

# 쪼갠인장 피로시험 방법에 의한 포장용 콘크리트의 누적손상 평가

## Evaluation of Cumulative Damage of Pavement Concrete Using Split Tension Fatigue Test

윤 병 성\*      김 동 호\*\*      정 원 경\*\*\*      이 봉 학\*\*\*\*      윤 경 구\*\*\*\*\*  
Byeung-Sung Yun      Dong-Ho Kim      Won-Kyong Jeong      Bong-Hak Lee      Kyong-Ku Yun

### ABSTRACT

The purpose of this paper was to estimate the cumulative damage of pavement concrete by split tension fatigue test. The split tension fatigue test of variable amplitude loading were performed in two and three stages. The results of the fatigue test by variable amplitude loading showed that the sums of damage were greater than 1 in the increasing sequence loading tests, and less than 1 in the decreasing sequence loading tests. The remaining life estimated by equivalent damage theory was almost similar to that of experimental results.

### 1. 서론

교량, 콘크리트 포장구조, 공항, 해양 및 항만구조물 등은 차량하중이나 파력의 주기적이고 반복적인 하중을 받는 경우가 많고 이러한 반복하중을 받게되면 부재가 정적강도보다 낮은 하중에서 파괴된다. 이와 같이 부재가 정적강도 이하에서 파괴되는 현상을 "피로파괴"라고 하며, 이러한, 반복적인 하중으로 인한 재료의 피로거동을 고려한 설계와 해석은 중요하다. 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>(2, 5)</sup>

또한, 현재 국내에서 사용하는 도로포장 설계법은 국외의 방법을 도입하여 사용하고 있으며 재료 및 기후조건, 교통조건, 시공환경 등이 국내에 사용하기에는 근본적인 제한성을 가지고 있어 한국형 도로포장 설계법 개발 및 포

\* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 석사과정  
\*\* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 박사수료  
\*\*\* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\*\* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 교수  
\*\*\*\*\* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 조교수

장성능 개선 방안에 관한 연구가 진행되고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup>

따라서, 본 논문에서는 조깅인장 피로시험방법을 이용하여 주기적이고 반복적인 하중을 받게 되는 대표적인 토목 구조물 가운데 도로포장에 사용되는 포장용 콘크리트를 대상으로 피로하중의 크기가 변화하는 즉, 변동진폭하중을 받는 포장용 콘크리트의 누적손상과 피로거동을 연구하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험개요

콘크리트의 누적손상에 대한 피로시험은 일정진폭 하중을 적용하여 S-N 선도를 도출한 후 이에 대한 관계식으로부터 각각의 응력수준에 따른 피로수명을 산정한 후 이를 변동진폭하중에 대하여 적용하기 위해 다음과 같이 크게 두가지로 나누어 실험하였다. 첫째, 일정진폭 하중에 대한 실험은 응력비를 0.1로 고정시킨 후 응력수준을 90, 80, 70%로 변화하여 실험을 수행하였다. 이때 하중재하속도는 20Hz를 적용하였으며, 하중재하형상은 정현파를 적용하였다. 둘째, 변동진폭 하중에 대한 실험은 고응력에서 저응력으로, 저응력에서 고응력으로 받게 했다. 이때, 반복비는 0.2로 하였으며, 응력비는 0.1, 하중재하속도는 20Hz, 하중재하형상은 정현파로 하였으며, 실험기간 강도의 증진을 피하기 위해 재령 28일동안 수조에서 양생시킨 후 56일 까지 기건양생하여 실험하였다.

### 2.2 사용재료

시멘트는 강원도 영월군 서면에서 생산되는 국내 S사 1종보통포틀랜드 제품을 사용하였다. 굵은골재는 충북 음성군 감곡면 오항리에서 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.

본 논문에 사용된 콘크리트의 배합표는 표 1과 같다.

표 1. 콘크리트의 배합

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

W/C (%)	S/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G(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 하중 전달과 시험체의 국부적인 파괴를 막기 위해 3mm 두께의 가압판을 설치하였다. 그림 1은 INSTRON 시험기를 이용한 조깅인장 피로시험을 나타낸 것이다. 실험은 시험체를 재령 28일 수중양생 한 후 56일까지 공기중 양생을 실시하여 정적강도측정으로부터 계산된 응력수준의 범위를 결정하였으며, 정적강도측정은 최소 5개 이상의 시험체를 사용하여 그 평균값을 결과로 하였다. 또한, 피로하중재하시 초기 평균하중(mean level)까지 도달시간은 20초로 하였으며, 실험의 종료는 200만 사이클까지 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

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

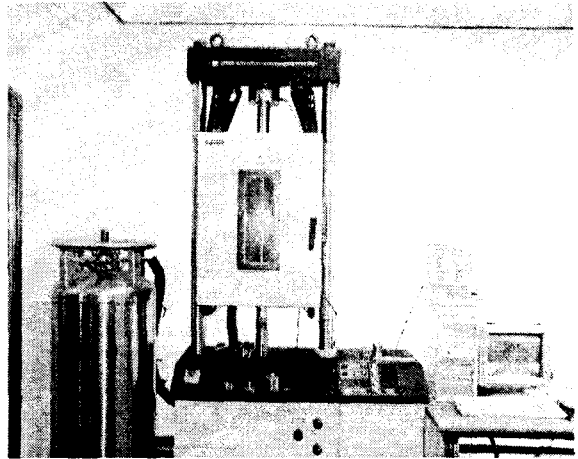


그림 1. 조깅인장 피로시험

### 3.1 일정진폭 피로실험 결과

표 2는 응력수준에 따른 피로시험 결과를 나타낸 것으로 총 45개의 시험체를 실험하여 그 결과를 제시하였다. 또한, 실험데이터의 보다 정확한 해석을 위하여 두 가지의 기준을 설정하여 해석시 제외되는 데이터를 구분하여 각각 † 와 ‡ 으로 나타내었다. 첫째는 실험데이터의 상관계수 (R<sup>2</sup>)가 0.9 이상 되도록 하였을 때 제외되는 데이터이고, 두 번째는 시험체가 200만회 반복하중 재하시 파괴되지 않은 것이다.

