

# 콘크리트의 압축강도에 따른 파괴특성값 연구

## A Study on fracture parameters with compressive strength of concrete

윤요현\*    전철송\*\*    최신호\*\*    김화중\*\*\*  
Yoon, Yo Hyun   Tian, Zhe Song   Choi, Sin Ho   Kim, Wha Jung

---

### Abstract

Concrete has a different fracture mechanism from the other materials, with the existing of FPZ at the ahead of its cracks, and represents the softening curves at the post-peak load in the load-displacement diagrams. So, it can transmit the stress at the post-peak load. This can not be understood with the traditional concept of strength, but with the theory based energy approach.

For the purpose of this study is mainly used RILEM(1990 TC89-FMT) and TPM, and the concrete fracture properties have been evaluated according to the its compressive strength. The evaluated fracture properties is  $G_F$ ,  $a_c$ ,  $K_{IC}$ ,  $CTOD_c$ ,  $Q$  etc.

---

### 1. 서론

콘크리트는 초기부터 내부에 많은 미세균열이 포함되어 있으며 사용 중에 발생하는 균열과 함께 콘크리트 구조물의 열화·손상을 일으키게 되어 결국에는 구조물 전체에 많은 문제를 일으키게 된다. 특히, 응력집중에 의한 콘크리트 파괴와 같은 현상은 구조물의 붕괴와 직접적인 관련이 있으므로 이에 대한 관심과 대책을 위한 많은 연구가 필요하다.

콘크리트 부재나 구조물은 하중이 가해지면 최대하중이 되기 전에 완만하고 안정적인 균열성장영역을 형성하므로, 비선형 거동을 하고 균열길이에 비해 비교적 큰 파괴진행대(Fracture Process Zone : FPZ)가 존재하는 파괴특성을 갖는다. 초기에는 불규칙하게 분산된 미세균열이 형성되며 최대하중 이후의 파괴거동은 충분한 하중전달능력을 보이는 연화거동을 하며, 이는 기존의 강도이론이 아닌 에너지이론에 기초한 파괴역학개념에 의해 설명될 수 있다.

콘크리트 파괴인성 평가 시험방법으로는 노치보에 의한 3점휨 시험이 RILEM 표준시험방법으로서 제시되어 있고, 최근 일본에서도 파괴시험방법의 표준화를 위한 많은 연구를 수행하고 있다.

하지만, 국내에서는 외국에서 제안되고 있는 실험에 대한 고찰이 부족하고 파괴실험의 표준화가 이루어지지 않아 연구자들은 거의 외국의 실험방법에 의존하고 있을 뿐만 아니라, 실험 결과에 대한 국내의 다른 연구결과와 비교 검증이 이루어질 수 없는 실정이라 할 수 있다.

---

\* 정회원, 경북대학교 건축공학과 석사과정  
\*\* 정회원, 경북대학교 건축공학과 박사과정  
\*\*\* 정회원, 경북대학교 건축공학과 교수

본 연구에서는 국내의 실험방법의 표준화를 위한 일환으로서 기존의 콘크리트 압축강도를 실험 인자로 하여 콘크리트 파괴특성과의 관계를 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 개요

압축강도가 210~500(kgf/cm<sup>2</sup>)인 콘크리트를 대상으로 노치가 있는 보의 3점휨시험을 행하여 콘크리트 파괴특성을 고찰하였다.

### 2.2 사용 재료 및 시험체

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

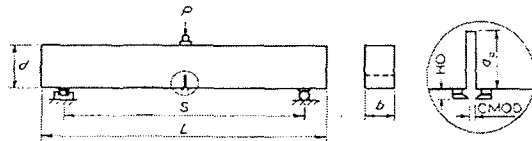
Table 2 Physical properties of Aggregates

Class	Specific gravity	G <sub>max</sub> (mm)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Absorption (%)	F.M
F·A	2.58	5	1564	1.05	2.91
C·A	2.66	15	1569	0.9	6.49

Table 3 Mix proportion of concrete

F (kgf/cm <sup>2</sup> )	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				
	C	S	G	W	AD*
210	345	781	1004	178	1.03
270	378	754	1008	176	2.27
330	427	718	1008	175	2.99
400	484	683	1001	173	3.87
500	566	639	981	171	5.66

