

# 조깅인장 반복하중을 받는 포장용 콘크리트의 피로 해석

## Fatigue Analysis of Pavement Concrete under Split Tension Repeated-Loading

김 동 호\* · 김 성 환\*\* · 이 주 형\*\*\* · 윤 경 구\*\*\*\*

### 1. 서 론

도로포장 구조물에 작용되는 하중은 다양한 형태의 차량과 반복적인 주행으로 인하여 부재가 정적강도보다 낮은 하중에서 파괴된다. 이와 같이 부재가 정적강도 이하에서 파괴되는 현상을 “피로파괴”라고 하며 하중의 특성과 응력상태에 따라 복잡한 거동을 나타낸다. 이러한, 반복적인 하중으로 인한 재료의 피로거동을 고려한 설계와 해석은 중요한 요소이다. 이러한 토목구조물에 작용되는 피로하중은 실제 불규칙적으로 작용하는 경우가 대부분이며, 지속적으로 하중의 강도나 환경조건이 변화하여 일정한 피로하중이 작용하기 보다는 변동하중이 작용하는 경우가 대부분이다. 이처럼, 피로하중의 크기가 변화하는 반복하중 상태의 피로거동은 일정진폭 하중하에서의 피로거동과 다른 특성을 나타내며 거동이 복잡하고 점진적인 누적손상으로 인하여 결국 피로파괴에 이르게 된다.<sup>(3, 7, 9)</sup>

또한, 현재 국내에서 사용하는 도로포장 설계법은 국외의 방법을 도입하여 사용하고 있으며 재료 및 기후 조건, 교통조건, 시공환경 등이 국내에 사용하기에는 근본적인 제한성을 가지고 있어 한국형 도로포장 설계법 개발 및 포장성능 개선 방안에 관한 연구가 진행되고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup>

따라서, 본 논문에서는 포장용 콘크리트의 피로거동을 조깅인장 피로시험방법을 이용하여 실험하고 이에 유효한 모델을 제시하였다. 그리고 이 모델을 국외의 모델과 비교 하였으며, 콘크리트 피로데이터의 신뢰성 확보를 위하여 확률론적 개념을 이용하여 해석 하였으며 해석의 적합도 검정을 수행하였다. 또한, 피로하중의 크기가 변화되는 변동진폭하중을 적용하여 누적손상을 받는 피로특성을 고찰하고 잔존수명에 대한 연구를 수행하였다

### 2. 실험

#### 2.1 실험개요

포장용 콘크리트에 대한 피로시험은 일정진폭 하중을 적용하여 응력비를 0.1로 고정시킨 후 응력수준을 90, 80, 70%로 변화하여 실험을 수행하였다. 이때 하중재하속도는 20Hz를 적용하였으며, 하중재하형상은 정현파를 적용하였다. 또한, 변동진폭 하중을 적용한 피로실험은 고응력에서 저응력을 받게 되는 경우 응력수준을 90→80, 80→70, 90→80→70와, 저응력에서 고응력을 받게 되는 경우 응력수준을 80→90, 70→80, 70→80→90의 세가지지를 합하여 총 6가지의 경우에 대하여 실험하였다. 이때, 반복비는 0.2로 하였으며, 응력비는 0.1, 하중재하속도는 20Hz, 하중재하형상은 정현파로 하였다. 이때 실험기간 강도의 증진을 피하기 위해 재령 28일동안 수조에서 양생시킨 후 56일 까지 기건양생하여 실험하였다.

\* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 · 033-250-6240(dhkim@mail.kangwon.ac.kr)

\*\* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 · 033-250-6240(ksh0304@korea.com)

\*\*\* 정희원 · 한국철도기술공사 구조설계2팀 · 공학박사 · 02-2186-1982(joobin@krtc.co.kr)

\*\*\*\* 정희원 · 강원대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 033-250-6236(kkyun@kangwon.ac.kr)



## 2.2 사용재료

시멘트는 강원도 영월군 서면에서 생산되는 국내 S사 1종 보통포틀랜드 제품을 사용하였다. 굵은골재는 충북 음성군 감곡면 오향리에서 채취된 골재를 사용 하였으며, 굵은골재의 최대치수는 32mm로서 입도가 표준입도에 맞지 않아 19mm골재와 1.24 : 1의 비율로 혼합하여 사용하였다. 또한, 잔골재는 경기도 여주군 점동면 덕평리에서 채취한 골재를 사용하였으며, 실험에 사용된 콘크리트용 혼화제는 국내S사의 제품의 AE감수제 표준형(LIGACE-UA)을 사용하였다.

