

초기재령 콘크리트의 파괴 특성

이 윤¹⁾ · 김진근^{1)*}

¹⁾한국과학기술원 토목공학과

(2001년 7월 23일 원고접수, 2001년 10월 26일 심사완료)

Fracture Characteristics of Concrete at Early Ages

Yun Lee¹⁾, and Jin-Keun Kim^{1)*}

¹⁾ Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea

(Received on July 23, 2001, Accepted on October 26, 2001)

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, and bilinear softening curve 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 taking various strengths and ages, load-crack mouth opening displacement curves were obtained, and the results were analyzed by linear elastic fracture mechanics and the finite element method.

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 ages from 1 day to 28 days. By numerical analysis, four parameters of bilinear softening curve from 1 day to 28 days were obtained. The obtained fracture parameters and bilinear softening curves at early ages may be used as a fracture criterion and an input data for finite element analysis of concrete at early ages.

Keywords : critical stress intensity factor, critical crack-tip opening displacement, fracture energy, bilinear softening curve, wedge splitting test, early ages

1. 서 론

콘크리트 구조물에 존재하는 균열 중에, 상당한 부분이 콘크리트의 타설 직후부터 발생하는 온도 응력, 자기 수축, 건조 수축 또는 그 밖의 외부 원인들로 인하여 발생된다. 실제 공사 현장에서, 시공 초기에 구조물이 붕괴되는 요인으로 콘크리트가 완전히 경화되기 전에 유발된 균열이 원인이 될 수 있을 뿐만 아니라, 이런 균열은 구조물의 내구성에도 크게 영향을 미치게 되므로 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 파괴특성의 구명이 요구된다. 이에, 본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 파괴특성을 구명하고자 하였다. 콘크리트의 파괴에 관하여 현재까지 연구되어온 접근 모델들은 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

하나는 취성재료에 선형탄성파괴역학을 적용하려는 유

효탄성균열모델(effective elastic crack model)이며, 다른 하나는 유사취성재료에만 발생하는 연화 현상을 중심으로 파괴진전을 묘사하는 점성균열모델(cohesive crack model)이다. 본 연구에서는 유효탄성균열모델이 제시하고 있는 파괴특성인 임계균열단개구변위(CTOD), 임계응력확대계수(K_{Ic})와 점성균열모델이 제시하고 있는 파괴에너지(G_F)와 이선형 연화곡선(bilinear softening curve)과 같이 콘크리트의 파괴특성으로 간주되고 있는 파라미터들을 초기재령 콘크리트에 대하여 구명하고자 하였다.

2. 콘크리트의 파괴 특성

2.1 유효탄성균열모델

유효탄성균열모델은 변형연화현상을 보이는 재료의 복잡한 파괴거동을 예측하기 위하여 가공의 균열선단을 가정함으로써 선형탄성파괴역학을 적용하여 파괴거동을 밝힐 수 있는 모델이다. 일반적으로 실제의 균열길이와 유효탄성균열길이와의 관계는 식(1)과 같이 유효균열확장길이 a_e 로 나타낼 수 있다.

* Corresponding author

Tel : 042-869-3614 Fax : 042-869-3610

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

$$\Delta a_e = a_e - a_0 \quad (1)$$

여기서, a_e 는 유효탄성균열길이, a_0 는 초기균열길이이다.

1985년에 Jenq와 Shah¹⁾는 임의의 형상과 크기에 대한 균열이 존재하는 시험체의 최대하중을 이론적으로 예측할 수 있는 2-파라미터 모델을 제안하였다. Fig. 1과 같이 2-파라미터 모델에서는 최대 하중하에서의 실제 균열을 균열단 개구변위 $CTOD$ 가 어떤 특정한 값 $CTOD_c$ 와 같다는 조건으로 결정되는 가상적인 임계유효탄성균열길이 a_c 로 대신한다. 여기서 균열진전의 평가기준은 두가지 파라미터로 표현된다. 하나는 유효균열단에서의 임계응력확대계수 K_{Ic} 이고, 다른 하나는 $CTOD_c$ 이다. Jenq와 Shah는 유효균열단에서의 응력확대계수가 임계값 K_{Ic} 에 이르고, $CTOD$ 값이 임계값 $CTOD_c$ 를 취하게 되면, 균열이 진전하게 된다고 제안하고 있다. 이를 식으로 표현하면 식(2), 식(3)과 같다.

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a_c} g_1\left(\frac{a_c}{d}\right) \quad (2)$$

$$CTOD_c = \frac{4\sigma_c a_c}{E} g_2\left(\frac{a_c}{d}\right) g_3\left(\frac{a_c}{d}, \frac{a_0}{a_c}\right) \quad (3)$$

여기서, σ_c 는 임계응력, d 는 시험체의 깊이이다.

따라서, 유효탄성균열모델의 개념을 바탕으로 하여, 파괴기준이 되는 임계값 K_{Ic} 와 $CTOD_c$ 를 콘크리트의 파괴특성으로 간주할 수 있다.

2.2 점성균열모델

파괴진행영역 내에서 발생하고 있는 상세한 균열진전 메커니즘을 모두 유효균열단 하나로 집중시키면서 상세한 파괴진행과정을 무시하고 있는 유효탄성균열모델과는 달리, 점성균열모델은 파괴진행영역을 모사할 수 있는 균열 모델이다. 여기서 점성균열이란 Fig. 2에서 보이는 바와 같이, 균열면에서 응력을 전달할 수 있는 파괴진행영역내의 하나의 가상적인 균열을 말한다.

