

# 콘크리트의 피로균열 성장거동에 관한 연구

## The Fatigue Crack Growth Behavior of Concrete



김진근\*

Kim, Jin-Keun



김윤용\*\*

Kim, Yun-Yong

### 요 약

본 연구에서는 콘크리트의 피로균열 성장거동을 구명하기 위하여 썬기조깅시험(WST)을 수행하였다. 연구의 주안점인 피로균열 성장거동의 주요영향인자는 콘크리트의 강도로서 28, 60, 118MPa 등 3가지의 강도를 변수로 택하였다. 한편, 응력비를 6, 13%의 2가지로 변화시켜 그 영향을 관찰하였다. 소정의 응력비를 주기 위하여 최고피로하중수준을 75~85%, 최저응력수준을 5~10%로 각각 유지하였다. 피로시험 전에 균열개구변위(CMOD) 컴플라이언스 보정 실험을 수행한 후, 그 결과인 균열길이와 컴플라이언스의 관계를 피로시험 중에 균열길이를 예측하는 데에 이용하였다. 또한 CMOD 컴플라이언스 보정법의 타당성을 검증하기 위하여 선형탄성 파괴역학(LEFM) 및 염색법에 의하여 예측된 균열길이와 비교하였다.

실험결과에 의하여 선형탄성 파괴역학에 근거한 피로균열 성장속도 모델( $da/dN \sim \Delta K$ , 관계)을 제시하였고 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 피로균열의 성장속도가 빨라지는 것으로 평가되었다. 또한 응력비가 피로균열 성장속도에 영향을 미치는 것으로 나타났는데 강도가 증가함에 따라 그 정도가 감소하는 경향을 보였다. LEFM과 염색법 의하여 예측된 균열길이와 비교하여 본 결과 CMOD 컴플라이언스 보정법이 썬기조깅시험(WST)에 적용될 수 있음이 검증되었다.

\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 8월 30일까지 학회로 보내주  
시면 1997년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## Abstract

In this study, the wedge splitting test (WST) was carried out for the fatigue crack growth behavior of concrete. Selected test variables were concrete compressive strength of 28, 60 and 118 MPa, and stress ratio with 2 levels (6, 13%). In order to make the designed stress ratio, the maximum and the minimum fatigue loading level were 75~85% and 5~10% of ultimate static load, respectively. Fatigue testing was preceded by crack mouth opening displacement (CMOD) compliance calibration test, and then the fatigue crack growth was computed by crack length vs. CMOD compliance relations acquired by the CMOD compliance calibration technique. To evaluate the validity of CMOD compliance calibration technique, the crack length predicted by this method was compared with the crack length by linear elastic fracture mechanics(LEFM) and dyeing test.

On the basis of the experimental results, a LEFM-based empirical model for fatigue crack growth rate( $da/dN-\Delta K_I$  relationships) was presented. The fatigue crack growth rate increased with the strength of concrete. It appears that the  $da/dN-\Delta K_I$  relationships was influenced by stress ratio, however, the effect is diminished with an increase of strength. The comparisons between CMOD compliance calibration technique and the other methods gave the validity of CMOD compliance calibration technique for the WST.

**Keywords :** fatigue; fatigue crack growth; linear elastic fracture mechanics(LEFM); CMOD compliance calibration technique; concrete strength; stress ratio; Paris' law

## 1. 서 론

피로현상(fatigue)은 구조물 파손의 원인 중 상당한 비중을 차지하고 있으며, 특히 교량슬래브, 해양 구조물, 철근 콘크리트 도로포장 등의 구조물은 피로하중에 의한 파손 가능성이 있다. 피로에 대한 기존의 연구는 주로 재료가 파괴에 도달하는 응력수준에 그 주안점을 두어 응력수준과 파괴횟수의 관계(S-N 관계)를 확률론적으로 접근하여 왔다. 그러나 이 방법은 레이터의 흠어지는 폭이 매우 크고 사용 중인 구조물의 건전성 및 안전성을 평가할 수 없는 단점을 갖고 있다. 따라서 강재를 비롯한 금속 분야에서는 균열의 진전(crack propagation)단계를 대상으로 하는 피로 거동의 정량적인 평가에 의해서 사용 중에 있는 구조물의 건전성을 진단하고 있다.

