

콘크리트의 피로균열 성장거동에 관한 연구

A study for the Fatigue Crack Growth Behavior of Concrete

김진근*

Kim, Jin Keun

김윤용**

Kim, Yun Yong

Abstract

In this study, the wedge splitting test (WST) specimens with various strength levels were tested to investigate the fatigue crack growth behavior of concrete. Selected test variables were concrete compressive strength with 2 levels (28 MPa, 60 MPa, 100 MPa) and maximum fatigue loading with 2 levels (75%, 85%). Fatigue testing was preceded by fracture energy test, and the crack growth was measured by means of the compliance calibration method. 60 WST specimens were cast for the fatigue test, and 6 companion cylinders ($\phi 100 \times 200$ mm) for each batch. In fatigue test, the frequency of loading cycle was 1 Hz, and the minimum fatigue loading level was 5~10 % of ultimate monotonic loading. On the basis of the experimental results, a fracture mechanics-based empirical relationships for fatigue crack growth rate (da/dN - ΔKI relationships) were presented. In addition, the effect of initial notch depth on the fracture energy and the validity of compliance calibration technique for the WST were shown.

1. 서론

구조물 파손원인의 원인 중 상당한 비중을 차지하고 있는 피로현상(fatigue)은 1860년대 기차 차축의 피로파괴를 Whler가 처음으로 인식한 이래 수많은 연구자들에 의하여 많은 발전을 거듭하여 왔다. 대형 건설구조물에 있어서 많은 경우에 콘크리트를 사용하여 건설되며 그 중에서도 교량 슬래브, 해양 구조물, 철근 콘크리트 도로포장 등과 같이 피로하중에 의한 파손 가능성이 있는 구조물의 경우에는 콘크리트의 피로거동은 더욱 중요하다. 또한 반복적인 피로하중에 의하여 구조물이 점진적으로 손상되어 설계시 고려한 사용하중에 못 미치는 하중상태에서 급작스런 파괴가 발생할 수도 있다.

* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수, 공학박사

** 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

피로현상은 크게 균열발생(crack initiation), 균열진전(crack propagation), 최종파괴(final fracture)의 3단계로 나누는데 각 단계에 적용하는 모델이 일반적으로 다르다. 파괴역학(fracture mechanics)의 발달과 더불어 1963년 Paris 등이 종래의 고전적 연구에 의한 실험 데이터를 중심으로 균열진전과정을 피로균열 성장속도(fatigue crack growth rate)와 응력확대계수의 폭(stress intensity range)으로 표현한 이래 Forman의 식, Walker의 식 등 균열진전에 대한 연구가 양적, 질적으로 큰 발전을 이루어 왔다.

1980년대 후반에 이르러 몇몇 연구자들에 의하여 콘크리트의 피로균열 성장속도에 관한 연구가 시작되었으며 대표적으로 Swartz 등⁽¹⁾, Bazant 등⁽²⁾, Baluch 등⁽³⁾, Perdikaris 등⁽⁴⁾은 균열의 성장속도를 식(1)과 같은 Paris' law에 적용하는 연구를 수행하였다. 또한 Zhang 등⁽⁵⁾은 균열의 성장속도를 식(2)와 같은 Forman의 식으로 표현하였고 Alliche 등⁽⁵⁾은 손상도 함수를 도입하여 균열성장속도 대신에 피로손상율을 변형도와 응력의 함수로 표현하여 보의 처짐을 시간에 따라 표현하였다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \text{ 여기서 } C, m : \text{경험상수} \quad (1)$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_{cr} - \Delta K} = \frac{CK_{\max}(\Delta K)^m}{K_{cr} - K_{\max}}, \text{ 여기서 } K_{cr} : \text{한계 } K_{\max} \quad (2)$$

2. 연구의 목적

기존에는 콘크리트에 대한 피로설계는 Wöhler 곡선(S-N 곡선)에 근거하여 피로한계(fatigue limit)를 결정하고 사용기간 동안에 발생하는 피로하중을 견딜 수 있도록 설계하는데 중점을 두었다. 그러나 S-N 곡선은 이론이 간단하고 적용이 용이한 반면, 사용 중에 구조물의 잔여수명을 예측할 수 없고 데이터의 흩어짐(scattering)이 매우 크다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 좀더 정확하게 콘크리트의 피로거동을 예측하기 위하여 콘크리트의 피로균열 성장거동에 대한 실험을 수행하였고 그 목적은 다음의 3가지로 크게 구분할 수 있다.

