

중앙에 노치가 있는 콘크리트 디스크의 파괴인성

박현재^{1)*} · 장희석²⁾ · 이승훈¹⁾ · 진치섭¹⁾

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 ²⁾ 부경대학교 건설공학부

(2004년 8월 2일 원고접수, 2004년 9월 30일 심사완료)

Fracture Toughness of a Center Notched Concrete Disk

Hyun-Jae Park^{1)*}, Hee-Suk Jang²⁾, Seung-Hoon Lee¹⁾, and Chi-Sub Jin¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

²⁾ Division of Construction Engineering, Pukyong National University, Busan, 608-739, Korea

(Received August 2, 2004, Accepted September 30, 2004)

ABSTRACT

Purpose of this paper is to determine the appropriate size of a center notched disk specimen for mode I fracture toughness K_{Ic} . For this purpose, mode I test results with various sizes of center notched disk were compared with the RILEM three-point-bend test ones. Compressive strength of concrete used in this paper was 44.9 MPa. Diameters of 200, 300, 400 mm, thickness of 75, 100, 125 mm, and notch length ratios a/R of 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 were used for the mode I disk test. Also, diameter of 300 mm, thickness of 100 mm, and notch length ratios a/R of 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 were used for the mixed mode disk test. Mixed mode stress intensity factors were investigated by changing notch angles for the disk specimen. Stress intensity factors of a center notched disk were calculated with the various methods for comparison.

From the test results, mode I fracture toughness calculated from the disk specimen with diameter of 300 mm, thickness of 100mm, and notch length ratio a/R of 0.5 was very similar to the RILEM three-point-bend test ones. And it is verified that stress intensity factors for mixed mode can be easily calculated with the disk specimen.

Keywords : concrete disk, fracture toughness, RILEM, stress intensity factor

1. 서 론

파괴인성은 균열의 개시와 전파에 대한 재료 고유의 상수로서 파괴역학에서 가장 중요한 재료상수 중의 하나이다. 콘크리트의 모드 I 파괴인성 측정에 대하여 1990년 RILEM 기술 위원회 89-FMT는 2-파라메타 모델에 근거한 3점 휨 시험법을 제시하였다¹⁾. 그러나 혼합모드에 대한 시험법은 아직까지 표준으로 제안된 방법이 없는 실정이며, 또한 RILEM에서 제안한 3점 휨 시험법은 실험법이 복잡하다. 따라서 혼합모드 파괴인성 측정이 가능하면서 실험 방법이 간단한 콘크리트 파괴인성 측정 방법이 요구되고 있다. 디스크 형태의 시편은 혼합모드 파괴인성 측정이 가능하면서 시험법이 단순하여 많은 연구가 행해져 왔으나 콘크리트를 이용한 디스크 형태의 시편에 대한 연구는 많지 않다.

콘크리트와 같은 취성재료의 혼합모드 하중상태의 파괴인성을 연구하기 위하여 Awaji & Sato²⁾는 중앙에 노치가 있는 디스크에 직경방향 압축력을 가하는 실험을 수행하였다. 사용한 재료는 흑연, 석고 및 대리석이었다. 그 후 Atkinson 등³⁾은 디스크의 응력확대계수를 구하는 식을 정식화하고 PMMA(polymethyl methacrylate)를 이용하여 혼합모드 파괴거동을 조사하였다. 한편, Irobe & Peng⁴⁾은 콘크리트 디스크의 응력확대계수를 탄성론으로 계산하고 유한요소법과 비교하였으며 실험결과도 제시하였다.

본 연구는 RILEM 3점 휨 보와 콘크리트 디스크로 구한 모드 I 파괴인성을 서로 비교하여, 디스크로 콘크리트의 파괴인성을 구하는 경우에 적절한 디스크의 크기(직경, 두께) 및 노치 길이 비를 제시해 보려는 데 그 목적이 있다. 이를 위해서, RILEM 3점 휨 시험을 행한 후 디스크의 크기 및 노치 길이 비에 따른 파괴인성 값들을 구하고 이들을 비교·분석하였다. 그리고 이렇게 정해진 디스크에 대하여 디스크의 노치 경사를 변화시키는 방법으로 혼합모드 시험을 수행하였다.

* Corresponding author

Tel : 051-510-1534 Fax : 051-513-9596

E-mail : chandos@pusan.ac.kr

2. 파괴인성 시험법

2.1 RILEM 3점 휨 시험법

모드 I 파괴인성 K_{Ic} 및 한계균열선단열림변위 $CTOD_c^e$ 를 구하기 위하여 RILEM에서 제안한 3점 휨 시험법은 Jenq & Shah가 탄성 파괴거동에 기초하여 제시한 2-파라메타 모델을 근거로 한다^{1,5)}. 보의 치수는 굵은골재의 최대치수 G_{max} 에 의해 결정되며, G_{max} 가 25mm 이하일 때의 시험편 치수는 Fig. 1과 같다. 시험은 Fig. 2와 같이 최대 응력(최대 하중)을 지났을 때나 최대 응력(최대 하중)의 95% 이내에 있을 때 제하한다. 하중이 제하되어 0이 되면 재제하한다. 이때 clip gauge 등을 이용하여 $CMOD$ (Crack Mouth Opening Displacement)를 측정하여야 한다. 측정된 최대 하중에서의 $CMOD$ 값인 $CMOD_c$ 는 식 (1)과 같이 탄성 성분과 비탄성 성분으로 나눌 수 있다(Fig. 2 참조).

