

고강도 콘크리트 디스크를 이용한 혼합모드 균열전파

Mixed Mode Crack Propagation using the High Strength Concrete Disk

진치섭* 김희성** 박헌재*** 김민철****

Jin, Chi-Sub Kim, Hee-Sung Park, Hyun-Jae Kim, Min-Cheul

ABSTRACT

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

We examined the cracked high strength concrete disk and the experimental results were compared with the results by finite element analysis(FEA). Also, we compared experimental fracture locus with theoretical fracture locus.

1. 서론

파괴역학적 관점에서 콘크리트와 같은 취성재료의 특성이 활발히 연구되어 왔다. 취성재료의 혼합모드 파괴인성을 연구하기 위하여 Awaji와 Sato¹⁾는 중앙에 노치가 있는 디스크에 반경방향 압축력을 가하는 실험을 수행하였다. 이때 사용한 재료는 흑연, 석고 및 대리석이었다. 또한, Atkinson 등²⁾은 디스크의 응력확대계수를 구하는 식을 정식화하였으며, Irobe와 Peng³⁾은 콘크리트 디스크에 대하여 응력확대계수를 탄성론으로 계산하고 유한요소법으로 비교하였는데 실험결과는 최대 원주방향 인장응력기준 궤적의 외측에 존재함을 보여주었다.

본 연구에서는 파괴역학적 파라메타 중 하나인 파괴인성을 구하기 위해 RILEM 위원회(Committees 50-FMC와 TC89-FNT)가 제시한 3점 휨 시험⁴⁾보다 중앙에 노치가 있는 디스크의 쪼갠 인장시험이 더 유용함을 확인하는 데 그 목적이 있다. 이를 위해 고강도 콘크리트를 사용하여 중앙에 노치가 있는 디스크의 쪼갠인장시험을 통해 파괴인성을 구하고 혼합모드 상태의 균열전파를 추적하였다. 그리고, 유한요소법을 이용하여 노치가 있는 디스크의 응력확대계수를 구하고 실험과 유한요소법에 의한 최종균열전파각을 서로 비교하였으며, 실험에 대한 파괴 포락선을 그려 최대 원주방향 인장응력기준에 의한 파괴 포락선과 비교하였다. 또한, 강도수준이 디스크의 파괴특성에 미치는 영향을 알기 위해 강도수준이 다른 콘크리트를 사용한 연구결과⁵⁾와 파괴특성을 비교하였다.

*정회원, 부산대학교 토목공학과 교수

**정회원, 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원

***정회원, 부산대학교 토목공학과 박사과정

****정회원, 부산대학교 토목공학과 석사과정

2. 콘크리트의 혼합모드 균열전파

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

최대 원주방향 인장응력 이론은 Erdogan 과 Sih⁽⁶⁾에 의해 제안된 것으로 균열은 균열선단에서 최대 인장응력을 가지는 방향에 수직한 방향으로 진전한다고 보았다. 혼합모드상태의 균열전파이론 중에서 일반적으로 가장 널리 쓰이고 있는 이론이다.

혼합모드상태의 균열에서, 선단 부근의 응력상태를 극좌표로 나타내면 식 (1) 과 같다.

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2}\right) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2K_{II} \tan \frac{\theta}{2} \right] + \dots \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] + \dots \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) \right] + \dots\end{aligned}\quad (1)$$

이 때의 응력성분은 그림 1과 같다.

이 최대 원주방향 인장응력 이론은 아래와 같을 때 균열전파가 시작된다고 가정한다.

- ① 균열은 crack tip 에서 시작하고 방사상으로 진파된다.
- ② 균열은 최대 인장응력방향에 연직인 면내에서 시작된다.
- ③ 균열은 $\sigma_{\theta_{max}}$ 가 재료의 한계치에 달할 때 성장한다.

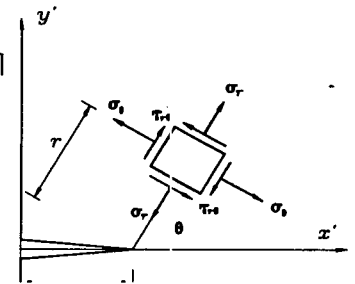


그림 1 균열선단에서의 응력성분

σ_θ 는 $\tau_{r\theta} = 0$ 일 때 최대값이 되므로 식 (1) 에서

$$\tau_{r\theta} = 0 \Rightarrow \cos \frac{\theta_0}{2} \left[K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) \right] = 0 \quad (2)$$

이 된다. 식 (2) 는 식 (3) 과 같은 두 개의 해를 가진다.

$$\theta_0 = \pm \pi \text{ (trivial)}, \quad K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) = 0 \quad (3)$$

따라서, 균열전파각은 식 (4) 로 구할 수 있다.

