

휨 또는 쪼갬인장 반복하중을 받는 콘크리트의 신뢰성 해석과 피로모델 제안

김동호^{1)*} · 심도식²⁾ · 김성환³⁾ · 윤경구³⁾

¹⁾ 텍사스주립대학교 교통연구소 ²⁾ 강원도립대학 건설시스템과 ³⁾ 강원대학교 토목공학과

(2003년 10월 10일 원고접수, 2004년 8월 7일 심사완료)

Reliability Analysis and Fatigue Models of Concrete under Flexural or Split Tensional Cyclic Loadings

Dong-Ho Kim^{1)*}, Do-Sik Sim²⁾, Sung-Hwan Kim³⁾, and Kyong-Ku Yun³⁾

¹⁾ Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, TX78705, U.S.A

²⁾ Dept. of Civil Engineering, Gangwon Provincial University, Gangneung, 210-804, Korea

³⁾ Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea

(Received October 10, 2003, Accepted August 7, 2004)

ABSTRACT

This paper compares the fatigue behaviors of concretes subjected to flexural and split-tensional loadings, and proposes the fatigue reliability models based on experimental results and reliability analysis. The fatigue tests were performed for the specimens of 150 mm×75 mm split tensional cylinders and 150 mm×150 mm×550 mm flexural beams under constant loadings at three levels (70, 80 and 90 %) with 0.1 stress ratio, 20 Hz loading speed and sine wave. The reliability analysis on fatigue data was based on Weibull distribution of two-parameters.

From fatigue test results, two criteria were proposed to reject the experimental fatigue data because of statistical variation of concrete fatigue data. Two parameters (α and u) of Weibull distribution were obtained using graphical method, moment method and maximum likelihood method. The probability density function(P.D.F) and cumulative distribution function(C.D.F) of the Weibull distribution for fatigue life of pavement concrete were derived for various stress levels using parameters, α and u . The goodness-of-fit test by Kolmogorov-Smirnov test was acceptable at 5 % level of significance. Based on reliability analysis, a fatigue model for pavement concrete was proposed and compared from existing models.

Keywords : fatigue model, split tension, weibull distribution, goodness-of-fit test, pavement concrete

1. 서 론

콘크리트 포장, 교량, 공항, 해양 및 항만 구조물 등은 차량하중이나 파력이 주기적으로 작용하는 즉 피로하중을 받게 되는 대표적 구조체이다. 이러한 콘크리트의 피로설계에 필요한 모델은 실험데이터의 합리적 분석과 해석을 통하여 제시되어야 하며, 콘크리트의 피로실험데이터는 통계적 분산성과 변화성으로 인하여 확률이론에 기초한 신뢰성 해석이 반드시 요구된다^{8,11)}.

또한, 지금까지 무근콘크리트의 피로실험은 국내·외 여러 학자에 의해 연구되어 다양한 피로모델이 제시되어 왔으나 적용된 피로실험방법은 압축응력이나 휨응력을 받는

경우가 주로 적용되어 왔다^{5,6,7-10)}.

그러나 실제 교량이나 공항, 도로포장체는 순수휨응력을 받기 보다는 압축응력과 인장응력을 동시에 받게 되는 2축 응력상태의 조합응력을 받게 된다. 이러한 상태를 재현 할 수 있는 실험방법이 쪼갬인장피로실험방법이며 콘크리트의 피로거동을 이상적으로 모사할 수 있고 파괴모드가 유사한 이점을 가지고 있어 최근 시도되고 검증된 방법이다^{1,2)}.

따라서, 본 논문에서는 반복하중을 받게 되는 대표적 구조체인 도로포장에 사용되는 콘크리트를 대상으로 휨인장 피로실험방법과 쪼갬인장피로실험방법을 사용하여 두 가지 실험방법에 대한 결과를 비교하고자 하였다. 실험데이터는 2-모수 Weibull 분포(two-parameter Weibull distribution) 함수를 사용하여 신뢰성 해석을 수행하고 적합도 검정을 통하여 이에 기초한 모델을 제시하고자 한다.

* Corresponding author

Tel : +1-512-232-3075 Fax : +1-512-232-3151

E-mail : dhkim1327@korea.com

2. 실험

2.1 개요

본 연구에서는 콘크리트의 피로실험방법을 휨인장피로 실험과 쪼갬인장피로실험방법을 적용하여 일정진폭 반복 하중을 받는 경우에 대해 응력수준의 변화에 따라 실험하였다. 응력수준은 정적 극한강도에 적용 최대 응력으로서 각각 90, 80, 70%로 변화하여 실험하였으며, 이때 응력비는 0.1로 실험하였다.

또한, 하중 재하 속도는 20 Hz를 적용하였고, 하중 재하 형상은 차량하중을 이상적으로 재현할 수 있는 정현파를 적용하였다. 실험에 사용된 시험체는 피로실험이 진행되는 기간 동안 강도의 증진현상을 최소화하기 위하여 재령 28 일 동안 수조에서 양생시킨 후 56일 까지 공기 중 양생하여 실험하였다.

2.2 콘크리트의 배합

콘크리트의 배합에 사용된 시멘트는 강원도 영월군 서면에서 생산되는 국내 S사 1종 보통포틀랜드 제품을 사용하였으며, 혼화제는 국내 S사 제품의 표준형 AE감수제로서 첨가량은 시멘트 중량의 0.15%를 사용하였다. 굵은골재는 충북 음성군 감곡면 오향리에서 채취된 골재와 잔골재는 경기도 여주군 점동면 덕평리에서 채취한 골재를 사용하였다. 포장 콘크리트에 사용되는 굵은골재의 최대치수는 32mm이나 골재의 입도분포가 표준입도에 맞지 않아 32mm의 골재와 19mm의 골재를 약 55% : 45%의 비율로 혼합하여 사용하였으며, 32mm와 19mm의 굵은골재 혼합 입도분포곡선과 잔골재의 입도분포가 시방입도 범위 내에 분포하는 것으로 나타났다.