$$CMOD_c = CMOD_c^e + CMOD_c^p \quad (1)$$

Jenq & Shah⁵⁾는 측정된 최대 응력 σ_c 와 $CMOD_c^e$ 를 식 (2), (3)에 대입하여, K_{Ic} 와 유효-탄성 한계균열길이 a_c 를 구하였다.

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

$$CMOD_c^e = 4 \frac{\sigma_c a_c}{E} g_2 \left(\frac{a_c}{b} \right) \quad (3)$$

여기서, g_1 및 g_2 는 기함수로서 식 (4), (5)와 같다¹⁾.

$$g_1(x) = \{ 1.99 - x(1-x) \times [2.15 - 3.93x + 2.70x^2] \} / \{ \sqrt{\pi} (1+2x)(1-x)^{3/2} \} \quad (4)$$

$$g_2(x) = 0.76 - 2.28x + 3.87x^2 - 2.04x^3 + \frac{0.66}{(1-x)^2} \quad (5)$$

또한, 한계균열선단열림변위 $CTOD_c^e$ 는 측정된 $CMOD_c^e$ 와 σ_c , a_c 를 사용하여 계산될 수 있다.

RILEM에서는 식 (2), (3)을 기초로 하여 3점 휨 보의 유효-탄성 한계균열길이 a_c 를 구할 수 있는 식 (6), (7)과 모드 I 파괴인성 K_{Ic} 를 구하기 위한 식 (8)을 제안하였다.

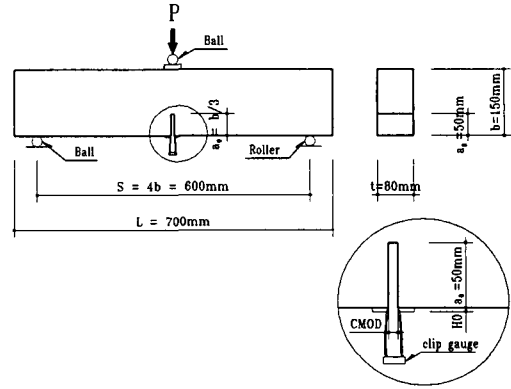
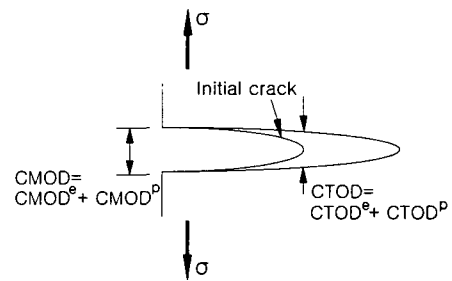
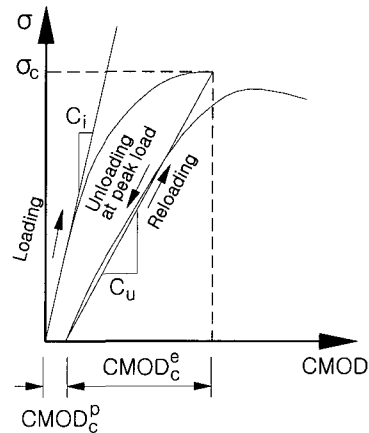


Fig. 1 Geometry of the RILEM three-point-bend beam



(a) Elastic and plastic fracture responses



(b) Loading and unloading procedure

Fig. 2 Procedure of RILEM three-point-bend test

$$a_c = \frac{(a_c + H0)}{(b + H0)} \quad (6)$$

$$a_c = a_0 \frac{C_u}{C_i} \frac{g_2(a_0)}{g_2(a_c)} \quad (7)$$

$$K_{Ic} = 3(P_c + 0.5W_h) \frac{\sqrt{\pi a_c} g_1(a_c/b)}{2b^2 t} \quad (8)$$

여기서, $\alpha_0 = (a_0 + H_0)/(b + H_0)$, P_c 는 최대 하중, C_i 는 하중-CMOD 곡선의 초기 컴플라이언스이고 C_u 는 제하 컴플라이언스, $W_h = W_{h0}S/L$, W_{h0} 는 보의 자중, P_c 는 최대 하중이다.

3점 휨 시험법은 위의 내용과 같이 실험법이 복잡하며 하중-변위 곡선의 형태가 불규칙하여 정확한 파괴인성을 구하는 데 어려움이 있다.

