

초기재령 콘크리트의 파괴특성

Fracture Characteristics of Concrete at Early Ages

이 윤* 김진근**
Lee, Yun Kim, Jin-Keun

ABSTRACT

The objective of this study is to examine the fracture characteristics of concrete at early ages such as critical stress intensity factor, critical crack-tip opening displacement, fracture energy based on the concepts of the effective-elastic crack model and the cohesive crack model. A wedge splitting test for Mode I was performed on cubic wedge specimens with a notch at the edge. By varying strength and age, load-crack mouth opening displacement curves were obtained and the results were analyzed by linear elastic fracture mechanics. The results from the test and analysis showed that critical stress intensity factor and fracture energy increased, and critical crack-tip opening displacement decreased with concrete age from 1 day to 28 days. The obtained fracture parameters at early ages may be used as a fracture criterion and an input data for finite element analysis of concrete at early ages.

1. 서론

콘크리트 구조물에 존재하는 균열 중에, 상당한 부분이 콘크리트의 타설 직후부터 발생하는 온도 응력, 자기 수축, 건조 수축 또는 그 밖의 외부 원인으로 인하여 발생된다. 실제로 공사 현장에서, 이렇게 콘크리트가 완전히 경화되기 전에 유발된 균열에 의해서 시공 초기에 구조물이 붕괴되는 사례가 발생하고 있다. 이런 콘크리트 구조물의 시공시의 안전성과 시공 후의 미관 등을 위하여 초기재령에서 유발되는 균열의 제어와 평가가 요구되고 있다. 이를 위해서는 여러 균열 발생 요인들에 대한 실험과 이를 고려한 총체적인 균열 해석이 필요하게 되는데, 이를 수행하기 위해서는 초기재령 콘크리트의 파괴기준에 대한 정립이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 파괴특성을 규명하고자 한다. 콘크리트의 파괴특성은 콘크리트의 파괴과정을 모사하고 있는 여러 균열 모델들에 의해 정의될 수 있다. 콘크리트의 파괴에 관하여 현재까지 연구되어온 접근 모델들은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 취성재료에 선형탄성 파괴역학을 적용하려는 유효탄성 균열 모델(effective elastic crack model)이며, 다른 하나는 유사취성재료에만 발생하는 연화 현상을 중심으로 파괴진전을 모사하려는 점성 균열 모델(cohesive crack model)이다. 따라서, 본 연구에서는 유효탄성 균열 모델이 제시하고 있

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

는 파괴특성인 임계 균열단 개구변위($CTOD_c$), 임계 응력확대계수(K_{Ic})와 점성 균열 모델이 제시하고 있는 파괴에너지(G_F)과 같이 콘크리트의 파괴특성으로 간주되고 있는 파라미터들을 초기재령 콘크리트에 대하여 구명하고자 한다.

이에 따라 본 연구에서는 세 가지 강도의 재령 1일, 3일, 7일, 14일, 28일의 초기재령 콘크리트에 대한 썬기조갠시험(wedge splitting test)을 수행하여, 초기재령 콘크리트의 파괴특성을 구명하고자 하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료 및 배합설계

본 실험의 사용재료로 시멘트는 국내산 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하고, 골재로서 잔골재는 금강 유역의 강모래(비중 : 2.54, 조립률 : 2.61)를 사용하며, 굵은골재는 최대 치수 19mm인 부순돌(비중 : 2.59, 조립률 : 6.27)를 사용한다. 또한, 고강도 콘크리트의 경우 작업성이 매우 불량하므로 작업성을 확보하기 위해 KS F 2560의 규격을 만족하는 고성능 감수제를 사용하였다. 썬기 조갠시험체를 만들기 위한 배합설계는 표 1에 주어져 있다.

표 1 콘크리트 배합

W/C (%)	S/A (%)	Unit content(kgf/m ³)				Admixture
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	
69	40	185	268	717	1085	0.15%
54	42	185	342	727	1012	0.3%
30	42	160	533	726	1003	1%

2.2. 실험체 제작

본 실험에서는 육면체 썬기조갠시험을 수행하기 위한 육면체 실험체를 채택하였다. 타설 시에 실험체 내부에 강철판을 넣고 탈형 후에 철판을 제거함으로써 초기균열을 만들었다. 로울러가 부착된 하중장치를 고정시키고, 변위계이저를 설치하기 위하여 실험체의 윗부분에 홈을 만들었다. 이와 동시에 압축강도와 탄성계수, 조갠인장강도 시험을 위한 원주공시체도 제작하였다.

