

J-적분을 이용한 아스팔트의 피로 균열 성장 모사

Numerical simulation of Asphalt
fatigue Crack propagation using J-integral

유성문* · Chau Dinh Thanh** · 이현종*** · 지광습****

Yu, Seong mun · Chau Dinh Thanh · Lee, Hyun jong · Zi, Goang seup

1. 서 론

아스팔트 콘크리트는 반복되는 차량 하중에 의해서 피로 하중을 받게 되며 그에 따라 피로 균열의 성장이 발생하게 된다. 따라서 적절한 유지보수 및 교체를 위해서는 이러한 아스팔트의 피로균열의 적절한 예측이 필요할 것이다. 피로 균열의 성장 예측에는 그간 여러 가지 경험식(Paris' law 등)이 사용되어 왔다. 본 연구에서는 에너지 기반의 균열 성장 모델인 J-적분 이용 방법을 사용하고자 한다. J-적분 이용 방법이란 구성방정식을 시간 이력에 따라서 적분하여 점탄성 물질의 피로 균열 성장을 예측하는 방법이다. 피로균열의 성장속도가 J-적분의 변동폭의 역에 비례한다는 실험식을 적용하였다. 이러한 실험식을 이용하여 실험체의 피로 실험 결과의 적절한 모사가 가능하였다.

2. 이론적 접근

시간 이력에 따른 적분을 계산하여 J-적분을 계산한다. J-적분을 계산한 후에는 J값의 변동 폭을 사용하여 피로균열의 성장의 예측식을 구할 수 있다.

2.1 J-적분

비선형 점탄성 물질의 경우 구성방정식을 시간에 따라 적분하는 방식으로 J-적분을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$J = E_R' \int_{t_0}^t D(t-\tau) \frac{\partial J_e}{\partial \tau} d\tau \quad (1)$$

여기서 $J_e = \frac{K_I^2}{E}$ 이며, $K_I = P(t)G(a)$ 이다. 여기서 $G(a)$ 는 구조물 형태에 따른 형상함수이다. 이를 적용하여 식 (1)의 J-적분 식을 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = 2G(a)^2 \int_{t_0}^t D(t-\tau) P(\tau) P'(\tau) d\tau \quad (2)$$

여기서 $G(a)$ 값은 $P=1$ 일 때의 응력확장계수(K_I)값으로 유한요소해석을 통해서 구해진다. D 값은 크리프 변형계수(creep compliance)로 보통 다음과 같은 프로니 급수(Prony series)의 형태로 나타낸다[4].

* 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 · 공학사 · E-mail : ysmgc@korea.ac.kr - 발표자

** 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 · 공학석사 · E-mail : chdthanh@korea.ac.kr

*** 정희원 · 세종대학교 사회환경공학부 부교수 · 공학석사 E-mail: hlee@sejong.ac.kr

**** 정희원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 · 공학박사 E-mail: g-zi@korea.ac.kr

$$D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^M D_i (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_i})) \tag{3}$$

또한 하중 함수 $P(\tau)$ 는 sin 함수의 형태의 피로 하중으로 가정하였으며 아래 식과 같다.

$$P(\tau) = A_0 + A_0 \sin(2\pi f t - \frac{\pi}{2}) \tag{4}$$

여기서 A_0 는 하중의 변동 폭이며, f 는 하중의 진동수(frequency)이다.

계산된 J-적분의 값은 다음 그림 1과 같이 나타난다. $A_0=1N$, $f=10Hz$, $t_0=800sec$ 을 사용하였다. $G(a)$ 는 실험 시 사용되었던 실험체의 형태에서 균열이 성장함에 따라 $P=1N$ 일때의 K_I 값을 유한요소해석을 이용하여 구하였다.

