

## 중앙에 노치가 있는 고강도 콘크리트 디스크의 파괴특성

진치섭<sup>1)\*</sup> · 김희성<sup>2)</sup> · 박현재<sup>2)</sup> · 김민철<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>부산대학교 생산기술연구소 <sup>3)</sup>(주)나우이엔씨

(2001년 1월 9일 원고접수, 2001년 3월 18일 심사완료)

### Fracture Properties of High Strength Concrete Disk with Center-Crack

Chi-Sub Jin<sup>1)\*</sup>, Hee-Sung Kim<sup>2)</sup>, Hyun-Jae Park<sup>2)</sup>, and Min-Cheul Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

<sup>2)</sup> Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

<sup>3)</sup> Now Engineering & Consultants, Seoul, 135-080, Korea

(Received January 9, 2001, Revised March 18, 2001)

#### ABSTRACT

It is difficult to obtain accurate fracture toughness values using three point bending test(TPB) proposed by RILEM committees because the shape of load-deflection curve is irregular and final crack propagation occurs after some slow stable cracking. However, fracture toughness is easily obtained from crack initiation load in the disk test.

In this paper, the fracture properties of high strength concrete disks with center-crack was investigated. For this purpose, the experimental results were compared with the results by finite element analysis(FEA). And the experimental fracture locus was compared with theoretical fracture locus. Also, the results of fracture properties for the degree of concrete strength are presented.

It is concluded from this study that results from FEA with maximum stress theory were compared well with the results from experiment. And the degree of concrete strength was contributed to the crack initiation load and fracture toughness, but was not contributed to the failure angle. Also, The discrepancy of fracture locus between the maximum stress theory and the experiment for concrete is considered to depend upon a large energy requirement for inducing the mixed-mode and sliding mode fractures.

**Keywords : concrete disk, fracture locus, fracture toughness, high strength**

#### 1. 서 론

콘크리트와 같은 유사취성재료는 모르타와 굵은골재의 경계면상에 부착미세균열과 함께 여러 가지 원인으로 인하여 고유의 흠을 포함하고 있다. 이러한 균열은 재료의 항복응력에 훨씬 못 미치는 낮은 응력에서도 파괴를 발생시킨다. 따라서 이러한 경우에 대비하기 위하여 균열을 가진 부재의 강도특성을 취급하는 학문 분야의 필요성이 인식되어 왔으며, 이러한 요구로 발전된 것이 파괴역학이다.

파괴역학적 관점에서, 콘크리트와 같은 유사취성재료의 특성이 활발히 연구되어 왔다. 이런 연구 중에서 혼합모드 상태의 파괴인성에 관한 실험적 연구들이 수행되었는데, 유사취성재료의 혼합모드 하중상태의 파괴인성을 연구하

기 위하여 Awaji와 Sato<sup>1)</sup>는 중앙에 노치가 있는 디스크에 반경방향 압축력을 가하는 실험을 수행하였다. 이때 사용한 재료는 흑연, 석고 및 대리석이었다. 또한 Atkinson 등<sup>2)</sup>은 디스크의 응력확대계수를 구하는 식을 정식화하였으며 Irobe와 Peng<sup>3)</sup>은 콘크리트 디스크에 대하여 응력확대계수를 탄성론으로 계산하고 유한요소법으로 비교하였는데, 실험결과는 최대 원주방향 인장응력기준 궤적의 외측에 존재함을 보여주었다.