\*AD: Lignosulphonate based AE water reducer  
G<sub>max</sub> 15mm, Slump 15cm±2



Depth(d) 150 Width(b) 80 Length(L) 700 Span(S) 600  
Notch(a<sub>0</sub>) to depth ratio 1/2

Fig 1 Size of specimen

실험을 위한 시험체의 크기는 RILEM 표준(1990 TC89-FMT)을 준용하여 제작되었다.(Fig 1)

### 2.3 실험 방법

노치가 있는 콘크리트의 휨실험은 본 연구실에서 제작한 시험기구를 사용하였고, 0.25 mm/min의 속도로 중앙점 재하(載荷)방법으로 실험을 행하였다. 재하(除荷)시에는 1 mm/min의 속도를 유지하도록 하였고 허용용량 20tonf 의 하중계가 사용되었다.

재하(除荷)컴플라이언스(unloading compliance)를 측정하기 위하여 최대하중 이후 최대하중의 95%에 도달되는 점에서 재하(除荷)하였고, 휨하중이 영(zero)이 될 때까지 연속적으로 수행하였다.(RILEM TC 89-FMT(1990))

수직 변위 측정시 재하점과 지지부의 국소 파괴로 인하여 변위 측정에 큰 영향을 받으므로 Fig 2와 같이 변위 측정용 프레임을 제작하여 사용하였다. 수직 변위(VT)는 중앙점에서 감도 1.0μm의 변위계로 측정되었고 균열개구변위(CMOD)는 보 스패 중앙의 두께 방향 단부(CM1, CM2)에서 감도 5.5μm의 클립 게이지로 측정되었다.

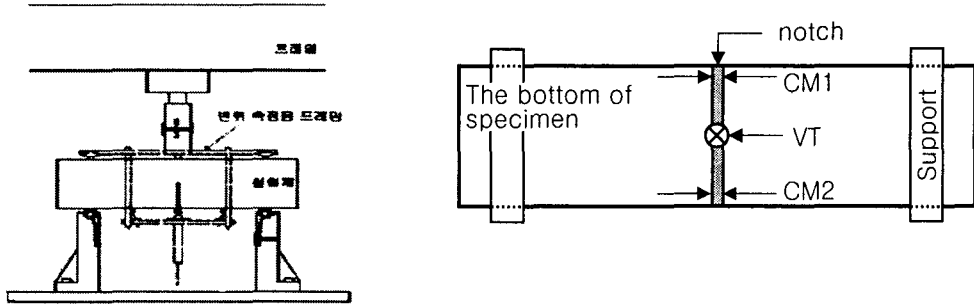


Fig 2 Test set-up

### 3. 실험체의 재료 특성 평가

압축강도 시험은 KS F 2405, 인장강도 시험은 KS F 2423 그리고, 탄성계수 시험은 KS F 2438의 방법으로 측정되었으며, 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 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> )
210	237	25.43	$2.55 \times 10^9$
270	344	36.52	$2.96 \times 10^9$
330	380	37.17	$2.99 \times 10^9$
400	420	44.40	$3.03 \times 10^9$
500	521	50.12	$3.15 \times 10^9$

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

3점 휨시험에 의해 얻어지는 하중-CMOD 곡선의 관계에서 휨강도 시험체의 재료특성(material properties)으로 영계수 (Young's modulus, E), 임계유효균열길이(Critical effective crack length,  $a_c$ ), 임계응력확대계수 (Critical stress intensity factor,  $K_{Ic}^*$ ), 임계균열선단개구변위 (Critical crack Tip Opening Displacement, CTODc), 파괴에너지 ( $G_F$ ), 그리고 특성길이 (Q)를 구하였으며, 그 결과는 Table 5에 나타내었다. 각각에 대한 계산 방법은 다음과 같다.

#### 3.1 영계수 (Young's modulus, E)

하중-CMOD 선도에 기초하여, 영계수 E, 임계응력확대계수  $K_{Ic}^*$ , 그리고 임계균열선단개구변위 CTODc가 결정될 수 있다. 영계수 E는 다음 식으로부터 계산된다.

$$E = 6Sa_0 V_1(a) / [C_i d^2 b] [Nm^{-2}] \quad (1)$$

여기서,  $C_i$  는 하중-CMOD 곡선으로부터 계산된 초기 컴플라이언스(compliance)이다.  $[m^{-1}]$ ;

$$\text{또한 } V_1(a) = 0.76 - 2.28a + 3.87a^2 - 2.04a^3 + \frac{0.66}{(1-a)^2} \quad (2)$$

여기서,  $a = (a_0 + HO) / (d + HO)$  이고 S,  $a_0$ , HO, d 그리고 b는 Fig 1에서 정의된다.

