

# 휨피로시험을 이용한 포장용 콘크리트의 피로해석

## Fatigue Analysis of Pavement Concrete by Flexural Fatigue Test

최창식\*

김동호\*\*

김성환\*\*

이주형\*\*\*

윤경구\*\*\*\*

Chan-Sik Choi

Dong-Ho Kim

Seong-Hwan Kim

Joo-Hyung Lee

Kyong-Ku Yun

### ABSTRACT

The purpose of this research was to obtain fatigue property of pavement concrete by flexural fatigue test. The size of specimen used in fatigue tests was  $10 \times 10 \times 46$ cm. The specimens of pavement concrete were fabricated using the concrete at job site. The fatigue tests were performed by applying into a constant amplitude loading. The flexural fatigue tests were performed by stress levels of 90%, 80%, 70% and 60%, and stress ratio of 0.1.

From this research, the S-N relationship, S-N-P relationship were derived and Weibull probability density functions was plotted using the distribution parameters.

### 1. 서론

일반적으로 콘크리트 구조물들은 정적하중 이외에 파도, 바람, 교통하중과 같이 반복하중을 많이 받게 되는데, 그 중에서도 도로, 교량, 해양 구조물 등이 불규칙한 동적 또는 반복하중상태에 노이게 된다. 기존의 많은 연구에서 이와 같은 콘크리트 구조물의 거동 특성을 연구하기 위하여 피로실험이 수행되었으며, 그로 인해 많은 제안식들이 도출되었다. 그러나 지금까지 국내에서는 실제 포장용 콘크리트에 대한 피로연구는 많이 이루어지지 못한 실정이다. 또한 비균질한 콘크리트의 재료적 특성상 정량적 결과를 얻기란 매우 어렵다. 특히 섬유보강 콘크리트와 같이 보강용 재료를 사용한 피로실험은 많이 이루어지고 있으나, 무근콘크리트에 대한 피로연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 포장용 콘크리트의 피로특성을 연구하기 위해 빔( $10 \times 10 \times 46$ cm)을 이용하여 피로실험을 수행하였다. 피로실험에 사용된 시편은 보다 정확한 결과를 얻기 위해 콘크리트포장이 시공중인 현장에서 제작하였다. 실험은 재령에 따른 압축, 인장, 휨 정적강도를 측정하였으며, 이 결과를 이용하여 응력비 0.1에 대한 응력수준을 결정하였다. 또한 피로수명을 이용하여 응력비 0.1에 따른 S-N관계 및 S-N-P관계를 규명하였으며, 확률이론을 이용한 Weibull 분포매개변수를 산정하여 응력수준에 따른 확률밀도분포를 얻고자 하였다.

### 2. 실험개요

#### 2.1 시편 제작 및 양생

본 연구에서는 중부내륙고속도로에 건설되고 있는 시험도로 본선구간에서 시편을 제작하였으며, 표 1은 시편제작에 사용한 콘크리트의 배합설계이다.

\* 정회원, 강원대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 정회원, 강원대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 한국철도기술공사 대리

\*\*\*\* 정회원, 강원대학교 토목공학과 조교수

<표 1> 포장용 콘크리트의 배합설계

W/C	S/a	단위수량 W (kg)	시멘트량 C (kg)	잔골재량 S (kg)	굵은골재량(kg)		AE표준 감수제	비고
					32mm G <sub>1</sub>	19mm G <sub>2</sub>		
42.3	37.7	144	340	682	660	532	510	

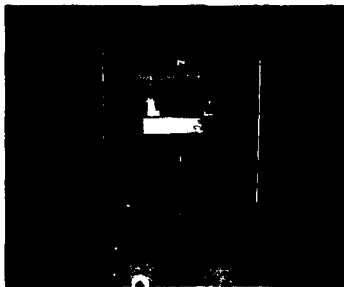
시험체 제작시 다짐은 바이브레이터를 이용한 진동다짐을 병행하여 2층다짐을 실시하였다. 타설 후 급속한 수분 증발을 막기 위해 양생포와 양생제를 사용하여 24시간 양생 후 탈형하였으며, 재령 56일 까지 수온은 23±2℃인 수조에 수중양생을 하였다. 피로시험 중 강도증진에 따른 편차를 줄이기 위해 가도의 증가가 거의 없는 56일 이후에 실험을 실시하였다.

