

# 쪼갠인장 반복하중을 받는 콘크리트의 파괴확률 모델

## Failure Probability Models of Concrete Subjected to Split Tension Repeated-Loads

김 동 호\*      김 경 진\*\*      이 봉 학\*\*\*      윤 경 구\*\*\*\*  
Kim, Dong-Ho    Kim, Kyong-Jin    Lee, Bong-Hak    Yun, Kyong-Ku

---

### ABSTRACT

Concrete structures such as bridge, pavement, airfield, and offshore structure are normally subjected to repeated load. This paper proposes a failure probability models of concrete subjected to split tension repeated-loads, based on experimental results. The fatigue tests were performed at the stress ratio of 0.1, the loading shape of sine, the frequency of 20Hz, and the stress levels of 90, 80 and 70%. The fatigue test specimen was 150mm in diameter and 75mm in thickness. The fatigue analysis did not include which exceeded 0.9 of statistical coefficient of determination values or did not failure at  $2 \times 10^6$  cycles. The graphical method, the moment method, and maximum likelihood estimation method were used to obtain Weibull distribution parameters. The goodness-of-fit test by Kolmogorov-Smirnov test was acceptable 5% level of significance. As a result, the proposed failure probability model based on the two-parameter( $\alpha$  and  $u$ ) Weibull distribution was good enough to estimate accurately the fatigue life subjected to tension mode.

**Keywords** : concrete fatigue, split tension, failure probability, Weibull distribution

---

### 1. 서 론

지금까지 국내·외 콘크리트의 피로실험은 대부분 압축응력이나 휨응력을 받는 경우에 대하여 연구되어 왔다. 그러나 실제 교량이나 도로포장체는 순수 휨응력을 받기 보다는 압축응력과 인장응력을 동시에 받게 되는 2축 응력 상태의 조합응력을 받게 된다. 이러한 상태를 재현 할 수 있는 실험방법이 쪼갠인장 피로실험 방법이며 콘크리트의 피로거동을 이상적으로 모사할 수 있고 파괴모드가 유사한 장점을 가지고 있으나 콘크리트의 경우 적용한 바 없는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 반복하중을 받는 대표적 재료인 포장 콘크리트를 대상으로 쪼갠인장 피로실험 방법을 사용하여 피로실험을 수행하고 통계적 해석에 기초한 파괴확률 모델을 제시하고자 한다.

---

\* 정희원, 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터 연구원

\*\* 정희원, 충주대학교 토목공학과 부교수

\*\*\* 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수

\*\*\*\* 정희원, 강원대학교 토목공학과 조교수

## 2. 피로실험

쪼갠인장 피로실험에 적용한 하중 형태는 일정진폭 반복하중으로서 응력수준을 각각 90, 80, 70%로 변화하여 실험하였으며, 이때 응력비는 0.1로 하여 실험하였다. 또한, 하중재하 속도는 20Hz를 적용하였고, 하중재하 형상은 정현파를 적용하였다. 실험에 사용된 공시체는 피로실험이 진행되는 기간 동안 강도의 증진현상을 최소화하기 위하여 재령 28일 동안 수조에서 양생시킨 후 56일 까지 기건양생하여 실험하였으며, 재령 56일의 정적강도를 기준으로 하여 피로실험에 적용하였다.

### 2.1 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 오항리에서 채취된 골재와 잔골재는 경기도 여주군 점동면 덕평리에서 채취한 골재를 사용하였으나, 골재의 입도분포가 표준입도에 맞지 않아 32mm의 골재와 19mm의 골재를 약 55% : 45%의 비율로 혼합하여 사용하였다.

콘크리트 배합은 국내 고속도로 포장에 사용되는 시방배합표를 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. 표 1은 실험에 사용된 콘크리트 배합표를 나타낸 것이다.

표 1 콘크리트의 배합

물/시멘트 비 (%)	잔골재 율 (%)	단위수량 (kg)	단위시멘트량 (kg)	잔골재 (kg)	굵은골재(kg)		AE제 (g)
					32mm	19mm	
42.3	37.7	144	340	682	660	532	510

### 2.2 실험방법

쪼갠인장 피로실험은 Ø15×30cm의 원주형 시험체를 제작한 후 Ø15×7.5cm가 되도록 절단한 후 버어너 캘리퍼스를 이용하여 시험체의 두께를 측정한 후 실험하였다. 또한, 시험체가 가압판 위에서 편심이 되지 않도록 하고 가압판과 공시체 사이 균등한 하중전달과 시험체의 국부적인 파괴를 막기 위해 3mm 두께의 가압판을 설치하여 실험하였다. 또한, 피로 하중 재하시 초기 평균하중(mean level)까지 도달시간은 실험적으로 결정된 20초를 가하여 시험체의 손상을 방지하고자 하였으며, 실험의 종료는 200만 사이클까지 수행하였다.