점성 균열이 전달하는 응력을 균열변위로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\sigma = f(w) \quad (4)$$

여기서, $f(w)$ 는 실험으로부터 결정되어지는 재료의 특성 함수이다. 이 함수를 연화 곡선(softening curve)이라고 하

며, 이것을 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

여기서, G_F 는 연화 곡선의 면적으로, 단위면적의 균열을 발생시키는데 필요한 콘크리트의 파괴에너지이다. 파괴에너지와 연화 곡선은 재료의 특성으로서, 콘크리트에 따라서 각기 다른 파괴에너지와 연화 곡선이 존재하게 된다. 따라서점성균열모델의 개념을 바탕으로 하여, 파괴에너지 G_F 와 연화 곡선을 콘크리트의 파괴특성으로 간주할 수 있게 된다.

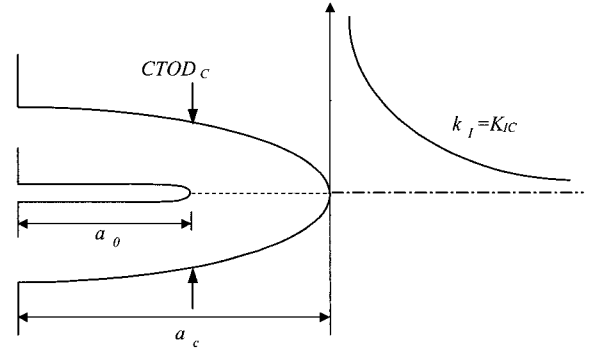


Fig. 1 Effective elastic crack profile and definition of crack-tip opening displacement in 2-parameter model

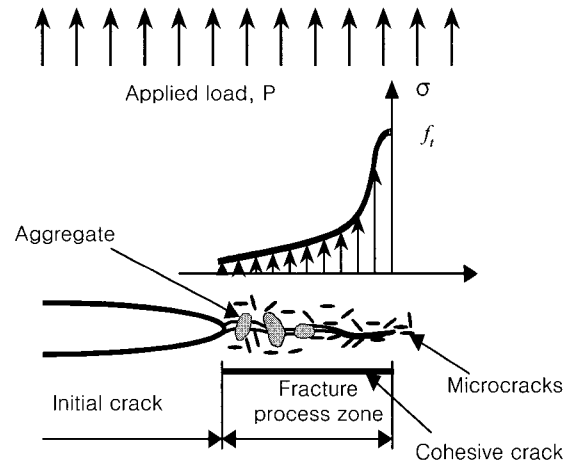


Fig. 2 Cohesive crack and fracture process zone

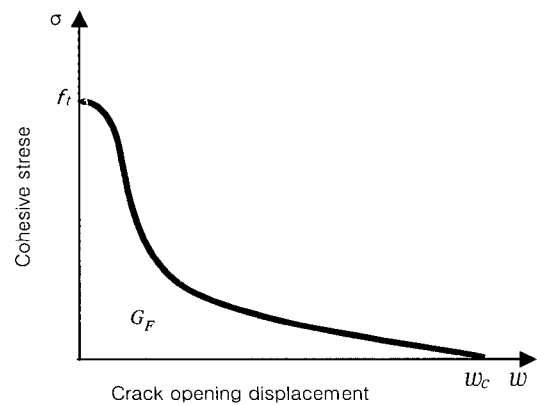


Fig. 3 Stress softening curve

3. 파괴 실험

3.1 사용재료 및 배합설계

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

3.2 시험체 제작

본 실험에서는 육면체 췌기췌갸시험을 수행하기 위한 육면체 시험체를 제작하였다. 타설 시에 시험체 내부에 강철판을 넣고 탈형 후에 철판을 제거함으로써 초기균열을 만들었다. 로울러가 부착된 하중장치를 고정시키고, 변위게이지를 설치하기 위하여 시험체의 윗부분에 홈을 만들었다. 이와 동시에 압축강도와 탄성계수, 췌갸인장강도 시험을 위한 원주공시체도 제작하였다.

췌기췌갸실험에 사용한 육면체 시험체의 형태와 크기는 Fig. 4와 같으며, 제작 후 24시간만에 탈형하여 실험시까지 습윤양생을 실시하였다.

3.3 실험 방법

본 실험에서는 1988년에 Bruhwiler²⁾에 의해 제안된 췌기췌갸시험(wedge splitting test, WST)방법으로 실험을 수행하였다. 본 실험 방법은 Fig. 5와 같다. 노치를 포함한 시험체를 지지대에 올린 다음 로울러가 부착된 하중장치를 시험체의 윗부분에 고정시키고 두 개의 동일한 췌기를 가진 강성이 큰 강철판을 가력 장치의 위판에 고정시킨다. 췌기가 양쪽에 있는 로울러 사이를 움직이면서 작용되는 수직하중과 시험체의 균열면을 따른 두 지점과 로울러 축의 위치에 균열게이지를 부착하여 균열개구변위(COD)를 측정하게 된다. 실험은 로울러 축의 위치의 균열개구변위(COD)에 의하여 제어된다. 췌기췌갸시험 직전에 KS F 2405에 의하여 압축강도와 탄성계수 실험을 수

행하였으며, 인장강도 실험은 KS F 2423에 의하여 췌갸인장강도를 측정하였다.