콘크리트 배합은 국내 고속도로 포장에 사용되는 시방 배합표를 기준으로 하여 콘크리트 배합전 골재의 입도와 함수상태를 보정하여 현장배합으로 환산한 후 실험하였다. 또한, 콘크리트의 제조에서 재료의 투입순서는 굵은골재와 잔골재 및 시멘트를 믹서내에 투입한 후 30초간 건비빔을 실시하고 혼화제를 배합수에 희석하여 투입한 후 1분간 배합하여 배출하였다. Table 1은 실험에 사용된 콘크리트 배합표를 나타낸 것이다.

Table 1 Mix proportions of concrete (unit : N/m³)

W/C (%)	S/a (%)	W	C	S	Gravel		AE
					G ₁ (32 mm)	G ₂ (19 mm)	
42.3	37.7	1411	3332	6684	6468	5214	5.0

2.3 실험방법

콘크리트의 강도측정은 KS 규정에 의하여 쪼갬인장강도 및 휨강도시험을 실시하였다. 쪼갬인장강도와 휨강도는 피로실험과 동일한 조건으로 수행하여 재령 56일의 강도 측정결과를 기준하여 피로실험에 적용할 응력수준의 범위를 결정하였다. 강도 측정은 콘크리트 배치에 따라 각각 5개 이상의 공시체를 시험하여 그 평균값을 사용하였다. 강도측정결과 쪼갬인장강도는 재령 28일과 56일에서 각각 4.1, 4.6 MPa로 나타났으며 휨강도는 6.5, 7.0 MPa로 나타나 소요의 강도를 충족시키는 것으로 나타났다. 여기서, 쪼갬인장강도의 경우 정적 강도측정은 KS 규정에 따라 Ø150×300mm의 원주형 공시체를 사용해야 되나 피로실험에 사용될 시험체와 동일한 조건으로 하고 실험의 효율성을 기하기 위하여 콘크리트용 시료절단기를 이용하여 Ø150×75mm가 되도록 절단한 후 실험하였다. 휨 피로실험은 150×150×550mm의 각주 공시체를 제작하여 INSTRON 장비에 의해 정적 강도측정과 동일한 조건인 단순 지지되고 중앙점에 하중이 재하되는 3점 재하 방식으로 실험하였다. 쪼갬인장 피로실험은 Ø150×300mm의 원주형 시험체를 제작하여 Ø150×75mm가 되도록 절단하고 버어니어캘리퍼스를 이용하여 시험체의 두께를 측정후 실험하였다. 시험체는 가압판 위에서 편심 되지 않도록 하고 가압판과 공시체 사이에 균등한 하중전달과 시험체의 국부적 파괴를 방지하기 위해 3mm 두께의 가압판을 설치하여 실험하였다. 피로하중 재하시 초기 평균하중까지 도달시간은 실험적으로 결정한 20초를 가하여 시험체의 손상을 방지 하였으며, 실험의 종료는 200만회까지 수행하였다. Fig. 1은 피로실험의 모식도를 나타낸 그림이다.

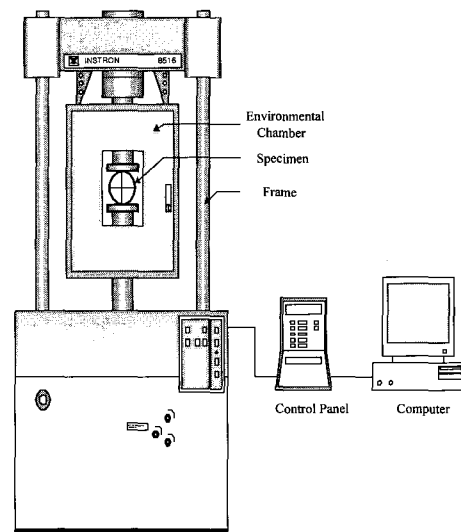


Fig. 1 Schematic description of fatigue test set-up

Table 2 Fatigue test results

Specimen no.	Fatigue life(cycles)					
	S=90%		S=80%		S=70%	
	Split	Flexural	Split	Flexural	Split	Flexural
1	† 132	† 119	† 2,383	† 479	† 15,217	† 21,761
2	† 241	424	9,960	† 2,076	† 45,962	† 50,851
3	416	614	12,320	7,600	72,849	103,452
4	477	689	15,033	12,347	107,516	103,506
5	622	754	22,181	16,907	117,349	128,364
6	1,039	985	23,352	17,514	124,399	147,293
7	1,656	1,242	25,171	31,173	183,767	217,319
8	1,716	2,155	35,747	38,311	203,184	326,932
9	2,205	2,452	40,113	57,065	239,296	343,931
10	2,397	2,452	40,767	61,267	299,816	374,996
11	2,582	2,516	59,458	67,671	374,390	451,817
12	2,640	2,714	61,424	69,853	519,747	500,944
13	† 4,111	2,887	† 94,688	† 84,813	567,526	569,405
14	† 5,679	† 5,410	† 114,321	† 122,735	† 1,494,864	659,013
15	† 5,913	† 6,892	† 122,016	† 174,729	‡ 2,000,000	† 1,242,351

3. 피로실험결과와 신뢰성 해석

3.1 실험결과

콘크리트 피로실험결과와 실험데이터가 통계적 변화성 및 분산성을 내재하고 있기 때문에 합리적인 분석과 해석이 필요하다. 확률론적 이론을 바탕으로 한 신뢰성 해석은 이러한 불확실성의 적절한 계산을 위한 효율적 방법이라 할 수 있다. 또한, 금속이나 고체의 피로실험 데이터는 수치적 확률모델의 계산을 위해 통계학적으로 서술할 수 있으며, 대부분의 모델은 대수적 정규분포함수를 사용하는 것이 손쉬운 방법이므로 이를 사용하여왔다. 1963년 개정된 ASTM Special Technical Publication에서도 피로수명 N 이 정규분포 한다는 가정으로 제정하여 대수정규분포함수를 광범위하게 사용하였으나, 대수정규분포의 채택으로 인하여 수학적 편의성에 대한 논쟁의 여지를 남기게 되었다^{7,11)}.

