

## J-적분 평가를 이용한 콘크리트 파괴 특성

최신호<sup>1)\*</sup> · 계해주<sup>2)</sup> · 김화중<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 경북대학교 건축공학과 <sup>2)</sup> 현대건설

(2001년 3월 2일 원고접수, 2001년 7월 19일 심사완료)

## Fracture Properties of Concrete by using the J-integral

Sin-Ho Choi<sup>1)\*</sup>, Hae-Ju Kye<sup>2)</sup>, and Wha-Jung Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Taegu, 702-701, Korea

<sup>2)</sup> Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd., Seoul, 110-793, Korea

(Received on March 2, 2001, Revised on July 19, 2001)

### ABSTRACT

Recently, the parameters, models, and experimentations, which evaluate the fracture properties of concrete, have been proposed by many researchers, and their developments allow us to analyze the non-linear and quasi-brittle fracture mechanisms.

In this paper, a brief treatment of the fracture parameters was presented and the experiments of 3-point bending tests were conducted to compare J-integral( $J_{Ic}$ ) with other parameters( $K_{Ic}$ ,  $G_{Ic}$ , and  $G_F$ ). The change of parameter values according to the width and notch length of concrete beam specimens was also considered. The load-displacement curves are used to experimentally measure concrete fracture toughness. From the results of experiment, it is noted that the value of  $G_F$  and  $J_{Ic}$  decreases as the notch depth increases and  $G_F$  is less sensitive than  $J_{Ic}$ . Therefore, the former is more appropriate to use as the concrete fracture toughness parameter. The values of  $G_F$  and  $J_{Ic}$  increase when the width of concrete specimens increase from 75 mm to 150 mm. Therefore, the effects of specimen width need to be considered in determining the concrete fracture toughness.

**Keywords :** 3-point bending test, fracture parameters, notch length, J-integral, concrete fracture toughness

### 1. 서 론

최근, 파괴 역학의 발전으로 콘크리트 비선형 거동과 취성 파괴를 해석할 수 있는 모델과 이론들이 많이 보고되고 있다. 그 중에서도 널리 사용되고 있는 모델로는 가상 균열 모델, 2-매개변수 모델, 크기 효과 모델 등이 있다. 그렇지만, 이 모델들은 균열 선단이 직선이라고 가정하고 있어서 실제 콘크리트 구조체의 3차원적인 측면을 다소 무시하고 있다. 따라서, 지금까지의 파괴역학 모델들이 콘크리트 구조물의 파괴 거동을 성공적으로 묘사하고 있지만 아직까지 한계가 존재하며, 이는 두께(width) 방향에 대한 파괴 기구를 완전히 설명하지 못하고 있는 데 기인한다.

균열 발생·성장에 기인한 파괴 현상에 대한 최초의 연구자는 1920년에 에너지 해방률을 사용하여 완전 취성 재료에서 균열 불안정 전파의 발생을 설명한 Griffith<sup>1)</sup>였으

며, 주로 금속재료에 대해 파괴역학이 적용·발전되었고, 시멘트계 복합 재료에 대해서는 1961년 Kaplan<sup>2)</sup>에 의해 최초로 파괴 역학이 적용되었다. 콘크리트 파괴 역학에 관한 초기의 연구는 금속 재료에서 확립된 파괴 역학 매개변수를 기본으로 하는 것이 많았다. Lott 등<sup>3,4)</sup>은 노치가 있는 보의 실험에서  $K_{Ic}$ 와  $G_{Ic}$ 를 측정하였고, 균열의 끝에 미세 균열 영역이 있음을 밝혔다. 또한 Walsh<sup>5)</sup>는 균열 끝에 미세 균열 영역이 공시체 크기와 리가먼트(ligament) 길이에 비하여 작도록 하고, 콘크리트 파괴 실험에서 보의 높이가 최소한 15 cm는 되어야 한다고 제안했다. 1970년대 후반에 콘크리트 균열 선단 전방에는 손상을 받고 있지만, 응력 전달이 가능한 연화 영역이 존재함을 발견함으로써 금속 재료에 대한 파괴 역학을 콘크리트에 직접 적용하는 것이 불가능하다고 인식하게 되었다. Hillerborg<sup>6)</sup>는 가상 균열 모델(FCM)을 제안하였는데, 이 모델은 보의 3점 휨 실험에서 구한 하중-변위 곡선에서 얻어지는 파괴 에너지  $G_F$ 와 일축인장 실험에서 구한 응력-개구변위( $f_t$ -COD)의 인자가 필요하다. Jenq와 Shah<sup>7)</sup>는 탄성파괴 반응에 기초하여 2-매개변수 모델을 제안하였으며 응력확대계수( $K_{Ic}$ <sup>8)</sup>

\* Corresponding author

Tel : 053-950-5596 Fax : 053-950-6590

E-mail : cino@kebi.com

와 균열선단개구변위(CTOD<sub>c</sub>)로 표현할 수 있는 재료의 특성길이(Q)를 제시하였다. Bazant와 Cedolin 등<sup>8)</sup>은 콘크리트의 파괴 과정을 설명하기 위해 변형 연화에 근거한 균열대 모델을 제안하였고 파괴 에너지를 균열 저항 곡선(R-curve)에서 구하였다. Shah와 Hamm 등<sup>9)</sup>은 양단에 노치가 있는 네모꼴 공시체 인장 실험에서 콘크리트 파괴 거동에 두께의 영향이 있음을 보였다. 콘크리트의 균열 현상은 콘크리트 균열 선단에서 파괴 진행 영역(fracture process zone, FPZ)이라는 비선형 영역이 존재하고, 이 영역은 주로 균열 선단의 미세 균열에 의해서 발생한다. 이러한 미세 균열은 균열 선단에서의 응력 분포에 아주 큰 영향을 미치므로 고전적인 선형 탄성 파괴 역학의 적용보다는 비선형 파괴 역학의 적용이 시도·연구되고 있다.