일정진폭 피로시험 결과로부터 다음과 같은 S-N 관계식을 도출하였으며,

$$\ln(N_F) = 32.337 - 28.090 \left( \frac{f_t, max}{f_t} \right)$$

이로부터 각각의 응력수준에 따른 피로수명을 산정한 결과 응력수준 90%에서 1,160, 80%에서 19,248, 70%에서 319,387로 계산되었다.

표 2. 일정진폭 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

### 3.2 변동진폭 피로실험 결과 및 고찰

변동진폭하중을 적용한 콘크리트의 피로시험은 저응력에서 고응력으로 하중이 작용하는 경우와 고응력에서 저응력으로 하중이 작용하는 경우로서 각각 2단계 및 3단계의 피로하중을 받는 경우에 대하여 실험하였다. 표 3은 이에 대한 실험결과를 나타낸 것으로 실험에 사용된 시험체는 각각의 경우별로 5개씩 총 30개의 시험체를 실험하여 그 결과를 나타낸 것이다.

표 3. 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

#### 3.2.1 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>1</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 4는 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 나타났다. 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 선형손상 이론이 잘 일치하지 않으므로 이에 대한 합리적인 해석이 필요할 것으로 판단된다.

표 4. 선형손상 이론에 의한 피로 해석

Specimens	Case 1.			Case 2.		
	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$D = \sum \frac{ni}{N_{Fi}}$	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$D = \sum \frac{ni}{N_{Fi}}$
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.		
	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$D = \sum \frac{ni}{N_{Fi}}$	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$D = \sum \frac{ni}{N_{Fi}}$
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.			
	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$\frac{n_3}{N_{F3}}$	$D = \sum \frac{ni}{N_{Fi}}$	$\frac{n_1}{N_{F1}}$	$\frac{n_2}{N_{F2}}$	$\frac{n_3}{N_{F3}}$	$D = \sum \frac{ni}{N_{Fi}}$
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	$D = 0.798$				$D = 1.775$			

### 3.2.2 등가 누적손상 이론에 의한 피로 해석

등가 누적손상 이론은 Marin에 의해 연구된 것으로 좀더 편리하고 간단한 개념을 이용하여 콘크리트의 누적 손상을 계산하는 방법이다. 이 개념은 실험결과에 대한 등가 누적손상 해석에 필요한 지수  $p$ 를 계산하면 잔존수명을 계산할 수 있으며, 이를 실험결과와 비교하여 이론적 잔존수명과 실험결과를 비교하고자 한 것이다.

표 5는 등가의 누적손상 이론을 적용하여 계산된 변동진폭 하중에 대한 경우에 따라 계산된 잔존수명 계산에 필요한 지수  $p$ 를 계산하여 나타낸 것이다. 표 5에 나타낸 바와 같이 지수  $p$ 는 대체로 유사한 결과를 나타내었으며, 총 6가지 경우에 대한 평균 지수  $p$ 는 21.216으로 나타났다.

또한, 표 6은 이론으로부터 계산된 잔존수명과 실험결과를 나타낸 것이다. 2단계의 변동하중이 적용된 경우와 3단계의 변동하중이 적용한 총 6개의 경우에 있어 이론에 의해 계산된 잔존수명과 실험결과가 거의 유사하게 나타났다.

표 5. 지수  $p$ 의 계산결과

구 분	case 1.	case 2.	case 3.	case 4.	case 5.	case 6.
계산결과	22.141	20.645	20.099	22.494	15.485	26.426

표 6. 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

#### 4. 결 론

피로하중의 크기가 2단계 및 3단계로 변화하는 포장용 콘크리트의 누적손상 피로특성을 분석하기 위하여 쪼갬인장 피로시험 방법으로 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 포장용 콘크리트의 응력수준에 따른 피로수명을 S-N 관계식으로부터 계산한 결과 응력수준 90%에서 1,160, 80%에서 19,248, 70%에서 319,387로 계산되었다.
- 2) Palmgren-Miner의 선형손상 이론을 적용하여 실험결과를 분석한 결과 고응력에서 저응력을 받는 피로하중이 적용된 경우에서 누적손상  $D$ 는 평균 0.853으로 나타났으며, 저응력에서 고응력을 받게 되는 피로하중에서는 1.058~1.775로 나타났다.
- 3) 등가의 누적손상 이론을 적용하여 잔존수명 계산에 필요한 지수  $p$ 를 계산한 결과 지수  $p$ 는 대부분 유사하게 계산되었으며, 평균 지수  $p$ 는 21.216으로 계산되었다.
- 4) 등가의 누적손상 이론으로부터 계산된 잔존수명과 실험결과를 비교한 결과 2단계의 변동하중이 적용된 경우와 3단계의 변동하중이 적용한 총 6개의 경우에 있어 이론에 의해 계산된 잔존수명과 실험결과가 대부분 유사하게 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. 건설교통부(2001), "한국형 포장 설계법 개발 및 포장 성능 개선 방안 수립을 위한 기본계획."
2. 오병환,(1986-12), "변동진폭의 피로하중을 받는 콘크리트의 누적손상이론," 대한토목학회논문집, Vol.6, No.4, pp.79~88.
3. 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.
4. Jan Ove Holmen,(1982), "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading," ACI Publication SP75-4, pp.71~110.