2.2 디스크 시험법

디스크 시험은 Fig. 3과 같이 중앙에 노치가 있는 디스크 시편에 직경방향 하중을 작용시킨다. 이 시험은 노치 경사각도를 적절하게 선택하여 모드 I 조건뿐만 아니라 혼합모드 조건 하에서도 쉽게 응력확대계수를 구할 수 있다. 디스크 시편의 응력확대계수는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다³⁾.

$$K_I = \frac{P}{R \cdot t} \sqrt{\frac{a}{\pi}} N_I \quad (9)$$

$$K_{II} = \frac{P}{R \cdot t} \sqrt{\frac{a}{\pi}} N_{II}$$

여기서, P 는 작용 하중, a 는 노치 길이의 절반, R 은 반지름, t 는 두께이다. 또한, N_I 과 N_{II} 는 노치 길이 비 a/R 과 노치 경사각도 θ 에 따라 결정되는 정규화된 응력확대계수다.

Atkinson 등³⁾은 N_I 과 N_{II} 를 수치해석으로 노치 길이 비 a/R 과 노치 경사각도 θ 의 변화에 따른 급수의 형태로 정식화하여, a/R 이 0.1 ~ 0.6일 때 유효한 5개항 근사법 식 (10)과 a/R 이 0.3 이하일 때 유효한 소균열 근사법 식 (11)을 제안하였다.

$$N_I = \sum_{i=1}^n T_i \left(\frac{a}{R}\right)^{2i-2} A_i(\theta) \quad (10)$$

$$N_{II} = 2 \sin 2\theta \sum_{i=1}^n S_i \left(\frac{a}{R}\right)^{2i-2} B_i(\theta)$$

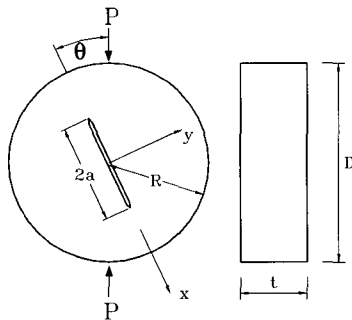


Fig. 3 Geometry of the center notched disk

$$N_I = A_1 + \frac{A_2}{2} \left(\frac{a}{R}\right)^2 \quad (11)$$

$$N_{II} = \left[B_1 + \frac{B_2}{2} \left(\frac{a}{R}\right)^2 \right] 2 \sin 2\theta$$

여기서, T_i , S_i 와 $A_i(\theta)$, $B_i(\theta)$ 는 Atkinson 등이 수치적으로 계산하여 얻은 상수와 식이다.

Fowell & Xu⁶⁾는 a/R 이 0.05 ~ 0.95 일 때 유효한 식 (12)를 제안하였다.

$$N_I = \sqrt{\frac{\pi}{(a/R)}} \left[0.0354 + 2.0394 \left(\frac{a}{R}\right) - 7.0356 \left(\frac{a}{R}\right)^2 + 12.1854 \left(\frac{a}{R}\right)^3 + 8.4111 \left(\frac{a}{R}\right)^4 - 30.7418 \left(\frac{a}{R}\right)^5 - 29.4959 \left(\frac{a}{R}\right)^6 + 69.2739 \left(\frac{a}{R}\right)^7 + 66.5439 \left(\frac{a}{R}\right)^8 - 82.1339 \left(\frac{a}{R}\right)^9 - 73.6742 \left(\frac{a}{R}\right)^{10} + 73.8466 \left(\frac{a}{R}\right)^{11} \right] \quad (12)$$

Fig. 4는 5개항 근사법을 이용하여 노치 길이 비 a/R 과 노치 경사각도 θ 에 따른 N_I , N_{II} 값을 나타낸 것이다.

3. 실험

3.1 사용 재료

시편 제작에 사용된 콘크리트는 압축강도 44.9 MPa로 제작되었으며 콘크리트의 배합표는 Table 1과 같다. 사용된 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트(1종 시멘트)를 사용하였으며, 고성능 감수제는 미국 M사의 제품을 사용하였다.

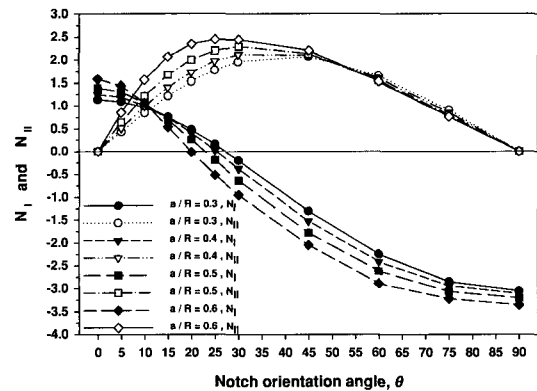


Fig. 4 Normalized mixed mode stress intensity factors (Five terms approximation)

Table 1 Concrete mix proportions

Gmax (mm)	Slump (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				High range water reducing admixture
				W	C	S	G	
20	80±10	33	40	197	597	605	969	3.58

Table 2 Properties of concrete

Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Unit weight (kg/m ³)
44.9	3.8	31,557	2,415

압축강도 측정은 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 사용하여 KS F 2405에 따라 채령 28일에 측정하였다. 제작된 콘크리트의 특성은 Table 2와 같다.