이 연구에서는 노치가 있는 콘크리트보 시험체를 두께 별로 3점 휨실험하여 콘크리트보의 두께 변화가 콘크리트 파괴 인성에 미치는 영향에 관하여 고찰하고 임계 J-적분값(J<sub>Ic</sub>)과 파괴 인성을 나타내는 다른 파괴 특성값들과 서로 비교하였다.

## 2. 시험체 제작 및 실험 방법

### 2.1 사용 재료 및 시험체

이 실험에서는 국내산 1종 보통포틀랜드 시멘트, 경북 예천산 강모래 및 평은산 쇄석 골재, 그리고 혼화제로 리그닌설폰산계 AE감수제 표준형 제품이 사용되었다. 사용 재료의 물리적 성질은 Table 1, 2와 같고 실험에 사용된 콘크리트 배합은 Table 3과 같다.

콘크리트 파괴 실험을 위한 시험체의 크기는 기존의 콘크리트 휨실험용 시험체와 동일한 직사각형 보로 하였으며, 노치 길이와 시험체의 두께를 실험 변수로 하여 제작하였다. 노치의 길이는 0, 25, 50, 75 mm로 하였고 시험체 두께는 150, 112.5, 75 mm로 하였으며, Table 4에 나타내었다. 또한 노치폭은 5 mm로 하였는데, 이는 RILEM<sup>10)</sup>에서 제안한 파괴에너지 측정을 위한 노치 폭 10 mm 이하에 따른 것이다.

### 2.2 실험 방법

재하 방법은 스크류 잭에 연결된 모터가 등속회전하여 잭의 변위가 1 mm/min의 속도를 유지하도록 하였고 허용 용량 20 tonf의 하중계가 사용되었다.

수직 변위 측정시 재하점과 지지부의 국소 파괴로 인하여 변위 측정에 큰 영향을 받으므로<sup>11)</sup> Fig 1(a)와 같이 변위 측정용 프레임을 제작하여 사용하였다. 수직 변위 측정은 중앙점에서 처짐(VT2)과 중앙점에서 좌우 100 mm 떨어진 점에서의 처짐(VT1, VT3)을 감도 1.0 μm의 변위계

를 부착하여 측정하였으나 실험 결과 분석에서는 중앙점의 처짐 결과만을 사용하였다. 또한 균열 개구 변위(CMOD)는 보 스펀 중앙의 두께 방향 단부(CM1, CM2)에서 감도 5.5 μm의 클립 게이지로 측정되었다(Fig 1(b)).

## 3. 시험체의 재료 특성 평가

압축강도 시험은 KS F 2405, 인장강도 시험은 KS F 2423 그리고, 탄성계수 시험은 KS F 2438의 방법으로 측정되었으며, 결과는 Table 5와 같다.

휨강도 시험체의 재료특성(material properties)으로 유효 휨강도, 임계응력확대계수, 에너지 해방률, 파괴에너지, 그리고 J-적분값을 측정하였으며, 그 결과는 Table 6에 나타내었고 각각의 계산 방법은 다음과 같다.

Table 1 Physical properties of cement

Specific gravity	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time (min)		Compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		Ini.	Fin.	3d	7d	28d
3.15	3,140	225	440	210	280	376

Table 2 Physical properties of Aggregates

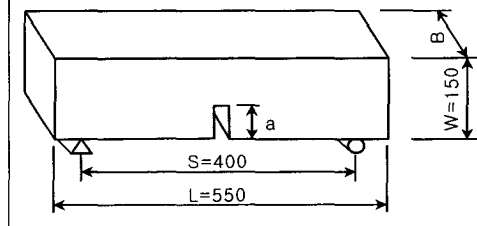
Class	Specific gravity	G <sub>max</sub> (mm)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate	2.58	5	1564	1.05	2.91
Coarse aggregate	2.66	25	1569	0.9	6.49

Table 3 Mix proportion of concrete

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				
					C	S	G	W	AD*
25	9±2	4	55	43	327	750	1025	180	1.64

\*AD : Lignosulphonate based AE water reducer, normal

Table 4 Shape, size and notation of specimens

Shape & Size	 <p>a : Notch length B : Width</p>
Notation	<p>A - ◇◇ - ○○</p> <p>↳ Specimen number (01,02,03)</p> <p>↳ Notch length (00,25,50,75)</p> <p>↳ Specimen width (A=150,B=112.5,C=75)</p>

① 유효 휨강도 : 지지점 중앙부 유효 단면적, 모멘트와 휨응력의 관계식에서 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_{net} = \frac{3L_p S}{2B(W-a)^2} \quad (3\text{점 휨시험}) \quad (1)$$

W : 높이, B : 두께, a : 노치길이, S : 지지점, Lp : Peak Load.

② 임계응력확대계수(K<sub>IC</sub>) : 선형 파괴 역학을 적용할 수 있다고 가정하면 다음 식과 같다.