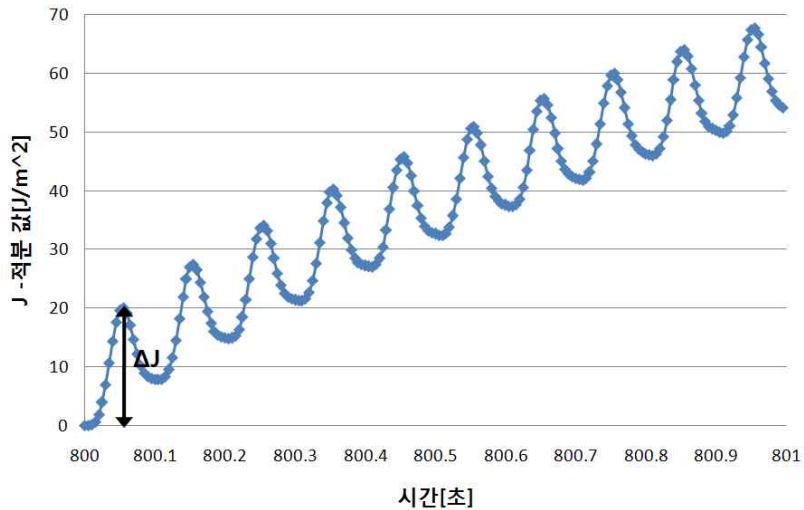


그림 2 J-적분 곡선

그림 1에서 ΔJ 값은 피로 균열 성장 예측 식에서 사용된다. 점탄성 물질에서 ΔJ 값은 첫 번째 하중 진폭에서 가장 큰 값을 갖고 하중이 반복됨에 따라 점차 감소하여 일정한 값을 갖게 된다. 본 연구에서는 피로 균열 성장의 예측에 첫 번째 하중 진폭에서의 ΔJ 값을 사용하였다.

2.2 피로균열 성장 예측

피로로 인하여 과대한 소성이 발생하는 경우 응력확대계수 K 는 균열 선단의 상태를 나타내는데 부적합하다고 알려져 있으며 따라서 몇몇 연구에서는[1,3] J-적분을 적용하여 피로문제를 해석하였다. 피로 균열 예측식 중에서 가장 널리 쓰이는 Paris' law에서 응력확대계수의 변동 폭 ΔK 를 J-적분의 변동 폭 ΔJ 로 바꾸면 다음 식과 같은 피로 균열 예측식을 얻을 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta J)^m \tag{5}$$

여기서 c 와 m 은 재료에 따른 물성치로 실험 결과와의 비교를 통해서 시행착오법을 통해서 구할 수 있다. 그 후 da 혹은 dN 중 한 가지를 가정하면 나머지를 구할 수 있으며 이를 통해 피로 균열 성장의 예측이 가능하다. da 혹은 dN 을 가정할 때에는 작은 값을 가정할수록 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.

3. 피로균열 실험 모사

3.1 실험 내용 요약

아스팔트의 균열 성장을 모사하기 위해서 그림 2와 같은 원판 형태의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험은 하중별(200N, 250N, 300N) 실험과 주기별(1Hz, 5Hz, 10Hz) 실험, 그리고 온도별(10℃, 20℃, 30℃)로 이루어 졌다. 본 연구에서는 10Hz, 20℃하에서의 200N, 250N, 300N의 피로 실험의 모사를 수행하였다.

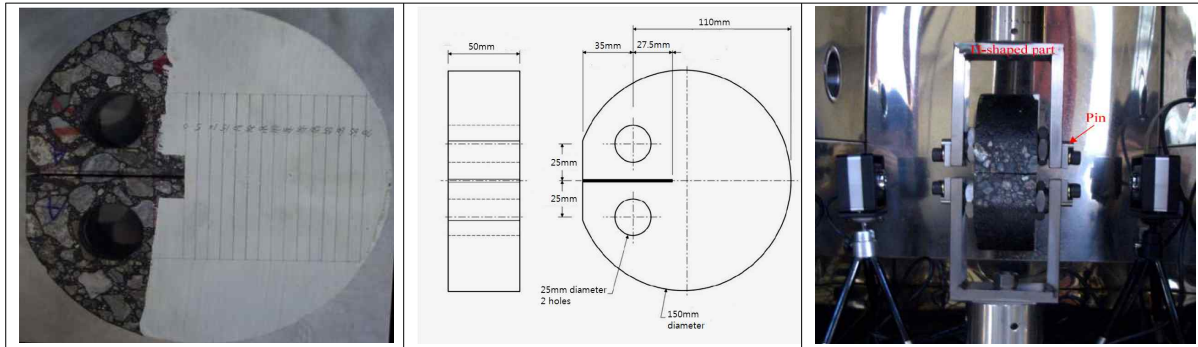


그림 3 피로실험 실험체 및 실험 사진

3.2 피로 균열 성장 모사

위 실험체의 실험결과를 식 (5)를 사용하여 모사하였다. 피로 균열 성장 모사의 결과는 그림 3에 나타내었다. 그림에서 점선은 실험결과이고 실선은 ΔJ 를 사용한 모사이다. 그림에서 나타난 바와 같이 ΔJ 를 적용한 피로 균열 성장 예측 식으로 실험 결과를 적절히 모사할 수 있었다. 균열 모사 시에 da 값은 1mm로 고정하고 균열이 1mm 성장하는 동안의 dN 을 계산하여 그림 3과 같은 N-a 곡선을 얻을 수 있었다.