3.4 실험 결과

본 논문에서는 실험 결과들을 가장 낮은 강도의 시험체를 LS, 중간 강도의 시험체를 NS로, 가장 고강도의 시험체를 HS로 표기하였다. 압축강도시험과 췌갸인장시험을 통해 얻은 콘크리트의 물성치는 Table 2와 같다. 췌기췌갸시험을 통한 세 가지 강도에 대한 하중-균열개구변위(CMOD) 곡선은 Fig. 6과 같고, 균열선단으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 세 지점에서 측정된 최대하중에서의 균열개구변위의 평균값은 Fig. 7과 같다. Fig. 6을 보면, 균열개구변위가 증가하면서 하중이 증가하다가 어느 지점부

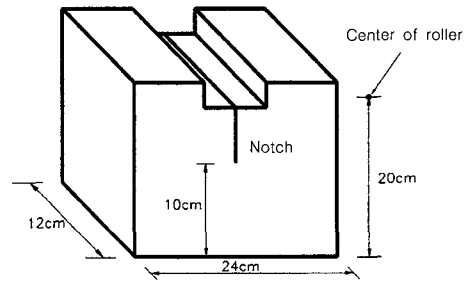


Fig. 4 Test specimen used in wedge splitting test

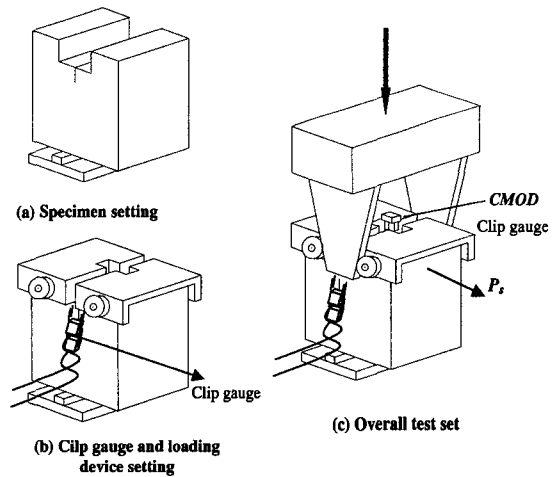


Fig. 5 Wedge splitting test procedure

Table 1 Mix proportion of concrete

Water-cement ratio(%)	Fine aggregate ratio(%)	Unit weight(kg/m ³)				
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super plasticizer
70	42	185	268	726	1002	0.15%
55	42	185	342	727	1030	0.3%
30	41	160	533	712	1090	1%

Table 2 Properties of concrete

Type	Age (days)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Elastic modulus (10 ⁵ kgf/cm ²)
LS	1	41	2.84	0.99
	3	106	15.7	1.77
	7	143	18.4	2.06
	14	157	24.8	2.14
	28	187	29.6	2.47
NS	1.5	58	15.9	1.33
	3.5	169	22.7	2.34
	7.75	226	33.3	2.68
	14.75	273	37.7	2.74
	28.5	338	40.0	2.96
HS	1	168	29.6	2.25
	3.25	266	39.3	3.03
	7.33	382	39.9	3.37
	14.75	533	46.8	3.43
	28	590	49.6	3.66

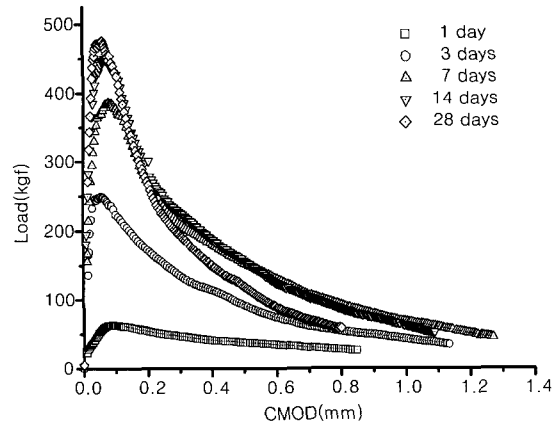
터는 하중이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 어느 임계상태(최대하중)까지는 하중이 증가해야만 균열이 진전하는 안정적인 균열 성장을 나타내며, 그 이후부터는 하중이 감소해도 균열이 진전하는 불안정한 균열 성장을 나타냄을 의미한다. 본 연구에서는 이런 불안정한 균열이 발생되기 시작하는 임계상태를 Fig. 6의 최대하중점으로 간주하였다. Fig. 7을 보면, 세 지점에서의 측정값들이 선형적 경향을 보이며 균열선단으로부터 멀어질수록 증가하게 되는데, 이는 균열개구변위가 다음 장에서 언급될 균열개구형상(crack opening profile)의 형태를 따르기 때문이다.

4. 분석 및 해석

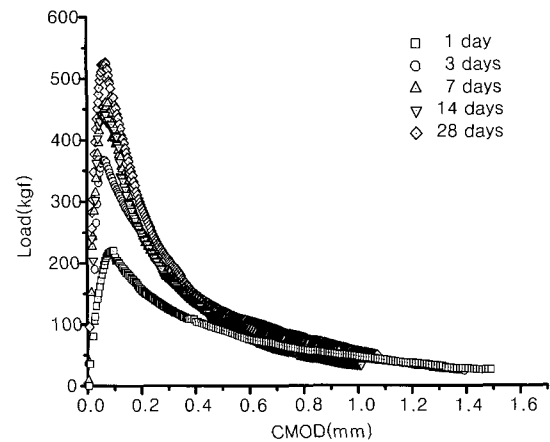
4.1 분석 방법

유효탄성균열모델에서 제시하고 있는 파괴특성인 임계응력확대계수와 임계균열단개구변위를 구하기 위해서는 먼저 유효탄성균열길이를 구해야 한다. Jenq와 Shah의 2-파라미터 모델에 의하면, 최대하중 상태에서의 탄성변형을 유발하는 유효탄성균열길이를 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 유효탄성균열길이(a_e)를 추정하기 위하여, 선형탄성파괴역학으로부터 유도된 균열개구형상(crack opening profile)을 사용하였다. 이를 식으로 표현하면 식(5)와 같다.