파괴역학(fracture mechanics)의 발달과 더불어 1963년 Paris 등<sup>[1]</sup>은 종래의 고전적 연구에 의한 실

험 데이터를 갖고서 균열의 진전을 피로균열 성장속도(fatigue crack growth rate)와 응력확대계수의 폭(stress intensity range)으로 표현하였다. 그 이후 Forman<sup>[2]</sup>과 Walker<sup>[3]</sup> 등의 많은 연구자들에 의하여 균열진전에 대한 연구가 양적, 질적으로 큰 발전을 이루어 왔다. 1980년대 후반에 이르러 몇몇 연구자들이 콘크리트의 피로균열 성장속도에 관한 연구를 시작하였는데, 대표적으로 Swartz 등<sup>[4]</sup>, Bazant 등<sup>[5,6]</sup>, Baluch 등<sup>[7]</sup>, Perdikaris 등<sup>[8]</sup>이 균열의 성장속도를 Paris의 법칙<sup>[1]</sup>에 적용하는 연구를 수행한 바 있다. 또한 Zhang 등<sup>[9]</sup>은 균열의 성장속도를 Forman의 식<sup>[2]</sup>으로 표현하였고 Alliche 등<sup>[10]</sup>은 손상도 함수를 도입하여 균열성장속도 대신에 피로손상율을 변형도와 응력의 함수로 표현하여 보의 처짐을 시간에 따라 나타내었다.

본 연구는 콘크리트의 피로거동을 보다 합리적이고 정량적인 방법으로 평가하기 위하여 재료의 근본

적인 파괴 과정인 균열의 성장을 통하여 피로 현상을 표현하고자 함에 그 목적을 두고 있다. 또한 콘크리트의 재료 특성 중에서 가장 널리 사용되고 있는 압축강도가 피로균열의 성장거동에 미치는 영향을 구명하였고 이에 대한 기초 데이터를 얻었다. 그리고 본 연구에서는 피로실험 중에 변화하는 균열의 길이를 예측하기 위하여 균열개구 변위(CMOD) 컴플라이언스 보정법을 사용하였으며 켈기조깅실험(WST)에 대한 이 방법의 타당성도 함께 검증하였다. 검증에 사용된 균열길이 예측법은 LEFM에 의한 방법과 염색에 의한 방법이었다.

## 2. 균열길이 및 피로균열 성장속도의 예측 방법

### 2.1 CMOD 컴플라이언스 보정법

CMOD 컴플라이언스 보정법은 파괴실험 중에 콘크리트의 균열길이를 예측하는 방법으로 3점 휨실험에서는 그 적용성이 이미 다수의 연구자<sup>5,6,7</sup>에 의하여 입증되었다. 이 방법을 켈기조깅실험에 적용하는 과정은 3점 휨실험과 동일하며, Fig. 1의 순서도에 따라 실험이 진행된다.

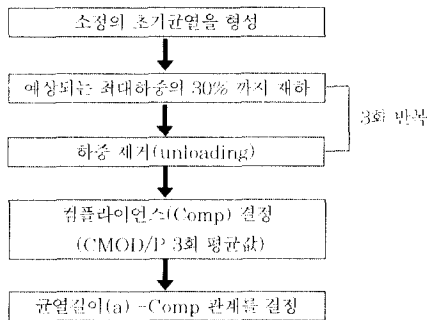


Fig. 1 Flow chart of CMOD compliance calibration test

### 2.2 염색법

염색법은 균열이 발생한 콘크리트의 파면을 착색된 수지(colored resin)로 염색하여 균열의 길이를 측정하는 방법이다. 염색액의 점도는 물에 희석시켜서 조절할 수 있으며, 그 점도에 따라 측정된 균열의

길이가 차이를 보인다. 따라서 염색액의 점도를 결정하기 위하여 다음의 3가지 조건을 만족할 수 있도록 충분한 예비실험을 거친 후 채택하였다.

- ① 균열은 가시적으로 보이는 균열(visual crack)로 정의한다.
- ② 염색액은 균열을 타고 흘러서 파면을 충분히 염색할 수 있어야 한다.
- ③ 손상되지 않은 콘크리트의 표면에 묻었을 때에는 내부로 스며들지 않아야 한다.