- 1) 콘크리트 구조물은 피로하중에 의하여 균열이 발전할 수 있는데 본 연구에서는 피로균열에 대한 보다 합리적이고 정확한 예측을 위한 기초자료를 얻고자 한다.
- 2) 콘크리트의 역학적 특성 중 가장 큰 영향을 미치는 요인은 강도수준이다. 특히 콘크리트는 고강도화 됨에 따라 에너지 흡수능력이 급격히 저하된다. 따라서 콘크리트의 강도수준이 피로균열의 성장거동에 미치는 영향을 알아보고자 한다.
- 3) 부차적인 목적으로는 ① 초기균열의 길이와 강도수준이 파괴에너지에 미치는 영향을 알아보고 ② CMOD에 근거하여 콘크리트의 균열길이를 예측하는 방법인 compliance calibration 방법을 썬기썬갠실험(WST)에도 적용할 수 있는가를 검증하고자 한다.

3. 실험

3.1 파괴에너지의 결정방법 (썬기썬갠실험)

대체로 안정된 파괴역학 실험방법으로 알려져 있는 썬기썬갠실험법은 노치(notch)와 그루브

(groove)를 사용하여 제작된 시험체를 양편의 동일한 쐐기(wedge)가 로울러 사이를 움직이면서 가해지는 수직하중이 쪼갬하중으로 변환된다. 실험 중에 측정되는 값은 수직하중(F_v)과 균열개구변위(CMOD)이며 파괴에너지를 산정할 때에는 다음의 식(3)과 같이 구할 수 있는 쪼갬하중(F_s)을 이용한다. 파괴에너지는 쪼갬하중-균열개구변위(F_s -CMOD) 곡선의 면적을 파괴면적(리가먼트길이×시험체의 폭)으로 나눔으로써 구할 수 있다.

$$F_s = \frac{F_v}{2 \cdot \tan \alpha} \quad (3)$$

3.2 균열길이 결정 방법 (Compliance Calibration 방법)

compliance calibration 방법은 파괴실험 중에 콘크리트의 균열길이를 예측하는 방법으로서 3점 휨실험에서는 그 적용성이 다수의 연구자에 의하여 이미 입증되었다. 이 방법을 쐐기쪼갬실험에 적용하는 방법은 동일하며 다음과 같은 그림 1의 순서도에 따라 실험이 진행된다.

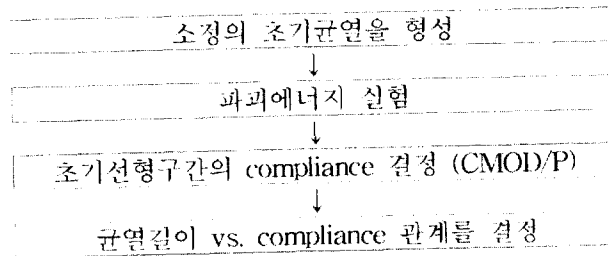


그림 1 Compliance calibration 방법의 순서도

3.3 실험계획 및 실험방법

피로실험의 변수로서 최고피로하중(P_{max})과 강도수준을 변수로 두고 최저응력수준($0.05P_u$), 하중주파수(1Hz) 등을 일정하게 하였다. 피로하중의 형상은 일정한 진폭을 갖는 정현곡선이다. 본 실험에서 사용된 실험변수는 다음의 표 1과 같다.

표 1 실험변수

변수	최고피로하중 (P_{max})	0.75 P_u , 0.85 P_u
	콘크리트 압축강도 (MPa)	28 (LS), 60 (MS), 118 (HS)

본 연구에 사용된 시멘트는 S사 제품의 제1종 포틀랜드 시멘트이며 잔골재로는 금강 유역의 대평리 산 강모래를 사용하였다. 굵은골재로는 최대치수가 10mm인 쇄석을 사용하였고 적절한 작업성을 확보하기 위하여 ASTM C494 type F의 규격을 만족하는 고성능감수제를 혼화제로 사용하였다. 한편, 본 연구에서 사용된 배합설계는 다음의 표 2와 같다.

표 2 배합설계

기호	W/C (%)	S/A (%)	S·F 대체율 (%)	단위시멘트량 (kg/m ³)	단위수량 (kg/m ³)	잔골재 (kg/m ³)	굵은골재 (kg/m ³)	혼화제 (%)
LS	70	42	-	305	214	719	993	-
MS	40	35	-	423	169	606	1124	1.0
HS	20	33	10	628	140	522	1059	3.5

총 80개의 WST 실험체를 제작하여 파괴에너지 및 compliance calibration 실험에 60개, 피로실험에는 LS, MS 시험체 20개가 사용되었다. 또한 각각의 배치마다 6개의 원통형 공시체를 제작하여 압축강도, 탄성계수, 인장강도 등을 측정하였다. 실험에 사용된 기기는 20톤 로드셀을 연결시킨 Instron사의 Closed-Loop Servo-Hydraulic Dynamic Materials Testing System 으로서 피로하중이 가해지는 동안 100회 또는 200회에 한번씩 10회의 하중, CMOD 등을 측정하였다. 또한 실험체의 함유량 차이를 최소화하기 위하여 2시간 기건 후에 실험을 시작하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 파괴에너지 및 compliance 실험

하중-CMOD 실험에 의한 결과의 일부로서 a/h가 0.6인 경우에 대한 하중-CMOD 곡선을 그림 2에 도시하였다. 한편, 표 3과 그림 3에 하중-CMOD 곡선에 의하여 구한 파괴에너지를 초기균열의 길이에 따라 나타내었다.