썬기조갠시험에 사용한 육면체 실험체의 형태와 크기는 그림 1과 같으며, 제작 후 24시간만에 탈형하여 실험시까지 습윤양생을 실시하였다.

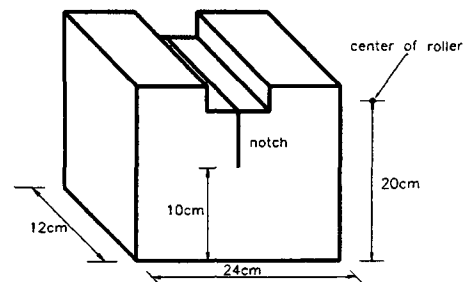


그림 1 실험체 형상

2.3 실험 방법

본 실험에서는 1986년에 Linsbauer에 의해 제안된 썬기조갠시험(wedge splitting test, WST)방법으로 실험을 수행하였다. 본 실험 방법은 그림 2와 같다. 노치를 포함한 실험체를 지지대에 올린 다음 로울러가 부착된 하중 장치를 실험체의 윗부분에 고정시키고 두 개의 동일한 썬기를 가진 강성이 큰

강철판을 가력 장치의 위판에 고정시킨다. 썬기가 양쪽에 있는 로올러 사이를 움직이면서 작용되는 수직하중과 실험체의 균열면을 따른 두 지점과 로올러 축의 위치에 클립게이지를 부착하여 균열개구변위(COD)를 측정하게 된다. 실험은 로올러 축의 위치의 균열개구변위에 의하여 제어된다. 썬기조깅시험 직전에 KS F 2405에 의하여 압축강도와 탄성계수 실험을 수행하였으며, 인장강도 실험은 KS F 2423에 의하여 조깅인장강도를 측정하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 실험 결과

본 연구에서는 실험 결과들을 가장 낮은 강도의 실험체를 LS, 중간 강도의 실험체를 NS로, 가장 고강도의 실험체를 HS로 분류하였다. 압축강도시험과 조깅인장시험을 통해 얻은 콘크리트의 물성치는 표 2와 같다. 썬기조깅시험을 통한 세 가지 강도에 대한 하중-균열입구변위(CMOD) 곡선은 그림 3과 같고, 균열선단으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 세 지점에서 측정된 최대 하중에서의 균열개구변위의 평균값은 그림 4와 같다. 그림 4와 같이, 세 지점에서의 측정값들을 연결하면 선형적 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 다음 절에서 언급될 균열개구형상(crack opening profile)과 관계가 있다. 그림 3의 하중-균열입구변위 곡선은 파괴에너지를, 그림 4의 균열개구변위는 임계 균열단개구변위와 임계 응력확대계수를 구하는데 사용된다.

3.2 결과 분석

유효탄성 균열 모델에서 제시하고 있는 파괴특성인 임계 응력확대계수와 임계 균열단 개구변위를 구하기 위해서는 먼저 유효탄성 균열길이를 구해야 한다. Jenq와 Shah의 2-파라미터 모델에 의하면

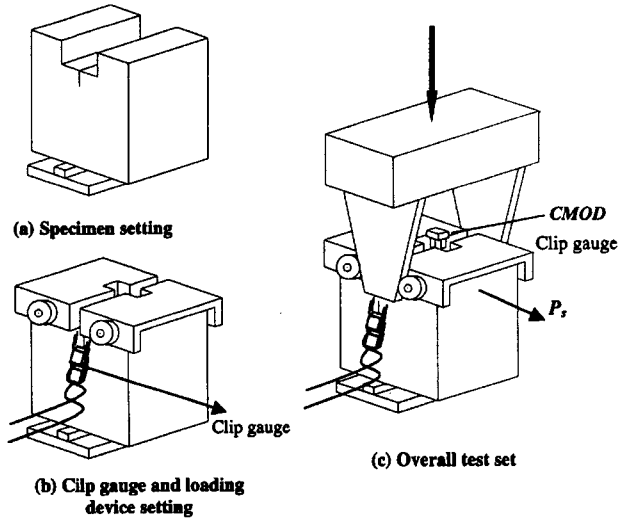
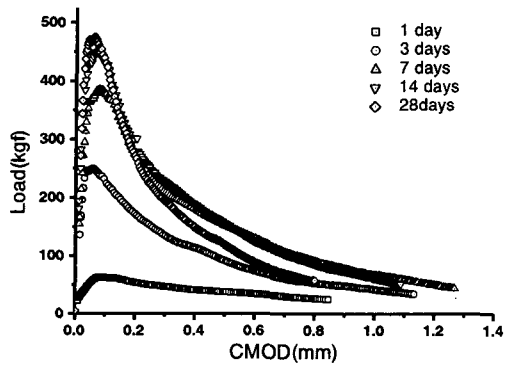