Gumbel에 의해 지적되었듯이 대수정규분포의 위험함수(hazard function or risk function)는 시간이나 피로수명의 증가에 따라 감소한다^{11,14)}. 이는 공학재료의 피로진행 과정에서 재료가 점진적으로 약화되어야 하는 물리적 현상에 위배되는 결과를 가져오게 된다. 따라서, 재료의 물리적 가정이나 실험의 검증, 적용상 용이성 및 진보적인 통계학적 해석 등이 요구되기 때문에 현재 실험적으로 증명된 Weibull 확률분포 함수가 널리 사용되며, Weibull 확률분포 함수의 매개변수 α , u 는 그래픽방법, 모멘트 방법, 최우도법에 의해 계산된다^{4,11,14)}.

Table 2는 신뢰성 해석을 위하여 응력수준 및 실험방법에 따라 실험결과를 나타낸 것으로 각각의 실험변수에 따라 15개의 시험체를 실험하여 그 결과를 제시한 것이다. 콘크리트 피로실험데이터는 Table 2에 나타낸 바와 같이 통계적 변화성 및 분산성을 나타내고 있다. 실험데이터의 합리적 분석을 위해 데이터를 검토한 결과 결정계수 0.9를 기준으로 이 범위에서 제외되는 데이터와 200만회 반복하중 재하시 파괴되지 않은 데이터는 해석에서 제외하는 것이 타당할 것으로 판단되어 이를 각각 †와 ‡으로 표기하여 나타내었다.

실험데이터는 Weibull의 확률분포 함수를 사용하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 신뢰성 해석에 필요한 Weibull의 확률분포 함수의 매개변수 α 와 u 는 그래픽 방법, 모멘트 방법 및 최우도법에 의해 산정하고 평균값을 사용하였다. 응력수준 및 실험방법에 따라 확률밀도함수와 누적분포함수를 도시하여 분포양상을 고찰하였다. 신뢰성 해석에 사용한 Weibull의 확률분포 함수는 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정 방법을 이용하여 유의수준 5%에 대한 검정을 수행하고 이에 기초하여 휨 및 쪼갬인장피로실험에 대한 피로모델을 제안하고자 한다.

3.2 Weibull 확률분포함수의 매개변수 산정

3.2.1 그래픽 방법

Graphic 방법에 의한 매개변수 산정은 Weibull의 확률분포법칙으로부터 계산되며, 특히 공학재료의 피로거동을 적절

히 나타내고 재료의 안정성 확보를 위해 n_0 를 0으로 가정한 2-모수 Weibull 분포를 신뢰성 공학에 있어서 가장 많이 사용하고 있다. Weibull 확률법칙에 의한 확률밀도함수(P.D.F : probability density function) $f(n)$ 와 누적분포함수(C.D.F : cumulative distribution function) $F_f(n)$ 는 $n \geq n_{0,s} > 0$ 과 $\alpha > 0$ 및 $u > n_{0,s}$ 에서 식(1) 및 식(2)와 같이 표현된다.

$$f(n) = \frac{\alpha}{u - n_{0,s}} \left(\frac{n - n_{0,s}}{u - n_{0,s}} \right)^{\alpha-1} \exp - \left(\frac{n - n_{0,s}}{u - n_{0,s}} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$P_f(n) = 1 - \exp - \left(\frac{n - n_{0,s}}{u - n_{0,s}} \right)^\alpha \quad (2)$$

여기서, n =임의 피로수명에 대한 특정 치, N
 α =응력수준 S에서 형상 매개변수(또는 Weibull 기울기)
 u =응력수준 S에서 특성수명 (또는 스케일 매개변수)
 n_0 =응력수준 S에서 위치 매개변수 (또는 최소수명)

생존함수(survivorship function) 또는 신뢰성함수 $L_R(n)$ 은 식(2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L_R(n) = \exp - \left(\frac{n - n_{0,s}}{u - n_{0,s}} \right)^\alpha \quad (3)$$

또한, Weibull 분포의 위험함수는 시간에 따른 피로수명의 확률밀도함수와 누적분포함수 및 신뢰성함수로부터 $n \geq n_0$ 에서 다음과 같이 표현된다.

$$h_N(N) = \alpha \left(\frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^{\alpha-1} \quad (4)$$

위험함수는 피로수명이 증가함에 따라 점진적으로 증가하며 재료의 피로거동을 예측하는데 적합하다. 특히 n_0 가 0일 때, 2-모수 Weibull 분포는 안전측의 신뢰성을 제공하므로 공학재료의 피로거동을 나타내는데 더욱 적절하며 위의 식(3)은 아래의 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_R(n) = \exp - \left(\frac{n}{u} \right)^\alpha \quad (5)$$

위의 식(5)는 2-모수 Weibull 분포를 표현하는 함수로서 양변에 대수를 취하게 되면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \ln \left(\frac{1}{L_R} \right) = \alpha \ln(n) - \alpha \ln(u) \quad (6)$$

식(6)은 좌변과 우변의 $\ln \ln \left(\frac{1}{L_R} \right)$ 과 $\ln(n)$ 을 $Y = aX + b$ 의 선형 관계로 표현할 수 있다. 식(6)으로부터 임의 응력수준 S에서 피로수명 데이터를 순차적으로

