

LTPP 자료를 이용한 실내 피로파손 모형의 보정계수 산정

Assessment of Shift Factor for Laboratory Fatigue Distress Model Using LTPP Data

윤경구* · 김성권** · 김동호*** · 최성용****

Yun, Kyong-Ku · Kim, Seong-Kwon · Kim, Dong-Ho · Choi, Seong-Yong

1. 서론

일반적으로 콘크리트 포장은 정적하중 이외에 교통하중이나 환경하중 등의 반복하중과 같은 불규칙한 반복하중상태에 노이게 된다. 기존의 많은 연구에서 이와 같은 콘크리트 포장의 거동 특성을 연구하기 위하여 다양한 피로실험이 수행되었고, 많은 제안식들이 도출되었다. 그러나 국내에서는 콘크리트 포장에 대한 피로 연구는 많이 이루어지지 못한 실정이며, 제안된 식들도 실내 피로실험을 이용하여 도출된 식이라 재료조건과 하중조건에 한정되어 있으며, 현장 조건에서의 교통조건, 환경조건, 경계조건 등에서 상당한 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서는 AASHTO 2002에서 채택된 누적손상 개념을 이용하고자 국내 LTPP 자료를 이용하여 실내 피로실험을 통하여 제안된 피로파손 모형을 현장조건에 적합한 피로파손 모형으로 전환하고자 하였다.

2. 실험방법

콘크리트 포장의 피로특성을 파악하기 위하여 휨인장 피로실험과 조괘인장 피로실험을 실시하였다. 또한 시험도로에 사용된 화강암을 비롯하여 국내의 대표적인 암종인 석회암, 사암에 대한 조괘인장 피로실험을 실시하였다. 피로실험에 사용되는 공시체는 피로실험 기간동안 강도 증진 현상을 최소화하기 위하여 시험체를 재령 28일까지 수증양생 한 후 56일까지 공기 중 양생을 실시하였다.

2.1 휨인장 피로실험

휨인장 피로실험은 15×15×55cm의 각주 공시체를 제작하여 실험하였으며, INSTRON 8506시험기를 사용하여 정적 강도측정과 동일한 조건인 일단힌지 타단 볼러로 지지하고 중앙점에 하중이 재하되는 3점 재하방식으로 KS F 2408의 규정에 의해 실험하였다. 실험은 200만 사이클까지 수행한 후 종료하였다.

휨인장 피로실험에 사용된 공시체는 재령 56일에 측정된 정적강도 결과로부터 응력수준을 계산하여 피로 실험에 적용하였다. 피로하중 재하시 초기 평균하중(mean level)까지 도달시간은 실험적으로 결정한 20초를 가하여 시험체의 손상을 방지하고자 하였다.

2.2 조괘인장 피로실험

조괘인장 피로실험 방법은 KS F 2423 규정에 따라 $\phi 15 \times 30$ cm의 원주형 공시체를 제작하여 피로시험을 실시하였다. 56일간의 양생 후 정밀시료절단기를 이용하여 $\phi 15 \times 7.5$ cm가 되도록 절단한 후 절단된 공시체를

* 정회원, 강원대학교 토목공학과 부교수, 공학박사, 033-250-6236(E-mail: kkyun@kangwon.ac.kr)

** 정회원, 강원대학교 토목공학과 석사과정, 공학사, 033-250-6240(E-mail: af519@nate.com)

*** 정회원, 강원대학교 토목공학과 박사후과정, 공학박사, 033-250-6240(E-mail: dhkim@korea.com)

**** 정회원, 강원대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사, 033-250-6240(E-mail: choisy@empal.com)



버니어 캘리퍼스를 이용하여 4점을 측정, 이에 대한 평균치가 공시체의 두께에 대한 측정오차 7.5±0.2cm 이내가 되는지 측정한 후 실험에 사용하였다. 실험은 INSTRON 8516시험기를 사용하여 공시체의 상·하면에 3mm두께의 합판을 접착제를 이용하여 부착하여 시험기에 정확히 수직이 되도록 장착한 후 실험하였다.

3. 실험결과

3.1 휨인장 피로실험 방법에 피로모형

휨인장 피로실험은 시험도로에 사용한 골재인 화강암 굵은 골재를 이용하여 KS F 2408에 의해 INSTRON 8506을 사용하여 실험하였다. <그림 1>은 휨인장 피로실험에 대한 S-N 선도를 나타낸 것이다.