본 연구에서는 고강도 콘크리트에 대한 파괴역학적 파라메타 중 하나인 파괴인성을 구하기 위해서, RILEM 위원회(Committees 50-FMC와 TC 89-FNT)가 제시한 3점 휨 시험<sup>4)</sup> 보다 중앙에 노치가 있는 디스크의 쪼갬인장시험이 더 유용함을 확인하는 데 그 목적이 있다. 이를 위해 중앙에 노치가 있는 고강도 콘크리트 디스크의 쪼갬인장시험을 통해 파괴인성을 구하고 혼합모드 상태의 균열 전파를 추적하였다. 그리고 유한요소법을 이용하여 노치가 있는 디스크의 응력확대계수를 구하고 실험과 유한요소법

\* Corresponding author

Tel : 051-510-2351 Fax : 051-513-9596

E-mail : jincs@hyowon.pusan.ac.kr

에 의한 최종 균열전파각을 서로 비교하였으며, 실험에 의해 얻은 파괴 포락선과 최대 원주방향 인장응력기준에 의한 파괴 포락선을 비교하였다. 또한 강도수준이 디스크의 파괴특성에 미치는 영향을 알기 위해 강도수준이 다른 콘크리트를 사용한 연구결과<sup>5)</sup>와 파괴특성을 비교하였다.

## 2. 콘크리트의 혼합모드 균열전파

### 2.1 최대 원주방향 인장응력( $\sigma_{\theta_{max}}$ ) 이론

혼합모드상태의 균열전파이론 중에서 일반적으로 가장 널리 쓰이고 있는 최대 원주방향 인장응력 이론은 Erdogan과 Sih<sup>6)</sup>에 의해 제안된 것으로, 균열은 균열선단에서 최대 인장응력을 가지는 방향에 수직인 방향으로 진전한다고 보았다. 최대 원주방향 인장응력 이론은 다음과 같을 때 균열전파가 시작된다고 가정한다.

- ① 균열은 균열선단에서 시작하고 방사상으로 전파된다.
- ② 균열은 최대 인장응력방향에 연직인 면내에서 시작된다.
- ③ 균열은  $\sigma_{\theta_{max}}$  가 재료의 한계값에 달할 때 성장한다.

혼합모드상태의 균열전파에서 균열선단 부근의 응력상태를 극좌표로 나타내면 식 (1)과 같고, 응력성분은 Fig. 1과 같다.

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I (1 + \sin^2 \frac{\theta}{2}) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2K_{II} \tan \frac{\theta}{2}] + \dots \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta] + \dots$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] + \dots$$

여기서  $K_I$  과  $K_{II}$  는 각각 순수열림모드 및 면내전단모드에 대한 응력확대계수이다.

혼합모드상태에서의 균열전파각은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan \frac{\theta_0}{2} = \frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8} \quad (2)$$

또한 최대 원주방향 인장응력 이론으로 예상되는 파괴 포락선은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{K_I}{K_{Ic}} \cos^3 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} \frac{K_{II}}{K_{Ic}} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \theta_0 = 1 \quad (3)$$

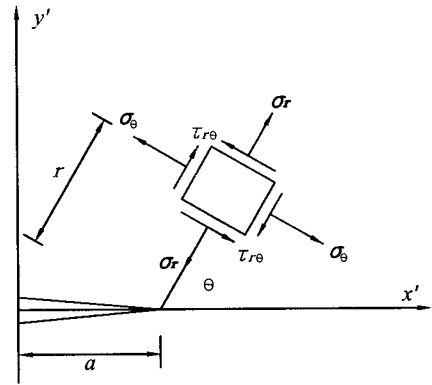


Fig. 1 Stress components around the crack tip

### 2.2 균열진전의 판단

균열선단에서 균열의 진전 여부를 판단하기 위해 먼저 주어진 균열선단의 위치 및 하중에서의 응력확대계수를 구하여 새로운 균열 전파각  $\theta_0$ 를 산정하고, 균열선단에서의 국부적인 안정성을 판단하는 순서로 진행된다. 최대 원주방향 인장응력 이론으로 계산된 응력확대계수쌍이 Fig. 2의 파괴 포락선안에 있으면 응력확대계수가 더욱 커지지 않는 한 균열은 진전되지 않고, 파괴 포락선 밖에 있으면 균열은 불안정하게 되어 균열이 자유면에 도달할 때까지 또는 응력확대계수쌍이 포락선 안으로 돌아올 때까지 계속하여 전파하게 된다.