정리하고, 각각의 피로수명데이터에 대한 생존함수 $\ln \ln \left(\frac{1}{L_R} \right)$ 과 대수적으로 계산된 피로수명 $\ln(n)$ 을 도시하면 그래프로부터 형상매개변수 α 는 기울기가 되며 특성수명 u 는 절편과 α 의 관계식으로 계산하거나 $L_R = 0.368$ 에 대응하는 피로수명을 계산함으로써 얻어질 수 있다. 이때, 생존함수 L_R 은 다음의 관계식으로부터 계산된다.

$$L_R = 1 - \frac{i}{k+1} \quad (7)$$

여기서, i 는 피로수명의 파괴순서, k 는 시험편의 개수

Table 3은 그래픽 방법에 의하여 매개변수 α 와 u 를 산정하기 위하여 응력수준 80%에 대한 실험방법에 따라 각각의 피로수명에 대한 생존함수 L_R 를 계산하고 식(6)에 대한 관계식 및 파괴 확률을 나타낸 것이다. Table 3으로부터 계산된 데이터를 생존함수와 피로수명의 대수관계로 나타내면 Fig. 2와 같이 된다. 여기서, Fig. 2의 형상매개변수 α 는 실험데이터를 회귀분석하여 얻어진 기울기로서 조깅인장 피로실험의 경우 응력수준 90%에서 1.342이며, 휨인장 피로실험의 경우 1.431로 나타났다. 또한, 스케일 매개변수 u 의 산정은 조깅인장 피로실험의 경우 절편이 10.109이고 휨인장 피로실험의 경우 10.831이므로 이는 식(6)의 $\alpha \ln(u)$ 이 된다.

Table 3 Fatigue lives and survivorship functions for S=80 %

Test	i	N_i	$L_R = 1 - \frac{i}{k+1}$	$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{L_R} \right) \right)$	$\ln(N_i)$	$P_f = 1 - L_R$
Split	1	9,960	0.9167	-2.4417	9.2063	0.0833
	2	12,320	0.8333	-1.7020	9.4190	0.1667
	3	15,033	0.7500	-1.2459	9.6180	0.2500
	4	22,181	0.6667	-0.9027	10.0070	0.3333
	5	23,352	0.5833	-0.6180	10.0584	0.4167
	6	25,171	0.5000	-0.3665	10.1334	0.5000
	7	35,747	0.4167	-0.1330	10.4842	0.5833
	8	40,113	0.3333	0.0940	10.5995	0.6667
	9	40,767	0.2500	0.3266	10.6156	0.7500
	10	59,458	0.1667	0.5832	10.9930	0.8333
	11	61,424	0.0833	0.9102	11.0256	0.9167
Flexural	1	7,600	0.9091	-2.3506	8.9359	0.0909
	2	12,347	0.8182	-1.6061	9.4212	0.1818
	3	16,907	0.7273	-1.1443	9.7355	0.2727
	4	17,514	0.6364	-0.7941	9.7708	0.3636
	5	31,173	0.5455	-0.5007	10.3473	0.4545
	6	38,311	0.4545	-0.2377	10.5535	0.5455
	7	57,065	0.3636	0.0115	10.9519	0.6364
	8	61,267	0.2727	0.2618	11.0230	0.7273
	9	67,671	0.1818	0.5334	11.1224	0.8182
	10	69,853	0.0909	0.8746	11.1541	0.9091

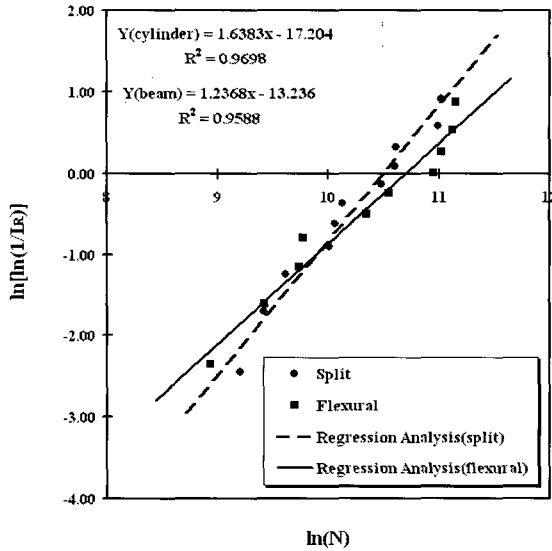


Fig. 2 Graphical analysis for obtaining Weibull's two parameters at S=80%

따라서 이 값을 계산하면 특성수명 u 는 각각 1,868 및 1,937이 된다.

이와 같이 응력수준 80% 및 70%에 대한 쪼갬인장피로실험과 휨인장피로실험에서 매개변수 α 와 u 를 계산하면 응력수준 80%인 경우 α 는 각각 1.638, 1.237, u 는 36,425와 44,371으로 계산되고, 응력수준 70%인 경우 α 는 1.479, 1.473, u 는 293,085과 382,677이 된다.

3.2.2 모멘트 방법

Two-parameter Weibull 분포의 모멘트는 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$E(N) = u\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (8), \quad E(N^2) = u^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) \quad (9)$$

여기서, E 는 기대값이고, $\Gamma()$ 는 감마함수이다.

응력수준 S 에서 데이터의 평균 $\mu = E(n)$ 과 분산 $\sigma^2 = E(n^2) - \mu^2$ 이므로 식(8)과 식(9)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{\sigma}{\mu}\right) = \frac{\Gamma\left(\frac{2}{\alpha} + 1\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)} - 1 \quad (10)$$

여기서, $\sigma/\mu = COV$; 변동계수이다.

식(10)에서 형상계수 α 를 구하는 것이 쉽지 않기 때문에 식(10)은 다음의 식(11)과 같이 간단한 함수로 함축시켜 나타내면 계산이 가능하다.

$$\alpha = (COV)^{-1.08} \quad (11)$$

또한, 특성수명 u 는 식(8)로부터 $E(n)$ 을 μ 에 관한 방정식으로 다시 쓰면 식(12)와 같이 나타낼 수 있으므로 간단히 계산된다.

$$u = \frac{\mu}{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)} \quad (12)$$

이러한 과정을 통하여 실험방법과 응력수준에 따라 모멘트 방법에 의해 매개변수 α 와 u 의 계산결과는 Table 4에 나타내었다.