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Y : 공시체 형상에 의해 구해지는 계수, σ : 노치가 없는 것으로 하여 계산한 최대내력에 대한 공칭 휨강도(σ = 1.5L<sub>p</sub>S/BW<sup>2</sup>)

실험에 사용된 시험체의 S/W≃2.7이지만 이 논문에서는 2.7에 대한 Y 값을 구하는데 어려움이 있어 일반적으로 잘 알려져 있는 S/W=2.5에 대한 아래의 식을 적용하였다.

$$Y = \frac{1.0 - 2.5\alpha + 4.49\alpha^2 - 3.98\alpha^3 + 1.33\alpha^4}{(1-\alpha)^{3/2}}, \quad \alpha = a/W$$

③ 에너지 해방율(G<sub>IC</sub>) : 균열이 단위면적 진전할 때 해방되는 포텐셜 에너지로서 K<sub>IC</sub>와 E'값에서 간접적으로 구해진다. 여기서는 평면응력 상태(E'=E)로 계산되었으며 평면 변형 상태에 대해서는 E'=E/(1-ν<sup>2</sup>)로 구해진다.

$$G_{IC} = \frac{1}{E'} K_{IC}^2 \quad (3)$$

단, E' = E (평면 응력 상태)  
 = E/(1-ν<sup>2</sup>) (평면 변형 상태)  
 여기서, E : 탄성계수 ν : 프와송 비

④ 파괴에너지(G<sub>F</sub>) : 하중-변위 곡선의 면적을 파괴된 면적(A)으로 나눈 값이며, 그래프의 하부 면적은 적분에 의해 구해질 수 있다.

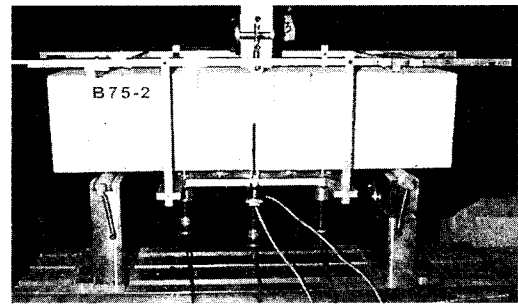
$$G_F = \frac{U}{A} \quad (4)$$

여기서, K<sub>IC</sub>와 G<sub>F</sub> 계산에서 시험체 자중의 영향은 지지점의 폭이 비교적 짧기 때문에 무시하였다.

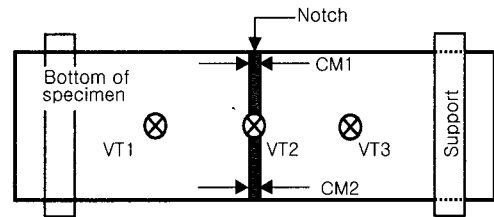
⑤ J-적분의 계산

Rice와 Paris 등<sup>12)</sup>은 균열이 비교적 깊고 하중-변위 곡선이 주가 되어 에너지가 주로 순수 단면(전체 보높이에서 리가멘트 길이)에 의존하는 경우의 시험체에 대하여

J-적분의 반해석적인 평가법을 제안했다. 즉, 휨변형이 지배적인 경우에 대해서 임계 J-적분값(J<sub>IC</sub>)은 균열의 안정 성장 개시점에서의 J-적분값이 반영되도록 초기 균열점까지의 하중-변위 곡선의 면적으로 계산되어야 한다. 岡田 등<sup>13)</sup>에 의하면 보통 콘크리트에서는 최대 하중점에서 주균열이 시작된다고 보고, 임계 J-적분값을 최대 하중점에서 정량화할 수 있다고 설명하고 있다. Rice와 Paris의 간편식의 장점은 실험에 의해 얻어진 P-δ 곡선이 그대로 사용되며, 단 한 개의 P-δ 곡선에 의해 J-적분이 평가된다는 것이다(Fig. 2).



(a) Test set-up



(b) Location of measurement

Fig 1 Test set-up

Table 5 The property value of compressive specimens

Specimen	C.S. (kgf/cm <sup>2</sup> )	T.S. (kgf/cm <sup>2</sup> )	E (kgf/cm <sup>2</sup> )
A	293	25.4	2.59 × 10 <sup>9</sup>
B	285	24.4	2.51 × 10 <sup>9</sup>
C	301	24.1	2.55 × 10 <sup>9</sup>

C.S. : Compressive strength, T.S. : Tensile strength

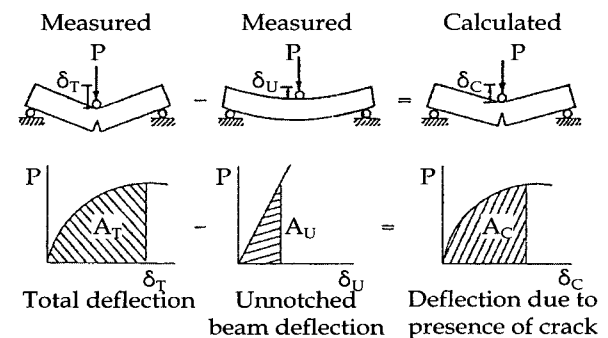


Fig 2 Experimental Decision of J<sub>IC</sub>(by Rice & Paris)

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{2}{B(W-a)} \int_0^{\delta_{max}} P \cdot d\delta_c \\
 &= \frac{2}{B(W-a)} (A_T - A_U) \quad (6) \\
 &= \frac{2}{B(W-a)} A_C
 \end{aligned}$$

여기서, B : 시험체 폭  $\delta_{max}$  : 하중점 최대변위  
W-a : 리지먼트 길이  $A_U$  : 노치와 관계없는 성분  
 $A_T$  : 전체 포텐셜에너지  $A_C$  : 노치로 인한 포텐셜에너지

#### 4. 실험 결과

하중-처짐 관계와 하중-균열개구변위 관계는 각각 Fig 3과 Fig 4와 같으며, 실험 결과에서 대표적인 양상을 나타내는 그래프를 나타내었다. Fig 5~7은 상대적 노치 깊

이에 대한 임계응력확대계수( $K_{Ic}$ ), 임계 J-적분값( $J_{Ic}$ ), 그리고 파괴에너지( $G_F$ )의 관계를 각각 나타내었다.