### 2.3 파괴인성의 계산

Atkinson 등<sup>2)</sup>은 파괴인성을 계산하기 위한 무차원량  $N_I$  과  $N_{II}$  를 수치해석을 수행하여 상대 균열길이 비와 하중 재하 각도의 변화(Fig. 3 참조)에 따른 급수의 형태로 식 (4)와 같이 정식화하였다.

$$N_I = \sum_{i=1}^n T_i \left(\frac{a}{R}\right)^{2i-2} A_i(\theta) \quad (4)$$

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

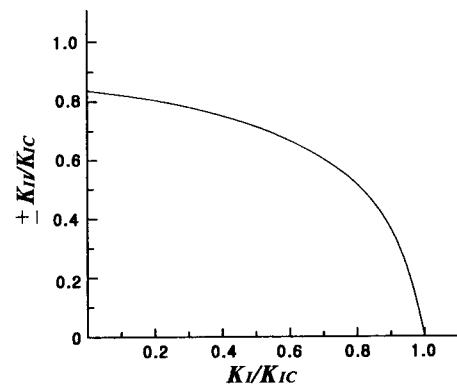


Fig. 2 Fracture locus for maximum principal stress criterion

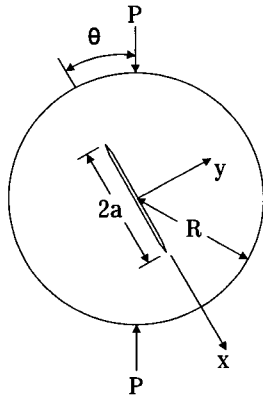


Fig. 3 Geometry of disk

여기서,  $N_I = (K_I) / \sigma_0 \sqrt{\pi a}$ ,  $N_{II} = (K_{II}) / \sigma_0 \sqrt{\pi a}$ ,  $\sigma_0 = P / \pi R$  이며,  $T_i, S_i$ 와  $A_i(\theta), B_i(\theta)$ 는 Atkinson 등이 수치적으로 계산하여 얻은 상수와 식이다. 따라서 다음 식 (5)를 이용하여 파괴인성을 계산할 수 있다. 여기서  $P_{ini}$ 는 균열개시하중이며  $t$ 는 디스크의 두께이다.

$$K_{Ic} = \frac{P_{ini}}{R \cdot t} \sqrt{\frac{a}{\pi}} N_I \quad (5)$$

Fig. 4는 상대 균열길이 비가 0.3 ~ 0.6 이고 하중재하 각도가 30° 이하 일 때의  $N_I$  값을 그래프로 나타낸 것이다.

### 3. 디스크 실험 및 유한요소해석

#### 3.1 디스크의 제작 및 실험방법

디스크는 강도수준이 783 kgf/cm<sup>2</sup>인 고강도 콘크리트로 제작하였다. 콘크리트의 배합은 Table 1과 같다. 디스크의 반경 R은 15 cm 이고, 상대 균열길이 비(a/R)는 0.3,

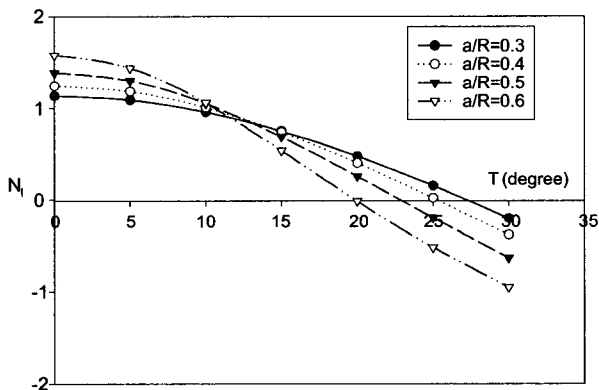


Fig. 4 Loading angle vs  $N_I$

Table 1 Mix proportion

Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	AE
13	10±1.0	33	48	192	583	677	767	1.165

0.4, 0.5, 0.6이며 두께 t는 7.5 cm 이다(Fig. 5 참조). 디스크는 a/R에 대하여 각각 10개씩 모두 40개를 제작하였다.