3.2.3 최우도법(Maximum likelihood estimation)

Weibull 분포의 확률밀도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\exp -\left(\frac{n-n_{0,s}}{u-n_{0,s}}\right)^\alpha ; n \geq n_0 \quad (13)$$

식(1)의 확률밀도함수는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$f_N(n) = \frac{\alpha}{\theta} n^{\alpha-1} \exp -\frac{n^\alpha}{\theta} \quad (14)$$

여기서,

$$\theta = u^\alpha \quad (15)$$

최우도 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i^{\alpha^*} \quad (16)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^k (n_i^{\alpha^*} \ln n_i)}{\sum_{i=1}^k n_i^{\alpha^*}} - \frac{1}{\alpha^*} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \ln n_i \quad (17)$$

여기서, α^* 와 θ^* 는 각각 최우도법으로 α 와 u 를 계산하기 위한 방정식이다. 위의 방정식으로부터 매개변수 α 는 컴퓨터를 이용한 반복계산에 의해 구할 수 있으며, 매개변수 u 는 $u = \theta^{\frac{1}{\alpha}}$ 의 관계식으로부터 계산된다.

따라서, 본 논문에서는 컴퓨터에 의해 이러한 절차를 수행하여 매개변수 α 와 u 의 계산을 산정하였으며, 최우도법에 의해 계산된 α 와 u 는 Table 4에 나타내었다.

3.3 확률밀도함수와 누적분포함수

그래픽방법, 모멘트방법 및 최우도법에 의해 Weibull 분포의 매개변수 α 와 u 를 계산하였다. Table 4는 이 세 가

지 방법에 의해 계산된 매개변수 α 와 u 를 실험방법 및 응력 수준에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 매개변수 α 와 u 의 계산결과는 응력 수준 90%에서 조깅인장피로실험과 휨인장피로실험에서 매우 유사하게 산정되었으며, 응력수준 80%와 70%에서는 실험방법 및 계산방법에 따라 다양한 결과를 나타냈다. 이는 콘크리트 피로실험데이터의 통계적 분포를 간접적으로 의미하는 것으로 피로실험데이터에 따라 다양한 결과를 가져오게 된다. 또한, 매개변수 산정방법에 따라 α 는 그래픽방법이모멘트 방법 및 최우도법에 비하여 대부분 작게 산정 되었으나, u 는 크게 산정되어 산정방법에 따라 차이가 있음을 시사하고 있다.

Figs. 3~4는 응력수준 80%에 대하여 산정된 매개변수 α 와 u 의 평균값을 이용하여 Weibull 분포의 PDF와 CDF를 실험방법에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 응력수준 90%의 경우 α 와 u 의 계산결과가 유사하게 나타나 확률밀도함수와 누적분포함수가 거의 동일한 분포양상을 볼 수 있었으며, 응력수준 70%의 경우 실험방법에 따라 확률밀도함수와 누적분포함수의 분포양상이 실험방법에 따라 차이를 나타내었다. 이러한 분포양상은 α 와 u 에 의해 결정되며 Weibull 분포의 매개변수 α 는 분포의 모양을 결정하고 u 는 피로수명의 척도를 규정한다.⁴⁾

따라서, 응력수준 90%에서는 α 와 u 의 계산결과가 유사하나 응력수준 80%와 70%에서는 실험방법에 따라 α 와 u 의 계산결과가 차이를 나타내기 때문에 분포양상이 다양하게 나타나는 것이다.

3.4 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정

통계적 분석과 해석에서 중요한 문제는 표본이 추출된 모집단의 확률분포에 대한 정보를 얻는 것이다. 모집단의 확률분포를 설정하고 데이터의 분포를 분석하여 모집단에 대한 가설이 타당한지를 검정할 필요가 있다.

Table 4 Comparison of Weibull's parameters from three methods

Division	Test method	S=90 %		S=80 %		S=70 %	
		α	u	α	u	α	u
Graphical method	Split	1.342	1,868	1.638	36,425	1.479	293,085
	Flexural	1.431	1,937	1.237	44,371	1.473	382,677
Moment method	Split	1.872	1,774	1.852	35,366	1.570	284,389
	Flexural	1.830	1,865	1.623	42,405	1.789	367,877
Maximum likelihood estimation	Split	1.966	1,777	1.981	35,606	1.701	288,335
	Flexural	1.921	1,873	1.680	42,579	1.885	369,981
Mean	Split	1.727	1,806	1.824	35,799	1.583	288,603
	Flexural	1.727	1,892	1.513	43,118	1.716	373,512

