

J-적분과 콘크리트 파괴거동에 관한 연구

A study on the J-integral and the fracture behavior of concrete

최 신 호^{***} 윤 요 현^{*} 계 해 주^{**} 전 철 송^{***} 김 화 중^{****}
Choi, Sin Ho Yoon, Yo Hyun Kye, Hae Ju Jeon, Chel Song Kim, Wha Jung

ABSTRACT

The effect of specimen thickness and notch's depth and the validity of J-integral analysis were studied on the fracture behavior of concrete. Through the 3-point bending test, the stress-deformation curves were experimentally measured. Concrete fracture toughness is calculated from stress-displacement curves.

• Concrete fracture toughness decreases when notch's depth is longer. So, G_f is less sensitive than J_{Ic} and G_f is more useful factor as concrete fracture toughness parameter.

• The values of J-integral and fracture energy increase when the breadth of concrete specimen get longer from 75mm to 150mm. Therefore, the breadth effect of specimen has to be considered in determining the concrete fracture toughness.

1. 서 론

1.1 연구의 배경

콘크리트가 언제, 어떻게 파괴되는지 이해하고 모델링하는 것은 콘크리트 구조물을 계획하고 사용하는 데 절대적이며 시멘트를 사용한 재료의 성질 개선에도 중요하다. 파괴역학의 최근 발전으로 콘크리트 거동의 비선형성과 구조물의 취성파괴를 해석하는 것이 가능하게 되었다. 그 중에서도 널리 사용되고 있는 모델로는 가상균열모델, 2-매개변수모델, 크기효과모델 등이 있다. 이 모델들은 균열선단이 직선이라고 가정을 하고 균열을 다루고 있지만, 실질적인 콘크리트 구조는 3차원적인 접근으로 다루어져야 한다. 균열의 진전은 보 내부에서보다 양측의 표면에서 더 크다. 지금까지의 파괴역학 모델들이 많은 콘크리트 구조물의 파괴거동을 묘사하는데 성공적이지만 한계가 존재하며 이는 두께 방향에 대한 파괴 진행의 변수를 무시함으로 기인하는 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 노치가 있는 콘크리트보 시험체를 두께별로 3점 휨실험하여 콘크리트 부재의 두께방향 영향이 콘크리트 파괴인성에 미치는 영향을 고찰하고 파괴인성을 나타내는 특성값으로써 한계 J-적분값(J_{Ic})의 타당성을 검증한다.