실험데이터를 분석하여 <식 1>의 피로모형을 도출하였다. 이 관계식으로부터 각각의 응력수준별 피로수명과 200만회 및 1,000만회의 피로강도를 계산하여 나타낸 것이 <표 1>이다.

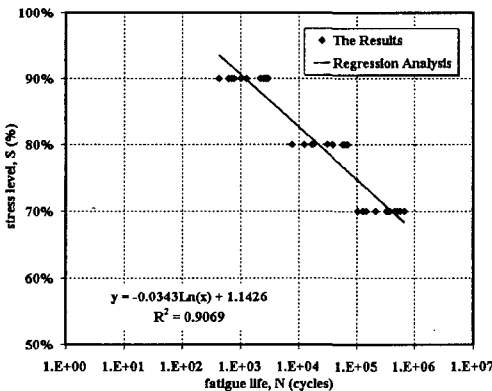
$$\ln(N_F) = 33.312 - 29.155 \left(\frac{\sigma_{max}}{MR_{56}} \right) \quad <식 1>$$

3.2 쪼갬인장 피로실험 방법에 의한 피로모형

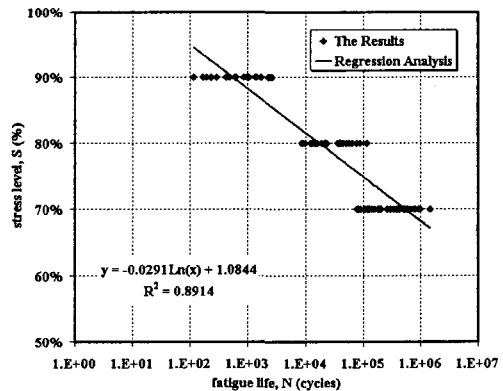
쪼갬인장 피로실험은 화강암, 석회암, 사암 굵은 골재에 대하여 제작한 공시체를 이용하여 실시하였으며 <그림 2>는 쪼갬인장 피로실험에 대한 S-N 선도를 나타낸 것이다.

골재별 쪼갬인장 피로실험 결과를 종합·분석하여 <식 2>의 피로모형을 도출하였다. 이 관계식으로부터 각각의 응력수준별 피로수명과 200만회 및 1,000만회의 피로강도를 계산하여 나타낸 것이 <표 2>이다.

$$\ln(N_F) = 37.265 - 34.364 \left(\frac{\sigma_{max}}{S_{Split}} \right) \quad <식 2>$$



<그림 1> 휨인장 피로실험 방법에 의한 S-N 선도



<그림 2> 쪼갬인장 피로실험 방법에 의한 S-N 선도

<표 1> 휨인장 피로실험 방법에 의한 피로수명과 피로강도

구분 (실험방법)	응력수준별 피로수명(Cycles)				피로강도(%)	
	90%	80%	70%	60%	200만회	1,000만회
휨인장	1179	21,764	401,716	7,414,885	64.50%	58.97%



<표 2> 조검인장 피로실험 방법에 의한 피로수명과 피로강도

구분 (실험방법)	응력수준별 피로수명(Cycles)				피로강도(%)	
	90%	80%	70%	60%	200만회	1,000만회
조검인장	565	17,567	545,905	16,963,932	66.58%	62.31%

4. 보정계수 산정

4.1 개요

실내실험으로부터 개발된 콘크리트 포장의 피로모형을 현장의 다양한 조건이 반영된 모델로 보정하고 수정된 피로모형으로 전환하기 위한 방법으로 누적손상 개념을 이용하였다. 이 방법에 의해 AASHTO 2002 설계법이 개발되었으며 이 방법은 상당량의 축적된 LTPP 데이터가 요구된다. 또한, 이 방법은 슬래브에 발생하는 균열은 반복되는 차량하중 및 환경적인 영향에 의해 발생 되는 것으로 이러한 영향을 Miner의 누적 피로손상 이론과 접목하여 누적피로손상에 대한 포장 슬래브의 균열발생률로 표현하는 방법이다.