위의 조건을 만족하는 점도의 염색액을 사용할 경우 염색법에 의하여 측정된 균열의 길이는 매우 양호

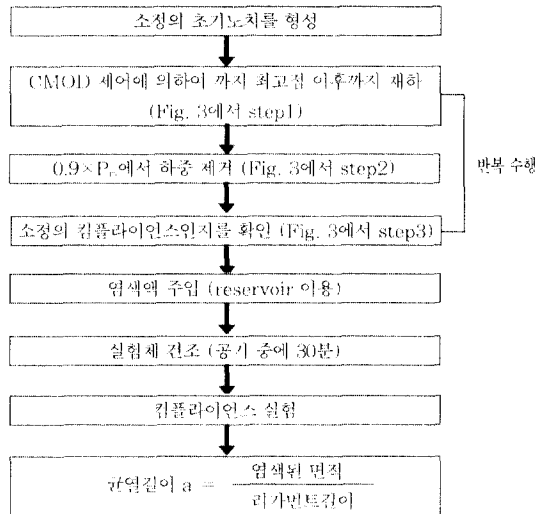


Fig. 2 Flow chart of dyeing test

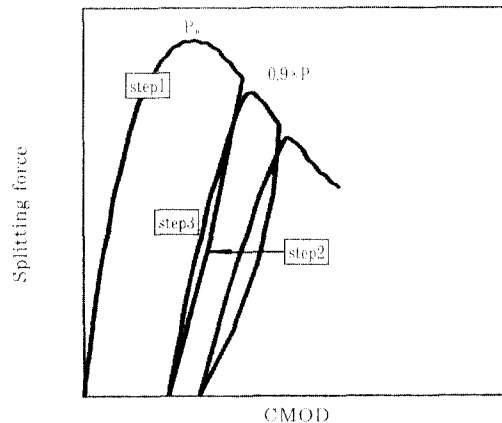


Fig. 3 Precracking procedure in dyeing test

한 결과를 보여준다. 그러나 1개의 실험체에 대하여 1회만 측정할 수 있으므로 연속적인 균열의 예측을 요구하는 피로실험에는 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 CMOD 컴플라이언스 보정법의 유효성을 검증하기 위한 목적으로만 염색법을 이용하였다. 염색법의 순서는 Fig. 2와 같다. 한편, Fig. 3은 Fig. 2 중에서 초기균열을 만드는 과정(precrack-ing)을 도식적으로 표현한 것으로서  $P_m$ 는 하중을 제거하기 전까지인 step1에서의 최대하중을 의미한다.

### 2.3 증분다항식에 의한 피로균열 성장속도 결정법

ASTM E 647에서는 피로균열 성장속도를 결정하는 방법으로 할선법(secant method)과 증분다항식법(incremental polynomial method)을 추천하고 있다. 할선법은 해당 단계( $i$  번째)와 다음 단계( $i+1$  번째)의 컴플라이언스를 이용하여  $i$  번째 균열의 길이를 결정하는 방법이다. 그 반면 본 연구에서 사용된 증분다항식법은 할선법에 비하여 보다 합리적으로 피로균열 성장속도를 구할 수 있는 방법이다. 이 방법은  $i$  번째 균열의 길이를 결정하기 위하여  $(2n+1)$ 개의 연속적인 데이터에 대하여 다음 식에 대한 이차다항식의 회귀분석을 수행한다.

$$a_i = b_0 + b_1 \left( \frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left( \frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \quad (1)$$

그 후에 식 (1)의 양변을  $N_i$ 에 대하여 미분한 후 다음의 식으로  $i$  번째 균열의 성장속도를 구한다.

$$\left( \frac{da}{dN} \right)_i = \frac{b_1}{C_2} + 2b_2 \frac{N_i - C_1}{C_2^2} \quad (2)$$

여기서  $C_1$ 과  $C_2$ 는 각각  $1/2(N_{i+n} + N_{i-n})$ 과  $1/2(N_{i+n} - N_{i-n})$ 이고,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  등은 회귀분석에서 계산되는 계수이다. 본 연구에서는  $n$ 으로 3을 사용하였기 때문에 7점 데이터에 의한 증분다항식법이다.

피로균열 성장속도를 구하기 위해서는 Fig. 4의 순서도에 따라 최초 데이터인 하중( $P$ )과 CMOD의 관계로부터 최종 데이터인 균열성장속도( $da/dN$ )와 응력확대계수( $\Delta K$ )의 관계를 얻는다. 이 때 사용되는 기법으로는 균열길이( $a$ )와 컴플라이언스(Comp)의 관계를 얻기 위한 CMOD 컴플라이언스

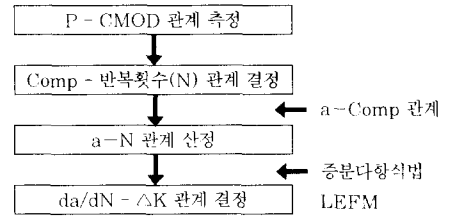


Fig. 4 Flow chart of the determination of fatigue crack growth rate

보정법, 균열성장속도를 구하기 위한 증분다항식법, 응력확대계수를 얻기 위한 LEFM 등이다.