## 2.3 콘크리트의 배합

콘크리트의 배합설계는 고속도로 콘크리트 포장에 사용되는 배합표를 사용하였으며, 콘크리트 배합전 골재의 입도와 함수상태를 보정하여 실험하였다. 또한, 콘크리트의 제조에서 재료의 투입순서는 굵은골재와 잔골재 및 시멘트를 믹서내에 투입한 후 30초간 건비빔을 실시하였으며, 혼화제를 배합수에 희석하여 투입한 후 1분간 배합한 후 콘크리트를 배출하였다.

콘크리트의 배합표는 표 1과 같다.

표 1. 포장용 콘크리트의 배합

(unit: kg/m<sup>3</sup>)

W/C (%)	S/a (%)	Water (kg)	Cement (kg)	Sand (kg)	Gravel(kg)		AE Water-reducer (g)
					G <sub>1</sub> 32mm	G <sub>2</sub> 19mm	
42.3	37.7	144	340	682	660	532	510

## 2.4 실험방법

조깅인장 피로시험은 Ø15×30cm의 원주형 시험체를 제작한 후 Ø15×7.5cm가 되도록 절단하여 실험에 사용하였다. 또한 시험장치에 있어서 시험체가 가압판 위에서 편심이 되지 않도록 하며, 가압판과 공시체 사이 균등한 하중전달과 시험체의 국부적인 파괴를 막기 위해 3mm 두께의 가압판을 설치하였다. 실험에 사용된 피로시험기는 INSTRON을 사용하였으며, 정적강도측정으로부터 계산된 평균값을 적용하여 응력수준의 범위를 결정하였다. 또한, 피로하중 재하시 초기 평균하중까지 도달시간은 20초로 하였으며, 실험의 종료는 200만 사이클까지 수행하였다.

## 3. 피로데이터의 신뢰성 해석

콘크리트의 강도는 재령 28, 56일에 압축강도, 휨강도 및 조깅인장강도를 측정하였다. 재령 28일에는 각각 3개의 공시체를 시험하여 평균값을 측정값으로 하였으며, 재령 56일에는 5개의 공시체로부터 강도측정결과를 평균하여 결과 값으로 제시하고 피로시험에 적용하였다. 콘크리트의 강도측정 결과 총 4배치의 평균 압축강도는 재령 56일에서 633kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났으며, 휨강도와 조깅인장강도는 각각 64kgf/cm<sup>2</sup>와 47kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

### 3.1 피로실험 결과

표 2는 응력수준에 따른 피로수명을 나타낸 실험결과로서 총 45개의 시험체를 실험하여 그 결과를 제시하였다. 콘크리트의 피로시험 데이터는 표에서 나타낸 바와 같이 통계적 분산성을 내재하고 있으므로 확률론적 개념을 도입한 신뢰성 해석이 필요하다.<sup>(2, 6, 8, 10)</sup> 또한, 실험데이터의 보다 정확한 신뢰성해석을 위하여 두 가지의 기준을 설정하여 해석시 제외되는 데이터를 구분하여 각각 † 와 ‡ 로 나타내었다. 첫째는 실험데이터의 상관계수(R<sup>2</sup>)가 0.9 이하로 되는 데이터이고, 두 번째는 시험체가 200만회 반복하중 재하시 파괴되지 않은 것이다.



표 2. 콘크리트의 피로시험 결과

No.	응력수준(S)		
	90%	80%	70%
1	† 132	† 2,383	† 15,217
2	† 241	9,960	† 45,962
3	416	12,320	72,849
4	477	15,033	107,516
5	622	22,181	117,349
6	1,039	23,352	124,399
7	1,656	25,171	183,767
8	1,716	35,747	203,184
9	2,205	40,113	239,296
10	2,397	40,767	299,816
11	2,582	59,458	374,390
12	2,640	61,424	519,747
13	† 4,111	† 94,688	567,526
14	† 5,679	† 114,321	† 1,494,864
15	† 5,913	† 122,016	† 2,000,000