Fig 8~10에 모두께의 변화에 따른  $K_{Ic}$ ,  $J_{Ic}$ , 그리고  $G_F$ 의 변화를 각각 나타내었다.

#### 4.1 $G_F$ 와 $G_{Ic}$ 의 비교

Table 6에서  $G_F$ 와  $G_{Ic}$ 의 값이 큰 차이를 나타내는 이유는 각각의 값을 계산하는데 사용되는 범위가 다르기 때문이다. 즉,  $G_F$ 는 시험체가 두 부분으로 나누어지는데 필요한 전체 에너지의 범위를 고려하고,  $G_{Ic}$ 는 균열이 미소 길이만큼 진전할 때의 탄성에너지를 고려하기 때문이다. 콘크리트의 경우 균열 진전에 큰 에너지를 필요로 하고

Table 6 Fracture properties of notched beam specimens

Specimen	a(cm)	B(cm)	(a/W)	Y	E(GPa)	$L_p$ (kN)	$\delta_p$ (mm)	$\sigma_{net}$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	$K_{Ic}$ (MPam <sup>1/2</sup> )	$G_{Ic}$ (N/m)	$G_F$ (N/m)	$J_{Ic}$ (N/m)
A-00-01	0	15.00	0.00	1.00	25.4	24.40	0.026	4.34	4.34	-	-	-	-
A-00-02	0	15.00	0.00	1.00	25.4	21.29	0.050	3.79	3.79	-	-	-	-
A-00-03	0	15.00	0.00	1.00	25.4	-	-	-	-	-	-	-	-
A-25-01	2.5	15.00	0.17	0.91	25.4	12.76	0.058	3.27	2.27	0.577	13.10	182	80.5
A-25-02	2.5	15.00	0.17	0.91	25.4	11.13	0.052	2.85	1.98	0.503	9.97	178	74.0
A-25-03	2.5	15.00	0.17	0.91	25.4	11.18	0.050	2.86	1.99	0.506	10.07	175	71.8
A-50-01	5	15.00	0.33	0.98	25.4	10.33	0.044	4.13	1.84	0.714	20.09	162	67.2
A-50-02	5	15.00	0.33	0.98	25.4	9.36	0.046	3.75	1.66	0.648	16.52	157	46.9
A-50-03	5	15.00	0.33	0.98	25.4	8.88	0.042	3.55	1.58	0.614	14.87	156	44.3
A-75-01	7.5	15.00	0.50	1.30	25.4	4.94	0.046	3.51	0.88	0.552	12.00	118	30.6
A-75-02	7.5	15.00	0.50	1.30	25.4	5.71	0.058	4.06	1.01	0.638	16.03	146	57.2
A-75-03	7.5	15.00	0.50	1.30	25.4	5.36	0.068	3.81	0.95	0.599	14.11	133	55.6
B-00-01	0	11.25	0.00	1.00	24.6	20.91	0.038	4.96	4.96	-	-	-	-
B-00-02	0	11.25	0.00	1.00	24.6	19.47	0.040	4.61	4.61	-	-	-	-
B-00-03	0	11.25	0.00	1.00	24.6	19.31	0.020	4.58	4.58	-	-	-	-
B-25-01	2.5	11.25	0.17	0.91	24.6	10.39	0.027	3.55	2.46	0.626	15.95	156	58.3
B-25-02	2.5	11.25	0.17	0.91	24.6	10.39	0.022	3.55	2.46	0.627	15.96	161	56.5
B-25-03	2.5	11.25	0.17	0.91	24.6	11.48	0.048	3.92	2.72	0.692	19.48	184	73.6
B-50-01	5	11.25	0.33	0.98	24.6	7.41	0.026	3.95	1.76	0.683	18.98	135	59.7
B-50-02	5	11.25	0.33	0.98	24.6	7.44	0.046	3.97	1.76	0.686	19.14	154	50.8
B-50-03	5	11.25	0.33	0.98	24.6	8.53	0.018	4.55	2.02	0.787	25.16	151	52.2
B-75-01	7.5	11.25	0.50	1.30	24.6	5.52	0.046	5.23	1.31	0.822	27.47	139	33.0
B-75-02	7.5	11.25	0.50	1.30	24.6	5.00	0.032	4.74	1.19	0.746	22.60	120	55.1
B-75-03	7.5	11.25	0.50	1.30	24.6	5.19	0.058	4.93	1.23	0.774	24.37	136	43.0
C-00-01	0	7.50	0.00	1.00	25.0	11.16	0.032	3.97	3.97	-	-	-	-
C-00-02	0	7.50	0.00	1.00	25.0	12.44	0.036	4.42	4.42	-	-	-	-
C-00-03	0	7.50	0.00	1.00	25.0	11.22	0.032	3.99	3.99	-	-	-	-
C-25-01	2.5	7.50	0.17	0.91	25.0	7.44	0.040	3.81	2.65	0.673	18.11	145	53.3
C-25-02	2.5	7.50	0.17	0.91	25.0	9.36	0.048	4.79	3.33	0.847	28.69	163	65.5
C-25-03	2.5	7.50	0.17	0.91	25.0	7.79	0.034	3.99	2.77	0.705	19.87	149	42.8
C-50-01	5	7.50	0.33	0.98	25.0	4.81	0.034	3.85	1.71	0.666	17.72	137	53.2
C-50-02	5	7.50	0.33	0.98	25.0	4.91	0.024	3.93	1.74	0.679	18.43	130	47.8
C-50-03	5	7.50	0.33	0.98	25.0	5.19	0.024	4.16	1.85	0.719	20.66	149	65.0
C-75-01	7.5	7.50	0.50	1.30	25.0	3.55	0.046	5.05	1.26	0.795	25.25	117	35.1
C-75-02	7.5	7.50	0.50	1.30	25.0	3.62	0.040	5.15	1.29	0.810	26.25	106	27.9
C-75-03	7.5	7.50	0.50	1.30	25.0	3.59	0.060	5.11	1.28	0.803	25.79	122	27.1