* 정회원, 경북대 건축공학과, 석사과정

** 정회원, 경북대 건축공학과, 석사

*** 정회원, 경북대 건축공학과, 박사과정

**** 정회원, 경북대 건축공학과, 교수

1.2 연구의 동향

균열 발생·성장에 기인한 파괴현상에 대한 최초의 연구자는 1920년에 에너지 해방률을 사용하여 완전 취성 재료에서 균열 불안정 전파의 발생을 설명한 Griffith였다. 그 후, 주로 금속재료에 대해 파괴역학이 적용·발전되었다. 시멘트계 복합재료에 대해서는 1961년 Kaplan에 의해 최초로 파괴역학이 적용되었지만, 콘크리트 파괴역학에 관한 초기의 연구는 금속재료에서 확립된 파괴역학 매개변수를 기본으로 하는 것이 많았다. Naus 등은 노치가 있는 보의 실험에서 K_{Ic} 와 G_{Ic} 를 측정하였고, 균열의 끝에 미세 균열 영역이 있음을 밝혔다. 또한, Walsh는 균열 끝에 미세균열 영역이 시험체의 크기와 리가멘트 길이에 비하여 작도록 하고, 콘크리트 파괴 실험시 보의 높이가 최소한 6인치는 되어야 한다고 제안했다. 1970년대 후반, 콘크리트 균열 선단 전방에는 손상을 받고 있지만, 응력 전달이 가능한 연화 영역이 존재함을 발견함으로써, 금속재료에 대한 파괴역학을 콘크리트에 직접 적용하는 것이 불가능하다고 인식되었다. Hillerborg는 가상 균열 모델(FCM)을 제안하였는데, 이 모델은 보의 3점 휨실험에서 하중-변위 곡선에서 얻어지는 파괴에너지 G_f 와 일축인장실험에서 구한 응력-개구변위(f_t -COD)의 인자가 필요하다. Jeng & Shah는 Griffith의 유효균열 개념을 일반화한 2-매개변수 모델을 제안하였는데 이 모델은 노치가 있는 3점 휨실험에서 최대하중과 초기 컴플라이언스(compliance)와 제하(unloading) 컴플라이언스 비로 구한 유효균열길이 a_e 를 선형파괴역학의 방법으로 임계응력확대계수 K_{Ic} 와 임계균열선단개구변위 $CTOD_c$ 를 구할 수 있다. Bazant와 Cedolin 등은 콘크리트의 파괴 과정을 설명하기 위해 변형연화에 근거한 균열대 모델을 제안하여 이 모델의 파괴에너지를 균열저항곡선(R-curve)에서 구하였다. Shah & Hamm 등은 노치가 양단에 있는 네모꼴 공시체의 인장실험에서 콘크리트 파괴거동에 미치는 두께의 영향이 있음을 제안했다. 이러한 콘크리트의 균열현상은 콘크리트의 균열선단에서 파괴진행영역(FPZ)이라는 비선형영역이 존재하고, 이 비선형영역은 주로 균열선단의 미세 균열에 의해서 발생한다. 이러한 미세 균열은 균열선단에서의 응력 분포에 아주 큰 영향을 미치므로 고전적인 선형탄성파괴역학의 적용이 어렵다는 것을 인식하고 비선형파괴역학의 적용이 시도·연구되고 있다.

2. 시험체 제작 및 실험 방법

2.1 사용 재료 및 시험체

2.1.1 사용 재료

본 실험에서는 국내산 1종 보통포틀랜드 시멘트, 경북 예천산 강모래 및 평은산 쇄석 골재, 그리고 혼화제는 국내 E사의 제품을 사용하였다. 사용 재료의 물리적 성질은 표 1, 2와 같다.

표 1. 시멘트의 물리적 성질

비중	안정성	분말도 (cm^2/g)	용결시간(h-m)		압축강도(kgf/cm^2)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	양호	3140	3-45	7-20	210	280	376

표 2. 골재의 물리적 성질

종 류	표준 비중	최대크기 (mm)	단위용적중량 (kg/m^3)	흡수율 (%)	공극율 (%)	조립율
잔 골 재	2.58	5	1564	1.05	47	2.91
굵은골재	2.66	25	1569	0.9	41	6.49

2.1.2 콘크리트 배합

실험에 사용한 배합기준은 일정한 반죽 질기를 유지하면서, 단위수량 180 kg/m^3 , 슬럼프 9 $cm \pm 2$ 를 기준으로 결정하였고 배합표는 표 3과 같으며 혼합은 60 l 강제식 믹서기를 사용하였다.

표 3. 실험 배합표

Gmax (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m^3)				
					시멘트	모래	자갈	물	혼화제
25	9 ± 2	4	55	43	327	750	1025	180	1.64

2.1.3 시험체 형상 및 종류

콘크리트 파괴실험을 위한 시험체의 크기는 기존의 콘크리트 휨실험용 시험체와 동일한 직사각형으로 하였으며 노치 깊이와 시험체의 두께를 실험 변수로 하여 제작하였다. 노치의 깊이는 시험체에 대해 0, 25, 50, 75mm로 하였고 시험체 두께는 150, 112.5, 75mm로 하였다. 또한 노치폭은 5mm로 하였는데 이는 RILEM FMC1에서 파괴에너지의 측정을 위한 노치폭은 10mm 이하로 제안한 것을 따랐다.