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

또한, 최대 원주방향 인장응력을 재료의 한계치와 등치시키면 식 (5) 를 얻는다.

$$\begin{aligned}\sigma_\theta \sqrt{2\pi r} &= K_{Ic} \\ &= \cos \frac{\theta_0}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right]\end{aligned}\quad (5)$$

$\sigma_{\theta_{max}}$ 이론으로 예상되는 파괴계적식은 식 (5) 를 표준화하면 식 (6) 과 같다.

$$\frac{K_I}{K_{Ic}} \cos^3 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} \frac{K_{II}}{K_{Ic}} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \theta_0 = 1 \quad (6)$$

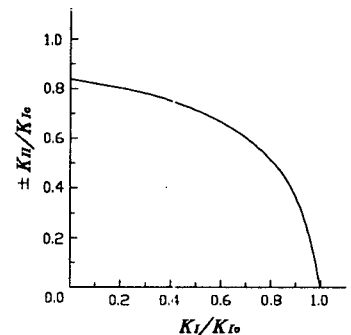


그림 2 $\sigma_{\theta_{max}}$ 이론 파괴계적

2.2 균열진전의 판단

균열선단에서 균열의 진전 여부를 판단하기 위해 먼저 주어진 균열선단의 위치와 주어진 하중에서의 응력확대계수를 구하여 새로운 균열 전파각 θ_0 를 산정한 뒤, 균열선단에서의 국부적인 안정성을 판단하는 순서로 진행된다. 최대 원주방향 인장응력($\sigma_{\theta_{max}}$)기준으로 계산된 응력확대계수쌍이 그림 2에 보여지는 파괴 포락선안에 있으면 균열은 응력확대계수가 더욱 커지지 않는 한 진전되지 않고, 파괴 포락선 밖에 있으면 균열은 불안정하게 되어 균열이 자유면에 도달할 때까지나 또는 응력확대계수쌍이 포락선 안으로 돌아올 때까지 균열은 계속하여 전파하게 된다

3. 디스크 실험 및 유한요소해석

3.1 실험체 제작 및 실험방법

압축강도수준이 783 kgf/cm^2 인 콘크리트를 제작하였다. 그때의 콘크리트의 배합은 표 1과 같다. 디스크의 반경 R은 15 cm이고, 상대 균열길이 비(a/R)는 0.3, 0.4, 0.5, 0.6이며 두께 t는 7.5 cm이다 (그림 3 참조). a/R에 대하여 각각 10개씩 모두 40개의 디스크를 제작하였다.

표 1 콘크리트 배합표

Gmax (mm)	슬럼프 (cm)	W/C (%)	s/a (%)	단 위 량 (kg/m ³)				
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	AE 감수제
13	10±1.0	33	48	192	583	677	767	1.165

모든 실험체는 타설 24시간 후에 몰드에서 꺼내어 KS F 2329에 따라서 수중양생하였다. 디스크는 균열 축에 대해 $0^\circ \sim 30^\circ$ 까지 5° 간격으로 각각 나눠 그림 4와 같이 UTM을 사용하여 0.1 mm/min의 속도로 하중을 재하하였다.