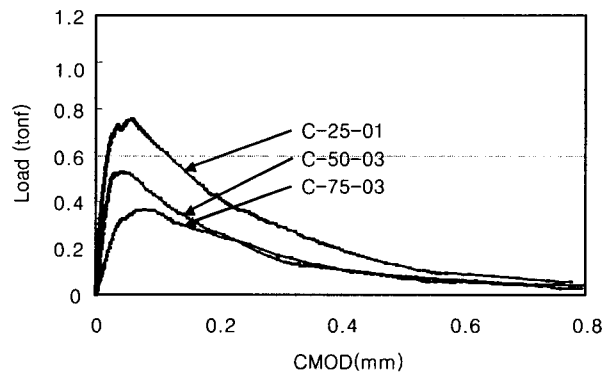
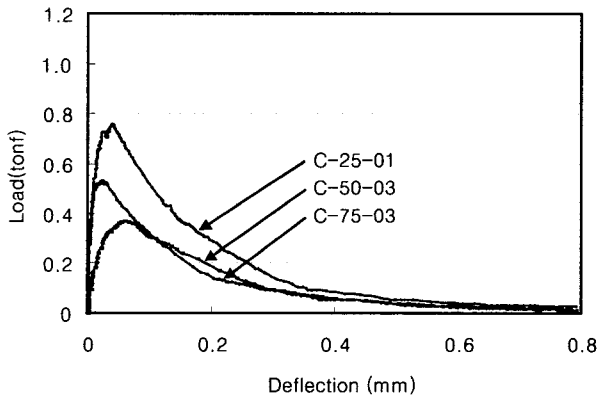
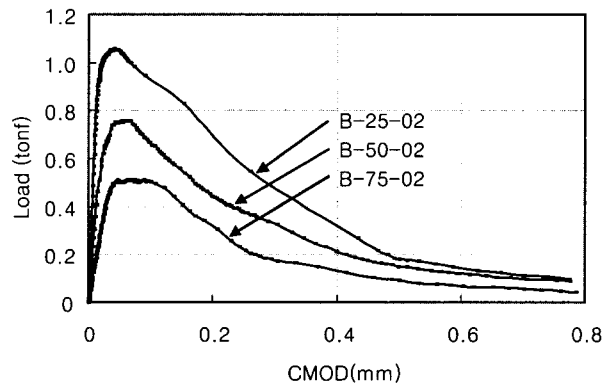
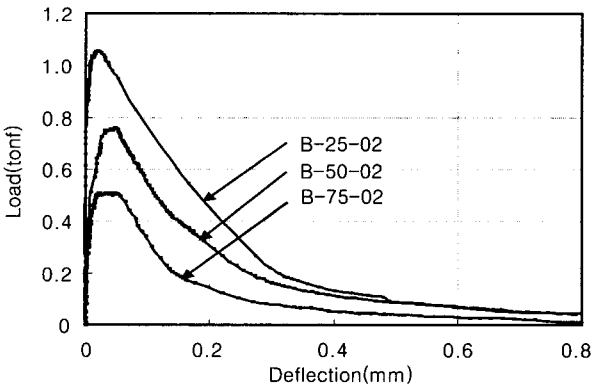
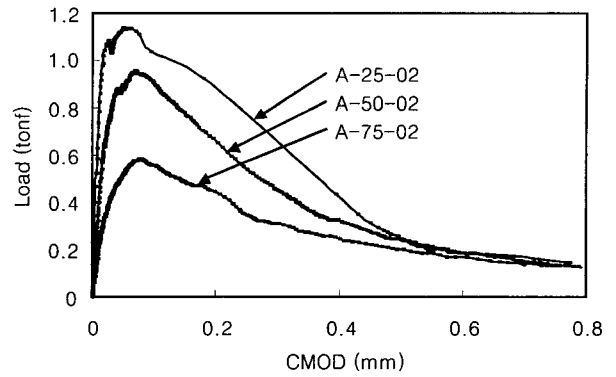
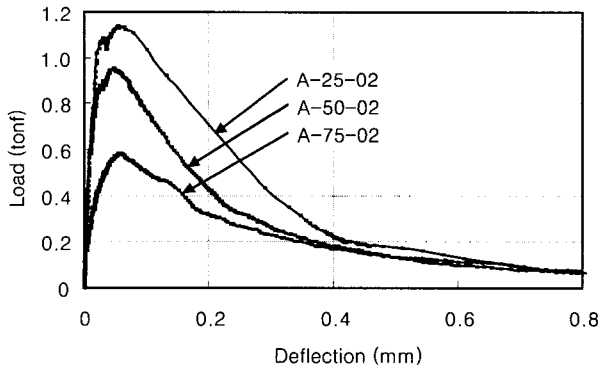