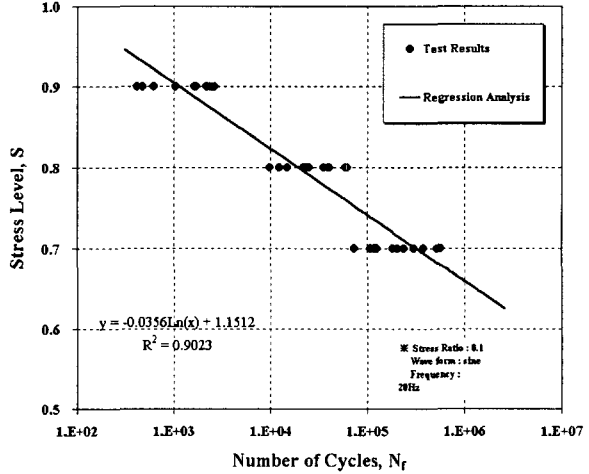


그림 5. S-N 선도

3.2 피로모델 제안

그림 1은 실험결과에 대한 S-N 선도를 회귀분석하여 나타낸 것이다. 실험결과로부터 200만회의 조깅인장 반복하중을 받는 포장용 콘크리트의 피로강도는 정적강도의 63.5%로 나타났으며, 실험결과로부터 응력수준과 피로수명에 대한 S-N 모델을 아래의 식(1)로 제안하였다.

$$\text{Ln}(N_F) = 32.337 - 28.090 \left( \frac{f_{t, \max}}{f_t} \right) \tag{1}$$

여기서,  $N_F$ : 피로수명,  $f_{t, \max}/f_t$ : 응력수준(S)

또한, 국외의 주요모델은 S-N 선도에 기초하여 콘크리트 포장의 피로수명 예측에 사용하기 위하여 개발된 모델로 재료의 특성을 반영한 PCA 모델 및 Darter 모델과 AASHTO Road Test의 단면에서 해석되어 개발된 모델로서 ARE 모델, Vesic 모델, RISC 모델등이 있다.<sup>(5)</sup> 그림 2는 S-N 선도에 기초한 국외의 모델을 제안된 모델과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 PCA Fatigue Model은 설계의 안전성 확보를 위하여 낮은 파괴확률이 적용되므로 제안된 모델에 비하여 피로수명이 작게 평가됨을 볼 수 있으며, Darter Fatigue Model도 제안된 모델에 비하여 작게 나타났다.

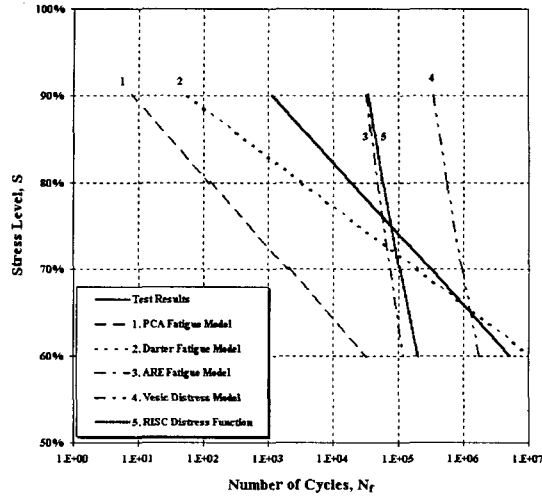


그림 6. 피로모델의 비교

그러나, AASHTO Road Test로부터 개발된 ARE Fatigue Model, Vesic Distress Model, RISC Distress Function 등은 실험데이터와 재료의 피로시험으로부터 제시된 모델과는 다른 양상으로 나타난다. 이는 재료의 피로시험을 통하여 나타난 실험결과가 시험도료를 통하여 측정된 결과와의 차이점으로 분석된다.

### 3.3 신뢰성 해석 및 파괴확률

표 3은 Weibull 분포의 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 를 Graphic 방법, Moment 방법 및 Maximum Likelihood 방법에 의해 계산하여 나타낸 것이다. Graphic 방법, Moment 방법 및 Maximum Likelihood 방법으로 계산된 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 의 평균값을 이용하여 파괴확률에 따른 피로수명을 산정하였다. two-parameter Weibull 분포에서 각각의 파괴확률에 대한 피로수명은 다음의 식(2)로부터 계산된다.(7)

$$n = \ln^{-1} \left[ \frac{\ln \ln \left( \frac{1}{1 - P_f} \right) + \alpha \ln(u)}{\alpha} \right] \quad \text{식(2)}$$

식(2)로부터 계산된 파괴확률에 대한 피로수명은 표 4에 나타내었다. 또한, 파괴확률 0.95, 0.50, 0.05에 대한 응력수준 및 피로수명의  $S-N-P_f$  관계를 그림 3에 도시하여 나타내었다.