2.2 실험 방법

재하 방법은 스크류 잭을 이용하여 1mm/min의 속도로 중앙점 재하 방식으로 하였고 허용용량 20톤 로드셀을 사용하였다.

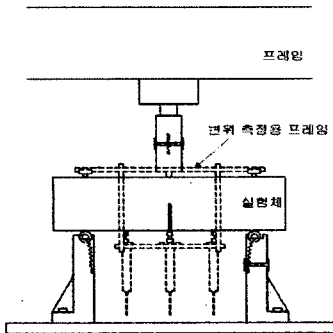


그림 1. 시험체와 재하 장치

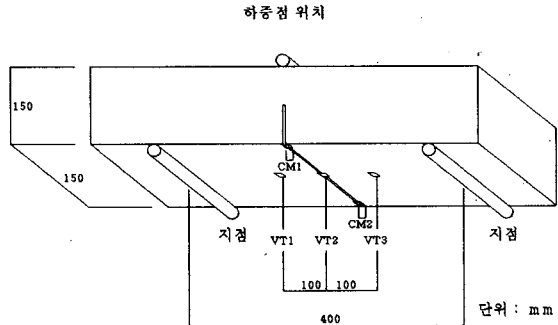


그림 2. 수직변위와 균열개구변위 측정 위치

수직 변위 측정시 재하점과 지지부의 국소적인 파괴로 인하여 파괴에너지 측정에 큰 영향을 미치므로, 변위 측정용 프레임을 제작하여 사용하였다(그림 1). 변위 측정 위치와 재하점의 위치는 그림 2에 나타내었다. 3개소의 수직변위(VT1, VT2, VT3) 측정은 감도 1×10^{-3} mm의 변위계를 부착하고, 2개소의 크랙 개구 변위(CM1, CM2)는 감도 547×10^{-5} mm의 클립 게이지를 사용하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 압축강도 시험체의 특성값

압축강도시험은 KS F 2405, 인장강도 시험은 KS F2423에 따라 시험하였고 탄성계수는 ASTM C 496-65에 의거하여 측정하였으며 그 결과는 표 4에 나타내었다.

표 4. 압축 시험체 특성값

시험체	압축강도(kgf/cm ²)	인장강도(kgf/cm ²)	탄성계수(kgf/cm ²)
A	293	25.4	2.59×10^5
B	285	24.4	2.51×10^5
C	301	24.1	2.55×10^5

3.2 휨 시험체의 특성값

① 유효 휨강도 : 지점 중앙부 유효단면적, 모멘트와 휨응력의 관계식에서 다음과 같이 계산하였다.

$$\sigma_{net} = \frac{3L_p S}{2B(W-a)^2} \quad (3\text{점 휨실험}) \quad W: \text{공시체 높이} \quad B: \text{단면폭} \quad a: \text{노치깊이} \quad S: \text{지점폭} \quad (1)$$

② 한계응력확대계수(K_{lc}) : 선형파괴역학이 적용 가능하다는 가정 하에서 다음 식과 같다.

$$K_{lc} = Y\sigma a^{1/2} \quad \text{여기서, } Y: \text{시험체의 형상에 의해 구해지는 계수} \quad (2)$$

σ : 노치가 없는 것으로 하여 계산한 최대내력시의 공칭 휨응력 ($\sigma = 1.5L_p S / BW$)

③ 에너지 해방율(G_{Ic}) : 균열이 단위면적당 진전하는데 해방되는 포텐셜 에너지.

$$G_{IC} = \frac{1}{E} K_1^2 \quad \text{단, } E = E \quad (\text{평면응력}) \quad (3)$$

$$= E/(1-\nu^2) \quad (\text{평면변형})$$

여기서, E : 탄성계수 ν : 프와송 비

④ 파괴에너지(G_f) : 하중-변위 곡선에서 곡선의 면적을 파괴된 면적(A)으로 나눈 값이다.