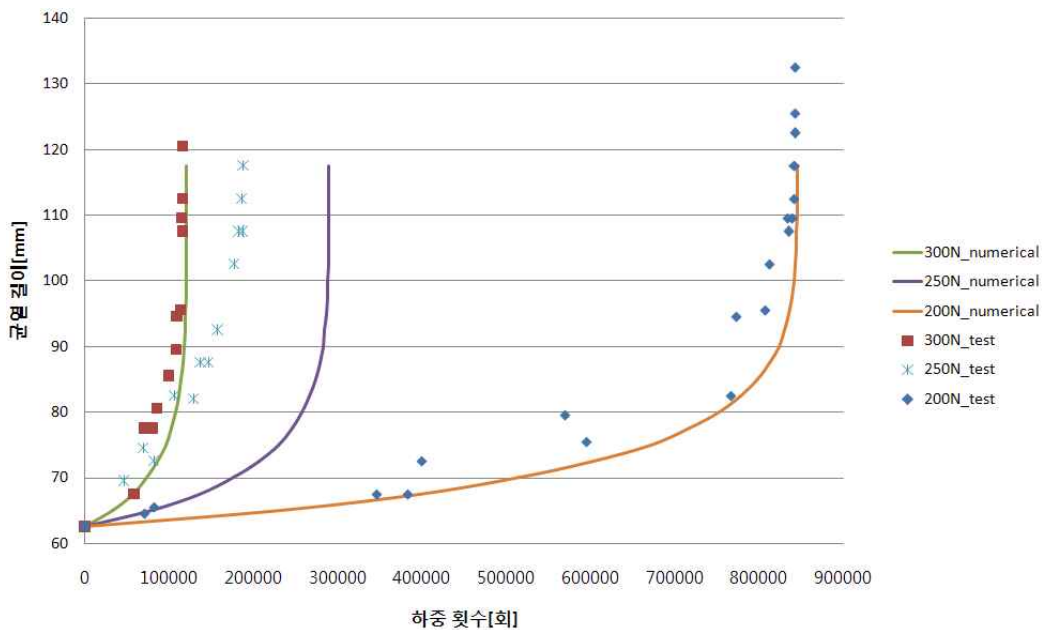


그림 3 실험체의 피로 균열 성장 모사

식 (5)의 상수 c 와 m 값은 시행착오법을 이용하여 구하였으며, 그 값은 다음 표 1과 같다.

표 2. 피로균열 모사에 사용된 상수

	c	m
상수값	7.43×10^{-23}	2.4

4. 결 론

본 연구에서는 점탄성 재료인 아스팔트의 피로균열 성장 예측을 위해서 J-적분을 이용한 방법을 사용하였으며, 이를 실험 결과 모사에 사용하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 점탄성 재료의 피로 균열 예측을 위해서 구성 방정식의 시간에 따른 적분을 통하여 J-적분을 계산할 수 있었다.
2. 계산된 J-적분을 통하여 피로균열성장의 예측 식으로 식(5)와 같은 실험식을 제안할 수 있었다.
3. 실험 결과의 역추정을 통하여 실험식의 상수를 결정할 수 있었고, 이러한 J-적분을 이용한 피로 균열 성장 식을 통하여 아스팔트 실험체의 피로 실험 결과를 250N 실험체를 제외하고는 적절히 모사할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 국방과학연구소 기초연구과제 “다중균열에 의한 피로손상 연구, 2단계 (ADD-06-05-06)와 2008년도 건설교통부 건설기술혁신사업 “레이더와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 비파괴시스템 개발”(과제번호: 05 첨단융합 B01) 및 05 기반구축 D04-01의 지원으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게 한 국방과학연구소와 건설교통부의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Dowling, N. E. and Begley, J. A. (1976) Fatigue crack growth during gross plasticity and th J-integral, American Society for Testing and MAterials, pp.82-103
2. Kuai, Haidong., Lee, Hyunjong., Zi, Goangseup., Mun, Sungho. (2008) Application of generalized J integral to crack propagation modeling of asphalt concrete under repeated loading, Transportation Research Board Annual Meeting 2009 Paper #09-2324
3. Lambert, Y., Saillard, P., and Bathias, C. (1976) Application of the J concept to fatigue crack growth in large-scale yeilding, American Society for Testing and MAterials, pp.82-103
4. Zi, G. and Bazant, Z. P. (2002) Continuous relaxation spectrum for concrete creep and its incorporation into microplane model M4