표 3. Weibull의 확률분포에 대한 매개변수 계산 결과

Division	S=90%		S=80%		S=70%	
	$\alpha$	$u$	$\alpha$	$u$	$\alpha$	$u$
Graphical Method	1.342	1.871	1.622	36,618	1.500	290,411
Method of Moments	1.872	1,774	1.852	35,366	1.570	284,391
Maximum Likelihood	1.966	1,777	1.982	35,606	1.701	288,335
Average	1.727	1,807	1.819	35,863	1.590	287,712

표 4. 파괴확률에 따른 피로수명

파괴확률 ( $P_f$ )	S=90%	S=80%	S=70%
0.05	324	7,003	44,448
0.10	491	10,405	69,891
0.20	758	15,720	112,034
0.30	995	20,345	150,463
0.40	1,225	24,787	188,591
0.50	1,462	29,317	228,491
0.60	1,718	34,180	272,323
0.70	2,013	39,718	323,333
0.80	2,381	46,591	388,074
0.90	2,930	56,733	486,092
0.95	3,413	65,567	573,564
0.99	4,378	83,056	751,632

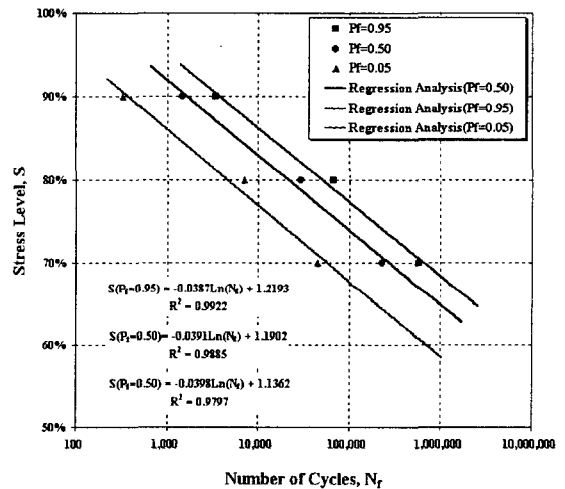


그림 3. S-N-Pf 선도

### 3.4 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정

Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정은 Graphic 방법, Moment 방법 및 Maximum Likelihood 방법으로 계산된 Weibull 분포의 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 의 평균값을 사용하여 통계량 D를 산정하고, 이것을 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정의 임계치  $D_c$ 와 비교하여, 산정된 통계량 D가 유의수준  $\alpha = 0.05$ 에서 채택되는가를 검정한 것이다.<sup>(4)</sup>

표 5에서 나타낸 바와 같이 각각의 응력수준에 대한 적합도 검정 결과 모든 경우에서 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정의 통계량 D는 임계치  $D_c$ 와 비교하여 5%의 유의수준에서 적합한 것으로 나타났다.

표 5. Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정

응력수준	D	$D_c$	유의수준	결과
90%	0.1534	0.4093	5%	accepted
80%	0.1361	0.3912	"	"
70%	0.1091	0.3912	"	"



#### 4. 누적손상 이론에 의한 피로 해석

변동진폭하중을 적용한 콘크리트의 피로시험은 저응력에서 고응력으로 하중이 작용하는 경우와 고응력에서 저응력으로 하중이 작용하는 경우로서 각각 2단계 및 3단계의 피로하중을 받는 경우에 대하여 실험하였다. 일정진폭 피로시험 결과에서 제안된 식(1)의 S-N 관계식으로부터 각각의 응력수준에 따른 피로수명을 산정한 결과 응력수준 90%에서 1,160, 80%에서 19,248, 70%에서 319,387로 계산되었으며 이를 변동진폭 하중에 대한 피로시험에 적용하였다.

표 6은 이에 대한 실험결과를 나타낸 것으로 실험에 사용된 시험체는 각각의 경우별로 5개씩 총 30개의 시험체를 실험하여 그 결과를 나타낸 것이다.