3.2 RILEM 3점 휨 시험

제작한 RILEM 3점 휨 보의 치수는 Fig. 1과 같으며 clip gauge 고정판의 높이 H0는 5mm이다. CMOD 측정은 일본 Tokyo Sokki사의 clip gauge UB-A를 사용하였고, UTM은 영국 Instron사의 8516을 사용하였다. 3점 휨 보의 4개를 제작하였다.

3.3 디스크 시험

모드 I 시험을 위한 디스크의 직경 D는 200, 300, 400 mm, 두께 t는 75, 100, 125 mm, 노치 길이 비 a/R은 0.3, 0.4, 0.5, 0.6이다. 따라서, 모드 I 시험용 디스크 시편의 총 Case는 36개이다. 혼합모드 시험을 위한 디스크 시편의 치수는 D는 300 mm, t는 100 mm이며 a/R은 0.3, 0.4, 0.5, 0.6이다. 디스크의 노치는 두께 2mm의 알루미늄 판을 이용하여 제작하였다. 디스크의 혼합모드 시험은 Fig. 3의 노치 경사각도 θ 를 $0^\circ \sim 30^\circ$ 까지는 5° 간격으로, $30^\circ \sim 90^\circ$ 까지는 15° 간격으로 나눠 UTM을 사용하여 0.1 mm/min의 속도로 재하하였다.

디스크의 모드 I 응력확대계수 계산에는 5개항 근사법과 소균열 근사법, Fowell & Xu법, 유한요소해석(FEA)을 적용하였고, 혼합모드 상태의 응력확대계수 계산에는 5개항 근사법과 소균열 근사법, FEA를 적용하였다.

4. 유한요소해석(FEA)

본 연구에서 유한요소법에 의한 응력확대계수는 유한요소해석에서 구해진 균열선단 주위의 변위와 해석해에서 얻어진 변위의 비교로부터 응력확대계수를 구하는 변위상관법에 의하여 계산되었다.

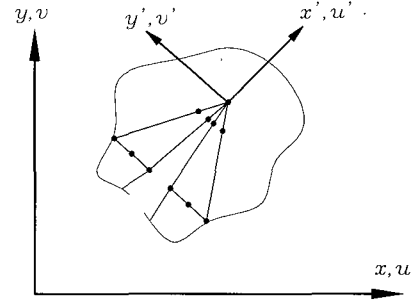


Fig. 5 Quarter point triangular singular element at the crack tip

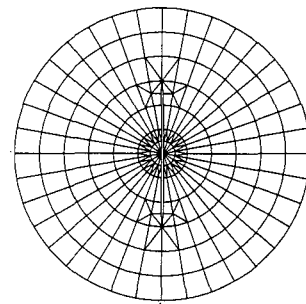


Fig. 6 Finite element mesh of center notched disk

요소분할은 8절점 사변형 등매개변수요소를 사용하고 균열선단부근에서는 Fig. 5와 같은 1/4점 6절점 삼각형 특이요소를 사용하였다^{7,8)}. 디스크의 정규화된 응력확대계수 및 응력확대계수 계산을 위한 요소분할은 Fig. 6과 같다. 유한요소해석에 사용된 압축강도, 인장강도, 탄성계수는 Table 2와 같다.

5. 실험결과 분석

5.1 모드 I 실험

Fig. 7은 RILEM 3점 휨 시험을 수행하여 얻은 하중-CMOD 곡선 중 하나이다. 4개의 3점 휨 보에 대해서 하중-CMOD 곡선으로부터 초기하중 컴플라이언스 C_i 와 최대하중 제하 컴플라이언스 C_u 를 구하여 평균한 결과 각각 3.392×10^{-4} mm/kN과 4.451×10^{-4} mm/kN을 얻었으며, 최대 하중 P_c 의 평균은 5.154 kN으로 나타났다. 또한 보의 자중 W_{h0} 의 평균은 0.203 kN이었다. RILEM 3점 휨 보의 K_{Ic} 는 식 (6) ~ (8)을 이용하여 $1.286 \text{ MPa m}^{1/2}$ 을 얻었다. 그리고 디스크 실험 결과, 디스크의 직경 D가 300 mm이고 두께 t가 100 mm일 때의 균열개시하중 P_{ini} 및 파괴인성 K_{Ic} 값은 각각 Table 3 및 Table 4와 같다. 여기서 P_{ini} 는 디스크 파괴하중의 90%를 적용하였으며, K_{Ic} 는 P_{ini} 를 디스크에 작용하는 하중으로 하여 FEA와 다양한 해석법으로 구하였다. Table 4에서 a/R이 0.5일 때

5개항 근사법으로 구한 디스크(D=300 mm, t=100 mm)의 K_{Ic} 는 RILEM 3점 휨 시험의 결과와 0.5% 차이가 가장 근접한 결과를 주고 있음을 알 수 있다.