그림 1 쪼갠인장 피로실험의 개요도를 나타낸 그림이다.

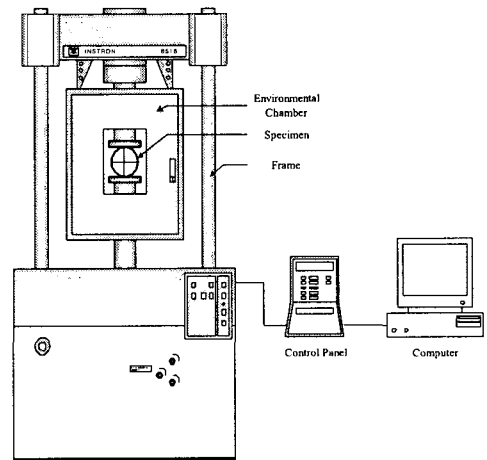


그림 1 쪼갠인장 피로실험 개요도

### 3. 피로실험 결과 및 피로모델 제안

표 2 피로실험 결과

#### 3.1 피로실험 결과

정적 쪼갠인장강도 측정은 재령 7일, 28일에 각각 3개의 공시체를 시험하여 평균값을 측정값으로 하였으며, 재령 56일에는 5개의 공시체로부터 강도측정 결과를 평균하여 결과 값으로 제시하고 피로실험에 적용하였다. 쪼갠인장 강도 측정결과는 재령에 따라 7일, 28일, 56일에서 각각 37kgf/cm<sup>2</sup>, 42kgf/cm<sup>2</sup>, 47kgf/cm<sup>2</sup>의 평균값을 나타내었다.

표 2는 피로실험 결과로서 응력수준에 따라 15개의 시험체를 실험하여 그 결과를 제시한 것이다. 콘크리트 피로실험 데이터는 표 2에 나타낸 바와 같이 통계적 변화성 및 분산성을 나타내고 있다. 따라서, 본 논문에서는 결정계수( $R^2$ ) 0.9를 기준으로 하여 기각되는 데이터와, 200회 반복하중 재하시 파괴되지 않은 시험체는 해석시 제외하였으며 각각 †와 ‡으로 표시하여 나타내었다.

해석은 Weibull의 확률분포함수를 사용하여 응력수준에 따른 매개변수를 산정하고 이를 평균하여 Weibull의 확률분포 함수로부터 피로수명을 계산하여 파괴확률 모델을 도출하고자 하였다. Weibull의 확률분포 함수의 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 는 그래픽 방법, 모멘트 방법 및 최우도법에 의해 산정하였으며, Weibull의 확률분포에 대한 적합도 검정은 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정 방법을 이용하여 유의수준 5%에 대한 검정을 수행하였다.

파괴 순위	피로수명(cycles)		
	S=90%	S=80%	S=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

#### 3.2 Weibull 분포의 매개변수와 적합도 검정

표 3 Weibull의 매개변수 계산결과

표 3은 세 가지 방법에 의해 계산된 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 를 계산방법 및 응력수준에 따라 나타낸 것이다. 매개변수의 계산결과는 산정방법에 따라 다소 차이를 나타내며 응력수준에 따라 다양하게 나타난다. 이는 콘크리트 피로실험 데이터의 통계적 분포를 간접적으로 의미하는 것으로 응력수준이 낮아짐으로 인하여 피로실험 데이터의 통계적 분산성이 크다는 것을 알 수 있는 것이다.<sup>[3-5]</sup>

또한, 그래픽 방법, 모멘트 방법 및 최우도법으로 계산된 Weibull 분포의 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 의 평균값을 사용하여 Kolmogorov-Smirnov의 방법으로 적합도 검정을 수행한 결과 5% 유의수준에서 모두 채택되는 것으로 나타났다.