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

여기서 K_{Ic} , G_f 의 평가에서 시험체 자중의 영향은 고려하지 않았다. 지지점의 폭(span) 길이가 비교적 짧기 때문에, 자중의 영향은 무시하였다.

표 5. 노치가 있는 휨 시험체의 특성 값

시험체	L_p (kg)	L_p 시 VT-2(mm)	σ_{net} (kg/cm ²)	K_{Ic} (kg/cm ^{3/2})	G_c (kg/m)	G_f (kg/m)	J_{Ic} (kg/m)
A00-1	2488.5	0.026	44.24	-	-	-	-
A00-2	2171.3	0.05	38.60	-	-	-	-
A00-3	-	-	-	-	-	-	-
A25-1	1300.8	0.058	33.84	65.13	1.64	18.54	8.21
A25-2	1134.7	0.052	29.05	55.72	1.20	18.15	7.55
A25-3	1140.5	0.050	30.4-	55.99	1.21	17.80	7.32
A50-1	1052.9	0.044	42.12	80.12	2.48	16.53	6.85
A50-2	954.8	0.046	38.19	72.66	2.04	16.02	4.78
A50-3	905.8	0.042	35.52	67.74	1.77	15.92	4.52
A75-1	503.6	0.046	35.72	61.42	1.46	12.04	3.12
A75-2	582.1	0.058	41.28	70.99	1.95	14.93	5.83
A75-3	546.1	0.068	38.83	66.74	1.72	13.61	5.67
B00-1	2132.0	0.038	50.54	-	-	-	-
B00-2	1984.9	0.040	47.05	-	-	-	-
B00-3	1968.7	0.020	46.67	-	-	-	-
B25-1	1059.5	0.027	35.93	68.82	1.89	15.91	5.94
B25-2	1059.6	0.022	34.98	67.10	1.79	16.41	5.76
B25-3	1170.7	0.048	39.90	77.05	2.37	18.81	7.51
B50-1	755.4	0.026	39.34	75.67	2.28	13.79	6.09
B50-2	758.6	0.046	39.82	76.11	2.31	15.72	5.18
B50-3	869.8	0.018	45.12	86.45	2.98	15.36	5.32
B75-1	562.4	0.046	49.30	86.87	3.01	14.20	3.37
B75-2	510.1	0.032	45.30	80.33	2.57	12.23	5.62
B75-3	529.7	0.058	47.65	83.37	2.77	13.88	4.38
C00-1	1138.0	0.032	40.46	-	-	-	-
C00-2	1268.8	0.036	45.11	-	-	-	-
C00-3	1144.5	0.032	40.69	-	-	-	-
C25-1	758.6	0.040	38.23	74.02	2.15	14.80	5.44
C25-2	954.8	0.048	48.42	93.66	3.44	16.64	6.68
C25-3	794.6	0.034	40.04	77.33	2.34	15.18	4.36
C50-1	490.5	0.034	39.01	75.17	2.22	13.98	5.42
C50-2	500.3	0.024	39.00	73.76	2.13	13.29	4.87
C50-3	529.7	0.024	41.21	78.69	2.43	15.16	6.63
C75-1	362.4	0.046	51.27	89.4	3.13	11.98	3.58
C75-2	369.5	0.040	50.51	88.34	3.06	10.78	2.85
C75-3	366.2	0.060	51.81	90.21	3.19	12.48	2.76

3.3 J-적분의 실험적 평가

Rice와 Paris는 균열이 비교적 깊고 하중-변위 곡선이 주가 되어 에너지가 주로 순수 단면(즉, 리가멘트의 길이)에 의존하는 경우의 시험체에 대하여 J-적분의 반해석적인 평가법을 제안했다. 즉, 휨변형이 지배적인 경우에 대해서 한계 J-적분값(J_{Ic})은 균열의 안정성장 개시점에서의 J-적분값이 반영되도록 초기 균열점까지의 하중-변위곡선의 면적으로 계산되어야 한다. 岡田에 의하면 보통 콘크리트에서는 최대 하중점에서 주 균열이 시작한다고 보고, 한계 J-적분값을 최대 하중점에서 정량화 할 수 있다고 설명하고 있다. Rice와 Paris의 간편식의 장점은 실험에 의해 얻어진 P- δ 곡선이 그대로 사용된다 는 것과 단 한 개의 P- δ 곡선에 의해 J-적분이 평가된다는 것이다.