Fig. 3 Load-deflection curve at the center of beam

Fig. 4 Load-CMOD curve at the center of beam

미소한 균열 진전이 파괴에 직결되지 않기 때문에 파괴인성으로써 파괴에너지가 에너지해방률보다 더 유용한 것으로 판단된다.

할 때도 리가멘트의 길이가 긴 시험체가 보다 큰 저항을 가지는 것으로 나타났다.

#### 4.2 노치 길이와 파괴에너지

#### 4.3 시험체 두께(width)의 영향

노치 길이와 파괴에너지( $G_F$ )와의 관계는 노치 길이가 짧을수록  $G_F$ 의 값이 증가하는 경향이 있다. 이는 노치(notch)의 길이가 짧고 리가멘트(ligament) 길이가 길기 때문에 노치가 진전될 때 큰 저항을 보이는 굵은 골재를 만날 가능성이 크고 균열 경로가 복잡해지기 때문에 균열 진전 후의 굵은 골재의 맞물림 효과가 증대하는 것이 중요한 원인이다. 중앙 재하점의 수직 변위가 0.5 mm를 초과

노치가 양단에 있는 네모꼴 콘크리트 시험체에 대한 파괴인성실험을 행한 기존의 연구에서 시험체의 두께가 커지면 파괴 인성이 조금씩 감소하는 경향을 나타내는데 이는 콘크리트의 취성적인 성질에 의한다고 보고되었다.<sup>9)</sup>

이 실험에서, 임계응력확대계수  $K_{Ic}$ 는 두께가 커질수록 조금씩 감소하는 경향(Fig 8)을 보여 기존의 연구와 비슷한 경향을 나타낸 반면에, 임계 J-적분값( $J_{Ic}$ )과 파괴에너지( $G_F$ )는 두께가 커질수록 오히려 선형적으로 증가하는