## 2.2 실험방법

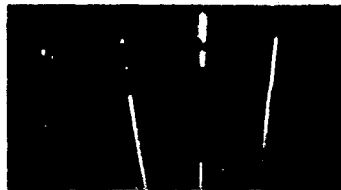
포장용 콘크리트의 강도특성을 알아보기 위해 동일배합으로 제작된 시편을 사용하였다. 강도측정은 휨강도, 압축강도, 간접인장강도를 재령일수(7일, 28일, 56일)에 따라 각각 3개의 시편을 사용하여 수행하였다. 휨강도측정은 빔 시편을 제작해(10×10×46cm) 사용하였고, 3점 재하시험을 규정에(KS F2407) 의해 수행하였다. 압축강도측정은 원주형 공시체(Φ10×20cm)를 사용하였고, 하중의 편심을 줄이기 위해 시편의 양면을 연마기를 이용해 수평하게 하여 규정에(KS F 2405) 의해 수행되었다. 간접인장강도는 압축강도와 동일한 시편을 사용하였고, 하중의 고른 분포를 위해 하중재하지점에 두께 3mm의 합판을 대고 규정에(KS F 2433) 의해 시험하였으며, 압축강도와 조괘인장강도는 만능시험기(UTM)을 사용하였고, 휨강도는 Instron을 사용하였다.

본 연구에서는 빔시편(10×10×46cm)을 이용하여 피로시험을 수행하였다. 시편은 56일 습윤 양생 이후 기건양생을 하였다. 이것은 피로실험 도중에 있을 수 있는 시편의 강도증진에 의한 영향을 줄이기 위한 것이다. 피로실험은 그림 1과 같이 Instron을 사용하였다. 하중의 파형은 sin파를 사용하였으며, 하중속도는 20Hz로 고정하였다. 하중이 mean level에 도달하는데 급격한 하중변화를 줄이기 위해 20초 동안 서서히 하중을 증가하였다. 하중재하는 최대 200만 Cycle까지 수행하였으며, 200만 이상의 피로수명이 발생할 경우에는 실험을 중단하였다.

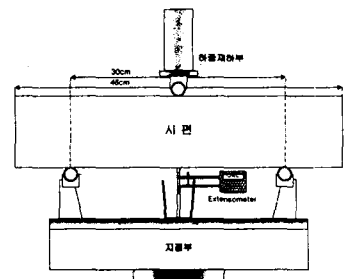
휨피로실험은 3점재하 방법으로 수행하였다. 응력비는 0.1로 고정하였고, 응력수준에 따른 피로수명을 알기 위해 정적 휨강도에 대한 응력수준 90%, 80%, 70%에 대하여 실험을 수행하였으며, 각 응력수준에 대하여 10개의 시편을 사용하였다. 또한 피로누적에 따른 시편의 처짐을 측정하기 위해 그림 2와 같이 처짐이 가장 많이 발생할 것으로 예상되는 시편의 중앙 하부에 처짐측정기(Extensometer)를 설치하여 각각의 시편에 대한 처짐을 측정하였다. 그림 3은 피로시험장치의 모습을 나타내고 있다.



<그림 1> Instron을 이용한 피로시험 전경



<그림 2> Extensometer를 이용한 처짐 측정



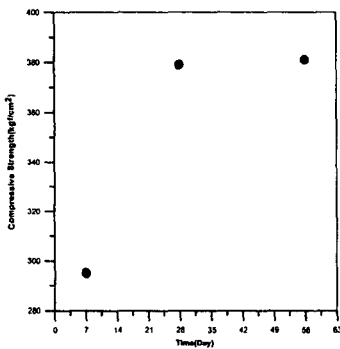
<그림 3> 피로시험 모식도

### 3. 실험결과 및 고찰

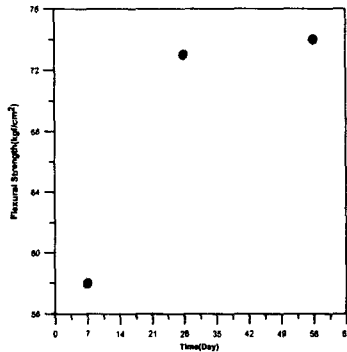
#### 3.1 정적강도 특성

그림 4~6은 현장에서 제작한 포장용 콘크리트의 재령 7일, 28일, 56일에 대한 압축강도, 휨강도, 쪼갬인장강도의 결과를 나타낸 것이다. 압축강도는 56일에 약 381 kgf/cm<sup>2</sup>, 휨강도는 74 kgf/cm<sup>2</sup>, 쪼갬인장강도는 45 kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

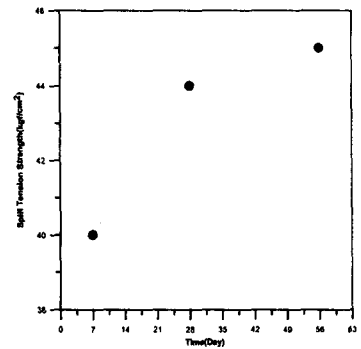
아래의 결과와 같이 모든 강도의 증진은 재령 28일에 거의 끝나며, 28일 이후에는 강도증가 속도가 거의 없는 것으로 나타나고 있다.