#### 3.2 임계유효균열길이(Critical effective crack length, $a_c$ )

임계유효균열길이  $a_c$  [mm] ( $a_c = a_0 +$  정점 하중에서 안정 균열 성장)는 식 1에서 계산된 영계수 E 와 최대 하중에서 특정된 제하(除荷) 컴플라이언스  $C_u$ 로부터 결정된다.

$$E = \frac{6S a_c V_1(a)}{C_u d^2 b} \quad (3)$$

여기서,  $a_c$  = 임계유효균열길이[mm],  $\alpha = (a+HO)/(d+HO)$ ,  $C_u$  = 제하컴플라이언스 [ $\text{mN}^{-1}$ ].

### 3.3 임계응력확대계수 (Critical stress intensity factor, $K_{Ic}^s$ )

임계응력확대계수는 다음식으로 계산된다.

$$K_{Ic}^s = 3(P_{\max} + 0.5W) \frac{S(\pi a_c)^{1/2} F(\alpha)}{2d^2 b} [\text{Nm}^{-3/2}] \quad (4)$$

$$F(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{\sqrt{\pi^{1/2}(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}}}$$

$\alpha = a_c/d$ ,  $P_{\max}$  = 측정된 최대 하중[N],  $W = W_0 S/L$ [N],  $W_0$  = 보 자중[N].

### 3.4 임계균열선단개구변위 (Critical crack Tip Opening Displacement, CTOD<sub>c</sub>)

$$CTOD_c = \frac{6P_{\max} S a_c V_1(a)}{E d^2 b} * [(1-\beta)^2 + (1.081 - 1.149\alpha)(\beta - \beta^2)]^{1/2} \quad (5)$$

여기서,  $\alpha = a_c/d$  이고  $\beta = a_0/a$ .

### 3.5 파괴에너지 ( $G_F$ )

하중-변위 곡선의 하부면적(U)을 리가멘트면적(A)으로 나눈 값이며, 적분에 의해 구해질 수 있다.

$$G_F = \frac{U}{A} \quad [\text{N/m}] \quad (7)$$

### 3.6 특성길이 (Q)

특성길이(Q)의 값은 콘크리트에 대해서 150-350mm의 범위에 있는 것으로 재료의 취성지수로 사용 가능하며 Q의 값이 크면 클수록 재료의 연성은 증가하는 것으로 보고되고 있다.

$$Q = \left( \frac{E \cdot CTOD_c}{K_{Ic}^s} \right)^2 [\text{mm}] \quad (6)$$

## 4. 실험결과

시험체 각각에 대한 실험 및 계산결과는 Table 5 와 같고 하중-균열개구변위 관계는 Fig 3 과 같다.

Table 5 The fracture properties of notched beam specimens

Specimen	$a_0$ (mm)	Ligament (mm)	$P_{\max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	E (GPa)	$G_F$ (N/m)	$a_c$ (mm)	$a_c/b$	$K_{Ic}^s$	CTOD <sub>c</sub>	Q
210_01	54	100	278	136	21.76	94	98	0.643	1.423	0.0648	980
210_02	49	103	275	139	19.85	84	80	0.538	1.093	0.0495	807
210_03	49	106	262	125	21.92	88	84	0.549	1.391	0.0526	686
270_01	55	95	268	125	24.76	86	79	0.509	1.106	0.0328	538
270_02	52	105	353	169	28.20	105	76	0.496	1.019	0.0338	876
270_03	53	100	330	152	25.32	83	81	0.519	1.201	0.0407	735
330_01	48	100	389	199	31.79	113	78	0.509	1.406	0.0289	427
330_02	48	105	376	1807	28.11	101	75	0.499	1.255	0.0296	439
330_03	48	107	386	1807	21.26	95	76	0.516	1.022	0.0347	520
400_01	51	103	409	1939	33.39	118	73	0.474	1.065	0.0201	396
400_02	55	102	347	1623	28.69	117	75	0.483	1.005	0.0197	317
400_03	53	103	445	2056	29.16	126	70	0.447	1.227	0.0203	232
500_01	48	105	445	2137	33.25	123	63	0.412	1.261	0.0205	290
500_02	54	96	409	2044	30.97	120	71	0.475	1.303	0.0205	236
500_03	46	106	520	2532	36.91	141	65	0.429	1.410	0.0192	253