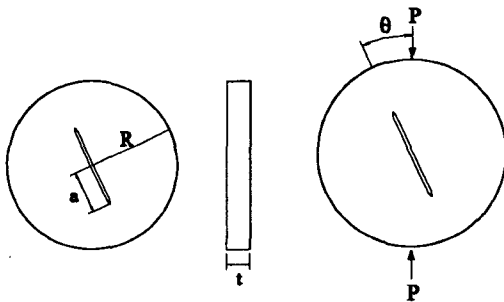


그림 3 실험체의 형상 및 크기

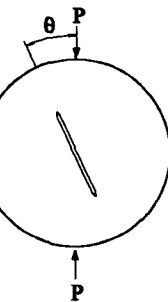


그림 4 하중 재하 각도

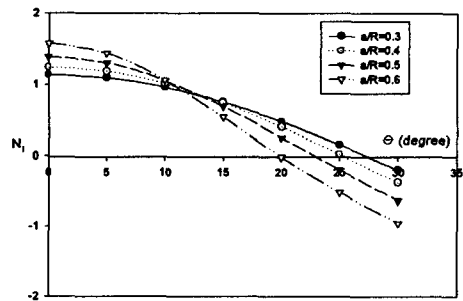


그림 5 하중재하각도 vs N_I

3.2 실험 결과 및 분석

각 실험에서 균열개시하중을 파괴하중의 약 50%로 간주하여 a/R = 0.5일 때의 균열 개시 하중을 표 2에 나타내었다. 또한 모드 I 파괴인성(K_{Ic})은 식 (7)과 $\theta=0^\circ$ 에서 그림 5를 이용하여 표 3과 같은 값을 구하였다²⁾. 여기서 N_I 는 Atkinson²⁾이 수치해석을 통해 상대 균열길이 비와 하중 재하 각도의 변화에 따른 급수의 형태로 정식화한 값이다.

$$K_{Ic} = \frac{P_{ini}}{R \cdot t} \sqrt{\frac{a}{\pi}} N_I \quad (7)$$

표 2 균열 개시 하중, P_{ini} ($a/R=0.5$)

θ (°)	0	5	10	15	20	25	30
P_{ini} (kgf)	3145	3030	2820	2730	2760	2550	2405

표 3 파괴인성 (K_{Ic})

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

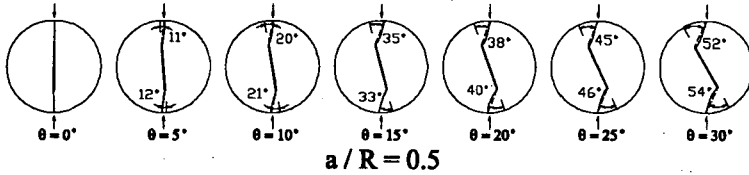


그림 6 실험에 의한 균열전파 경로

실험에서 측정된 디스크의 균열전파 경로를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 Mode I 상태인 $\theta=0^\circ$ 에서는 균열면을 따라 균열이 전파하고, 혼합모드상태인 $\theta=5^\circ \sim 30^\circ$ 에서는 균열선단에서 하중 작용방향으로 균열이 전파되는 것을 알 수 있다.

3.3 유한요소해석 및 결과

본 연구에서 사용한 LFRC⁷⁾ 프로그램에 최대 원주방향 인장응력 이론을 적용하여 콘크리트 디스크의 균열전파 경로를 유한요소로 해석하였다. 요소분할은 8절점 등매개요소를 사용하고 균열선단부에서는 1/4점 6절점 삼각형 특이요소를 사용하였다. 각각 경우에 대한 하중은 실험에서 구해진 값을 초기 하중으로 사용하여 하중을 점진적으로 증가시켜 균열전파를 해석하였다. 유한요소 해석에 의한 균열전파 경로는 그림 7에 나타내었다.

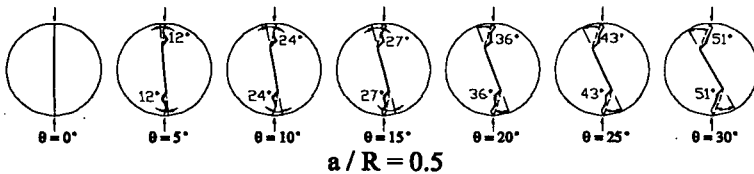


그림 7 LFRC에 의한 균열전파 경로

3.4 파괴 포락선과 강도수준이 다른 실험결과와의 비교

그림 8에서 보는바와 같이 모든 결과 값들이 최대 원주방향 인장응력기준의 이론곡선보다 바깥쪽에 위치하는 것을 알 수 있다. 이것은 전단효과가 커질수록 즉, 균열면이 닫힘으로서 마찰에 의해 균열의 전파가 인장응력이 작용하는 경우에 비하여 어렵다는 것을 의미한다⁸⁾. 그리고, 강도수준이 430 kgf/cm^{3/2}인 콘크리트 디스크(Con-1)로 실험한 다른 실험결과와 본 논문의 실험결과인 강도 783 kgf/cm^{3/2} 콘크리트 디스크(Con-2)를 표 4와 표 5에서 비교하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 모든 결과 값들이 최대 원주방향 인장응력 기준의 이론곡선보다 바깥쪽에 위치하는 것을 알 수 있다. 이것은 전단효과가 커질수록 즉, 균열면이 닫힘으로서 마찰에 의해 균열의 전파가 인장응력이 작용하는 경우에 비하여 어렵다는 것을 의미한다.