모든 시편은 타설 24시간 후에 몰드에서 탈형하여 KS F 2329에 따라서 수중양생하였다. 강도 측정은  $\phi 10 \times 20$  cm의 원주형 공시체를 사용하여 KS F 2405에 따라 측정하였다. 디스크는 균열 축에 대하여, Fig. 6의 하중재하 각도  $\theta$ 를 0° ~ 30° 까지 5° 간격으로 각각 나눠 UTM을 사용하여 0.1 mm/min의 속도로 재하하였다.

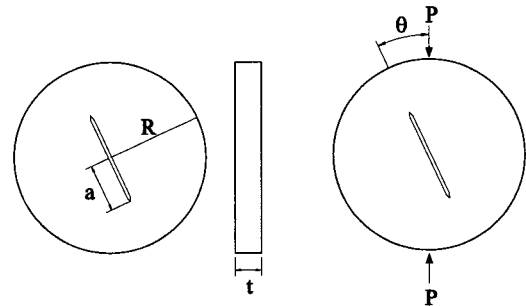


Fig. 5 Dimension of specimen Fig. 6 Loading angle

#### 3.2 디스크 실험 결과 및 분석

각 실험에서 균열개시하중은 파괴하중의 약 50%로 가정하였다. a/R = 0.5일 때의 균열개시하중을 나타내면 Table 2와 같다. 또한 모드 I 파괴인성( $K_{Ic}$ )은 식 (5)와  $\theta=0^\circ$ 에서의  $N_I$  값을 이용하여 Table 3과 같이 계산되었다. 실험에 의한 균열전파 경로는 Fig. 7과 같다.

Table 2 Crack initiation loads,  $P_{ini}$  (a/R=0.5)

$\theta$ (°)	0	5	10	15	20	25	30
$P_{ini}$ (kgf)	3,145	3,030	2,820	2,730	2,760	2,550	2,405

Table 3 Fracture toughness ( $K_{Ic}$ )