표 6. 변동진폭 피로시험 결과

Specimens	Case 1. 90%→80%		Case 2. 80%→90%		Case 3. 80%→70%		Case 4. 70%→80%	
	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>
1	232	1,956	3,850	547	3,850	8,385	63,877	3,986
2	232	2,448	3,850	841	3,850	12,235	63,877	5,626
3	232	5,087	3,850	1,648	3,850	93,436	63,877	6,541
4	232	13,927	3,850	1,833	3,850	485,327	63,877	18,409
5	232	39,546	3,850	1,898	3,850	527,952	63,877	28,813

Specimens	Case 5. 90%→80%→70%			Case 6. 70%→80%→90%		
	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>
1	116	1,925	25,033	31,939	1,925	741
2	116	1,925	171,143	31,939	1,925	839
3	116	1,925	197,782	31,939	1,925	924
4	116	1,925	259,862	31,939	1,925	3,309
5	116	1,925	300,785	31,939	1,925	3,322

#### 4.1 Palmgren-Miner의 선형 손상 이론에 의한 피로 해석

Palmgren-Miner의 선형손상 이론은 S-N 관계식으로부터 계산된 각 응력수준에 따른 피로수명을 산정하여 응력수준 S<sub>1</sub>에서의 피로수명을 N<sub>F1</sub>으로 하여 실제 적용한 반복수 n<sub>1</sub>과의 비를 부분손상 D<sub>1</sub>으로 정의하여 다른 응력수준에서도 이와 같은 계산 방법을 적용하여 이러한 부분손상의 합이 1보다 크거나 같을 때 파괴가 일어난다고 정의한 것이다.

표 7은 선형 손상 이론에 의하여 실험결과를 분석한 결과를 나타낸 것이다. 고응력에서 저응력을 받게 되는 2단계 피로하중이 적용된 case 1과 3에서의 누적손상은 각각 0.854 및 0.906으로 나타났으며, 3단계의 피로하중을 받는 case 5에서는 0.798로 나타나 누적손상 D는 평균 0.853으로 유사한 결과를 나타내었다. 또한, 저응력에서 고응력을 받게 되는 2단계의 피로하중에서 case 2와 4는 각각 1.367 및 1.058로 나타났으며, 3단계의 피로하중을 받는 case 6에서는 1.775로 나타나 Palmgren-Miner의 선형 손상 이론을 적용한 해석은 적합하지 않으며 이에 대한 적절하고 합리적인 해석이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4.2 등가 누적손상 이론에 의한 피로 해석

등가 누적손상 이론은 Marin에 의해 연구된 것으로 좀더 편리하고 간단한 개념을 이용하여 콘크리트의 누적 손상을 계산하는 방법이다.<sup>(3, 7)</sup> 이 개념은 실험결과에 대한 등가 누적손상 해석에 필요한 지수  $\beta$ 를 계산하면 잔존수명을 계산할 수 있으며, 이를 실험결과와 비교하여 이론적 잔존수명과 실험결과를 비교할 수 있다.



표 8은 등가의 누적손상 이론을 적용하여 계산된 변동진폭 하중에 대한 경우에 따라 계산된 잔존수명 계산에 필요한 지수  $\lambda$ 를 계산하여 나타낸 것이다. 표 8에 나타낸 바와 같이 지수  $\lambda$ 는 대체로 유사한 결과를 나타내었으며, 총 6가지 경우에 대한 평균 지수  $\lambda$ 는 21.216로 나타났다. 또한, 표 9은 이론으로부터 계산된 잔존수명과 실험결과를 나타낸 것이다. 2단계의 변동하중이 적용된 경우와 3단계의 변동하중이 적용한 총 6개의 경우에 있어 이론에 의해 계산된 잔존수명과 실험결과가 대부분 유사하게 나타났다.

표 7. 선형손상 이론에 의한 피로 해석

Specimens	Case 1.			Case 2.		
	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$D = \sum \frac{\Xi}{N_{Fi}}$	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$D = \sum \frac{\Xi}{N_{Fi}}$
1	0.2	0.102	0.302	0.2	0.472	0.672
2	0.2	0.127	0.327	0.2	0.725	0.925
3	0.2	0.264	0.464	0.2	1.421	1.621
4	0.2	0.724	0.924	0.2	1.580	1.780
5	0.2	2.055	2.255	0.2	1.636	1.836
평균	$D = 0.854$			$D = 1.367$		

Specimens	Case 3.			Case 4.		
	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$D = \sum \frac{\Xi}{N_{Fi}}$	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$D = \sum \frac{\Xi}{N_{Fi}}$
1	0.2	0.026	0.226	0.2	0.207	0.407
2	0.2	0.038	0.238	0.2	0.292	0.492
3	0.2	0.293	0.493	0.2	0.340	0.540
4	0.2	1.520	1.720	0.2	0.956	1.156
5	0.2	1.653	1.853	0.2	1.497	2.697
평균	$D = 0.906$			$D = 1.058$		