표 3 파괴에너지 실험 결과 (N/m) - 평균값

기호	a/h							압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
	0.3	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60			
LS	102.2	88.6	90.2	100.0	75.4	65.2	69.6	28.2	3.4	24.7
MS	108.3	107.3	113.0	113.4	96.8	95.2	97.0	60.2	5.0	32.9
HS	109.1	102.3	100.9	106.6	108.0	105.0	99.0	118.0	6.2	42.6

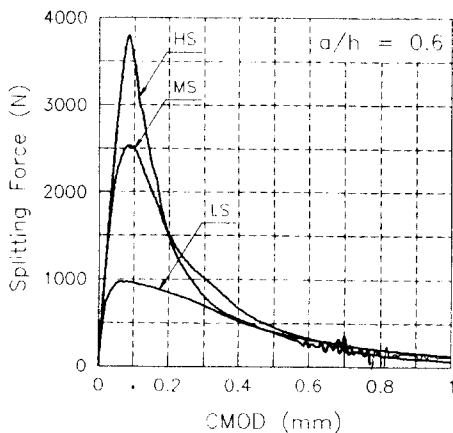


그림 2 하중-CMOD 곡선

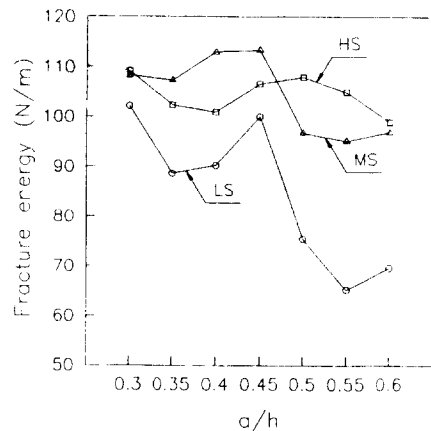


그림 3 초기균열에 따른 파괴에너지

표에서 나타난 바와 같이 콘크리트 LS의 경우 초기균열길이가 0.5h 이상일 경우에는 뚜렷이 파괴 에너지가 감소함을 알 수 있다. 그러나 콘크리트 MS, HS는 초기균열길이에 상관없이 95~110 N/m 에 해당되는 동일한 값을 보여주고 있다. 따라서 초기균열길이가 0.5h 이상일 경우에 실험체의 리가먼트가 저강도 콘크리트의 파괴진행영역을 충분히 확보할 수 없을 정도의 길이라고 사료된다. 그림 4는 측정된 compliance에 대한 회귀분석곡선과 선형탄성파괴역학(LEFM)에 의한 곡선을 강도수준에 따라 도시한 그림이다. 사용된 식은 다음의 식(4)와 같으며 회귀분석을 통하여 얻은 계수는 표 4와 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 WST에서의 compliance는 LEFM에 의하여 구한 값과 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서 피로 데이터로서 얻어지는 compliance를 이용하여 콘크리트의 균열길이를 추정하는 방법은 타당한 것으로 판단된다.

$$a/h = k_1 + k_2A + (k_3A+1)^2 + (k_4A+1)^3 + (k_5A+1)^4 + (k_6A+1)^5 \quad (4)$$

여기서 $A = 450\sqrt{C}$

표 4 회귀분석 결과

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
LS	-3.492	-0.278	3037	1770	1032	778
MS	-3.523	-0.272	4440	2146	1444	1064
HS	-3.298	-0.373	1400	679	588	412