디스크의 파괴인성 K_{Ic} 는 직경 D, 두께 t, 노치 길이 비 a/R의 변화에 따라 5개항 근사법으로 구하고 그 결과는 Figs. 8~10에 나타났다. 여기서 디스크의 파괴인성 K_{Ic} 는 직경 D, 두께 t, 노치 길이 비 a/R의 영향을 받음을 알 수 있다. Fig. 8을 보면 디스크의 직경 D가 300 mm 이상이고 a/R이 0.5, 0.6인 경우에 K_{Ic} 가 3점 휨 시험 결과와 유사함을 알 수 있다. Fig. 9에서는 두께 t가 100 mm 이상이고 a/R이 0.5, 0.6인 경우에 3점 휨 시험 결과와 유사한 값을 주는 것을 알 수 있다. Fig. 10에서는 a/R이 0.5 이상이고 두께 t가 100 mm 이상인 경우에 3점 휨 시험 결과와 유사함을 보이고 있다. 따라서 디스크의 모드 I 파괴시험에서 D는 300 mm 이상, t는 100 mm 이상, 그리고 a/R이 0.5 이상일 때 구해진 파괴인성 값이 3점 휨 시험 결과와 유사한 값을 갖게 되는 것을 알 수 있다. Figs. 11~13의 그래프는 디스크의 D, t, a/R의 변화에 따른 K_{Ic} 를 5개항 근사법, 소균열 근사법, Fowell & Xu의 방법, FEA로 구하여 서로 비교한 것이다. 여기서 a/R이 0.3인 경우는 어떠한 계산방법에 의하든지 3점 휨 시험 결과와 많은 차이가 있음을 재차 보여주고 있다. 또한 a/R이 0.5 이상인 경우라도 5개항 근사법과 FEA는 3점 휨 시험 결과에 유사한 값을 주고 있으나, 소균열 근사법과 Fowell & Xu법은 차이가 많이 있음을 보여주고 있다.

5.2 혼합모드 실험

디스크의 노치 경사각도 θ 가 $0^\circ \sim 90^\circ$ 이고 노치 길이 비 a/R이 0.3 ~ 0.6일 때, 혼합모드 응력확대계수를 구하였다. 혼합모드 응력확대계수는 모드 I 실험과 같이 균열개시하중 P_{ini} 를 디스크의 하중으로 하여 구하였다.

Table 3 Crack initiation loads P_{ini}
(D=300 mm, t=100 mm)

a/R	0.3	0.4	0.5	0.6
P_{ini} (kN)	68.60	59.57	49.76	41.62

Table 4 Fracture toughness K_{Ic} (D=300 mm, t=100 mm)

Analysis method	a/R			
	0.3	0.4	0.5	0.6
Five terms approximation	1.119	1.228	1.280	1.334
Small crack approximation	0.985	0.988	0.923	0.845
Fowell & Xu	1.056	1.123	1.108	1.077
FEA	1.053	1.270	1.265	1.370

※ unit : $MPa m^{1/2}$

혼합모드 시험에 사용된 시편의 치수는 3점 휨 시험 및 모드 I 디스크 시험 결과를 비교하여 직경 D는 300 mm, 두께 t는 100 mm를 선택하였다. Fig. 14는 혼합모드 상태의 응력확대계수 K_I , K_{II} 를 5개항 근사법으로 구한 것이고 Figs. 15~18은 디스크의 노치 경사각도 θ 가 $0^\circ \sim 90^\circ$ 이고 a/R

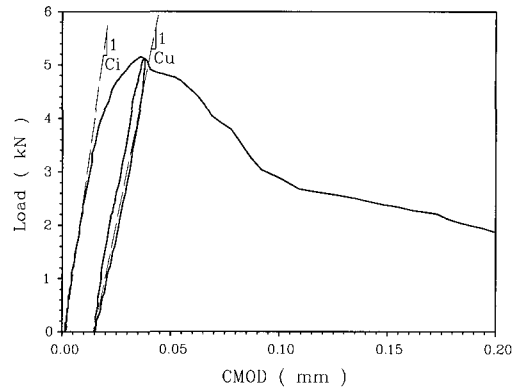


Fig. 7 Load-CMOD curve measured (RILEM 3 point-bend-test)

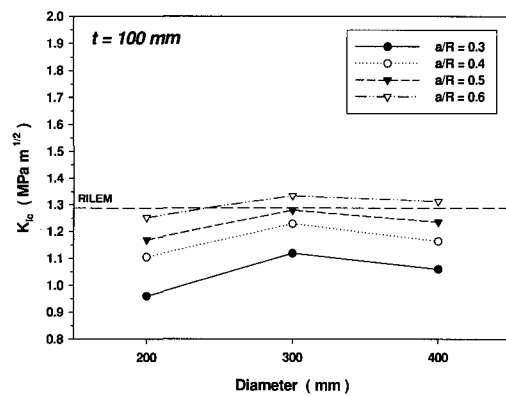


Fig. 8 Effect of diameter on K_{Ic}
(t=100 mm, Five terms approximation)