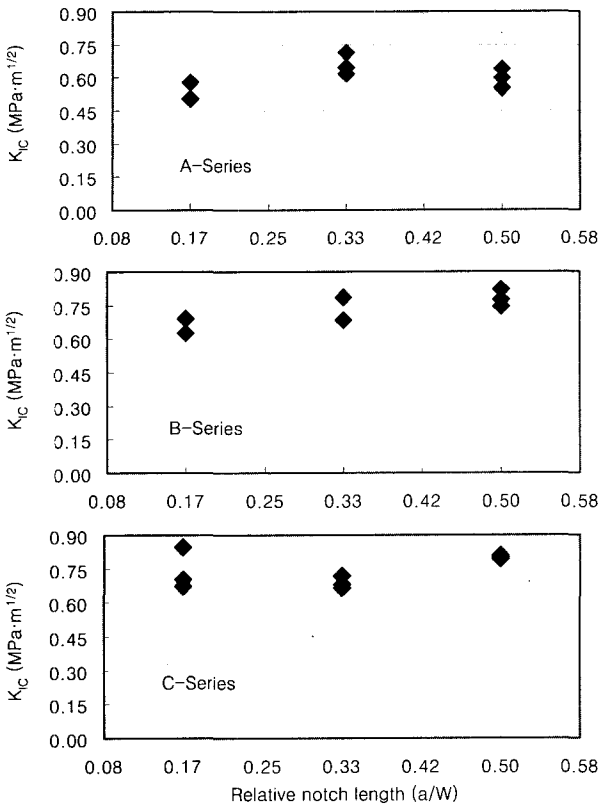


Fig.5 The relationship of  $K_{IC}$  and relative notch length

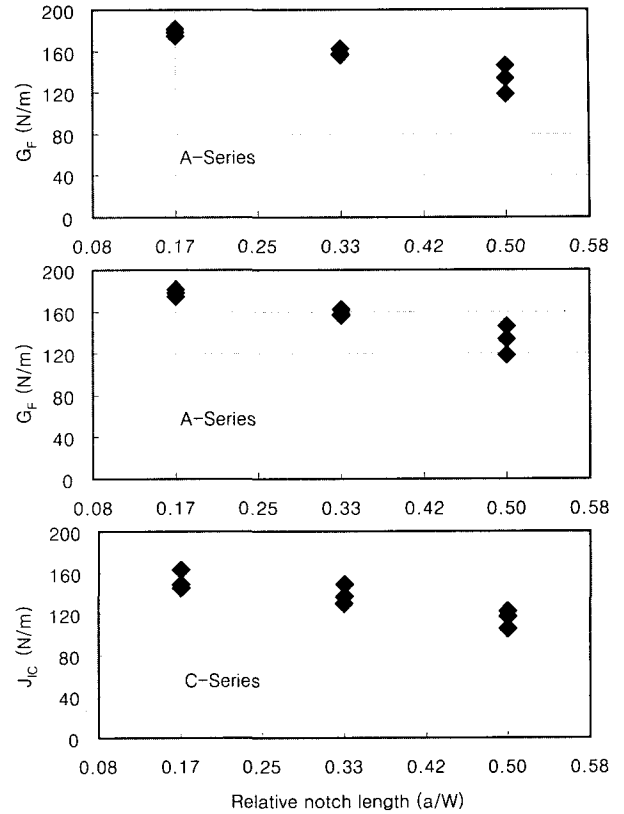


Fig. 7 The relationship of  $G_F$  and relative notch length

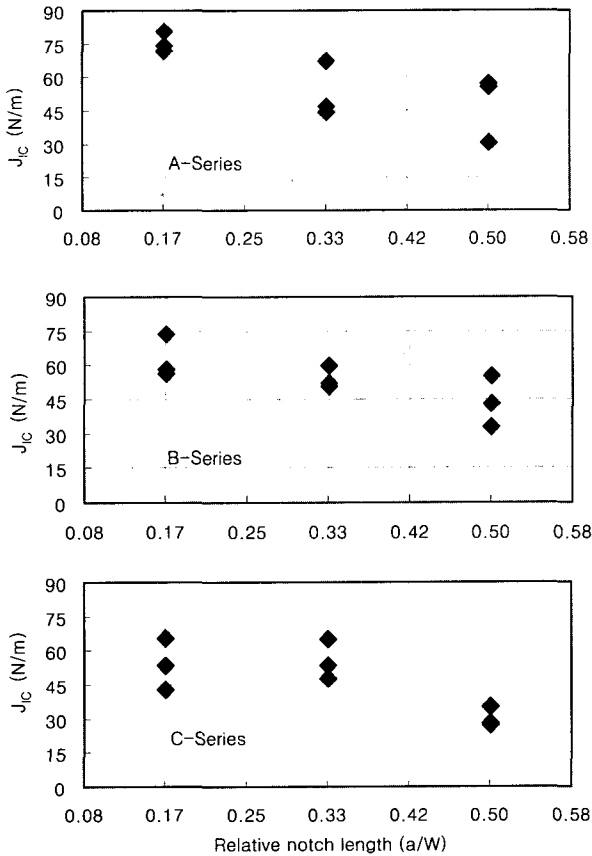


Fig. 6 The relationship of  $J_{IC}$  and relative notch length

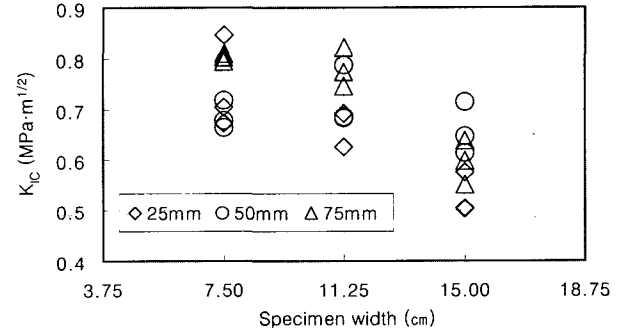


Fig. 8 The relationship of  $K_{IC}$  and beam width

경향(Fig 9, 10)을 나타내었다. 이 실험에 사용한 두께의 범위 내에서 두께가 증가할수록 골재의 맞물림 효과가 커져서 균열진전에 필요한 에너지가 증가했기 때문에 판단된다. 따라서, 노치가 있는 콘크리트 균열에 의한 파괴 인성을 평가할 때, 두께의 영향을 고려해 주어야 한다.

#### 4.4 $J_{IC}$ 와 $G_F$ 의 비교

노치 길이가 25 mm에서 50 mm, 75 mm로 길어짐에 따라  $J_{IC}$ 의 값은 약 15 %, 35 % 감소되었고, 두께가 150 mm에서 112.5 mm, 75 mm로 줄어들어 따라 각각 약 12 %, 24% 감소되었다.  $G_F$ 는 노치 길이가 25 mm에서 50 mm로 길어짐에 따라  $G_F$ 의 값이 약 10 %, 23 % 감소되었고, 두께가 150 mm

## 참고문헌

1. Griffith, A. A., "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A* 221, 1920, pp.163~198.
2. Kaplan, M. F., "Crack Propagation and Fracture of Concrete," *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 58, No. 5, 1961, pp.591~610.
3. Lott, J. L., Kesler, C. E., "Crack Propagation in Plain Concrete," *Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete*, 1966, pp.204~218.
4. Lott, J. L., Kesler, C. E. and Naus, D. J., "Fracture Mechanics Its Applicability to Concrete," *Mechanical Behavior of Materials* Vol. 4, 1972, pp.113~124.
5. Walsh, P. F., "Crack Initiation in Plain Concrete," *Magzine of Concrete Research*, Vol. 28, No. 94, 1976, pp.37~41.
6. Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P. E., "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, 1976, pp.773~782.
7. Jenq, Y. S., and Shah, S. P., "A Two parameter Fracture Model for Concrete," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 111, No. 10, 1985, pp.1227~1241.
8. Bazant, Z. P., Cedolin, L., "Blunt Crack Bond Propagation in Finite Element Analysis," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 105, No. 2, 1979, pp.297~315.
9. Shah, S. P., Hamm, J. and Ouyang, C., "The Effect of Specimen Thickness on Fracture Behaviour of Concrete," *Mag. of Concrete Research*, No. 175, 1996, pp.117~129.
10. RILEM Committee on Fracture Mechanics of Concrete-Test Methods, "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams," *Materials and Structures*, Vol. 18, No. 106, 1985, pp.285~290.
11. 김석기, "콘크리트의 균열개구 변위와 하중방향 변위 관계," 한국콘크리트학회 논문집, 제9권 1호, 1997. 2, pp.183~194.
12. Rice, J. R., Paris, P. C., and Merkle, J. G., "Some Further Result of J-integral Analysis and Estimate in Process in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing," *ASTM STP*, 536, 1973, pp.

