b}{|G^*|^v} \quad (9)$$

여기서 $v = 2(1 + 1/\sin \delta)$ 이고 b 는 상수이다.

5. 결 론

본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성만으로 피로공용성을 예측할 수 있는 모델을 제시하였으며, 검정시험을 통해 골재의 입도가 다르고 바인더의 함량이 1.5% 이상 차이나는 혼합물에 대해서도 점탄성 물성만으로 혼합물의 피로수명을 비교적 잘 예측할 수 있음이 검증되었다. 또한, 본 연구에서 제시한 피로모델은 공용성에 기초한 아스팔트 바인더의 시방과 혼합물의 배합설계의 연구에도 유용하게 활용될 수 있음을 보여주었다.

참고문헌

1. 이현중 (1999). "아스팔트 혼합물의 역학적 피로공용성 예측모델 개발," 대한토목학회 논문집 제 19권 제 III-5호, pp. 897-909.
2. 이현중, 최지영, 차순만 (2000). "골재의 입도와 SBS 개질제가 아스팔트 혼합물의 점탄성 물성 및 피로공용성에 미치는 영향," 한국도로포장공학회지, 제2권, 제3호, pp. 129-144.
3. Lee, H.J., Kim, Y.R., Daniel, J.S. (1998). "Performance Evaluation of Asphalt Mixtures for Incheon Airport Test Pavement Project," Final Report, AMSTech, Raleigh, NC.
4. Lee, H.J. and Kim, Y.R. (1998a). "A Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading," Jr. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 32-40.
5. Lee, H.J. and Kim, Y.R. (1998b). "A Viscoelastic Continuum Damage Model of Asphalt Concrete with Healing," Jr. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124, No. 11, pp. 1224-1232.
6. Lee, H.J., Daniel, J.S. and Kim, Y.R. (2000). "Continuum Damage Mechanics-Based Fatigue Model of Asphalt Concrete." Jr. of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 12, No. 2, pp. 105-112.