구분	S=90%		S=80%		S=70%	
	$\alpha$	$u$	$\alpha$	$u$	$\alpha$	$u$
그래픽방법	1.342	1,868	1.638	36,425	1.479	293,085
모멘트방법	1.872	1,774	1.852	35,366	1.570	284,389
최우도법	1.966	1,777	1.981	35,606	1.701	288,335
평균	1.727	1,806	1.824	35,799	1.583	288,603

#### 3.3 파괴확률에 따른 피로수명과 모델제안

파괴확률에 따른 피로수명의 산정은 세 가지의 방법으로 계산된 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 의 평균값을 이용하게 되며, two-parameter Weibull 분포에서 각각의 파괴확률에 대한 피로수명의 계산은 다음과 같다.

two-parameter Weibull의 신뢰성 함수  $L_R(n) = \exp\left[-\left(\frac{n}{u}\right)^\alpha\right]$ 로부터 양변에 대수를 취하게 되면  $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{L_R}\right)\right] = \alpha \ln(n) - \alpha \ln(u)$ 로 나타낼 수 있다. 이 식으로부터  $L_R$ 에  $1 - P_f$ 를 대입하면, 위의 식은  $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1 - P_f}\right)\right] = \alpha \ln(n) - \alpha \ln(u)$ 와 같이 표현된다. 이 식을 정리하여 피로수명  $n$ 에 대한 관계식으로 나타내면 식(1)과 같다.

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

따라서, 이 식(1)로부터 각각의 파괴확률에 대한 피로수명을 산정하여 나타낸 것이 표 4이며, 계산된 피로수명을 이용하여 파괴확률에 따른 피로모델을 제시한 것이 표 5이다. 따라서, 피로설계는 어느 정도의 파괴확률 또는 신뢰도를 채택하는가에 따라 피로저항성의 확보와 안전도가 변화된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 포장 콘크리트를 대상으로 조강인장 반복하중을 받는 콘크리트의 파괴확률 모델에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 콘크리트의 피로실험 데이터는 상당한 변화성과 통계적 분산성을 나타냄으로 본 연구에서는 두 가지의 기준을 설정하여 이 기준을 적용하여 해석을 실시하였다.
- 2) Weibull 확률분포함수를 사용하여 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 를 3가지 방법으로 계산하고 평균값을 이용하여 계산하고 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정결과 유의수준 5%에 대하여 모두 채택되는 것으로 나타났다.

3) Weibull 확률분포함수로부터 매개변수  $\alpha$ 와  $u$ 의 평균값을 이용하여 피로수명을 산정하였으며 파괴확률 5%에서 99% 범위에 대하여 다양한 모델을 제안하였다.

#### 참고문헌

1. 권혁제, "SAS활용 표준통계학", 청목 출판사, 2001, pp.643~655.
2. 박정식, 윤영선, "현대통계학", 다산출판사, 1999, pp.443~459.
3. 정해성, 박동호, 김재주, "신뢰성 분석과 응용", 영지문화사, 2001, pp.9~84.
4. Oh, B. H., "Fatigue-Life Distribution of Concrete for Various Stress Levels," ACI Materials Journal, Title no. 88-M15, 1991, pp.122~128.
5. Singh, S. P. and S. K. Kaushik, "Flexural Fatigue Life Distributions and Failure Probability of Steel Fibrous Concrete," ACI Materials Journal, V.91, No.6, 2000, pp.658~667.

표 4 파괴확률에 따른 피로수명

파괴확률	피로수명(cycles)		
	S=90%	S=80%	S=70%
0.05	323	7,023	44,218
0.10	491	10,422	69,670
0.20	758	15,728	111,913
0.30	994	20,340	150,496
0.40	1,224	24,769	188,822
0.50	1,461	29,281	228,965
0.60	1,717	34,123	273,100
0.70	2,011	39,635	324,501
0.80	2,380	46,473	389,791
0.90	2,928	56,558	488,730
0.95	3,410	65,337	577,099
0.99	4,374	82,710	757,169

표 5 파괴확률에 따른 피로모델

파괴확률	S-N 모델	$R^2$
0.05	$L_n(N_F) = 28.550 - 25.126(S)$	0.98
0.10	$L_n(N_F) = 29.076 - 25.253(S)$	0.98
0.20	$L_n(N_F) = 29.619 - 25.381(S)$	0.98
0.30	$L_n(N_F) = 29.939 - 25.445(S)$	0.99
0.40	$L_n(N_F) = 30.202 - 25.510(S)$	0.99
0.50	$L_n(N_F) = 30.435 - 25.575(S)$	0.99
0.60	$L_n(N_F) = 30.656 - 25.641(S)$	0.99
0.70	$L_n(N_F) = 30.795 - 25.641(S)$	0.99
0.80	$L_n(N_F) = 31.023 - 25.707(S)$	0.99
0.90	$L_n(N_F) = 31.284 - 25.773(S)$	0.99
0.95	$L_n(N_F) = 31.415 - 25.773(S)$	0.99
0.99	$L_n(N_F) = 31.793 - 25.907(S)$	0.99