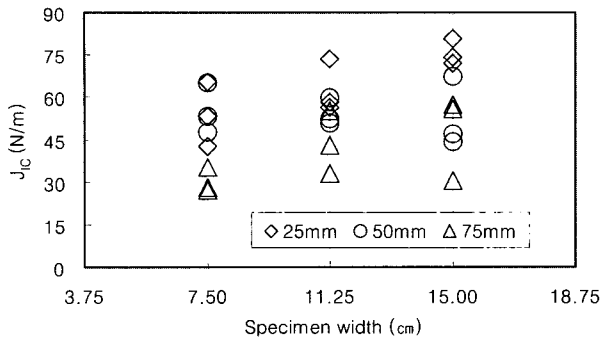


Fig 9 The relationship of  $J_{Ic}$  and beam width

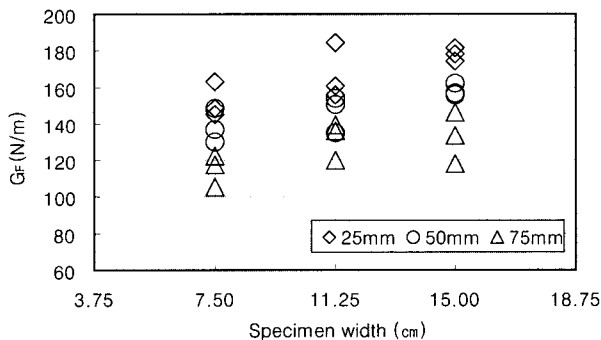


Fig 10 The relationship of  $G_f$  and beam width

에서 1125 mm, 75 mm로 감소됨에 따라 약 6%, 12% 감소되었다. 특히,  $G_f$ 가  $J_{Ic}$ 보다 노치 길이에 덜 민감하게 반응하는 것으로 나타나서 콘크리트 파괴인성으로써  $G_f$ 가 이 실험에서 더 유용한 인자로 나타났다. 실험에 의한  $J_{Ic}$ 의 값은 최대 하중점에서 민감하게 반응하므로, 실험에 의한 최대하중 선정이  $J_{Ic}$ 의 계산에 큰 영향을 미친다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 노치 길이와 시험체 두께가 콘크리트 파괴 인성에 미치는 영향을 파악하기 위해 3점 휨파괴 실험을 행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트의 비선형 파괴 인성( $J_{Ic}$ ,  $G_f$ )은 노치 길이가 증가할수록 크게 감소하였고, 특히 파괴에너지( $G_f$ )가 임계 J-적분값( $J_{Ic}$ )보다 노치 길이에 대하여 덜 민감하게 반응하는 결과를 보이므로 노치 길이에 따른 파괴 인성 평가에서 파괴에너지가 J-적분값보다 유용한 인자이다.
- 2) 콘크리트 시험체의 두께가 75 mm에서 150 mm로 커질수록 임계 J-적분값( $J_{Ic}$ )과 파괴에너지( $G_f$ )가 증가하는 경향을 보이므로 콘크리트의 파괴인성 결정에는 두께의 영향을 고려하여야 한다.
- 3) 이 연구에 이어 J-적분의 수치적 해석 방법에 대한 연구와 J-적분이 적용될 수 범위에 대한 연구가 계속 이루어져야 할 것이다.

---

 요약
 

---

콘크리트의 파괴 특성을 평가하기 위한 매개변수, 모델, 그리고 시험방법 등이 현재 많이 제안되고 있으며, 이러한 발전으로 최근에는 콘크리트의 비선형 파괴와 준취성 파괴를 해석 가능하게 하고 있다.

이 논문에서는 파괴 매개변수에 대하여 간략히 소개하고 3점 휨시험을 시행하여 콘크리트의 파괴인성을 나타내는 J-적분값 ( $J_{Ic}$ )과 다른 매개변수( $K_{Ic}$ ,  $G_F$ )를 비교하였다. 콘크리트 보 시험체의 두께(width)와 노치 길이에 따라 파괴인성값이 어떻게 변화하는지를 실험적으로 고찰하였고 콘크리트 파괴 인성을 측정하기 위해서 응력-변위 곡선을 사용하였다.

$G_F$ 와  $J_{Ic}$ 의 값은 노치 길이가 클수록 감소하는 경향을 보이며  $G_F$ 가  $J_{Ic}$ 보다 덜 민감한 반응을 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 콘크리트 파괴 인성 매개변수로써 전자가 후자보다 더 유용한 것으로 나타났다.  $G_F$ 와  $J_{Ic}$ 의 값은 콘크리트 시험체 두께가 75 mm에서 150 mm로 커질 때 증가한다. 따라서, 시험체 두께의 영향이 콘크리트 파괴 인성을 결정할 때 고려되어야 한다.

**핵심용어 :** 3점 휨시험, 파괴 매개변수, 노치 길이, J-적분, 콘크리트 파괴 인성

---