Specimen	Case 5.				Case 6.			
	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$\frac{n_3}{N_{F3}}$	$D = \sum \frac{\Xi}{N_{Fi}}$	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$\frac{n_3}{N_{F3}}$	$D = \sum \frac{\Xi}{N_{Fi}}$
1	0.1	0.1	0.078	0.278	0.1	0.1	0.639	0.839
2	0.1	0.1	0.536	0.736	0.1	0.1	0.723	0.923
3	0.1	0.1	0.619	0.819	0.1	0.1	0.797	0.997
4	0.1	0.1	0.814	1.014	0.1	0.1	2.853	3.053
5	0.1	0.1	0.942	1.142	0.1	0.1	2.864	3.064
평균	$D = 0.798$				$D = 1.775$			

표 8. 지수  $\lambda$ 의 계산결과

구분	case 1.	case 2.	case 3.	case 4.	case 5.	case 6.
계산결과	22.141	20.648	20.099	22.494	15.485	26.426



표 9. 실험결과와 이론적 결과의 잔존수명 비교

구 분		case 1.	case 2.	case 3.	case 4.	case 5.	case 6.
잔존수명	이론치	11,292	1,265	261,693	15,034	183,185	1,232
	실험결과	12,593	1,353	225,467	12,675	190,921	1,827

## 5. 결 론

본 논문에서는 포장용 콘크리트의 피로 해석을 위하여 쪼갬인장 피로시험방법을 적용하여 일정진폭 피로 하중 및 변동진폭 피로하중이 작용하는 경우에 대하여 피로 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 쪼갬인장 피로실험을 이용한 포장용 콘크리트의 200만회의 피로강도는 정적극한강도의 약 63.5%로 나타났다. 피로실험 결과로부터 S-N 모델을 제시하고 국외의 모델과 비교하였다.
- 2) Weibull 분포의 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 를 계산하여 피로시험 데이터의 신뢰성 해석을 수행하였으며, 파괴확률에 따른 피로수명을 산정한 후 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정방법을 이용하여 신뢰성 해석의 적합도 검정 결과 각각의 응력수준에서 모두 적합한 것으로 나타났다.
- 3) Palmgren-Miner의 선형손상 이론을 적용하여 실험결과를 분석한 결과 고응력에서 저응력을 받는 피로하중이 적용된 경우에서 누적손상 D는 평균 0.853으로 나타났으며, 저응력에서 고응력을 받게 되는 피로하중에서는 1.058~1.775로 나타나 이에 대한 적절하고 합리적인 해석이 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 등가의 누적손상 이론을 적용하여 잔존수명 계산에 필요한 지수  $\rho$ 를 계산한 결과 평균 21.216로 계산되었다. 또한, 등가의 누적손상 이론으로부터 계산된 잔존수명과 실험결과를 비교한 결과 2단계의 변동하중이 적용된 경우와 3단계의 변동하중이 적용한 총 6개의 경우에 있어 이론에 의해 계산된 잔존수명과 실험결과가 거의 유사하게 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(2001), "한국형 포장 설계법 개발 및 포장 성능 개선 방안 수립을 위한 기본계획"
2. 오병환,(1985), "콘크리트의 피로강도 및 피로신뢰성해석에 관한 이론 및 실험연구," 대한토목학회논문집, V.5, No.4, pp.113~119.
3. 오병환, (1986), "변동진폭의 피로하중을 받는 콘크리트의 누적손상이론," 대한토목학회논문집, Vol.6, No.4, pp.79~88.
4. 박정식, 윤영선(1999), "현대통계학", 다산출판사.
5. A. F. Stock,(1988), "CONCRETE PAVEMENTS", ELSEVIER APPLIED SCIENCE.
6. Byung Hwan Oh,(1986), "Fatigue Analysis of Plain Concrete in Flexure," Journal of Structural Engineering, ASCE V.112, No.2, pp.273~288.
7. Byung Hwan Oh,(1991), "Cumulative Damage Theory of Concrete under Variable-Amplitude Fatigue Loading," ACI Materials Journal, January-February, Title no. 88-M6, pp.41~48.
8. Byung Hwan Oh,(1991), "Fatigue-Life Distribution of Concrete for Various Stress Levels," ACI Materials Journal, V.88, No.2, pp.122~128.
9. Jan Ove Holmen,(1982), "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading," ACI Publication SP75-4, pp.71~110.
10. S. P. Singh and S. K. Kaushik, (2000), "Flexural Fatigue Life Distributions and Failure Probability of Steel Fibrous Concrete", ACI Materials Journal, V.91, No.6, pp.658~667.