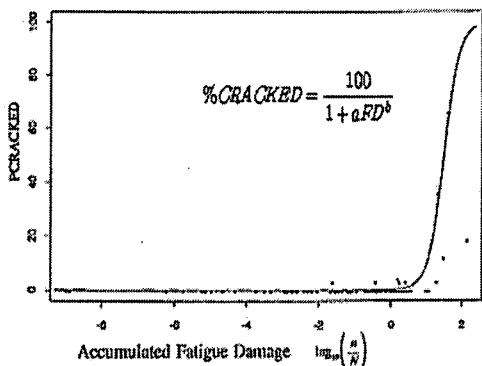
AASHTO 2002에서 누적피로손상 계산에 있어서 분자 n을 계산하기 위한 조합하중을 차량에 의하여 발생하는 하중과 온도과 습도에 의하여 발생하는 Curling과 Warping을 고려하여 합리성을 기하였다. 이러한 방법에 의해 보정계수를 산정하여 일반적인 균열발생률과 누적피로손상과의 관계를 나타낸 것이 <그림 3>이다.

4.2 국내 LTPP 자료조사 및 분석

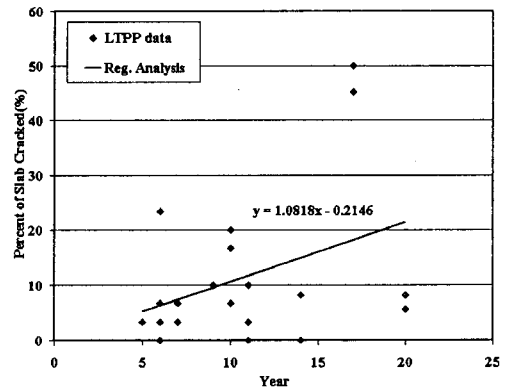
국내 LTPP 자료는 아직까지 체계적인 데이터베이스 구축이 미흡한 실정이나 한국도로공사에서 1999년 콘크리트 포장 52개소(졸눈 콘크리트 포장 41개소와 연속 철근 콘트리트 포장 11개소)를 대상으로 실시한 LTPP 자료와 2004년 5월 중부고속도로와 88고속도로에 대하여 추가적으로 실시한 조사 자료를 이용하였다.

국내 LTPP 조사 자료를 분석하여 균열이 발생되지 않은 구간은 제외하고 경부, 중부, 88, 남해고속도로 구간에 대하여 공용연수에 따른 균열발생률을 <그림 4>에 나타냈으며, 회귀분석을 통하여 공용연수에 대한 균열발생률은 <식 3>과 같이 나타났다.

$$PCRAKED = 1.0818 (Year) - 0.2146 \quad \text{<식 3>}$$



<그림 3> 일반적 균열발생률과 누적 피로손상과의 관계



<그림 4> 국내 고속도로의 공용연수에 따른 균열발생률



4.3 보정계수 산정 방법

균열 발생률과 누적피로손상과의 관계를 표현하기 위하여 Yu가 제안한 피로모형을 이용하고자 한다. AASHTO 2002에 채택된 Yu의 모형은 가장 최근에 제시된 모형으로서 횡방향으로 발생하는 모든 균열, 건조수축, Waring, Curling등을 고려할 수 있으며 상당량 축적된 데이터를 이용하여 검증되어 그 신뢰성이 상당히 높다할 수 있다.

Yu가 제시한 모형의 유도과정을 살펴보면 피로손상 개념에서 보정계수를 도입, 도입된 보정계수를 이용하여 실내 실험을 통하여 얻은 피로모형을 현장에서의 피로모형으로 보정하게 된다. 보정과정에서 사용되는 계수는 최종 균열발생률(%)과 누적피로손상의 관계로부터 유도된다.

슬래브에 발생하는 균열은 차량이나 환경적인 영향에 의한 반복하중에 의하여 발생하므로 보정계수 산정을 위하여 <식 4>~<식 14>과 같이 표현할 수 있다.

$$FD' = \alpha FD \text{ for Shifting} \tag{식 4}$$

$$N' = \frac{1}{\alpha} N \tag{식 5}$$

$$\ln(N') = \ln\left(\frac{1}{\alpha} N\right) = \ln(N) + \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) \tag{식 6}$$

$$\ln(N') = \ln\left(\frac{1}{\alpha} N\right) = \ln(N) + \gamma \tag{식 7}$$

$$\gamma = \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) \text{ or } \alpha = e^{-\gamma} \tag{식 8}$$