<그림 4> 포장용 콘크리트의 압축강도



<그림 5> 포장용 콘크리트의 휨강도



<그림 6> 포장용 콘크리트의 쪼갬인장강도

#### 3.2 포장용 콘크리트의 피로특성

##### 3.2.1 S-N 관계

포장용 콘크리트의 휨피로실험 결과는 표 2와 같이 나타났다. 본 연구의 결과에 의해 응력수준에 따른 피로수명(S-N관계)을 규명하기 위해 단순회귀분석을 통한 응력비 0.1에 따라 회귀분석식을 선정 하였다.

응력비 0.1에 대한 휨피로실험에 대한 회귀분석식은 다음과 같으며,

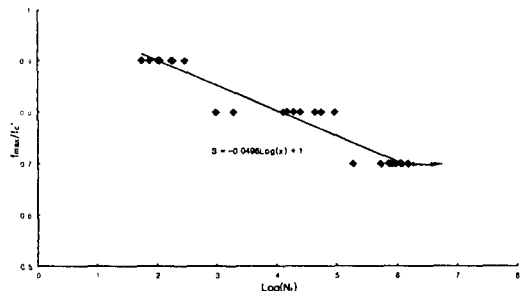
$$\frac{f_{max}}{f_c'} = 1 - 0.0496 \log N_F \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $\frac{f_{max}}{f_c'}$  = 응력수준 ;  $N_F$  = 파괴 시 반복사이클의 횟수(피로수명)

그림 7에서 보는 바와 같이 휨피로시험 결과 시편의 수명이 100만 cycle 이상 진행된 시편이 발생했다. 또한 저응력으로 갈수록 시편에 대한 피로수명결과의 편차가 심한 것을 알 수 있다. 또한 응력수준 80%에 대한 피로수명의 편차가 가장 많은 것으로 나타나며, 응력수준 70% 이하인 경우에는 200만 Cycle이상이 넘을 것으로 예상된다.

No.	90%	80%	70%
1	57	987	191974
2	76	1955	569262
3	108	13140	746334
4	108	15307	847983
5	109	19738	959970
6	112	25348	967431
7	114	25495	1154395
8	178	44490	1234866
9	187	56313	1564729
10	299	95299	*

<표 2> 응력수준에 따른 휨피로 수명



<그림 7> 휨피로실험에 의한 S-N곡선(응력비 0.1)

### 3.2.2 피로수명에 대한 확률분포결정

본 피로데이터에 대한 통계적 해석을 위하여 Weibull 분포를 사용하였고, 정규분포(normal distribution)와 비교하였으며, 응력비 0.1에 대한 응력수준 90%, 80%, 70%의 데이터를 사용하였다.

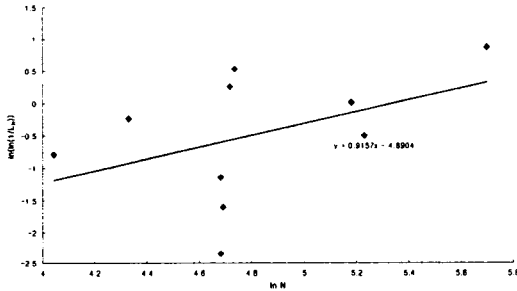
Weibull 분포의 확률밀도함수(PDF)  $f_N(n)$ , 누적분포함수(CDF)  $F_N(n)$ 은 다음과 같다.

$$f_N(n) = \frac{\alpha}{u - n_0} \left( \frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^{\alpha-1} \exp \left[ - \left( \frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^\alpha \right]; \quad n \geq n_0 \quad \text{식(2)}$$

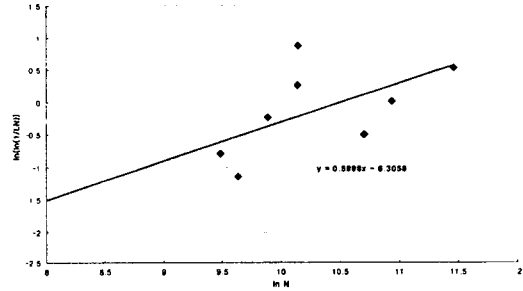
$$F_N(n) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^\alpha \right]; \quad n \geq n_0 \quad \text{식(3)}$$

여기서,  $\alpha$  = 형상매개변수;  $u$  = 특정 극한값;  $n_0$  = 위치매개변수.