a/R	0.3	0.4	0.5	0.6
$K_{Ic}$ (kgf/cm <sup>3/2</sup> )	65.23	62.84	59.92	54.61

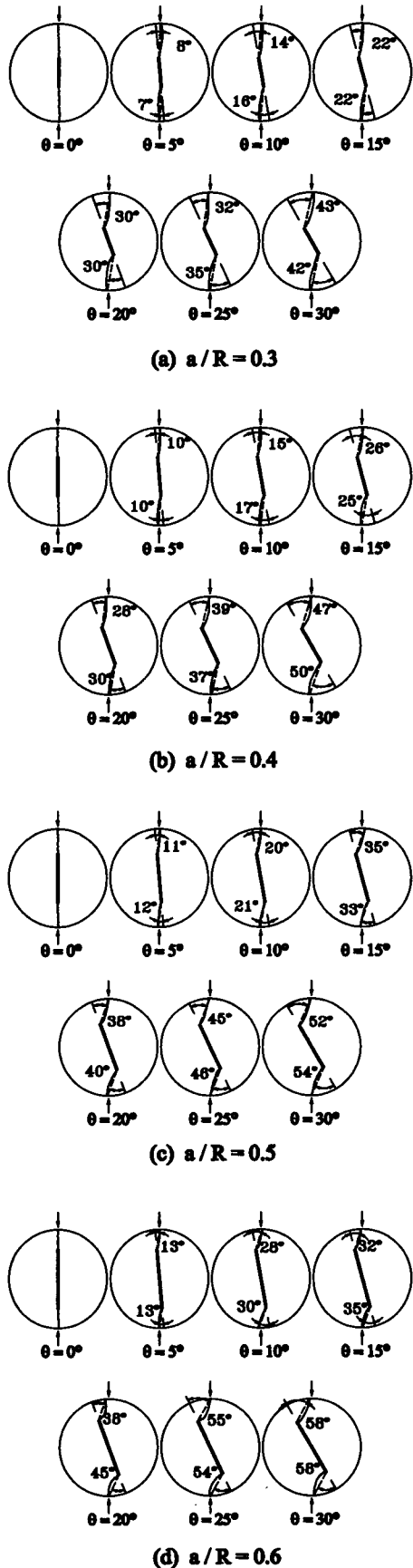


Fig. 7 Crack propagation path obtained from experiments

각각의 상대 균열길이 비에 대한 최종 균열전과각을 요약하여 다음 Table 4에 나타내었다.

### 3.3 유한요소해석(FEA) 및 결과

본 연구에서 사용한 프로그램(LFRC)<sup>7)</sup>에 최대 원주방향 인장응력 이론을 적용하여 콘크리트 디스크의 균열전과 경로를 유한요소로 해석하였다. Fig. 8은 유한요소 해석에 사용된 디스크의 요소분할을 보여주고 있다. 요소분할은 균열선단부근에서는 1/4점 6절점 삼각형 특이요소를 사용하였고, 그 외에는 8절점 사변형 등매개변수요소를 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 압축강도, 탄성계수 및 프와송비는 Table 5와 같다.

각 경우에 대한 유한요소해석에서, 실험으로 구한 균열 개시하중을 초기하중으로 사용하고 하중을 점진적으로 증가시켜가며 균열전과 경로를 추적하였다. 유한요소해석에 의한 균열전과 경로는 Fig. 9와 같다.

Table 4 Experimental results of failure angle (Unit : degree)

a/R	$\theta$ (degree)							
	0	5	10	15	20	25	30	
0.3	top	0	8	14	22	30	32	43
	bottom	0	7	16	22	30	35	42
0.4	top	0	10	15	26	28	39	47
	bottom	0	10	17	25	30	37	50
0.5	top	0	11	20	35	38	45	52
	bottom	0	12	21	33	40	46	54
0.6	top	0	13	28	32	38	55	58
	bottom	0	13	30	35	45	54	58