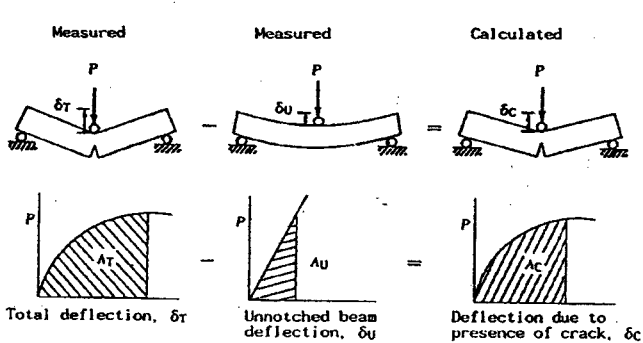


그림 3. J_{IIc} 의 실험적 결정 (by Rice & Paris)

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{2}{B(H-a)} \int_0^{\delta_{max}} P \cdot d\delta_c \\
 &= \frac{2}{B(H-a)} (A_t - A_u)
 \end{aligned}$$

여기서, $A_t \gg A_u$ 이므로, A_u 를 무시하면

$$= \frac{2}{B(H-a)} A_c$$

여기서, B : 보의 폭, H-a : 리가멘트 길이

δ_{max} : 하중점 최대 변위성분,

A_t : 전체 포텐셜에너지

A_u : 노치로 인한 포텐셜에너지

A_c : 노치와 관계없는 성분 (6)

3.4 결과의 고찰

3.4.1 G_f 와 G_{IIc} 의 비교

표 5에서 G_f 와 G_{IIc} 의 값이 큰 차이를 나타낸다. 그 이유는 각각의 값을 계산하는데 사용되는 범위가 다르기 때문이다. 즉, G_f 는 실험체가 두 부분으로 나누어지는데 필요한 전체 에너지의 범위를 고려하고, G_{IIc} 는 균열이 미소길이를 진전할 때의 탄성에너지를 고려하기 때문이다. 콘크리트의 경우 균열 진전에 큰 에너지를 필요로 하고, 미소한 균열 진전이 파괴에 직결되지 않기 때문에 파괴인성으로써 파괴에너지의 쪽이 중요하다고 사료된다.

3.4.2 노치 깊이와 파괴에너지

노치의 깊이와 파괴에너지 G_f 값과의 관계는 노치의 깊이가 얇을 때의 G_f 의 값이 증가하는 경향이 있다. 이는 노치(notch)의 깊이가 얇고 리가멘트(ligament)의 길이가 길기 때문에 노치가 진전하는데 보다 큰 저항을 보이는 굽은골재를 만날 가능성이 크고, 또한 균열 경로가 복잡해지기 때문에 균열 진전 후의 굽은 골재의 맞물림 효과가 증대하는 것이 중요한 원인으로 사료된다. 재하점의 수직 변위VT2가 0.5mm를 초과할 때도 리가멘트의 길이가 긴 시험체가 보다 큰 저항을 가지는 것은 파단면의 맞물림 면적이 크기 때문인 것으로 사료된다.

3.4.3 시험체 두께(thickness, breadth)의 영향

노치가 양단에 있는 네모꼴 콘크리트 시험체에 대한 파괴인성실험을 행한 기존의 연구에서 있어서 실험체의 두께가 커지면 파괴인성이 조금씩 감소하는 경향을 나타내는데 이는 콘크리트의 취성적인 성질에 의한다고 보고되었다.