공학재료의 피로거동을 나타내는데,  $n_0=0$  인 two-parameter Weibull 분포가 알맞고, 더욱더 안전한 신뢰성을 주는 것으로 보고되고 있다. 본 논문에서도 two-parameter Weibull 분포를 이용하기 위해, 분포매개변수  $\alpha$ ,  $u$ 값을 그래픽방법과 모멘트방법으로 산정하였다.



<그림 8> 피로수명과 신뢰함수와의 관계 (응력수준 90%인 경우)



<그림 9> 피로수명과 신뢰함수와의 관계 (응력수준 80%인 경우)

#### 1) 그래픽방법 :

생존함수(survivorship function)  $L_N(n)$ 은 식(3)으로부터 얻을 수 있다.

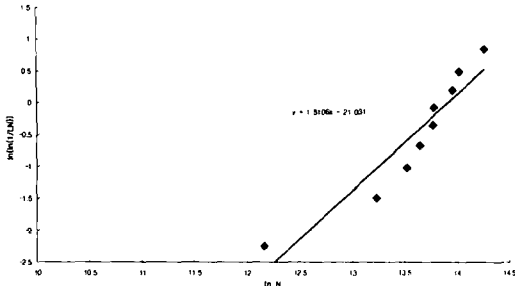
$$L_N(n) = 1 - F_N(n) = \exp \left[ - \left( \frac{n}{u} \right)^\alpha \right] \quad \text{식(4)}$$

여기서,  $L_N(n) = 1 - \left[ \frac{i}{k+1} \right]$ ;  $i$  = 피로수명의 파괴순서,  $k$  = 시편의 수(크기)

식(4)을 정리하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{L_N} \right) \right] = \alpha \ln n - \alpha \ln u \quad \text{식(5)}$$

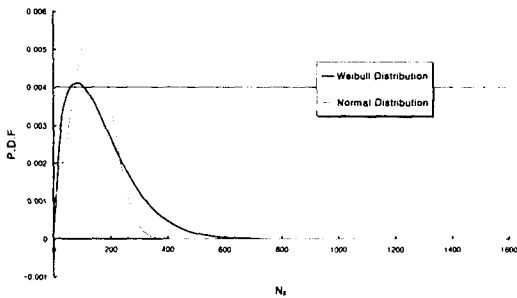
식(5)에서  $\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{L_N} \right) \right]$ 과  $\ln n$ 과의 관계로부터  $\alpha$ ,  $u$ 값을 산정할 수 있다. 그림 8~10은 응력수준에 대하여 위의 관계를 도식한 것으로, 단순회귀분석으로 분포매개변수를 구할 수 있다.



<그림 10> 피로수명과 신뢰함수와의 관계 (응력수준 70%인 경우)

표 2. Weibull 분포 매개변수 값

		응력수준		
		90%	80%	70%
그래픽 방법	$\alpha$	0.9157	0.6	1.511
	$u$	208.641	36796.98	1112680.5
모멘트 방법	$\alpha$	2.029	1.039	2.453
	$u$	152.141	30276.624	1030704.5
평균	$\alpha$	1.472	0.82	1.981
	$u$	180.391	33536.802	1071692.5



<그림 11> 확률밀도 함수 (응력수준 90%)

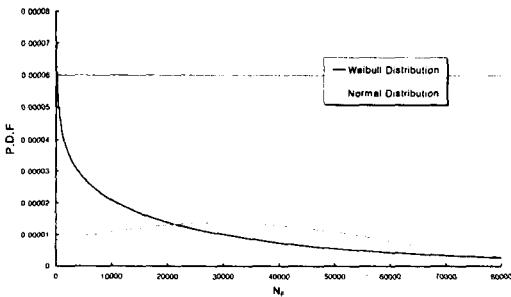
$\mu_N$  = 피로수명의 표준편차

2) 모멘트방법 :