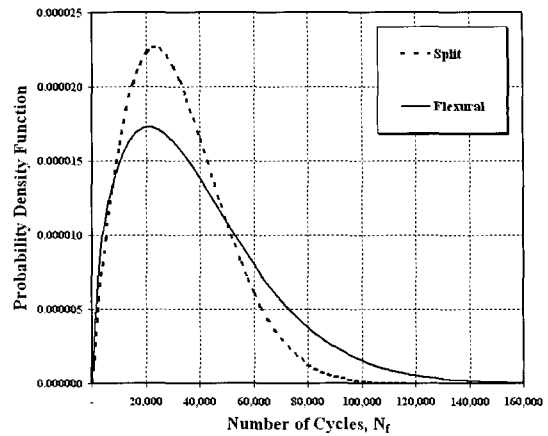


Fig. 3 Probability density functions for fatigue life at S=80 %

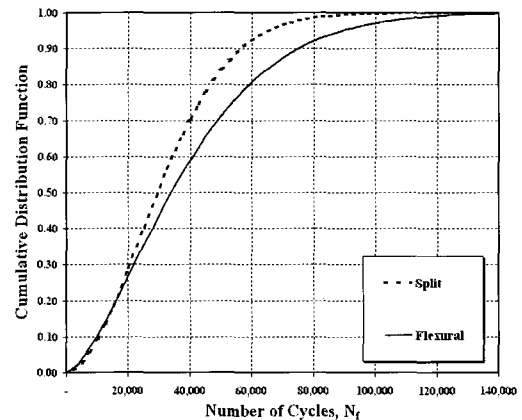


Fig. 4 Cumulative distribution functions for fatigue life at S=80 %

만일, 모집단의 분포가 본 논문에서 채택한 Weibull 분포를 이루고 있지 않다고 하면 많은 착오와 오류를 범하게 된다. 이러한 문제 해결은 비모수통계학(Nonparametric statistics)을 이용하여 적합도를 검정하는 것이 중요하다.³⁾ 따라서, 본 연구에서는 피로실험 데이터의 신뢰성 해석에 사용한 Weibull 확률분포 함수의 신뢰성 해석에 대한 적합도 검정을 위하여 Kolmogorov-Smirnov의 방법으로 유의수준 5%에 대하여 검정하였다. 이 방법은 실험데이터의 누적확률분포와 해석에 사용된 모집단의 누적확률분포를 비교하여, 실험데이터의 분포가 적합한가를 규명하는 것이다. 여기서, 사용되는 통계량은 " D_1 "로 나타내며, 이 수치는 실험데이터의 누적확률분포와 해석에 사용된 누적확률분포의 최대차이(maximum deviation)를 의미하는 것이다.³⁾ Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정에서 통계량 D 는 식(18)과 같이 정의된다.

$$D_1 = \text{Max} | F_a(X) - F_c(X) | \quad (18)$$

그래픽방법, 모멘트방법 및 최우도법으로 계산된 Weibull 분포의 매개변수 α 와 u 의 평균값을 사용하여 통계량 D_1 를 산정하고, 이것을 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정에 대한 임계치 D_C 와 비교하여, 산정된 통계량 D_1 가 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 채택되는지를 검정하였다. Table 5는 응력수준 90%에서 쪼갬인장 피로실험 및 휨인장 피로실험 해석데이터의 적합도 검정 결과를 나타낸 것이다. 쪼갬인장 피로실험의 경우 피로수명 n 이 622일 때 최대차이를 나타내므로 통계량 D_1 는 0.1533이며, Kolmogorov-Smirnov의 표에서 표본이 10이고 유의수준 5%에 대한 임계치 D_C 는 0.4093이다. 마찬가지로 휨인장 피로실험에서는 피로수명 n 이 754일 때 최대차이를 나타내므로 통계량 D_1 는 0.1487이며, Kolmogorov-Smirnov의 표에서 표본이 12이고 유의수준 5%에 대한 임계치 D_C 는 0.3754이다. 즉, $D_1 < D_C$ 이므로 5% 유의수준에서 신뢰성 해석은 적합한 것이 된다. 이러한 검정방법으로 응력수준과 실험방법에 따라 적합도 검정을 수행한 결과 통계량 D_1 는 응력수준 80%와 70%에서 쪼갬인장피로실험의 경우 0.1364, 0.1317 휨인장피로실험에서 0.2037, 0.1499로 나타났으며, 이때 임계치 D_C 는 각각 0.3912, 0.3912, 0.4093, 0.3754로서 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정의 통계량 D_1 는 임계치 D_C 와 비교하여 $D_1 < D_C$ 로 나타나 5%의 유의수준에서 적합한 것으로 나타났다.

4. 피로모델 제안

4.1 모델제안

전 절까지 응력수준 90, 80, 70%에 대한 피로실험데이터의 신뢰성 해석을 수행하고 적합도 검정을 수행한 결과 유의수준 5%에서 모두 적합한 것으로 검정되었다. 따라서, 신뢰성 해석을 바탕으로 이에 기초하여 피로모델을 제안하고자 한다.

Fig. 5는 신뢰성 해석을 수행한 쪼갬인장피로실험과 휨인장 피로실험데이터를 회귀분석하여 응력 수준과 피로수명에 대한 S-N 선도를 나타낸 것이다. 여기서 회귀식을 사용하여 휨 및 쪼갬인장피로실험에 대한 응력수준에 따른 피로수명과 200만회 및 1,000만회의 피로강도를 계산하여 나타낸 것이 Table 6이다.

Table 6에서 나타난 바와 같이 200만회 및 1,000만회의 피로강도는 쪼갬인장피로실험에서 63.5%와 57.7%로 나타났으며, 휨인장피로실험에서 64.5%와 59.0%로 나타나 쪼갬인장피로실험방법에 비하여 휨인장피로실험방법에

서 각각 1.03% 및 1.23%의 피로강도가 증가하는 것으로 나타났다. 응력수준에 따른 피로수명의 계산결과는 90%에서 쪼갬인장피로실험과 휨인장피로실험에서 각각 1,160 및 1,180으로 유사하게 계산되었으나 응력수준 80%에서는 19,248 및 21,771로 나타나 휨에 대한 쪼갬인장피로실험은 12% 감소되는 것으로 나타났다. 그러나, 응력수준 70% 및 60%에서의 피로수명은 각각 319,387과 401,832 및 5,299,622과 7,416,679로 나타나 휨에 대한 쪼갬인장피로실험에서의 피로수명은 각각 21% 및 29%로 감소되어 응력수준이 낮을수록 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 신뢰성 해석에 기초한 피로모델을 다음과 같이 제안하였다.