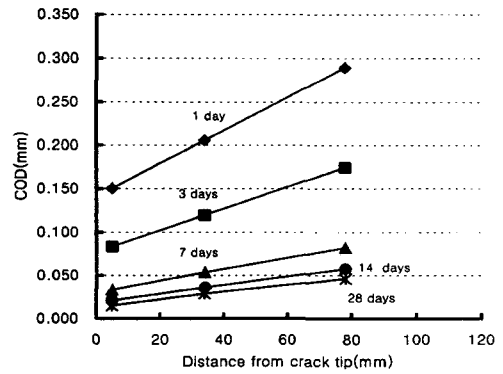
그림 2 실험 방법

표 2 콘크리트의 물성치

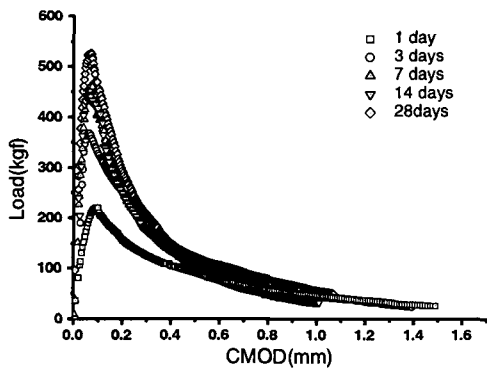
Specimen types	Age (days)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Elastic modulus (10 ⁵ kgf/cm ²)
LS	1	40	2.84	0.98
	3	105	15.7	1.79
	7	140	18.4	2.01
	14	159	24.8	2.15
	28	189	29.6	2.45
NS	1.5	56	15.9	1.32
	3.5	168	22.7	2.34
	7.75	228	33.3	2.67
	14.75	271	37.7	2.74
	28.5	339	40.0	2.94
HS	1	169	29.6	2.28
	3.25	267	39.3	3.09
	7.33	380	39.9	3.31
	14.75	531	46.8	3.45
	28	591	49.6	3.65