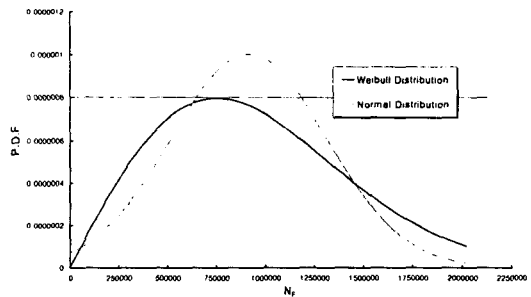
본 방법에서 분포매개변수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$V_N^2 = \left(\frac{\sigma_N}{\mu_N}\right)^2, \quad \alpha = V_N^{-1.08}, \quad u = \mu_N / \Gamma(1 + 1/\alpha) \quad \text{식(6)}$$

여기서,  $V_N^2$  = 분산계수,  $\sigma_N$  = 피로수명의 평균,



<그림 12> 확률밀도 함수 (응력수준 80%)



<그림 13> 확률밀도 함수 (응력수준 70%)

표 2는 각각의 방법에 대한 Weibull 분포의 매개변수 값을 나타내고 있으며, 그림 11~13은 각각의 응력수준에 따른 확률밀도함수를 나타내고 있다. 그래픽방법과 모멘트방법에 의해 산출된 분포매개변수값은 약간의 차이를 보이고 있으며, 이것은 각 변수당 시편의 개수가 약 10개로 통계적 처리에 있어 크기가 작고 피로데이터의 편차에 기인하는 것으로 판단된다.

3) S-N-P관계

McCall은 진동수 5Hz, 최소응력수준을 0.05로 일정하게 하여 얻은 데이터를 다음과 같은 S-N-P관

계식으로 나타내었다.

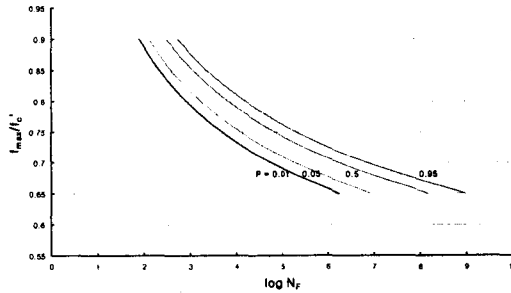
$$\log N_f = 1.824 \left( \frac{f_{\max}}{f_c'} \right)^{-3.658} (-\log L)^{0.064} \quad \text{식(7)}$$

여기서,  $L = 1-P$

본 연구에서는 응력비 0.1에 대하여 Weibull 분포매개변수와 피로수명데이터를 이용하여, 식(4)을 식(7)과 같은 형태로 나타내었으며, 실험결과에 의해 아래의 식(8)과 같이 변환되었다. 본 실험에서는 진동수 20Hz와 응력비를 일정하게 한 것으로 McCall의 실험변수와 약간의 차이는 있다.

$$\log N_f = 1.894 \left( \frac{f_{\max}}{f_c'} \right)^{-3.147} (-\log L)^{0.0621} \quad \text{식(8)}$$

식(8)을 이용하여, S-N-P 선도를 그림 14에 나타내었다.



<그림 13> 응력비 0.1에 대한 S-N-P 관계

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 휨피로실험에 의한 포장용 콘크리트의 피로거동은 응력비 0.1에서 Tefers and Kutti가 제안한 식과 유사하게 나타났다.
- (2) 그래피방법과 모멘트방법에 의해 산정된 Weibull분포매개변수 값은 약간의 차이를 보였으며, 특히 응력수준 80%에 대해서는 그 차이가 많은 것으로 나타났다. 이것은 피로수명의 편차와 실험량의 부족으로 인한 것으로 판단된다.
- (3) 본 논문에서는 휨피로실험을 통한 포장용콘크리트의 강도특성 및 S-N관계식과 S-N-P관계식을 도출하였고, 식(1)과 식(8)에 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

1. Byron W. Porter, Thomas W Kennedy, (1975) "Comparison of Fatigue Test Methods for Asphalt Materials," The Texas Highway Department in cooperation with U. S. Department of Transportation Federal highway Administration, Research Report Number 183-4, April.
2. Hsu, T. T. C, (1981), "Fatigue of Plain Concrete," ACI Journal Proceedings, Vol. 78, No. 4, Apr, pp.292~304.
3. Jan Ove Holmen, (1982), "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading," ACI Publication SP75-4, pp.71~110.
4. Oh, Byung Hwan, (1986), "Fatigue Analysis of Plain Concrete in Flexure," Journal of Structural Engineering, ASCE V. 112, No. 2, Feb, pp.273~288.
5. 오병환, (1985-12), "콘크리트의 피로강도 및 피로신뢰성해석에 관한 이론 및 실험연구," 대한토목학회논문집, Vol.5, No.4, pp.113~119.