1) 휨인장피로실험:

$$Ln(N_F) = 33.312 - 29.155(S) \quad (19)$$

2) 쪼갬인장피로실험:

$$Ln(N_F) = 32.337 - 28.090(S) \quad (20)$$

Table 5 Kolmogorov-Smirnov test for goodness-of-fit at S=90%

Test	i	n	$f_n(X)$	$F_n(X)$	$ f_n(X) - F_n(X) $
Split	1	416	0.1000	0.0762	0.0238
	2	477	0.2000	0.0955	0.1045
	3	622	0.3000	0.1467	0.1533
	4	1,039	0.4000	0.3194	0.0806
	5	1,656	0.5000	0.5771	0.0771
	6	1,716	0.6000	0.5996	0.0004
	7	2,205	0.7000	0.7561	0.0561
	8	2,397	0.8000	0.8040	0.0040
	9	2,582	0.9000	0.8433	0.0567
	10	2,640	1.0000	0.8542	0.1458
$\therefore D=0.1533 < D_C=0.4093$ (accepted at 5% significance level)					
Flexural	1	424	0.0833	0.0728	0.0106
	2	614	0.1667	0.1334	0.0333
	3	689	0.2500	0.1603	0.0897
	4	754	0.3333	0.1847	0.1487
	5	985	0.4167	0.2767	0.1400
	6	1,242	0.5000	0.3834	0.1166
	7	2,155	0.5833	0.7142	0.1309
	8	2,452	0.6667	0.7910	0.1243
	9	2,452	0.7500	0.7910	0.0410
	10	2,516	0.8333	0.8054	0.0280
	11	2,714	0.9167	0.8452	0.0715
	12	2,887	1.0000	0.8745	0.1255
$\therefore D=0.1487 < D_C=0.3754$ (accepted at 5% significance level)					

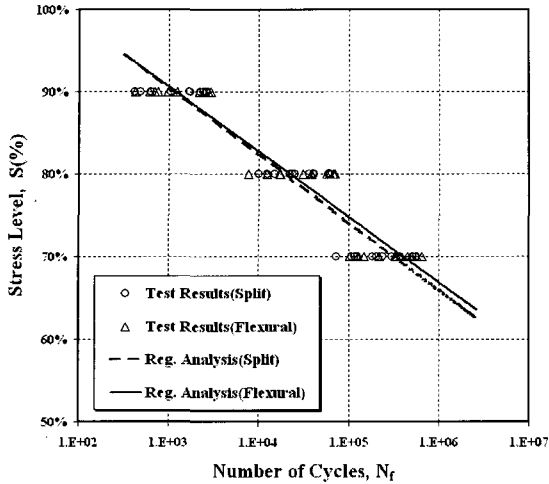


Fig. 5 S-N curves for split tension and flexural Tests

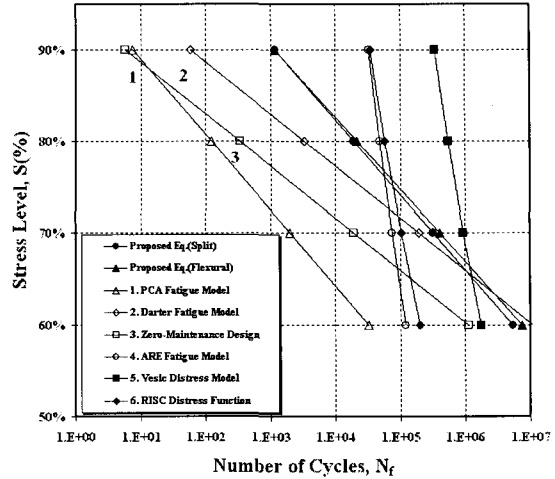


Fig. 6 Comparison of Test Results with Various Fatigue Models

Table 6 Fatigue life and fatigue strength obtained from test results

Test methods	Fatigue life at stress levels(cycles)				Fatigue strength(%)	
	90%	80%	70%	60%	at 2×10^6	at 1×10^7
Split	1,160	19,248	319,387	5,299,622	63.5%	57.7%
Flexural	1,180	21,771	401,832	7,416,679	64.5%	59.0%

4.2 피로모델의 비교

본 연구에서는 도로포장에 사용되는 콘크리트를 대상으로 하였으며 이와 관련된 국외의 주요모델을 살펴보고 제안된 모델과 비교·고찰하였다. 콘크리트 포장의 피로수명 예측에 사용하기 위해 제시된 모델로 실내 피로실험을 통하여 재료적 특성이 반영된 PCA 모델, Darter 모델 및 Zero-Maintenance Design 모델이 있으며, AASHO 시험도로에서 측정된 데이터를 이용하여 개발된 ARE 피로모델, Vesic 모델, RISC 모델이 있다¹²⁾.

Fig. 6은 국외의 모델을 본 연구에서 제안한 모델과 비교하여 나타낸 것이다. 제안된 피로모델에 비하여 PCA 피로모델은 설계의 안전성 확보를 위하여 낮은 파괴확률이 적용됨을 알 수 있다. Darter가 제안한 피로모델은 본 연구에서 제안된 피로모델과 비교하여 응력 수준 65%까지는 낮은 피로수명을 나타내며 응력 수준 65% 이하부터 다소 크게 나타남을 볼 수 있다. Darter 모델에서 좀더 낮은 파괴확률 24%~50%로 제시된 Zero-Maintenance Design 모델은 Darter 피로모델과 동일한 기울기를 갖는 선상에 평행한 것을 볼 수 있다.

그러나 AASHO 도로시험으로부터 개발된 ARE 모델, Vesic 모델, RISC 모델은 제안된 모델과 피로특성(S-N

선도)을 나타내고 있다.