## 3. 실험

### 3.1 쐐기조갸실험법(WST : wedge splitting test)

안정적인 파괴역학 실험방법으로 알려져 있는 쐐기조갸실험법은 노치(notch)와 그루브(groove)를 사용하여 실험체를 제작한다. 실험체의 형상은 Fig. 5와 같으며 초기노치길이는 로울러의 중심에서 그루브까지의 노치길이이다. 실험체에 재하되는 하중은 Fig. 6과 같이 실험체의 양면에 위치한 쐐기(wedge)가 로울러 사이를 움직이면서 가해지는 수직하중이다. 실험 중에 측정되는 값은 수직하중( $P$ )과 균열개구변위(CMOD)이며, 수직하중은 다음의 식에 의하여 쐐기하중( $P_s$ )으로 환산된다<sup>12</sup>.

$$P_s = \frac{P_v}{2 \tan a} \quad (3)$$

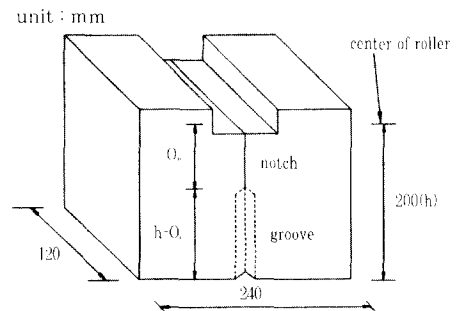


Fig. 5 Geometry of specimen

### 3.2 실험계획 및 방법

피로실험을 수행하기 위하여 강도수준과 응력비( $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ )를 변수로 두고 응력비를 맞추기 위하여 최고 피로하중( $P_{max}$ )과 최저피로하중( $P_{min}$ )을 각각  $0.71 \sim 0.85P_u$ 와  $0.05 \sim 0.10P_u$ 의 범위에서 약간씩 변화시켰다. 그 외의 하중주파수(1Hz), 초기노치길이( $a_0=0.3h$ ), 하중형상(정현곡선) 등은 일정하게 유지하였다. 실험변수의 상세한 내용은 Table 1과 같다.

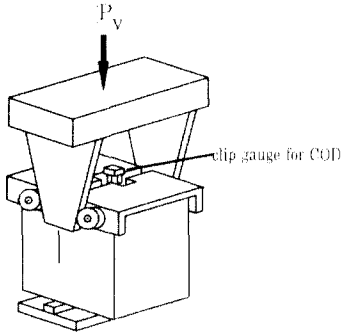


Fig. 6 Loading device of WST

Table 1 Variables for test

최고하중수준 ( $P_{max}/P_u$ )	71*, 75, 81*, 85%
응력비 ( $R: \sigma_{min}/\sigma_{max}$ )	6, 13%
콘크리트 압축강도 ( $f'_c$ )	28 (LS), 60 (MS), 118MPa (HS)

\* 콘크리트 MS, HS에 대해서만 실험

본 연구에 사용된 시멘트는 제1종 포틀랜드 시멘트이며, 잔골재로는 금강 유역의 대평리산 강모래를 사용하였다. 굵은골재로는 최대치수가 10mm인 쇄석을 사용하였고, 적절한 작업성을 확보하기 위하여 ASTM C494 Type F의 규격을 만족하는 고성능감수제를 혼화제로 사용하였다. 본 연구에서 사용된 배합설계는 Table 2와 같으며, 강도수준에 따라 실험체의 기호를 LS, MS, HS 등으로 정하였다.

Table 2 Mix proportions and concrete properties

Mix	W/C	S/A	S/F	S.P.	C	W	S	G	$f'_c$	$f_c$	$E_c$
	%				kg/m <sup>3</sup>				MPa	MPa	GPa
LS	70	42	-	-	305	214	719	993	28.2	3.4	24.7
MS	40	35	-	1.0	423	189	606	1124	60.2	5.0	32.9
HS	20	33	10	3.5	628	140	522	1059	118.0	6.2	42.6

총 120개의 WST 실험체를 제작하여 CMOD 컴플라이언스 보정 실험에 60개, 염색법에 의한 균열길이 검증 실험에 30개, 피로실험에 30개의 실험체가 각각 사용되었다. 또한 각각의 배치마다 6개의 원주형 공시체를 제작하여 압축강도, 탄성계수, 할렬인장강도 등을 측정하였다. 한편, 피로실험의 초기노치길이( $a_0$ )는 높이의 30%에 해당되는 길이(0.3h)이고, 컴플라이언스 보정 실험의 변수로 채택된  $a_0$ 는 0.3h, 0.35h, 0.4h, 0.45h, 0.5h, 0.55h, 0.6h 등이다.