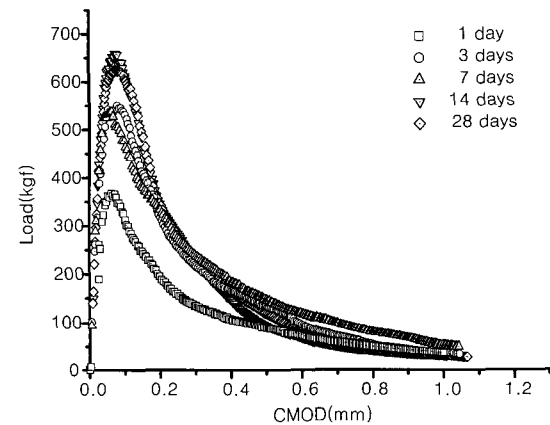
$$COD(x, a) = CMOD \times g\left(\frac{a}{d}, \frac{x}{a}\right) \quad (5)$$



(a) LS concrete



(b) NS concrete



(c) HS concrete

Fig. 6 Load-CMOD curves

여기서, g 는 기하적 함수, a 는 균열길이, d 는 시험체의 깊이, x 는 균열선단으로부터의 거리이다. 즉, 식(5)는 거리 x 에 따른 균열개구변위 COD 를 균열입구변위 $CMOD$ 로 나타낸 것이다. 엄밀히 말해, 식(5)의 g 함수는 균열의 형태, 시험체의 크기와 모양에 따라 각기 다르지만, 하나의

edge crack이 있는 보편적인 시험체의 경우에 g 함수 곡선은 매우 흡사하며³⁾, 이는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8을 보면, 균열단 부근에서는 비선형이며, 균열단으로부터 멀어질수록 선형을 보이며 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 균열단으로부터 떨어진 세 지점에서 측정된 균열개구변위가 거의 선형을 이루는 실험 결과와 일치한다. 따라서, 세 지점의 측정값들을 식(5)에 대입하면 임계 유효탄성균열길이 a_{ec} 에 관한 방정식을 얻을 수 있어 이를

구할 수 있다. 임계유효탄성균열길이가 얻어지면 식(5)의 x 에 초기균열길이를 대입하여 임계균열단개구변위 $CTOD_c$ 를 구할 수 있고, ASTM이 본 시험체와 유사한 컴팩트 인장 시험체에 대해 제시하고 있는 식(6)에 유효탄성균열 길이와 최대하중 P 를 대입하여 임계응력확대계수 K_{Ic} 를 구할 수 있게 된다.

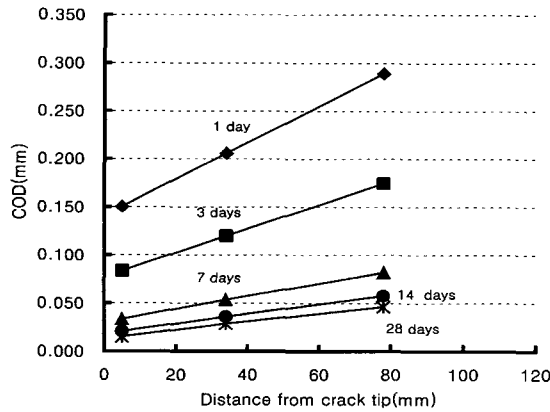
$$K_I = \frac{P}{b\sqrt{d}} F\left(\frac{a}{d}\right) \quad (6)$$

여기서, $F(a/d)$ 는 초기균열길이에 따라 주어지는 상수이고, b 는 시험체의 폭, d 는 시험체의 깊이이다.

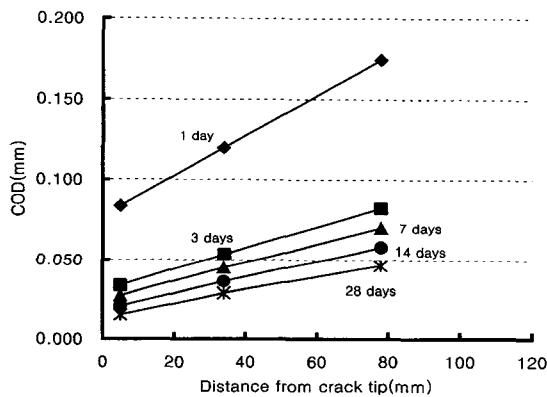
파괴에너지 G_F 는 Fig. 6의 하중-균열입구변위 곡선의 면적을 구함으로써 얻을 수 있다.

4.2 분석 결과

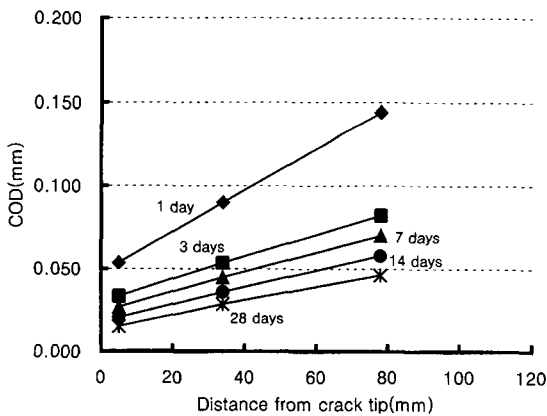
실험 결과를 분석한 결과 얻어진 파괴특성들을 Table 3과 Fig. 9부터 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 9의 임계유효균열 확장길이(Δa_{ec})를 보면, 강도가 낮을수록, 초기재령이 빠를수록, 최대하중에 이르기까지 균열이 상당히 진전함을 알 수 있다. 또한, Fig. 8의 균열개구형상에서 예측할 수 있는 바와 같이 Fig. 10의 임계균열단개구변위($CTOD_c$)도 임계 유효균열확장길이의 경향과 마찬가지로 저강도화 될수록, 재령이 빠를수록 큰 값을 보이고 있다. Fig. 11과 Fig. 12의 임계응력확대계수(K_{Ic})와 파괴에너지(G_F)의 경우에는 재령이 증가함에 따라서 초반에 급격히 증가하여 재령 28일에서 어느 정도 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 이는 초기재령의 증가에 따른 강도의 급격한 발현과 함께 파괴인성(fracture toughness)도 유사하게 발현됨을 의미한다. 3점휨시험을 통해 재령 0.5, 1, 7, 21, 28일의 임계응력확대계수를 구한 Zollinger⁴⁾의 결과와 초기재령에서의 파괴에너지를 구한 Schutter⁵⁾의 결과도 어느 정도 값의 차이는 있지만, 비슷한 경향을 보이는 것으로 사료된다.