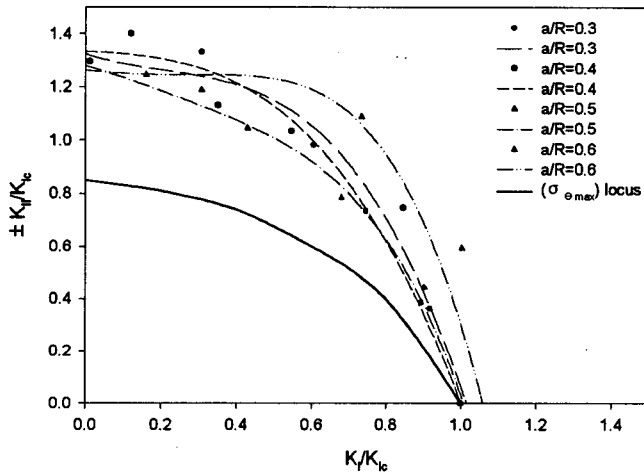


그림 8 실험과 이론에 의한 파괴 포락선 비교

표 4 파괴 인성 비교 (K_{Ic} : 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

표 5 실측에 의한 균열 전파각 (단위 : °)

a/R	재하각도	Con-1			Con-2		
		0	15	30	0	15	30
0.3	상	0	25	39	0	22	43
	하	0	23	42	0	22	42
0.4	상	0	23	46	0	26	47
	하	0	21	44	0	25	50
0.5	상	0	30	49	0	35	52
	하	0	30	55	0	33	54
0.6	상	0	30	65	0	32	58
	하	0	30	61	0	35	58

표 4와 표 5에서 알 수 있듯이 콘크리트의 강도수준의 차이는 파괴인성 등에 영향을 끼치지만 최종균열전파각 변화와는 무관함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 혼합모드 상태의 하중을 받는 고강도 콘크리트의 균열전파를 조사하였다. 강도 수준이 다른 실험결과와 비교하고, 최대 원주방향 인장응력 이론에 의한 파괴 포락선과 실험에 의한 곡선을 작성함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 모드 I상태의 하중을 받는 재료의 균열은 균열면을 따라 전파하고 혼합모드 상태에서는 균열선단에서 하중 작용방향으로 전파된다.
- 2) 최대 원주방향 인장응력 기준을 적용한 수치해에서 얻은 최종 파단각과 실험에서 얻은 최종 파단각이 거의 일치함을 알 수 있다.
- 3) 콘크리트의 강도수준의 차이는 파괴인성 등에 영향을 주지만 최종균열전파각 변화와는 무관함을 알 수 있다.
- 4) 최대원주방향 인장응력이론에 의한 파괴 포락선과 실험에 의한 포락선이 일치하지 않는 이유는 혼합모드의 미끄러짐(모드 II) 파괴 유발에 대한 큰 에너지 요구에 의존한다고 고려된다. 이것은 특히 콘크리트에서 골재의 존재는 이런 파괴 과정에서 무시할 수 없다.
- 5) RILEM 위원회에서 제시한 3점 휨 시험보다 중앙에 노치가 있는 디스크의 조합인장시험이 콘크리트의 파괴인성을 구하는데 더 간편함을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

- 1) Awaji, H. and Sato, S., "Combined Mode Fracture Toughness Measurement by the Disk Test", *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 100, pp. 175-182, April 1978.
- 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, pp. 279-291, April 1982.
- 3) Irobe, M. and Peng, S. Y., "Mixed-Mode and Mode II Fracture in Concrete", in *Fracture Mechanics of Concrete Structures*(ed Bazant Z.P.), Elsevier Applied Science, London and New York, pp. 719-726, 1993
- 4) Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C., "Fracture Mechanics of Concrete", John Wiley & Sons, INC, pp. 162-192, 1995.
- 5) 진치섭, 김희성, 정진호, "콘크리트 디스크를 이용한 혼합모드 파괴", *콘크리트학회 논문집*, 제12권 2호, pp. 63-69, 2000. 4.
- 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, pp. 1-390, 1999.
- 8) 이광명, "모르타르-골재 계면의 파괴인성에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 제15권 제2호, pp. 357-365, 1995.