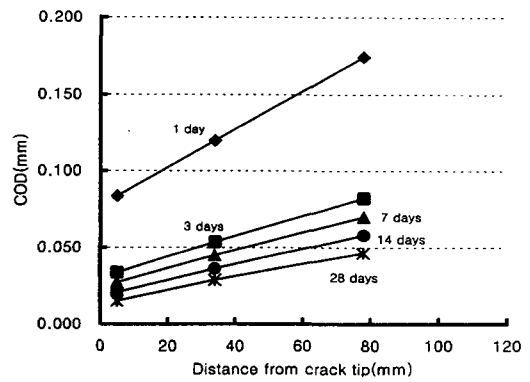
(a) LS 콘크리트



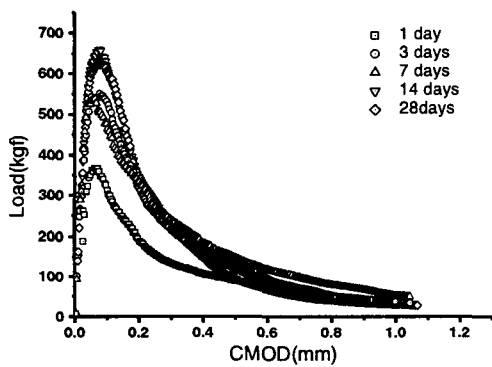
(a) LS 콘크리트



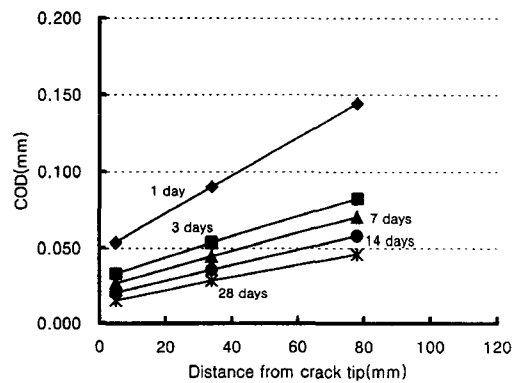
(b) NS 콘크리트



(b) NS 콘크리트



(c) HS 콘크리트



(c) HS 콘크리트

그림 3 하중-균열입구변위(CMOD) 곡선

그림 4 최대 하중하에서의 균열개구변위

최대 하중상태에서의 탄성변형을 유발하는 유효탄성 균열길이를 구하기 위하여 반드시 제하 과정 (unloading process)을 거쳐야 한다. 실험상에서 제하 시점의 선택과 이에 따른 제하 기울기의 측정은

매우 난해하므로, 본 연구에서는 제하 과정을 거치지 않고 유효탄성 균열길이(a_e)를 추정하기 위하여 선형탄성 파괴역학으로부터 유도된 균열개구형상(crack opening profile)을 사용한다. 이를 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$COD(x,a)=CMOD \times g\left(\frac{a}{d}, \frac{x}{a}\right) \quad (1)$$

여기서, g 는 기하적 함수, a 는 균열길이, d 는 실험체의 크기, x 는 균열선단으로부터의 거리이다. 즉, 식 (1)은 거리 x 에 따른 균열개구변위 COD 를 균열입구변위 $CMOD$ 로 나타낸 것이다. 엄밀히 말해, 식(1)의 g 함수는 균열의 형태, 실험체의 크기와 모양에 따라 각기 다르지만, 하나의 edge crack이 있는 보편적인 실험체의 경우에 g 함수 곡선은 매우 흡사하며¹⁾, 이는 그림 5와 같다. 그림 5를 보면, 균열단 부근에서는 비선형이며, 균열단으로부터 멀어질수록 선형을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 균열단으로부터 떨어진 세 지점에서 측정된 균열개구변위가 거의 선형을 이루는 실험 결과와 일치한다. 따라서, 세 지점의 측정값들을 식 (1)에 대입하면 임계 유효탄성 균열길이 a_{ec} 에 관한 방정식을 얻을 수 있어 이를 구할 수 있다. 임계 유효탄성 균열길이가 얻어지면 식 (1)의 x 에 초기균열길이를 대입하여 임계 균열단 개구변위 $CTOD_c$ 를 구할 수 있고, ASTM이 본 실험체와 유사한 컴팩트 인장 실험체에 대해 제시하고 있는 식 (2)에 유효탄성 균열길이와 최대 하중 P 를 대입하여 임계 응력확대계수 K_{Ic} 를 구할 수 있게 된다.

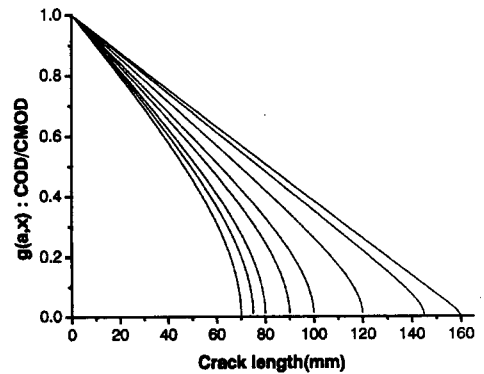


그림 5 edge crack의 균열개구형상

$$K_I = \frac{P}{b\sqrt{d}} F(a) \quad (2)$$

여기서, $F(a)$ 는 초기균열길이에 따라 주어지는 상수이다. 파괴에너지는 그림 3의 하중-균열입구변위 곡선의 면적을 구함으로써 구할 수 있다.