실험에 사용된 기기는 Closed-Loop Servo-Hydraulic Dynamic Materials Testing System으로서 20톤 로드셀을 연결시켜서 사용하였다. 피로실험 동안에는 60, 110 또는 210회에 1번씩 10회의 하중과 CMOD를 측정하였다. 또한 실험체의 함수량 차이를 최소화하기 위하여 2시간 기건 후에 실험을 시작하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 균열길이 예측 실험

Fig. 7은 컴플라이언스 보정법에 의하여 예측된 균열길기와 선형탄성파괴역학(LEFM)에 의한 곡선을 강도수준에 따라 도시한 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 측정된 컴플라이언스는 LEFM에 의하여 구한 값<sup>15)</sup>과 유사한 것으로 나타났다.

컴플라이언스 곡선을 피로 데이터 분석에 이용하기 위하여 각각의 콘크리트 강도에 따른 실험데이터를 갖고서 다음과 같은 지수함수에 대하여 회귀분석을 수행하였다.

$$Comp = k_1 e^{n(a/h)} \quad (4)$$

여기서 Comp는 컴플라이언스이고,  $a/h$ 는 높이에 대한 균열길이의 비이다.  $k_1$ 과  $n$ 은 회귀분석에 의하여 얻고자 하는 계수이다.

CMOD 컴플라이언스 보정에 의한 균열길이 예측법을 검증하기 위하여 수행된 균열 염색법의 실험결과와는 Fig. 8에 나타내었다. 컴플라이언스 보정법에 의하여 예측된 균열길이는 염색법에 의하여 검증한 균열길기와 거의 동일한 값을 보여주고 있다. 따라서

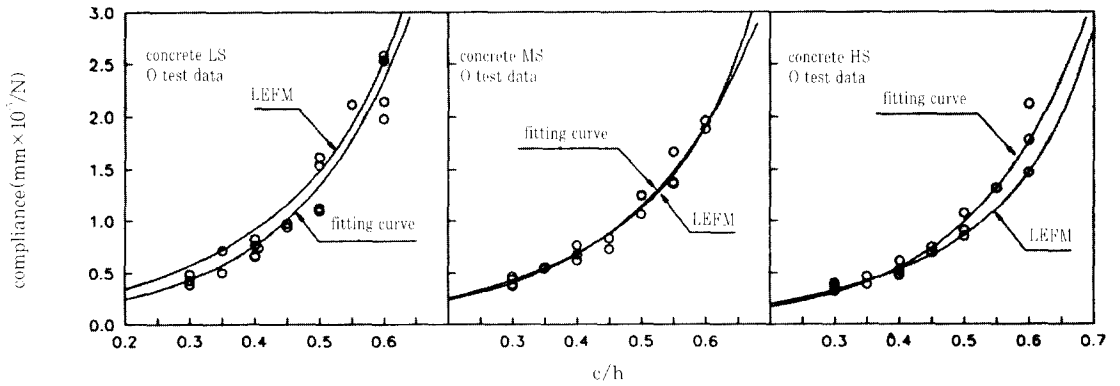


Fig. 7 Test data with compliance calibration curve

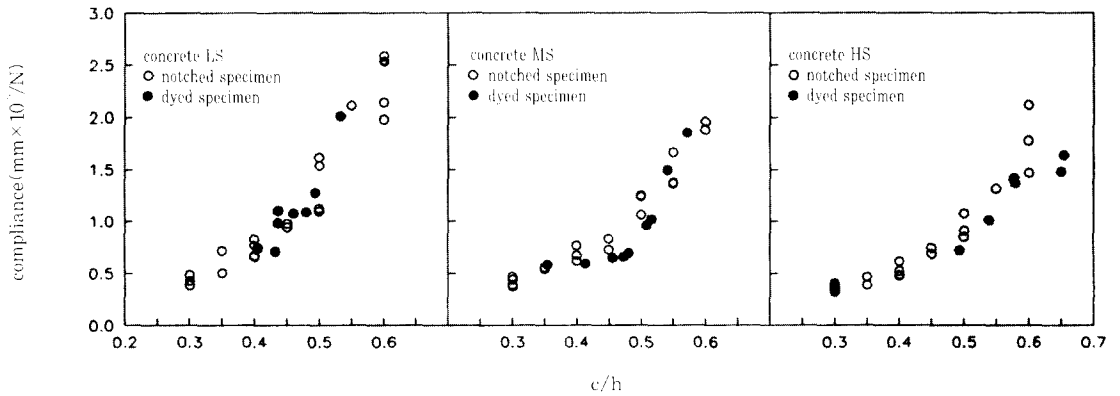


Fig. 8 Test results of CMOD compliance calibration and dyeing

피로실험 중에 얻어지는 하중-CMOD 관계의 컴플라이언스를 이용하여 콘크리트의 균열길이를 추정하는 방법은 매우 타당한 것으로 판단된다.