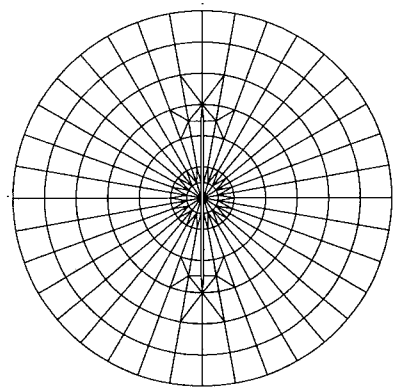


Fig. 8 Finite element mesh of disk

Table 5 Material properties of concrete

$f_{28}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio
783	363812	0.18

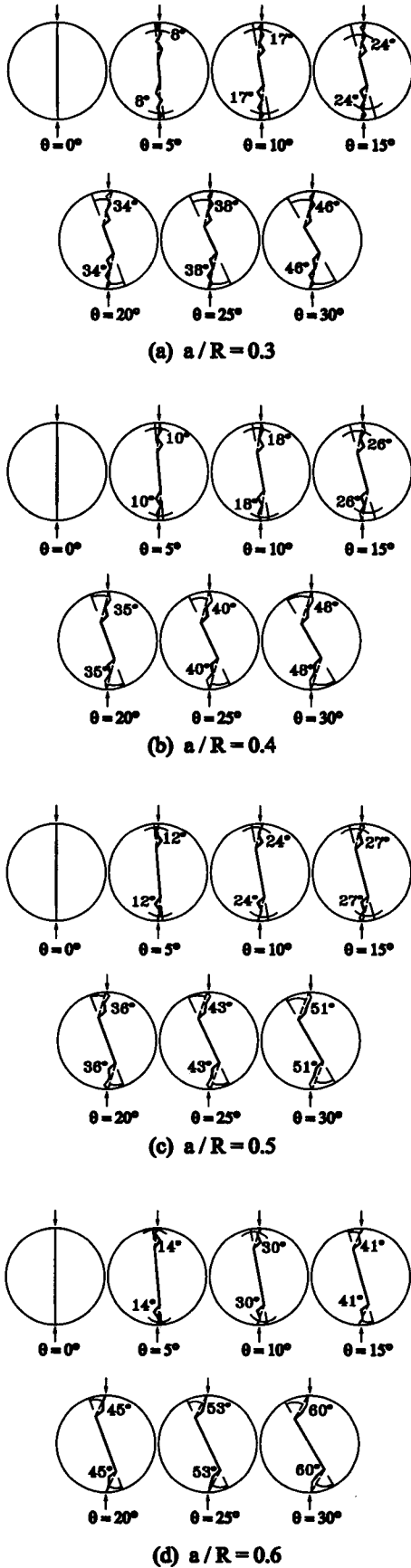


Fig. 9 Crack propagation path obtained from FEA

각각의 상대 균열길이 비에 대한 최종 균열전파각은 요약하여 Table 6에 나타내었다.

### 3.4 파괴 포락선 및 강도수준에 따른 비교

이론과 실험에 의한 데이터를 이용하여 파괴 포락선을 Fig. 10에 나타내어 비교하였다. Fig. 10은 모든 결과 값들이 최대 원주방향 인장응력기준의 이론곡선보다 바깥쪽에 위치하는 것을 보여준다. 이것은 전단효과가 커질수록 인장응력이 작용하는 경우에 비하여 균열의 전파가 어렵다는 것을 의미한다<sup>8)</sup>.

강도수준에 따른 파괴특성을 비교하기 위하여, 균열개시 하중, 파괴인성 및 최종균열전파각을 Table 7~10에 나타내었다. 여기서 Con-1은 강도수준이 430 kgf/cm<sup>2</sup>인 콘크리트 디스크로 실험한 결과<sup>5)</sup>이며, Con-2는 본 논문의 실험인 강도수준 783 kgf/cm<sup>2</sup>에 대한 것이다.

Table 6 Results of failure angle by FEA

(Unit : degree)

a/R \ θ(degree)	0	5	10	15	20	25	30
0.3	0	8	17	24	34	38	46
0.4	0	10	18	26	35	40	48
0.5	0	12	24	27	36	43	51
0.6	0	14	30	41	45	53	60

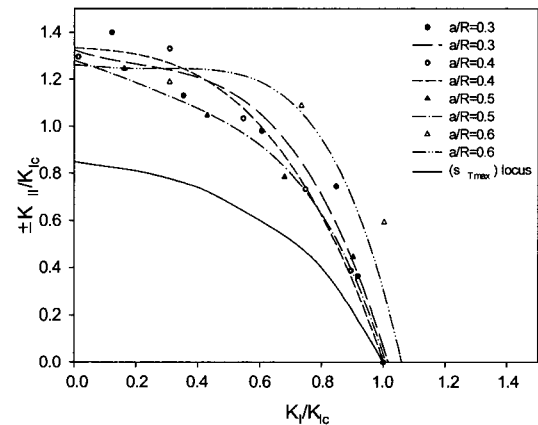


Fig. 10 Comparison between experimental and theoretical fracture locus

Table 7 Crack initiation loads

(Unit : kgf)

a/R \ θ(degree)	Con-1			Con-2		
	0	15	30	0	15	30
0.3	3,690	3,680	3,230	5,400	4,955	4,355
0.4	3,105	3,145	2,760	4,115	3,775	3,325
0.5	2,260	2,185	2,005	3,145	2,730	2,405
0.6	1,820	1,555	1,205	2,300	2,085	1,785