실험 결과를 분석한 결과 얻어진 파괴특성들을 표 3과 그림 6, 그림 7에 나타내었다. 그림 6의 임계 유효균열 확장길이(Δa_{ec})를 보면, 강도가 낮을수록, 초기재령이 빠를수록 최대 하중에 이르기까지 균열이 상당히 진전함을 알 수 있다. 또한, 그림 5의 균열개구형상에서 예측할 수 있는 바와 같이 그림 7의 임계 균열단 개구변위($CTOD_c$)도 임계 유효균열 확장길이의 경향을 따라서 저강도화 될수록, 재령이 빠를수록 큰 값을 보이고 있다. 표 3의 임계 응력확대계수(K_{Ic})와 파괴에너지(G_F)의 경우에는 재령이 증가함에 따라서 초반에 급격히 증가하여 재령 28일에서 어느 정도 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 이는 초기재령의 급격한 강도의 발현과 함께 파괴인성(fracture toughness)도 유사하게 발현됨을 의미한다. 3점휨시험을 통해 재령 0.5, 1, 7, 21, 28일의 임계 응력확대계수를 구한 Zollinger²⁾의 결과와 초기재령에서의 파괴에너지를 구한 Schutter³⁾의 결과도 어느 정도 값의 차이는 있지만, 비슷한 결과를 보이고 있다.

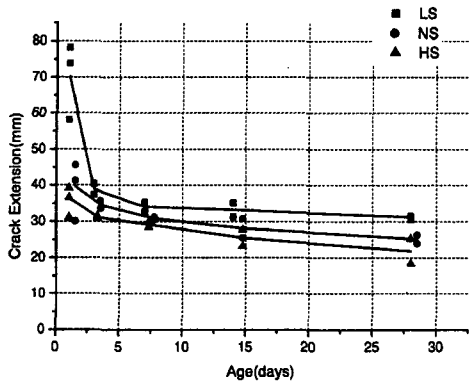


그림 6 임계 유효균열 확장길이(Δa_{ec})

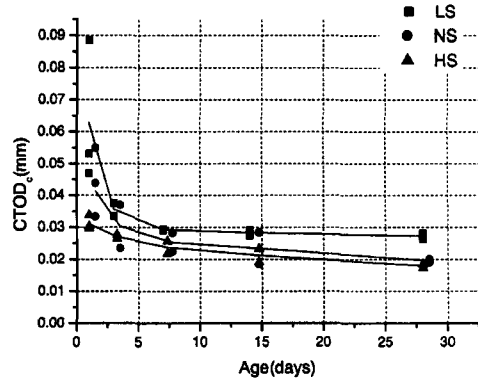


그림 7 임계 균열단 개구변위($CTOD_c$)

표 3 초기재령 콘크리트의 파괴특성치

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 실험 도중 제하과정을 수행하지 않고, 안정된 췌기조깅실험을 통해 얻은 결과와 균열개구형상을 이용하여 유효탄성 균열 모델이 정의하고 있는 임계 유효탄성 균열길이를 구할 수 있었다.

(2) 임계 유효탄성 균열길이로부터 초기재령 콘크리트의 임계 균열단 개구변위와 임계 응력확대계수, 그리고 실험 결과로부터 파괴에너지를 구할 수 있었다.

(3) 초기재령이 증가함에 따라 임계 균열단 개구 변위는 감소하고, 임계 응력확대계수와 파괴에너지와 같은 파괴인성은 강도와 함께 증가하였다.

Specimen types	Age (days)	$CTOD_c$ (mm)	K_{Ic} (Mpa m ^{1/2})	G_F (N/m)
LS	1	0.0628	0.6126	25.84
	3	0.0355	0.8907	101.31
	7	0.0292	1.0986	132.61
	14	0.0282	1.2579	132.60
	28	0.0272	1.4308	132.63
NS	1.5	0.0414	0.7694	93.11
	3.5	0.0302	1.0397	113.31
	7.75	0.0253	1.2430	130.22
	14.75	0.0233	1.3113	138.63
	28.5	0.0195	1.3327	173.14
HS	1	0.0309	1.1807	99.23
	3.25	0.0270	1.5254	126.19
	7.33	0.0237	1.4961	139.40
	14.75	0.0211	1.6123	139.91
	28	0.0179	1.6225	147.12

감사의 글

본 연구는 국가지정연구실 사업(National Lab.)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Shah, S. P., Swartz, E. S. and Ouyang, C., *Fracture mechanics of concrete*, John Wiley & Sons, 1995, pp. 210-214
2. Zollinger, D. G. and Tang, T., Fracture toughness of concrete at early ages, *Materials Journal of ACI*, Vol. 90, No. 5, 1993, pp. 463-471
3. Schutter, G. D. and Taerwe, L., Fracture energy of concrete at early ages, *Materials and Structures*, Vol. 30, 1997, pp. 67-71