$$\%CRACKED = \frac{100}{1 + aFD^b} \tag{식 9}$$

$$\%CRACKED = \frac{100}{1 + aFD^b} = \frac{100}{1 + (FD')^b} \tag{식 10}$$

$$(\alpha FD)^b = aFD^b \tag{식 11}$$

$$\alpha^b FD^b = aFD^b \tag{식 12}$$

$$\alpha^b = a \text{ or } \alpha = a^{\frac{1}{b}} \tag{식 13}$$

$$\gamma = -\frac{1}{b} \ln(a) \tag{식 14}$$

따라서, 조깅인장 피로실험과 휨인장 피로실험과 같은 실내 피로실험을 통하여 얻은 피로파손 모델은 보정계수 a, b, γ 를 산출하게 되면 현장조건에 적절한 피로파손 모형으로 전환할 수 있다.

Yu의 모델은 다양한 LTPP 자료를 이용하여 보정계수 a, b 를 1.16, -1.3으로 산정하였다. 따라서, 국내의 LTPP 데이터를 이용하여 보정계수를 산정하고 기 제시된 보정계수를 검증하고자 한다. 이는 국내의 LTPP 데이터가 많이 요구되며 현장 데이터를 조사하여 국내 실정에 적합한 보정계수를 산정하고자 한다.

4.4 국내 LTPP 자료를 이용한 보정계수(shift factor) 산정

<그림 4>의 공용년수에 따른 균열발생률 데이터를 이용하여 회귀분석한 결과로부터 $a = 0.2146$, $b = -1.0818$ 로 산정되고 이를 <식 14>에 적용하면 국내 고속도로 LTPP 데이터의 보정계수 $\gamma = -1.423$ 로 산정되었다.

산정된 a, b 를 %CRACKED 방정식에 대입하면 <식 15>과 같으며 <그림 5>은 누적손상에 대한 균열발생 비율을 도시하여 나타낸 그림이다. 또한 AASHTO 2002에 사용된 누적손상 방정식과의 비교하고자 일정 누적손상에 대한 %CRACKED의 변화추이를 알아보았다.

$$\%CRACKED = \frac{100}{1 + 0.2146 (FD)^{-1.0818}} \tag{식 15}$$



4.5 실내 피로파손 모형의 보정

Yu의 보정계수 산정 방법을 기초로 하여 <식 1>과 <식 2>의 실내 피로파손 모형을 $\gamma = -1.423$ 으로 보정하면 <식 16>, <식 17>와 같으며, <그림 6>는 실내 피로파손 모형과 보정계수를 이용하여 전환된 실내 피로파손 모형과의 비교를 나타낸 그림이다. 또한 전환된 피로파손 모형을 이용하여 응력수준별 피로수명과 피로강도는 <표 3>에 나타내었다.

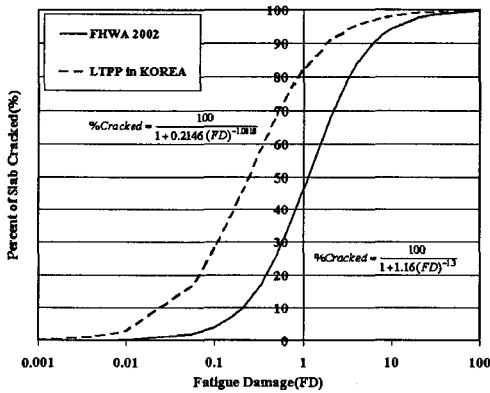
<그림 6>에서처럼 전환된 피로파손 모형은 기존의 실내 피로파손 모형에 비하여 응력수준별 피로수명이 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

보정계수 적용 후 휨인장 피로모델

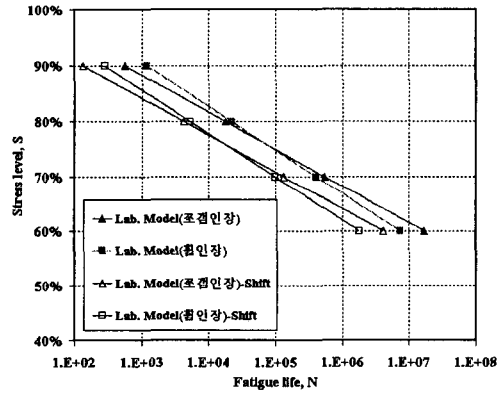
$$\ln(N_F') = 31.889 - 29.155 \left(\frac{\sigma_{max}}{MR_{56}} \right) \tag{식 16}$$