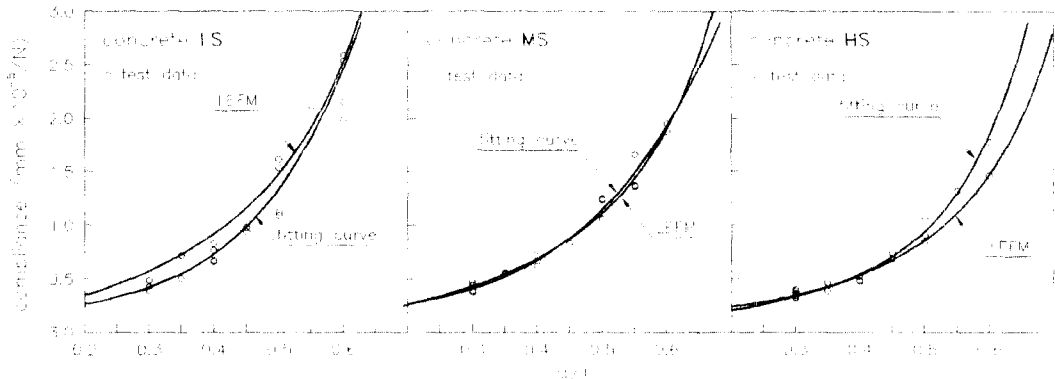


그림 4 측정된 compliance값과 LEFM 예측값의 비교

4.2 피로 실험

피로실험을 통하여 얻은 하중-CMOD의 곡선은 다음의 그림 5와 같은 순서에 의하여 피로균열 성장속도를 결정한다. 그림 6은 피로균열 성장속도를 나타낸 그림으로서 강도에 상관없이 거의 동일한 피로균열 성장속도(기울기)를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 콘크리트 MS의 경우 응력확대계수가 더 크므로 동일한 응력수준(P_{max}/P_u)에서는 강도수준이 증가할수록 피로균열의 성장속도가 더욱 빠르다고 할 수 있다. 또한 응력비에 따라 종축의 절편이 차이가 있으므로 응력확대계수폭과 피로균열 성장속도의 관계는 응력비에 영향을 받는 것으로 나타났다.

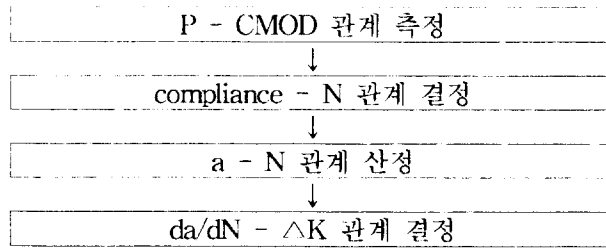


그림 5 피로실험에 의한 피로균열 성장속도의 결정 순서도

6. 결 론

- 1) 피로실험의 결과 강도에 상관없이 거의 동일한 피로균열 성장속도(기울기)를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 고강도 콘크리트일수록 동일한 응력수준(P_{max}/P_u) 하에서 응력확대계수가 더 크므로 강도수준이 증가할수록 피로균열의 성장속도가 더욱 빠르다고 할 수 있다. 또한, $da/dN-\Delta K$ 관계는 응력비에 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 2) 초기균열의 길이에 따른 파괴에너지를 살펴본 결과, 콘크리트 LS의 경우 초기균열길이가 0.5h 이하일 경우에 급작스럽게 파괴에너지가 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 이 경우에는 리가먼트가 파괴진행영역을 충분히 확보할 수 없는 길이라고 사료된다.
- 3) WST에서 측정된 compliance는 LEFM에 의하여 구한 값과 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서 compliance calibration 방법을 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

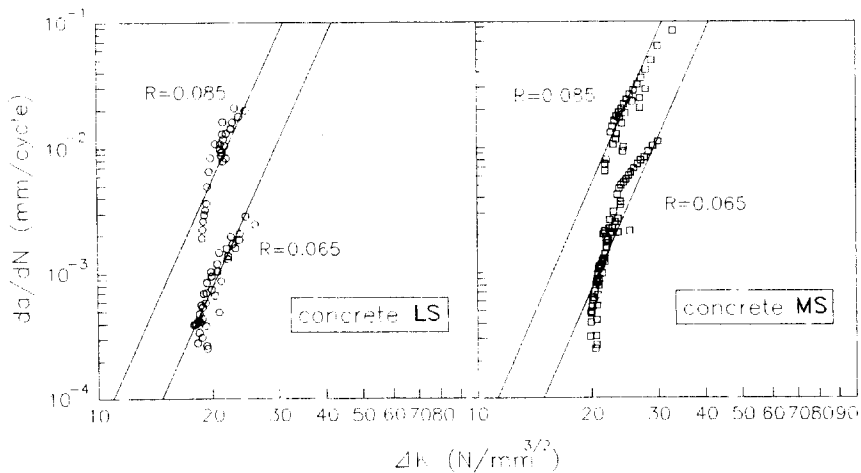


그림 6 콘크리트의 피로균열 성장속도 (LS, MS)

● 참고문헌 ●

1. 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.
2. Bazant, Z.P., and Xu, K., "Size Effect in Fatigue Fracture of Concrete," ACI Mat. Journal, Vol. 88, No 4, July-August 1991, pp. 390-399.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.