#### 4.2 피로 실험

피로실험을 통하여 구한  $(P_{max}/P_u)-N_f$  곡선은 Fig. 9와 같으며, 콘크리트의 강도수준이 증가할수록 동일한 최고하중수준( $P_{max}/P_u$ )에서 피로수명이 짧아지는 경향을 보이고 있다. Table 3은 강도 별로 응력비에 따라 피로수명을 나타낸 표이다. 일축압축 피로거동에 관한 연구에서 얻은 경향<sup>[11]</sup>과 유사하며, 그림에 나타나 있는 곡선은 참고문헌<sup>[11]</sup>에서 제안한 실험식에 근거한 것이다.

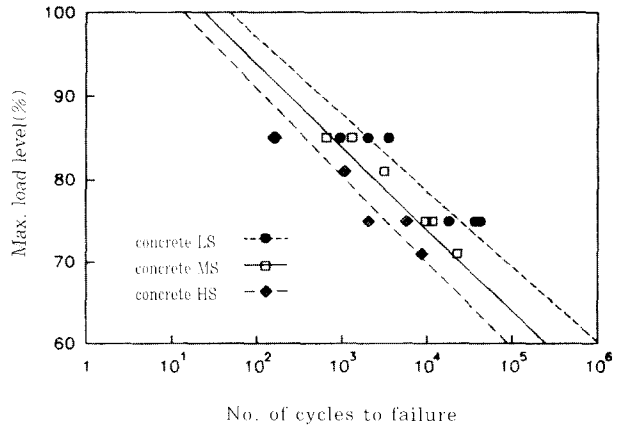


Fig. 9 Test data with  $(P_{max}/P_u)-N_f$  curve

Table 3 Fatigue life (N<sub>i</sub>) with concrete strength

Mix	f' <sub>c</sub> Mpa	R	P <sub>res</sub> /D <sub>i</sub> %	N <sub>i</sub> cycle
LS	28.2	5.9	75	42456
			75	36772
			75	18146
		13.3	85	3567
			85	2038
			85	958
MS	60.2	5.9	71	22858
			75	11500
			75	9747
		13.3	81	3147
			85	1328
			85	659
HS	118.0	5.9	71	8711
			75	5753
			75	2060
		13.3	81	1080
			85	167
			85	158

Paris의 법칙은 아래의 식과 같이 표현되며 이를 콘크리트에 적용할 수 있다는 사실은 기존의 연구자들<sup>16</sup>에 의하여 이미 입증된 바 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (5)$$

여기서 m과 C는 실험상수이고 ΔK는 K<sub>max</sub>에서 K<sub>min</sub>을 뺀 값인 응력확대계수의 폭이며 da/dN은 하중 반복횟수에 대한 균열길이 변화의 기울기를 나타내는 피로균열 성장속도이다. 이 식의 가장 큰 장점은 식의 양변에 로그를 취함으로써 아래와 같은 단순한 일차 방정식으로 나타낼 수 있다는 것이다.

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = m \log(\Delta K) + \log C \quad (6)$$

Paris의 법칙은 피로균열 성장속도를 나타내는 기울기(m)를 일종의 재료 특성으로 간주하여 왔다. 그러나 콘크리트의 경우 각종 요인에 따라 재료 특성이 변하며 특히 강도에 따라서 상이한 성질을 보인다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 강도가 피로균열 성장속도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Paris의 법칙에서 사용되는 2개의 실험상수를 다음과 같이 강도의 함수로 놓은 수정된 형태를 제안하였다.

$$m = m_0 F_1(f'_c) \quad (7)$$

$$\log C = \log C_0 + F_2(f'_c)$$

여기서 m<sub>0</sub>와 C<sub>0</sub>는 실험상수이고 F<sub>1</sub>과 F<sub>2</sub>는 강도의 영향을 나타내는 함수로서 각각 e<sup>k<sub>1</sub>(f'<sub>c</sub>)<sup>3</sup></sup>, k<sub>2</sub>e<sup>k<sub>2</sub>(f'<sub>c</sub>)<sup>3</sup></sup>이다. 또한 F<sub>1</sub>과 F<sub>2</sub>의 k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub> 등은 각각 회귀분석에 의하여 평가되는 계수이다. 응력비가 실험상수 C에 영향을 미치나<sup>16</sup>, 강도에 따른 영향만을 고려하기 위하여 1가지 응력비(0.059)에 대해서만 분석하였다. 응력비가 0.059인 경우는 최대피로하중의 수준이 75% 이하에 해당되는 경우로서 Table 3에서 나타난 바와 같이 파괴횟수가 10<sup>4</sup>에서 10<sup>5</sup>의 범위로 피로수명이 길기 때문에 더욱 안정적인 경향을 보일 뿐만 아니라 많은 개수의 데이터를 포함하고 있다.