본 실험에서, 임계응력확대계수 K_{IIc} 는 두께가 커질수록 조금씩 감소하는 경향을 보여 기존의 연구와 비슷한 경향을 나타낸 반면에, 한계 J-적분값 J_{IIc} 와 파괴에너지 G_f 는 두께가 커질수록 오히려 선형적으로 증가하는 경향이 나타났다. 이는 본 실험에 사용한 두께의 범위 내에서 두께가 증가할수록 취성적인 성질보다 골재의 맞물림 효과가 더 커져서 균열진전에 필요한 에너지의 증가에 의한 것으로 사료된다. 따라서, 노치가 있는 콘크리트 균열에 의한 파괴인성을 평가할 때, 두께의 영향을 고려한 3차원적인 접근에 대해서 더 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3.4.4 J_{IIc} 와 G_f 의 비교

J_{IIc} 는 노치의 깊이가 25mm에서 50mm, 75mm로 깊어짐에 따라 J_{IIc} 의 값이 약 15%, 35% 정도 감소되었고, 두께가 150mm에서 112.5mm, 75mm로 감소됨에 따라 약 12%, 24% 정도 감소함을 보인다. G_f 는 노치의

깊이가 25mm에서 50mm로 깊어짐에 따라 G_f 의 값이 약 10%, 23% 정도 감소하였고, 두께가 150mm에서 112.5mm, 75mm로 감소됨에 따라 약 6%, 12% 정도 감소함을 보인다. 특히, G_f 가 J_{Ic} 보다 노치의 깊이에 대해 덜 민감하게 반응하는 것으로 보이므로 콘크리트의 파괴인성으로써 G_f 가 좀더 유용한 인자로 판단된다. 이는 실험에 의한 J_{Ic} 의 값은 최대 하중점의 값에 민감한 반응을 보이므로, 실험에 의한 최대 하중 선정이 J_{Ic} 의 값에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 노치 깊이와 시험체 두께가 콘크리트 파괴인성에 미치는 영향을 파악하기 위해 3점 휨파괴 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 콘크리트 파괴하중은 시험체 노치의 깊이가 증가할수록 크게 감소하였고, 하중-처짐 곡선은 더욱 완만한 비선형성을 나타냈다.
- ② 콘크리트의 비선형파괴인성(J_{Ic} , G_f)은 노치의 깊이가 증가할수록 크게 감소하였고, 특히 파괴에너지(G_f)가 한계 J-적분값(J_{Ic})보다 노치의 깊이에 대하여 덜 민감하게 반응하는 것으로 보인다. 따라서, 콘크리트의 파괴인성으로써 파괴에너지(G_f)가 보다 유용한 인자로 판단된다.
- ③ 콘크리트 실험체의 두께가 75mm에서 150mm로 커질수록 한계 J-적분값(J_{Ic})과 파괴에너지(G_f)가 증가하는 경향을 보인다. 이는 콘크리트의 파괴인성 결정시 두께의 영향(3차원적인 고찰)을 고려하여야 한다는 것을 보여준다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. Shah, S.P., Hamm, J. & Ouyang, C, "The Effect of Specimen Thickness on Fracture Behaviour of Concrete", Mag. of Concrete Research No.175, 1996, p.117~129
2. RILEM (50-FMC), "Determination of the Fracture Energy of Mortar Concrete by means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams", Materials and Structures vol.18 No.106, 1985, p.285~290
3. Rice, J.P., 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, p.213~245
4. E.E.GDOUTOS, Fracture Mechanics Criteria and Applications, Kluwer Academic Publishers, 1990
5. K. Kishitani, T. Hirai & K. Murakami " J-integral Analysis of Intensity Factor of Concrete" fracture toughness and energy of concrete, edited by F. H. Wittmann PP205~208
6. 巖谷孝一の 3인 "コンクリートの破壊力学に関する研究-J積分評價における直接および間接的方法" 日本建築學會 構造系論文報告集 374호 昭和 62年 4月