(a) LS concrete



(b) NS concrete



(c) HS concrete

Fig. 7 Crack opening displacement at peak load

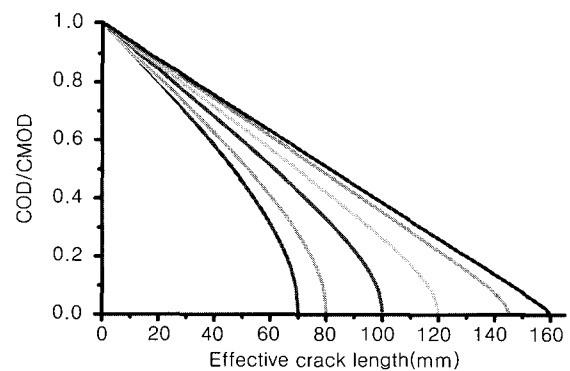


Fig. 8 Crack opening profile function for ordinary edge crack

Table 3 Fracture characteristics of concrete at early ages

Type	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

4.3 수치 해석을 통한 이선형 연화 곡선의 역추정

Petersson⁶⁾은 Fig. 3과 같은 콘크리트의 연화 곡선을 Fig. 13과 같은 이선형 곡선(bilinear curve)으로 근사하는 방법을 제안하였다. 따라서 콘크리트의 파괴특성인 연화 곡선의 추정 문제를 네 개의 파라미터 f_t , f_l , w_1 , w_c 의 추정 문제로 단순화할 수 있다. 본 연구에서는 점성균열모델을 바탕으로 하여, 1991년에 Gopalaratnam⁷⁾이 처음 제안한 중첩의 원리에 기본을 두고 본 연구에 사용된 시험체에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 중첩의 원리를 적용한 균열해석은 외부하중과 파괴진행영역의 균열면을 따라 작용하는 단위하중에 대하여 각각 독립적인 탄성해를 구하고, 이를 전체 구조물의 평형, 직합조건, 그리고 파괴진행영역의 점착응력-균열개구변위 관계를 만족하도록 일련의 방정식계를 구성한다. 본 연구에서는 응력 상태를 평면응력 조건으로 가정하고, Fig. 14와 같이 본 시험체의 우반부를 300개의 two-dimensional parabolic isoparametric element로 분할하고, 균열이 진전하는 리가먼트(ligament)에 23개의 절점을 두고, 이 절점을 이선형 연화 현상을 일으키는 비선형 스프링 요소(nonlinear spring element)로 고려해서 유한요소해석을 통한 하중-균열개구변위를 구현하였다. 이렇게 구현된 하중-균열개구변위 곡선은 이선형 연화 곡선의 네 개의 파라미터, 즉 f_t , f_l , w_1 , w_c 가 주어진 상태에서 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 6의 하중-균열개구변위 곡선을 최적으로 구현할 수 있는 이선형 연화 곡선을 추정하고자 하였다.

최적의 해를 구하기 위하여 식(7)과 같은 함수를 생각한다.