Table 8 Fracture toughness ( $K_{Ic}$ ) (Unit :  $\text{kgf/cm}^{3/2}$ )

a/R	0.3	0.4	0.5	0.6
Con-1	44.58	47.42	43.06	43.21
Con-2	65.23	62.84	59.92	54.61

Table 9 Experimental results of failure angle (Unit : degree)

a/R	$\theta$ (degree)	Con-1			Con-2		
		0	15	30	0	15	30
0.3	top	0	25	39	0	22	43
	bottom	0	23	42	0	22	42
0.4	top	0	23	46	0	26	47
	bottom	0	21	44	0	25	50
0.5	top	0	30	49	0	35	52
	bottom	0	30	55	0	33	54
0.6	top	0	30	65	0	32	58
	bottom	0	30	61	0	35	58

Table 10 Results of failure angle by FEA (Unit : degree)

a/R	$\theta$ (degree)	Con-1			Con-2		
		0	15	30	0	15	30
0.3	top	0	24	45	0	24	46
	bottom	0	24	45	0	24	46
0.4	top	0	20	46	0	26	48
	bottom	0	20	46	0	26	48
0.5	top	0	28	51	0	27	51
	bottom	0	28	51	0	27	51
0.6	top	0	35	62	0	41	60
	bottom	0	35	62	0	41	60

Table 7~10은 콘크리트의 강도수준의 차이는 균열개시 하중, 파괴인성 등에 영향을 끼치지만 최종 균열전파각의 변화에는 큰 영향이 없음을 보여준다. 균열개시하중은 콘크리트 강도수준이 증가함에 따라 대체적으로 증가하며, a/R과 재하각도가 작을수록 증가하는 정도는 크게 나타났다. 파괴인성도 강도수준 증가에 따라 증가하며 a/R이 작을수록 증가하는 정도는 크게 나타났다.

### 3.5 고찰

Fig. 7에서와 같이 모드 I 상태인  $\theta = 0^\circ$  에서는 균열면을 따라 균열이 전파되고, 혼합모드 상태인  $\theta = 5^\circ \sim 30^\circ$  에서는 균열선단에서 하중 작용방향으로 균열이 전파되는 것을 알 수 있다.

실측된 최종 균열전파각(Table 4)과 수치해석에 의한

최종 균열전파각(Table 6)은 일치성이 높게 나타났다.

Irobe와 Peng의 연구결과와 마찬가지로 Fig. 10과 같이 실험에 의한 파괴 포락선이 최대 원주방향 인장응력이론에 의한 파괴 포락선보다 바깥쪽에 위치하였다. 이것은 전단응력이 작용할 경우 균열면 위치에 있는 균열의 전파가 인장응력이 작용하는 경우에 비하여 어렵기 때문이다.

강도수준이  $430 \text{ kgf/cm}^2$ 인 콘크리트 디스크와  $783 \text{ kgf/cm}^2$ 인 콘크리트 디스크의 실험결과를 비교할 때 균열개시하중과 파괴인성 값은 차이가 나지만 실험과 유한요소해석에 의한 최종 균열전파각은 비슷하였다.

## 4. 결론

1) 모드 I 상태의 하중을 받는 재료의 균열은 균열면을 따라 전파하고, 혼합모드 상태에서는 균열선단에서 하중 작용방향으로 전파된다.

2) 최대 원주방향 인장응력 기준을 적용한 수치해석으로 구한 최종 균열전파각과 실험으로 구한 최종 균열전파각은 좋은 일치를 보여주어, 본 논문에서 사용된 유한요소 프로그램(LFRC)은 혼합모드에 대한 균열전파각을 예측하는 데 효과적임을 알 수 있었다.

3) 콘크리트의 강도수준에 따른 파괴특성의 차이는 균열개시하중과 파괴인성 등에 영향을 끼치지만 최종 균열전파각의 변화에는 큰 영향이 없었다.