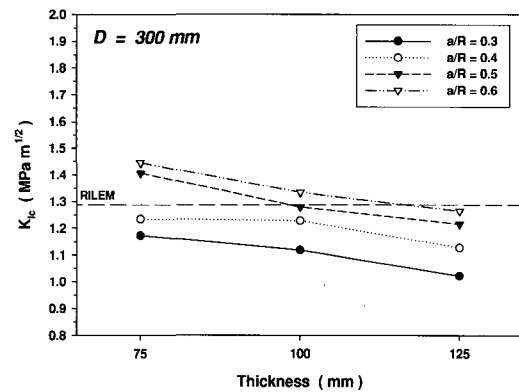


Fig. 9 Effect of thickness on K_{Ic}
(D=300mm, Five terms approximation)

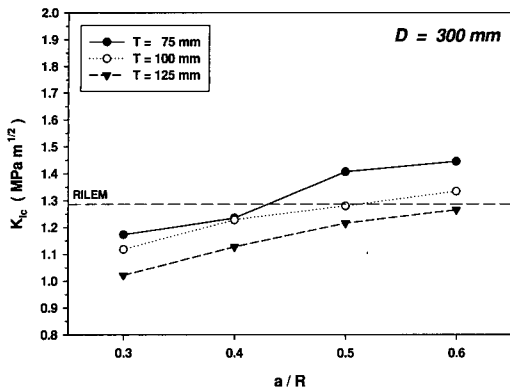


Fig. 10 Effect of a/R on K_{Ic}
($D=300$ mm, Five terms approximation)

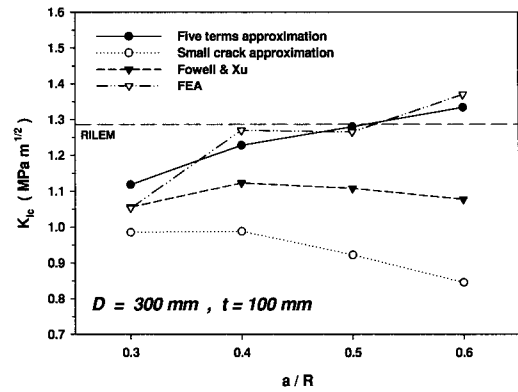


Fig. 13 Effect of a/R on K_{Ic}
($D=300$ mm, $t=100$ mm)

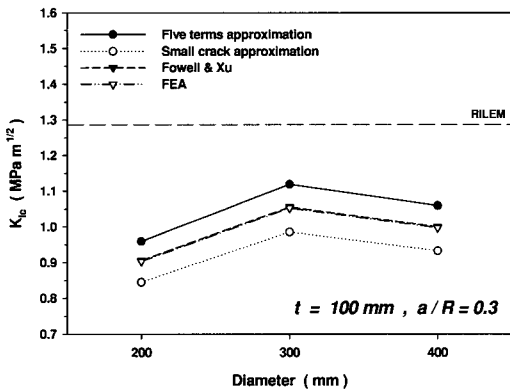


Fig. 11 Effect of diameter on K_{Ic}
($t=100$ mm, $a/R=0.3$)

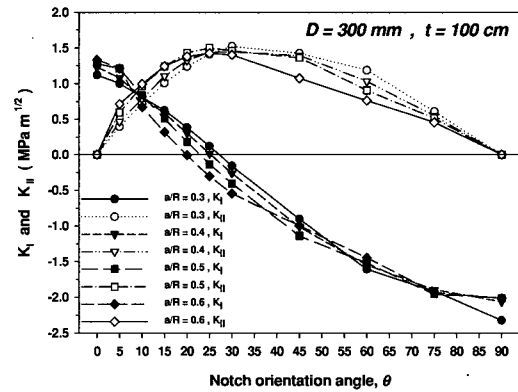


Fig. 14 Mixed mode stress intensity factors
(Five terms approximation)

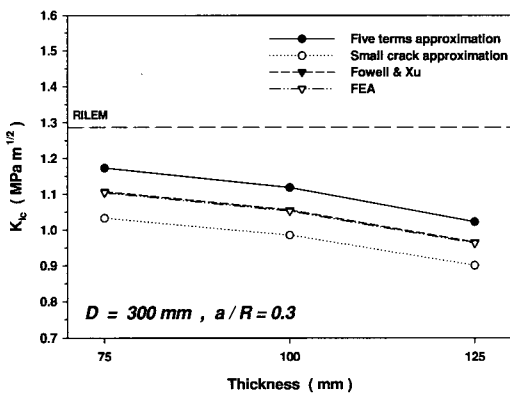


Fig. 12 Effect of thickness on K_{Ic}
($D=300$ mm, $a/R=0.3$)

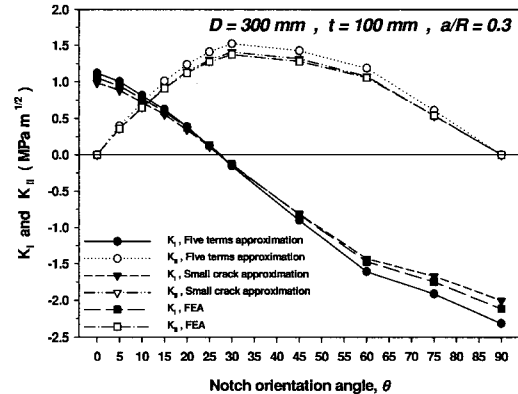


Fig. 15 Mixed mode stress intensity factors
($a/R=0.3$)