$$F(f_t, f_l, w_1, w_c) = \int_0^{CMOD_0} (P_e - P_m)^2 d\delta \quad (7)$$

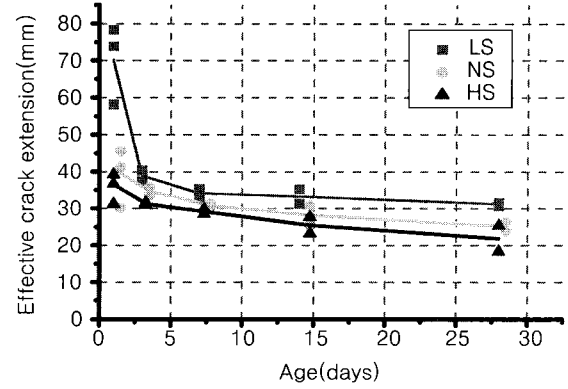


Fig. 9 Critical effective crack extension at various ages

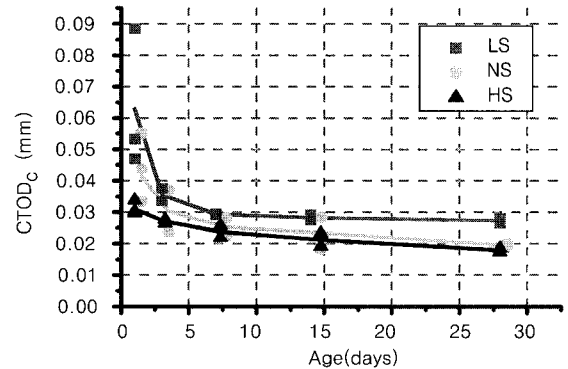


Fig. 10 CTOD_c at various ages

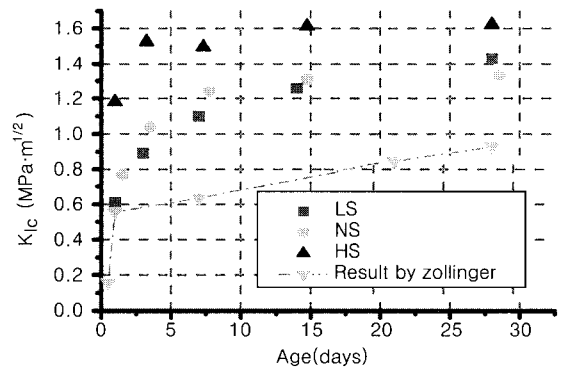


Fig. 11 K_{IC} at various ages

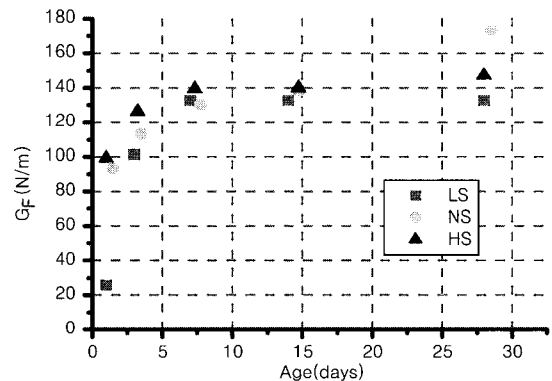


Fig. 12 G_F at various ages

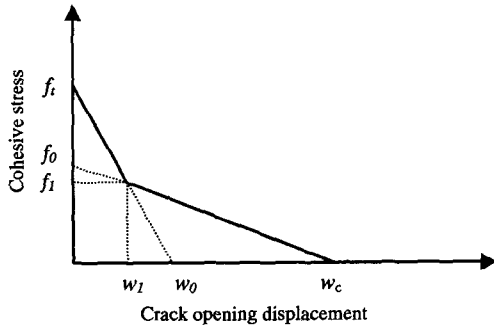


Fig. 13 Bilinear softening curve

No. of element = 390
 No. of d.o.f = 864
 No. of node on crack line = 23

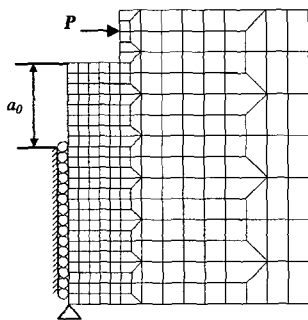


Fig. 14 Specimen configuration and finite element mesh

여기서, P_c 는 실험을 통해 얻은 하중이고, $CMOD_0$ 는 하중이 0이 될 때의 균열입구변위이며, $P_m = P_m(f_i, f_1, w_1, w_c)$ 은 유한요소해석을 통해 얻은 하중이다. 따라서, 함수 $F(f_i, f_1, w_1, w_c)$ 는 실험으로 얻은 하중-균열입구변위 곡선과 해석으로 얻은 하중-균열입구변위 곡선의 차이를 수치적으로 나타낸 것이라고 할 수 있다. 따라서 연화 곡선 추정 평가의 가장 중요한 평가 기준은 함수 $F(f_i, f_1, w_1, w_c)$ 의 값이라고 할 수 있다. 이 값은 항상 양수이며, 이 함수가 최소값을 갖는 조건은 식(8)과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial f_i} = \frac{\partial F}{\partial f_1} = \frac{\partial F}{\partial w_1} = \frac{\partial F}{\partial w_c} = 0 \quad (8)$$

식(8)은 네 개의 비선형 방정식을 구성한다. 따라서, 본 연구에서는 이 네 개의 비선형 방정식을 풀기 위하여 Newton-Raphson iteration 방법을 사용한다. 이 과정을 요약하면 Fig. 15와 같다^{8,9,10}. Fig. 15에서 함수 $F(f_i, f_1, w_1, w_c)$ 의 미분항들은 식(9)와 같이 수치적 방법으로 계산될 수 있다¹¹.

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \approx \frac{f(x+h) + f(x-h) - 2f(x)}{h^2}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \approx \frac{f(x+h, y+g) + f(x-h, y-g) - f(x+h, y-g) - f(x-h, y+g)}{4hg}$$

수치 해석을 통해 얻은 이선형 곡선의 파라미터 f_i, f_1, w_1, w_c 를 정리하면 Table 4와 Fig. 16 및 Fig. 17과 같다. Fig. 16과 Fig. 17을 보면 강도에 따라서 차이는 있지만 재령이 증가함에 따라서 f_i, f_1 는 증가하고, w_1, w_c 는 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이 사실은 하중-균열입구변위 곡선이 재령이 증가함에 따라 최대 하중은 증가하지만 최대 하중 이후에 급격한 연화 현상을 나타내는 사실에 기인한 것으로 사료된다. 또한 연화 곡선도 다른 파괴특성들과 마찬가지로 고강도화될 수록 발현이 빠른 것으로 나타났다.

이상적인 경우에 오차함수 $F(f_i, f_1, w_1, w_c)$ 의 최소 한계값은 0 이어야 하지만, 실험과 계산상의 여러 가지 이유로 이 값은 0 이 아닌 어떤 양수 값이 된다. Table 4의 결과를 분석해 보면, 오차함수 $F(f_i, f_1, w_1, w_c)$ 의 평균값이 LS는 $640.2 \text{ kgf}^2 \text{ mm}$, NS는 $992.0 \text{ kgf}^2 \text{ mm}$, HS는 $1965. \text{ kgf}^2 \text{ mm}$ 임을 알 수 있다. $F(f_i, f_1, w_1, w_c)$ 의 정적분 한계값을 2 mm로 간주한 것을 고려하면, 하중-균열입구변위 곡선의 각 $CMOD$ 값에 대하여 LS는 평균 17.9 kgf, NS는 평균 22.3 kgf, HS는 평균 31.3 kgf의 오차가 발생한 것으로 나