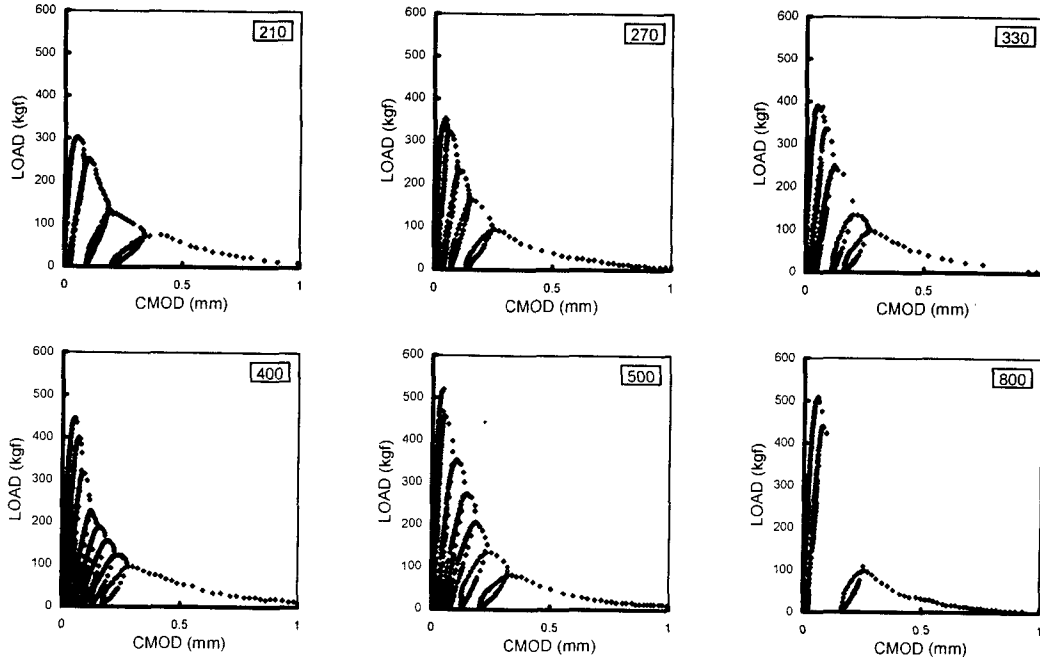


Fig 3 Load-CMOD curve at the center of beam

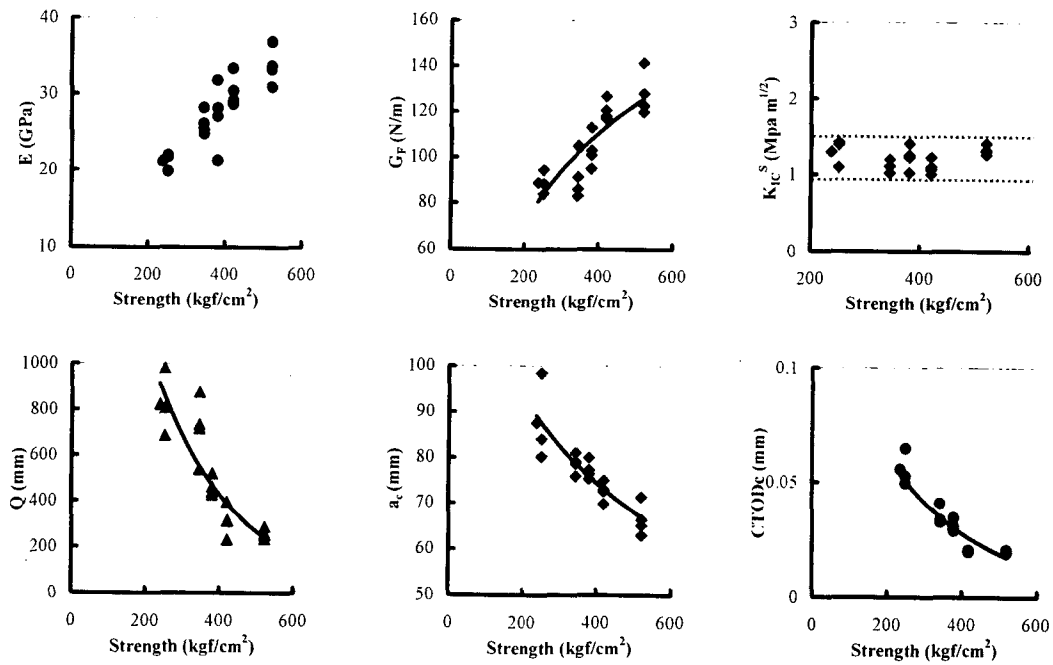


Fig 4 Fracture parameters - Compressive strength relation

## 5. 결론

본 연구에서는 압축강도와 콘크리트의 파괴변수값들과의 관계를 평가하기 위해 RILEM (1990 TC89-FMT) 규준에 따라 210~500(kgf/cm<sup>2</sup>) 압축강도를 가진 콘크리트 노치빔에 대한 3점휨 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 임계유효균열길이  $a_c$  는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여주었으며 이는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 콘크리트의 취성 경향이 커지고 FPZ가 작아짐을 의미한다. 실험의 결과로부터 얻은  $a_c$  와  $f_c$  의 관계는 다음의 로그방정식으로 표현할 수 있었다.

$$a_c = -28.1 \ln(f_c) + 234.1 \quad (f_c: \text{kgf/cm}^2 \quad a_c: \text{mm})$$

2) 파괴인성치  $K_{Ic}$  는 파괴응력  $\sigma_c$ 와 임계유효균열길이  $a_c$ 의 함수로서 콘크리트의 압축강도와는 무관하게 1.0~1.5MPa · m<sup>1/2</sup> 사이의 값을 나타내었다.

3) 파괴에너지  $G_F$  는 콘크리트의 압축강도에 증가함에 따라 커지는 경향을 나타내었으며 그 관계는 다음의 로그방정식으로 표현할 수 있었다.

$$G_F = 57.145 \ln(f_c) - 231.77 \quad (f_c: \text{kgf/cm}^2 \quad G_F: \text{N/m})$$

4) CTOD<sub>c</sub> 값은 압축강도의 증가에 따라서 감소하는 경향을 나타내었으며, 그 관계를 다음과 같은 로그 방정식으로 표현하였다.