이 0.3 ~ 0.6일 때의 혼합모드 상태의 응력확대계수 K_I , K_{II} 를 5개항 근사법, 소균열 근사법, FEA로 구하여 비교한 것이다. 이들 노치 경사각도-응력확대계수 그래프에서 K_I 이 0일 때의 K_{II} 와 θ 는 각각 순수 모드 II 상태의 파괴인성 K_{Ic} 와 θ 가 된다. 이러한 원리를 이용하여

a/R 이 0.5, 0.6일 때 5개항 근사법과 FEA로 순수 모드 II 상태의 파괴인성 K_{Ic} 와 θ 를 구하면 Tables 5, 6과 같이 된다. Fig. 14 및 Table 5를 보면 모드 II 상태의 θ 는 해석법에 관계없이 유사한 결과를 나타냈으며 a/R 이 클수록 작아지는 것으로 나타났다.

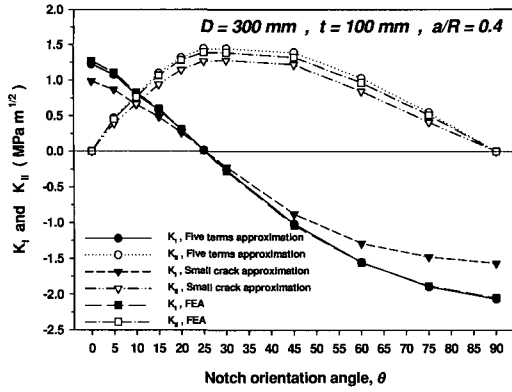


Fig. 16 Mixed mode stress intensity factors (a/R=0.4)

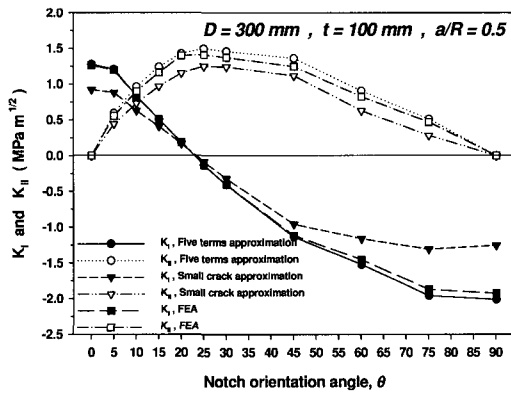


Fig. 17 Mixed mode stress intensity factors (a/R=0.5)

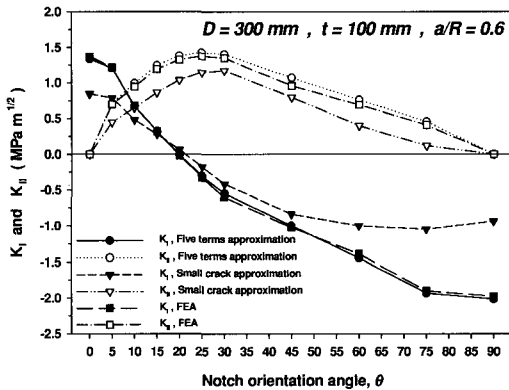


Fig. 18 Mixed mode stress intensity factors (a/R=0.6)

Figs. 15 ~ 18과 Tables 5 ~ 6을 보면 모드 I 시험 결과와 같이 혼합모드에서도 5개항 근사법은 FEA의 결과와 유사한 결과를 주는 것을 알 수 있다. 그리고 소균열 근사법은 a/R이 0.3의 경우에 한하여 다른 계산 결과들과 유사한 값을 주었다. Table 7은 K_{IIc}/K_{Ic} 비를 나타낸 것으로 재료의 K_{IIc}/K_{Ic} 비 값을 알면, K_{Ic} 만으로 K_{IIc} 값을 예측할 수 있다. 일반적으로 알루미늄 합금과 강재의

Table 5 Notch orientation angle θ for pure mode II

Analysis method	a/R	
	0.5	0.6
Five terms approximation	22.8	19.8
FEA	22.9	19.7

※ unit : degree

Table 6 Mode II fracture toughness K_{IIc}

Analysis method	a/R	
	0.5	0.6
Five terms approximation	1.469	1.376
FEA	1.381	1.317

※ unit : $MPa m^{1/2}$

Table 7 K_{IIc}/K_{Ic} ratio

Analysis method	a/R	
	0.5	0.6
Five terms approximation	1.15	1.03
FEA	1.10	0.96

K_{IIc}/K_{Ic} 비는 1.0 ~ 1.2의 범위에 있다²⁾. Table 7에서 a/R이 0.5, 0.6일 때, 5개항 근사법에 의한 K_{IIc}/K_{Ic} 비는 1.03 ~ 1.15의 범위에 있었고, FEA에 의한 K_{IIc}/K_{Ic} 비는 0.96 ~ 1.10의 범위에 있었다. 여기서 5개항 근사법을 기준으로 택할 때 FEA의 오차 범위는 4 ~ 7%로 나타났다. 또한 a/R이 커짐에 따라서, K_{IIc}/K_{Ic} 비는 감소하는 경향을 나타냈다.