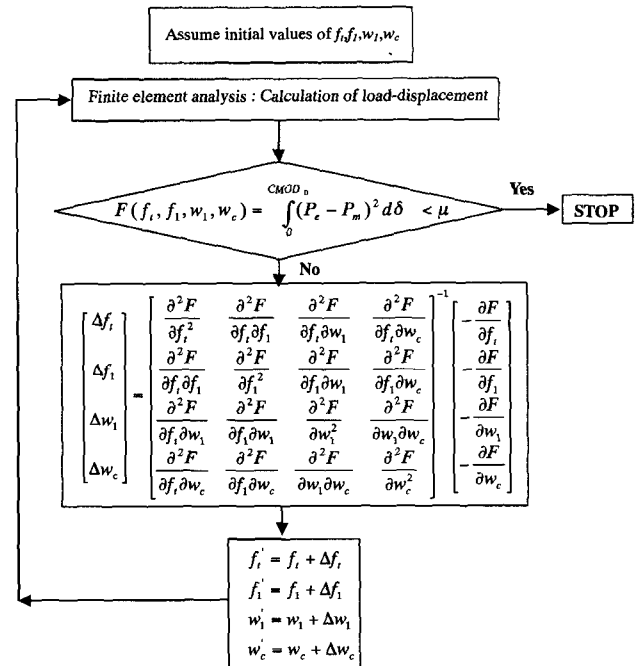


Fig. 15 Flow chart of the numerical procedure

Table 4 Parameters of bilinear softening curve obtained by numerical analysis

Type	Age (days)	f_t (Mpa)	f_l (Mpa)	w_l (mm)	w_c (mm)	$F(f_t, f_l, w_l, w_c)$ (kgf·mm)
LS	1	0.272	0.193	0.072	0.324	12
	3	1.248	0.363	0.024	0.285	443
	7	2.079	0.616	0.023	0.271	1053
	14	2.824	0.472	0.024	0.204	1340
	28	2.964	0.643	0.013	0.186	353
NS	1.5	1.575	0.374	0.026	0.287	162
	3.5	1.816	0.366	0.028	0.228	973
	7.75	2.611	0.540	0.017	0.236	813
	14.75	3.296	0.489	0.010	0.196	892
	28.5	3.919	0.696	0.011	0.177	2120
HS	1	2.881	0.383	0.024	0.186	527
	3.25	3.598	0.391	0.020	0.194	1460
	7.33	4.381	0.561	0.017	0.156	2727
	14.75	4.348	0.614	0.013	0.161	1196
	28	4.711	1.082	0.007	0.117	3918

타났다. 이렇게 고강도화 될수록 오차가 증가하는 원인은 고강도화 될수록 하중-균열입구변위 곡선에서 최대하중이 증가하고, 최대하중 이후에는 급격한 하중 감소를 일으키기 때문이다. 본 연구에서는 세 가지 강도에 대하여 균열이 진전하는 리가먼트에 같은 수의 절점을 두고 해석을 수행하였으므로, 다른 강도에 비해 고강도일 때의 하중변이점 부근에서의 오차가 증가하게 되는 것이다. 따라서 고강도의 해석에서는 리가먼트의 절점수를 증가시키는 것이 오차를 감소시킬 수 있으리라고 사료된다. 또한 본 연구에서는 하중-균열입구변위 곡선의 초기 기울기를 결정짓는 유한요소해석시의 입력 상수인 탄성계수를 결정함에 있어서, 췌기췌검시험 전에 수행한 원주공시체의 시험으로부터 구한 탄성계수 값을 해석에 적용하였는데, 이선형 연화 곡선 파라미터 f_t , f_l , w_l , w_c 에 탄성계수 E 도 미지수로 추가하여 5 개의 파라미터를 추정하는 수치 해석을 수행한다면, 보다 정확한 하중-균열입구변위 곡선을 구현할 수 있으리라고 사료된다.