4) 최대 원주방향 인장응력이론에 의한 파괴 포락선과 실험에 의한 포락선이 일치하지 않는 이유는 콘크리트에서 혼합모드와 면내전단모드(모드 II) 파괴를 유발하는 데 필요한 에너지량이 크기 때문이라고 판단된다. 이것은 특히 콘크리트에서 골재 맞물림에 의한 균열 저항성이 균열전파 에너지에 영향을 주기 때문이다.

5) RILEM 위원회에서 제시한 3점 휨 시험은 중앙에 노치가 있는 보를 사용하여 하중-변위 곡선을 얻어 파괴에너지( $G_F$ )를 구한 뒤 파괴인성을 결정해야하는 어려움이 있지만, 디스크를 이용하면 균열개시하중만 측정하여 파괴인성을 쉽게 구할 수 있어 혼합모드 파괴해석에 더욱 효과적이었다.

## 참고문헌

1. Awaji, H. and Sato, S., "Combined Modex Fracture Toughness Measurement by the Disk Test," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.100, 1978, pp.175~182.
2. 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, 1982, pp.279~291.

3. Irobe, M. and Peng, S. Y., "Mixed-Mode and Mode II Fracture in Concrete", *Fracture Mechanics of Concrete Structures* (ed. Bazant Z. P.), Elsevier Applied Science, London and New York, 1993, pp.719~726.
4. Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C., "*Fracture Mechanics of Concrete*", John Wiley & Sons, INC, 1995, pp.162~192.
5. 진치섭, 김희성, 정진호, "콘크리트 디스크를 이용한 혼합모드 파괴", 한국콘크리트학회 논문집, 제 12권 2호, 2000, pp.63~69.
6. Erdogan, F. and Sih, G. C., "On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear", ASME, *Journal of Basic Engineering*, Vol.85, pp.519~527, 1963.
7. 진치섭, "파괴역학의 기초", 부산대학교 대학원 토목공학과 강의노트, 1999, pp.1~390.
8. 이광명, "모르타르-골재 계면의 파괴인성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제15권 2호, 1995, pp. 357~365.

## 요 약

RILEM 위원회가 제시한 3점 휨 시험은 하중-변위곡선 형상이 불규칙하고 안정된 균열 발생 후 최종 균열이 발생하기 때문에 정확한 파괴인성을 구하는 것은 어렵다. 그러나 디스크 시험은 균열개시하중만 알면 쉽게 파괴인성을 구할 수 있다. 따라서, RILEM 위원회가 제시한 3점 휨 시험보다 파괴인성 계산의 편리함을 보이기 위해 중앙에 노치가 있는 고강도 콘크리트 디스크를 실험하여 실험결과와 유한요소해석에 의한 결과를 비교하였다. 또한 실험에 의한 파괴 포락선과 이론에 의한 파괴 포락선도 비교하였으며, 콘크리트 강도수준에 따른 파괴특성의 차이를 나타내었다.

본 연구의 결과는 다음과 같다. 유한요소해석과 실험결과를 비교해 볼 때, 최대 원주방향 인장응력 이론을 적용한 유한요소해석은 실험결과와 좋은 일치율을 보였다. 그리고 콘크리트의 강도수준에 따른 파괴특성의 차이는 균열개시하중과 파괴인성 등에 영향을 끼치지만 최종 균열전파각의 변화에는 큰 영향이 없었다. 또한, 최대 원주방향 인장응력이론에 의한 파괴 포락선과 실험에 의한 포락선이 일치하지 않는 이유는 콘크리트에서 혼합모드와 면내전단모드(모드 II) 파괴를 유발하는 데 필요한 에너지량이 크기 때문이라고 판단된다.

**핵심용어 :** 고강도, 파괴인성, 파괴 포락선, 콘크리트 디스크