6. 결론

압축강도 44.9 MPa의 콘크리트에 대해서, RILEM 3점 휨 시험에 의한 파괴인성과 크기를 변화시킨 디스크 시편의 모드 I 파괴인성 시험 결과를 비교하고 또한 디스크 시편의 혼합모드 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디스크 시편의 치수는 콘크리트의 파괴인성에 영향이 있음을 알 수 있으며, 본 연구에서 사용한 재료에 대해서, 디스크의 K_{Ic} 는 직경 D가 300 mm, 두께 t가 100 mm, a/R이 0.5일 때 RILEM 3점 휨 보의 실험 결과에 가장 근접하였다.
- 2) 5개항 근사법과 유한요소해석(FEA)에 의한 디스크의 응력확대계수는 거의 일치함을 알 수 있었으며, 본 연구에서 사용한 재료의 K_{IIc}/K_{Ic} 비의 범위는 a/R이 0.5, 0.6일 때 약 0.96 ~ 1.15로 나타났다.
- 3) 디스크 시편을 이용하여 모드 II 파괴인성 K_{IIc} 를 구하기 위한 노치 경사각도 θ 는 a/R이 0.5일 때 약 23° 이었다.

4) RILEM 3점 휨 시험은 최대 하중을 지나서 재하 및 재하를 해야하므로 현실적으로 시험 수행에 많은 어려움이 있다. 그러나 디스크 시편을 이용하면, 균열개시하중만 측정하여 쉽게 파괴인성을 구할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 디스크 시편은 노치 경사를 조절하여 혼합모드 상태의 응력확대계수를 편리하게 결정할 수 있었다.

참고문헌

1. Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C., "Fracture Mechanics of Concrete," John Wiley & Sons, INC., 1995, pp.129~192.
2. Awaji, H. and Sato, S., "Combined Mode Fracture Toughness Measurement by the Disk Test," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.100, April 1978, pp.175~182.
3. Atkinson, C., Smelser, R. E., and Sanchez, J., "Combined Mode Fracture via the Cracked Brazilian Disk Test," *International Journal of Fracture*, Vol. 18, No.4, April 1982, pp.279~291.
4. Irobe, M. and Peng, S. Y., "Mixed-Mode and Mode II Fractures in Concrete," in *Fracture Mechanics of Concrete Structures*(ed Z. P. Bazant), Elsevier Applied Science, London and New York, 1993, pp.719~726.
5. 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.
6. Fowell, R. J. and Xu, C., "The Use of the Cracked Brazilian Disc Geometry for Rock Fracture Investigations," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, Vol.31, No.6, 1994, pp.571~579.
7. Ingraffea, A. R. and Heuze, F. E., "Finite element Models for Rock Fracture Mechanics," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.4, 1980, pp.25~43.
8. 진치섭, 김희성, 정진호, "콘크리트 디스크를 사용한 혼합모드 파괴", 콘크리트학회 논문집, 12권, 2호, 2000, pp.63~69.

요 약

본 연구는 디스크로 콘크리트의 파괴인성을 구하는 경우에, 적절한 디스크의 크기(직경, 두께) 및 노치 길이 비를 제안하기 위해서 다양한 크기의 디스크와 RILEM 3점 휨 보의 파괴인성을 비교하였다. 또한 이렇게 정해진 디스크에 대하여 디스크의 노치 경사를 변화시키는 방법으로 혼합모드 응력확대계수를 조사하였다. 실험에 사용된 콘크리트의 압축강도는 44.9 MPa이었으며 모드 I 시험에 사용된 디스크의 직경은 200, 300, 400 mm, 두께는 75, 100, 125 mm, 노치 길이 비 a/R 은 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 이고 혼합모드 시험에 사용된 치수는 직경이 300 mm, 두께는 100 mm, 노치 길이 비 a/R 은 0.3, 0.4, 0.5, 0.6이었다. 디스크의 응력확대계수는 유한요소해석(FEA), 5개항 근사법, 소균열 근사법, Fowell & Xu의 방법으로 구하고 각각의 결과를 서로 비교하여 해석방법의 타당성을 조사하였다.

모드 I 실험 결과 디스크의 직경 D 가 300 mm이고 두께 t 가 100 mm일 때의 파괴인성 K_{Ic} 값이 RILEM 3점 휨 시험의 결과에 가장 근접하여 디스크 시험으로 파괴인성치를 쉽게 구할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 디스크 시편은 혼합모드 파괴의 연구 및 시험에 유용함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 콘크리트 디스크, 파괴인성, RILEM, 응력확대계수