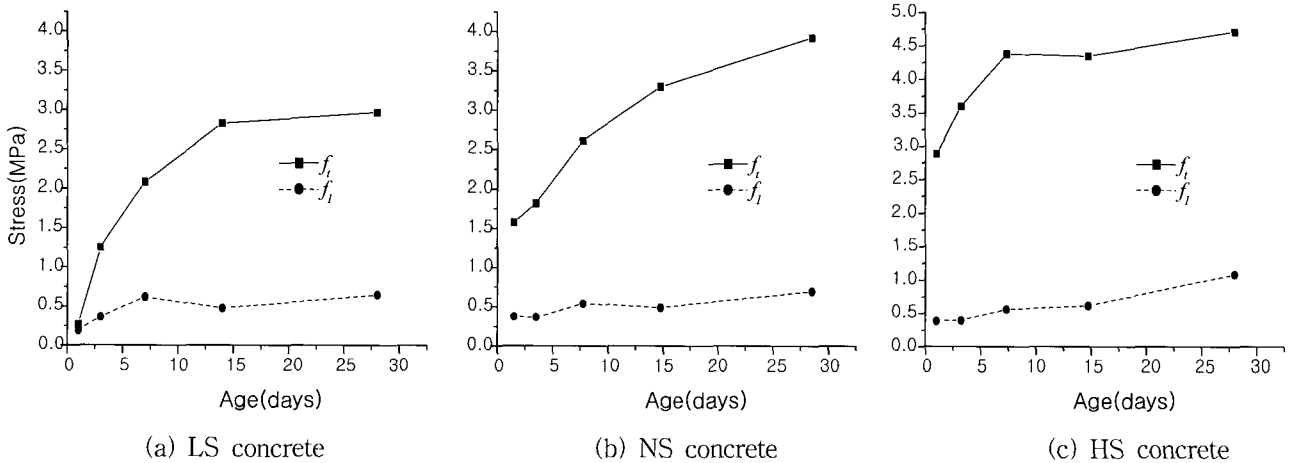


Fig. 16 Variation of parameter f_t , f_l

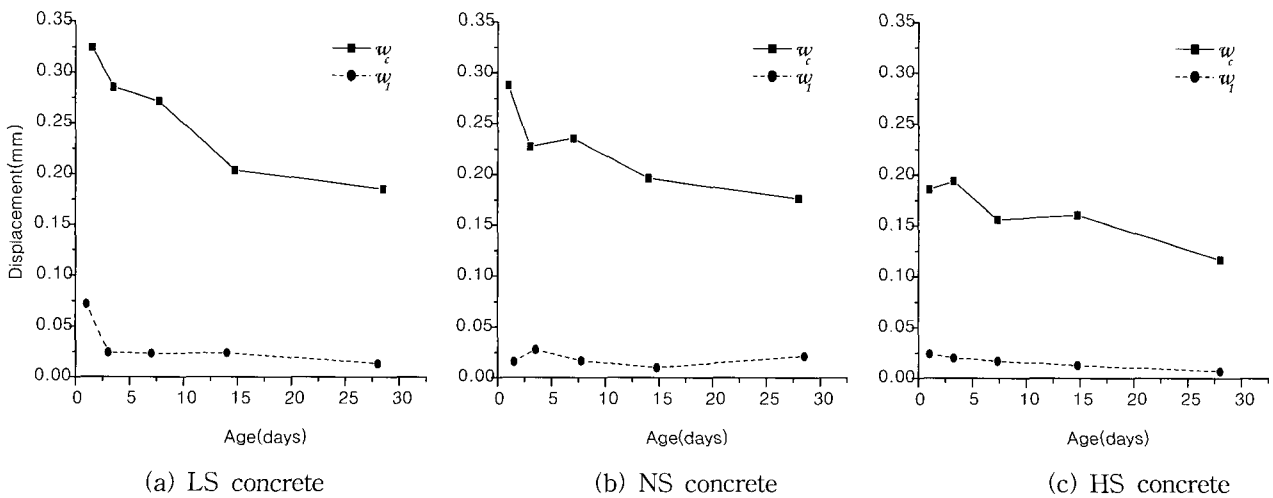


Fig. 17 Variation of parameter w_c , w_l

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 실험 도중 제하 과정을 수행하지 않고, 안정된 썬기 쪼갬실험을 통해 얻은 결과와 균열개구형상을 이용하여 유효탄성균열모델이 정의하고 있는 임계유효탄성균열길이를 구할 수 있었다.
- 2) 임계유효탄성균열길이를 이용하여, 초기재령 콘크리트에 대한 임계응력확대계수와 임계균열단개구변위의 파괴특성치를 제시하였다. 재령 28일까지 재령이 증가함에 따라 임계응력확대계수는 증가하고, 임계균열단개구변위는 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 썬기쪼갬시험 결과로 얻은 하중-균열입구변위 곡선으로부터 초기재령 콘크리트에 대한 파괴에너지 값을 제시하였다. 파괴에너지는 재령 28일까지 재령이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.
- 4) 점성균열모델을 바탕으로 하여, 본 실험에 사용된 시험체에 대한 유한요소해석을 수행하여 얻은 하중-균열입구변위 곡선과 실험으로부터 얻은 하중-균열입구변위 곡선에 대한 수치해석을 통하여, 초기재령 콘크리트에 대한 이선형 연화 곡선을 구현할 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Jenq, Y. S., and Shah, S. P., "A Two Parameter Fracture Model for Concrete," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.111, No.4, 1985, pp.1227~1241.
2. Bruhwiler, E., and Wittmann, F. H., "The Wedge Splitting Test, A Method of Performing Stable Fracture Mechanics Tests," *Recent Publications*, Ed. by Wittmann, F.H., 1988, pp.147~162.
3. Shah, S. P., Swartz, E. S., and Ouyang, C., "Fracture Mechanics of Concrete," John Wiley & Sons, 1995, pp.210~214.
4. 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.
5. Schutter, G. D., and Taerwe, L., "Fracture Energy of Concrete at Early Ages," *Materials and Structures*, Vol. 30, 1997, pp.67~71.
6. Petersson, P. E., "Crack Growth and Development of Fracture Zone in Plain Concrete and Similar Materials," Report No. TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1981.
7. Gopalaratnam, V. S., and Ye, B. S., "Numerical Characterization of the Nonlinear Fracture Process in Concrete," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 40, No. 6, 1991, pp.991~1006.
8. Wittmann, F. H., "Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete," *Proceedings of the International Conference on Fracture Mechanics of Concrete*, Lausanne, Swezerland, Elsevier, 1985, pp.163~175.
9. Mihashi, H., and Nomura, N., "Correlation between Characteristics of Fracture Process Zone and Tension-Softening Properties of Concrete," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 165, pp.359~376, 1996.
10. 어석홍, 김진근, 김희성, "고강도 콘크리트보의 파괴특성과 크기효과에 관한 수치해석적 연구," 대한토목학회 논문집, 제17권, I-3호, 1997, pp.361~371.
11. Kincaid, D., and Cheney, W., "Numerical Analysis," Brooks/Cole Publishing Company, 1996, pp.499~511.

요 약

본 연구의 목적은 유효탄성균열모델과 점성균열모델의 개념에 기초한 임계응력확대계수, 임계균열단개구변위와 파괴에너지, 이선형 연화 곡선같은 콘크리트의 파괴특성들을 초기재령 콘크리트에 관해 구명하는 것이다.

이를 위해 모드 I의 파괴를 일으킬 수 있는 썬기쪼갬시험이 노치가 있는 육각형의 썬기 시험체에 대하여 수행되었다. 강도와 재령의 변화에 따라 하중-균열입구변위 곡선이 얻어졌으며, 이것은 선형탄성 파괴역학과 유한요소법에 의해 분석되었다.

실험 결과를 분석한 결과, 재령 1일부터 재령 28일까지의 임계응력확대계수와 파괴에너지는 증가하였으며, 임계균열단개구변위는 감소하였다. 또한 수치해석을 통하여 재령 1일부터 재령 28일까지의 이선형 연화 곡선의 네 파라미터를 구할 수 있었다. 이렇게 얻어진 초기재령 콘크리트의 파괴특성치와 이선형 연화 곡선은 초기재령 콘크리트의 파괴 기준과 유한요소해석시의 입력 상수로써 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 임계응력확대계수, 임계균열단개구변위, 파괴에너지, 이선형 연화 곡선, 썬기쪼갬시험, 초기재령