이러한 모델들은 AASHO 시험도로의 현장에서 측정된 데이터를 탄성이론이나 판이론을 사용하여 제안된 것으로 실내실험과 현장실험의 차이를 간접적으로 보여주고 있다. 제안된 모델에 비하여 이러한 모델들은 응력수준이 높은 경우 피로수명이 증가 되며, 응력수준이 낮은 경우 피로수명이 감소되는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 휨과 쪼갬인장 반복하중을 받는 콘크리트의 신뢰성 해석과 피로모델을 제안하기 위하여 도로포장에 사용되는 콘크리트를 대상으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 콘크리트피로실험데이터는 통계적인 분산성과 변동성을 크게 나타내므로 합리적인 분석을 위해 두 가지의 해석기준을 설정하여 제시하고 해석에 적용하였다. 신뢰성 해석에 필요한 Weibull 확률분포함수의 매개변수는 전술한 세 가지 방법에 의하여 계산하고 평균치를 신뢰성 해석에 적용한 결과 Kolmogorov-Smirnov 방법에 의한 신뢰성 해석의 적합도는 유의수준 5%에서 모두 채택되는 것으로 나타났다.
- 2) 신뢰성 해석과 적합도 검증에 기초하여 본 연구에서는 휨인장 및 쪼갬인장피로실험방법에 대한 피로모델을 제안하였으며, 제안된 피로모델로부터 다양한 응력수준에 대한 피로수명과 200만회 및 1000만회에서 피로강도를 산정하여 제시하였다. 두 실험방법에 대해 휨인장피로실험방법은 쪼갬인장피로실험방법에 비해 응력수준별 피로수명과 피로강도가 증가하는 것으로 나타났다.

3) 제안된 모델은 기존에 제안된 국외의 주요 피로모델과 비교하였다. PCA 모델, Darter 모델 및 Zero-Maintenance Design 모델은 본 연구에서 제안된 피로 모델에 비하여 설계의 안전성 확보를 위하여 낮은 파괴확률이 적용되어 피로수명 및 피로강도가 낮음을 알 수 있었다. 그러나 ARE 모델, Vesic 모델, RISC 모델은 도로시험에서 측정된 데이터를 이론적으로 계산하여 제안된 것으로 응력 수준에 따라 피로수명이 실내 시험으로부터 제안된 모델에 비하여 둔화되는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김동호, 김경진, 이봉학, 윤경구, "조깅인장 반복하중을 받는 콘크리트의 파괴확률 모델", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 15권 1호, 2003, pp.311~314.
2. 김동호, 이주형, 정원경, 윤경구, "콘크리트의 조깅인장 피로실험방법 제안 및 적용성 평가", 콘크리트학회논문집, 16권, 1호, 2004, pp.27~35.
3. 박정식, 윤영선, "현대통계학", 다산출판사, 1999, pp. 443~459.
4. 정해성, 박동호, 김재주, "신뢰성 분석과 응용", 영지문화사, 2001, pp.9~84.
5. Holmen, J. O., "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading," ACI Publication SP75-4, 1982, pp.71~110.

6. Hsu, T. T. C., "Fatigue of Plain Concrete," *ACI Journal Proceedings*, Vol.78, No.4, July-Aug, 1981, pp.292~305.
7. Oh, B. H., "Fatigue Analysis of Plain Concrete in Flexure," *Journal of Structural Engineering*, ASCE Vol.112, No.2, Feb, 1986, pp.273~288.
8. Oh, B. H., "Fatigue-Life Distribution of Concrete for Various Stress Levels," *ACI Materials Journal*, Title no 88-M15, 1991, pp.122~128.
9. Shi, X. P., Fwa T. F., and Tan S. A., "Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete," *ACI Materials Journal*, September-October, Title no.90-M46, 1993, pp.435~440.
10. Siemes, A. J. M., "Miner's Rule with Respect to Plain Concrete Variable Amplitude Tests," ACI Publication SP75-17, 1982, pp.343~372.
11. Singh, S. P. and Kaushik S. K., "Flexural Fatigue Life Distributions and Failure Probability of Steel Fibrous Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.91, No.6, 2000, pp.658~667.
12. Stock, A. F., "CONCRETE PAVEMENTS," *ELSEVIER APPLIED SCIENCE*, 1988, pp.11~21.

요 약

본 논문에서는 일정진폭 휨인장 및 조깅인장 반복하중을 받는 콘크리트의 피로신뢰성과 모델제안을 위하여 도로포장에 사용되는 콘크리트를 대상으로 연구하였다. 실험데이터는 2-모수 Weibull 확률분포함수를 사용하여 신뢰성 해석을 수행하였고, 적합도 검정을 통하여 이를 기반으로 한 모델을 제시하였다. 피로실험은 150 mm×75 mm 시험체의 조깅인장피로실험방법과 150 mm×150 mm×550 mm 시험체의 휨인장피로실험방법을 적용하였으며 일정 진폭 피로하중에 대하여 수행하였다. 두 가지의 실험방법에 대하여 응력 수준 90, 80, 70%로 변화하여 실험하고 이때 적용한 응력비는 0.1, 하중재하속도 20 Hz, 정현파(sine)를 적용하였다.

연구결과 콘크리트 피로데이터의 분산성으로 인하여 보다 정확한 해석을 위해 두 가지의 해석 기준을 설정하여 제시하였으며, 그래픽방법, 모멘트방법 및 최우도법에 의해 2-모수 Weibull의 매개변수 α 와 u 를 계산하고 이를 이용하여 확률밀도함수(P.D.F)와 누적분포함수(C.D.F)를 도시하였다. 또한, Weibull의 확률분포함수를 이용한 신뢰성 해석은 Kolmogorov-Smirnov의 방법을 사용하여 5%의 유의수준에서 적합도 검정을 수행한 결과 채택되는 것으로 나타났다. 이러한 해석에 기초하여 조깅인장피로실험과 휨인장피로실험에 대한 피로모델을 제시하고 응력수준에 따른 피로수명과 200만회 및 1,000만회에서의 피로강도를 산정하여 제시하였으며 국외의 주요 피로모델과 비교하였다.

핵심용어 : 피로모델, 조깅인장, Weibull 분포, 적합도 검정