콘크리트 LS, MS, HS의 실험결과 중에서 응력비가 0.059인 데이터로 수정된 Paris의 법칙에 대하여 회귀분석을 수행하여 Table 4와 같은 결과를 얻었다. Table 4에 의하여 얻은 강도별 실험상수는 Table 5에 제시되어 있으며, 표에 나타난 바와 같이 콘크리트 강도가 증가할수록 실험상수 m이 증가함을 알 수 있다. m은 피로균열 성장속도를 의미하는 값으로서 고강도화 될수록 균열의 성장속도가 빠른 것으로 나타났다. Fig. 10은 피로균열 성장속도를 콘크리트의 강도 별로 도시한 것으로 그림 내의 곡선은 응력비가 0.059인 경우에 대하여 회귀분석한 곡선이다. 그림에서 나타난 바와 같이 콘크리트의 강도가 증가할수록 기울기가 커지는 것을 보여주며 이는 강도의 증가에 따라 피로균열의 성장속도가 빠르다는 것을 나타낸다. 이러한 이유로 고강도 콘크리트의 피로수명이 저강도 콘크리트에 비하여 짧으며, 이와 같

Table 4 Regression analysis results

m <sub>0</sub>	log C <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>
5.54	-8.03	0.008	-2.66	0.015

Table 5 Empirical constants evaluated by empirical equation

const	Mix	LS	MS	HS
m		6.9	8.8	13.6
log C		-12.1	-14.6	-23.8

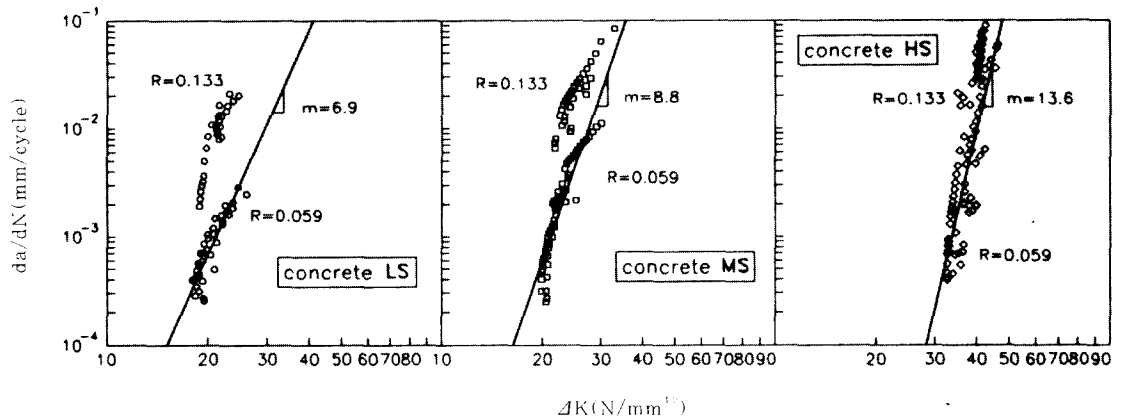


Fig. 10 Fatigue crack growth rates (test data with curves fitted)

은 현상은 Fig. 9의  $(P_{max}/P_0)-N_f$  곡선에 나타나 있다. 따라서 콘크리트의 피로(반복하중)에 대한 내성은 고강도화 될수록 감소함을 알 수 있다.

Fig. 10은 동일한 콘크리트인 경우라도 응력비에 따라 종축 절편( $\log C$ )이 변하는 것을 보여준다. 이는 강재와 같은 다른 재료에서도 나타나는 현상으로 콘크리트의 경우에도 실험상수  $C$ 는 응력비에 의존함을 입증한다. 한편, 응력비에 따른  $C$ 값의 차이가 고강도화 될수록 줄어드는 경향을 보인다. 이는 고강도 콘크리트일수록 선형탄성 파괴역학을 적용하기에 적합하기 때문인 것으로 판단되나, 향후 추가연구를 통하여 구명되어야 할 것이다.