보정계수 적용 후 조깅인장 피로모델

$$\ln(N_F) = 35.842 - 34.364 \left(\frac{\sigma_{max}}{S_{Split}} \right) \tag{식 17}$$



<그림 5> 누적 피로손상과 균열발생률의 관계



<그림 6> 보정 전·후의 피로파손 모형 비교

<표 3> 보정된 피로모형의 피로수명과 피로강도

구분 (실험방법)	응력수준별 피로수명(Cycles)				피로강도(%)	
	90%	80%	70%	60%	200만회	1,000만회
휨인장	284	5,245	96,809	1,786,913	59.61	54.09
조깅인장	136	4,234	131,558	4,088,137	62.08	57.40

5. 결론

본 연구에서는 실내 피로실험인 휨인장 피로실험과 굽은 골재 종류별 실시된 조깅인장 피로실험 결과를 종합하여 현장 조건에 부합되는 피로파손 모형으로 전환하고자 하였다. 이를 위하여 국내 LTPP 자료 조사 및 분석을 실시하여 실내 피로파손 모형을 보다 합리적으로 보정하고자 AASHTO 2002에 채택된 누적손상 이론은 사용하여 시멘트 콘크리트 포장에 대한 피로파손 모형을 제시하고자 하였다.

(1) 교통하중에 의한 파손상태를 모사하기 위하여 실험방법별 및 굽은 골재 종류별로 피로실험을 수행하여 각각의 요인별 실내 피로파손 모형을 개발하여 제시하였다.



(2) 국내에서 유일하게 다년간 LTPP 데이터가 축적되어있는 중부고속도로 및 한국도로공사에서 1998년 실시된 LTPP 자료조사와 본 연구를 위하여 2004년 추가로 LTPP 조사를 실시하여 LTPP 자료를 축적하였다.

(3) AASHTO 2002에 채택된 누적손상 개념을 이용하고자 축적된 LTPP 자료를 이용하여 보정계수 γ 를 산정하였다.

(4) 실내 피로실험으로 제시된 피로파손 모형을 현장조건에 부합되는 모형으로 합리적으로 보정하고자 보정계수 γ 를 적용하여 실내 피로파손 모형을 현장에 적절한 피로파손 모형으로 전환하였다.

현재 국내의 LTPP 자료를 이용하여 정확한 시멘트 콘크리트 포장의 피로파손 모형에 관련된 결론을 도출하기에는 축적된 LTPP 자료가 상당히 부족한 실정이다. 따라서 앞으로 계획적인 LTPP 자료 수집이 요구되며 수집된 자료를 바탕으로 보다 정확한 시멘트 콘크리트 포장의 피로파손 모형을 도출해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김동호, 2003, “조갯인장 반복하중을 받는 콘크리트의 피로신뢰성 및 누적손상”, 박사학위, 강원대학교
2. 안덕순, 서영찬, 박동엽, 2002, “공항포장 파손예측모형 개발 연구”, 대한토목학회, 22권 4-D호
3. 오병환, 1986, “변동진폭의 피로하중을 받는 콘크리트의 누적손상이론”, 대한토목학회, 6권 4호
4. 윤병성, 김동호, 정원경, 이봉학, 윤경구, 2002, “조갯인장 피로실험 방법에 의한 포장용 콘크리트의 누적손상 평가”, 한국콘크리트학회, 14권 2호
5. 윤병성, 2004, “골재 종류를 고려한 콘크리트 포장의 통합 피로모형 개발 및 평가”, 석사학위, 강원대학교
6. 전성일, 원치문, 이주형, 홍창우, 윤경구, 2002, “조갯인장 피로실험을 이용한 포장용 콘크리트의 피로해석”, 한국콘크리트학회, 14권 1호
7. 최창식, 김동호, 김성환, 윤경구, 2002, “휨과 조갯인장 피로실험을 이용한 포장용 콘크리트의 피로해석”, 2002, 도로포장공학회
8. 최창식, 2003, “휨과 조갯인장을 받는 콘크리트의 피로확률 해석”, 석사학위, 강원대학교
9. T.E. Hoerner, M.I. Darter, L. Khazanovich, L. Titus-Glover, and K.L. Smith, 2000, “Improved Prediction Models for PCC Pavement Performance-Related Specifications, Volume I: Final Report”, FHWA-RD-00-130, Washington, DC, Federal Highway Agency