$$CTOD_c = -0.0511 \ln(f_c) + 0.3345 \quad (f_c: \text{kgf/cm}^2 \quad CTOD_c: \text{mm})$$

5) 파괴특성길이  $Q$ 는 콘크리트의 압축강도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 본 실험에서는 그 관계를 다음의 로그방정식으로 표현할 수 있다.

$$Q = -840.58 \ln(f_c) + 5490.2 \quad (f_c: \text{kgf/cm}^2 \quad Q: \text{mm})$$

본 연구에서 유도한 실험식은 한정된 조건 하에서 진행된 실험에서 얻은 것임으로 일반적인 적용을 위해서는 기타 변수에 대한 폭 넓은 실험적 연구가 필요하며, 또한 이런 파괴 변수들과 압축강도사이의 관계에 대한 이론적, 해석적 연구도 병행되어야 한다고 사료된다.

## 참고문헌

1. Shah, S.P., Stuart E.S. & Ouyang, C, "Fracture Mechanics Of Concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials", 1995 pp171-182
2. RILEM Committee on fracture mechanics of concrete-Test Methods, "Determination of the Fracture Mechanics Energy of mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams," Materials and Structure, Vol 10 No.106, 1985 pp285-290
3. T.L. Anderson, FRACTURE MECHANICS, CRC Press, 1994
4. 콘크리트 공학연구논문집 2001-23제1호 "破壊靱性の侍険方法に關する調査研究委員會報告" pp19-28
5. "플레인 콘크리트의 파괴에너지 시험법(안)" 일본콘크리트 학회지 2001 Vol39 NO.8 p66-67  
제4회 콘크리트구조의 파괴의 역학에 관한 국제회의 (FRAMCOS-4) 의 보고  
<http://c-pc8.civil.musashi-tech.ac.jp/teacher/jci-fm/index.html>
6. 한국 콘크리트 학회, "최신 콘크리트공학", 1992