## 5. 결 론

1) 콘크리트 강도의 영향을 고려하여 피로균열 성장속도를 표현하기 위하여 기존의 Paris의 법칙에서 사용하는 실험상수( $m, C$ )를 강도의 함수로 놓는 수정된 Paris의 법칙을 제안하였다. 수정된 Paris의 법칙에 의하여 실험상수  $m$ 은 콘크리트 LS, MS, HS의 경우에 각각 6.9, 8.8, 13.6으로 평가되었다. 콘크리트의 강도가 증가할수록  $m$ 이 증가하며, 이는 콘크리트의 강도가 증가할수록 피로균열의 성장속도가 증가함을 의미한다.

2) 콘크리트의 피로수명을 나타내는  $(P_{max}/P_0)-N_f$  곡선에 따르면 콘크리트의 강도가 증가할수록 피로수명이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은

강도가 증가할수록 피로균열의 성장속도가 증가하는 콘크리트의 재료적 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 콘크리트의 피로(반복하중)에 대한 내성은 고강도화 될수록 감소함을 알 수 있다.

3) WST에서 측정된 컴플라이언스는 LEFM에 의하여 예측된 값과 거의 동일하며, 염색법에 의하여 예측된 균열길이-컴플라이언스 관계와도 상당히 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 균열길이를 예측하기 위하여 CMOD 컴플라이언스 보정법을 적용하는 것은 타당한 것으로 판단한다.

## 참 고 문 헌

1. Paris, P. C., and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Journal of Basic Engineering*, Trans. ASME, Vol. 85, No. 4, 1963, pp. 528-534.
2. Forman, R.G., Kearney, V.E., and Engle, R.M., "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures," *Journal of Basic Engineering*, Trans. ASME, Vol. 89, 1967, pp. 459-464.
3. Walker, E.K., "Effect of Stress Ratio during Crack Propagation and Fatigue for 2024-t3 and 7075-t6 Aluminum," In *Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*, American Society for Testing and Materials STP 462, ed. M.S. Rosenfeld, 1970.



4. Swartz, S.E., Huang, C.J., and Hu, K., "Crack Growth and Fracture in Plain Concrete - Static Versus Fatigue Loading," *Fatigue of Concrete*, SP-75, ed. S.P. Shah, American Concrete Institute, Detroit, 1982, pp. 47-69.
5. Bazant, Z.P., and Xu, K., "Size Effect in Fatigue Fracture of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No 4, July-August 1991, pp. 390-399.
6. Bazant, Z.P., and Schell, W.F., "Fatigue Fracture of High Strength Concrete and Size Effect," *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No 5, Sept.-Oct. 1993, pp. 472-478.
7. Baluch, M.H., Qureshy, A.B., and Azad, A.K., "Fatigue Crack Propagation in Plain Concrete," In *Fracture of Concrete and Rock*, eds. Shah, S.P. and Swartz, S.E., New York, 1989, pp. 112-119.
8. Perdikaris, P.C., and Calomino, A.M., "Kinetics of Crack Growth in Plain Concrete," In *Fracture of Concrete and Rock*, eds. Shah, S.P. and Swartz, S.E., New York, 1989, pp. 96-101.
9. Zhang, B., Zhu, Z., and Wu, K., "Fatigue Rupture of Plain Concrete Analyzed by Fracture Mechanics," In *Fracture of Concrete and Rock*, eds. Shah, S.P. and Swartz, S.E., New York, 1990, pp. 90-95.
10. Alliche, A., and Francois, D., "Fatigue Damage of Concrete," In *Fracture of Concrete and Rock*, eds. Shah, S.P. and Swartz, S.E., New York, 1989, pp. 120-125.
11. Swartz, S.E., Hu, K.K., and Jones, G.L., "Compliance Monitoring of Crack Growth in Concrete," *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 104, No. 4, April 1978, pp. 789-800.
12. 김진근, 이철성, "강모래 및 부순모래 콘크리트의 파괴 특성에 관한 연구," *한국콘크리트학회 논문집*, 제7권, 제4호, 1995. 8, pp. 129-136.
13. Saxena, A., and Hudak, Jr., S.J., "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens," *International Journal of Fracture*, Vol. 14, No. 5, Oct. 1978, pp. 453-468.
14. Kim, J.K., and Kim, Y.Y., "Experimental Study of the Fatigue Behavior of High Strength Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 10, 1996, pp. 1513-1523.
15. 김진근, 김윤용, "콘크리트의 피로균열 성장거동에 관한 연구", *한국콘크리트학회*, 1996년도 가을학술발표회, 1996. 11. 7, pp. 101-107.

(접수일자 : 1997. 1. 25)