
콘크리트 디스크를 이용한 혼합모드 파괴

The Mixed Mode Fracture Using Concrete Disk



진치섭*
Jin, Chi-Sub



김희성**
Kim, Hee-Sung



정진호***
Jeong, Jin-Ho

ABSTRACT

This study investigates a new method of using a concrete disk to calculate stress intensity factor (SIF) for mixed mode cases. The results indicate that the disk method is more accurate than three point bending test (TPB) in obtaining correct SIF values for mixed mode fracture propagation. Stress intensity factors K_I and K_{II} are calculated using a center notched disk subjected to splitting load. The notch angle is calculated by finite element (FEM). Fracture toughness K_{Ic} of the concrete is obtained from the load intensities at the initiation of crack propagation.

According to the finite element analysis (FEA) and disk test, the results show that mode I and mixed mode cracks propagate toward the directions of crack face and loading point, respectively. The results from FEA with maximum stress theory compare well with the experimental date. Unlike TPB method where an accurate fracture toughness value is difficult to obtain due to the irregular shape of load deflection curve and delayed final crack propagation (following slow stable cracking), fracture toughness value is easily measured in the disk test from the crack initial load. Therefore, it is safe to conclude that disk method is more advantageous than TPB method in analyzing combined mode fracture problems.

Keywords : concrete disk, mixed mode, fracture toughness, stress intensity factor.

* 정회원, 부산대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원
*** (주)대한건설단지 사원, 공학석사

• 본 논문에 대한 토의를 2000년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2000년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

실제로 사용되고 있는 철근콘크리트 부재나 구조물에 균열이 존재하면 이로 인해 구조물은 파괴될 수 있는데, 이 균열은 모든 구조물에서 생길 수 있다. 즉 재료가 사용 전에 이미 약간의 균열을 가지는 경우도 있고, 또는 구조물 제작 도중이나 사용 도중에 균열이 생기는 경우도 생각할 수 있다. 그래서 이러한 균열로 인하여 부재나 구조물은 재료의 항복응력에 훨씬 못 미치는 낮은 응력에서도 파괴가 되는 것이다. 따라서 이러한 것에 대비하기 위하여 균열을 가진 부재의 강도특성을 취급하는 학문 분야의 필요성이 인식되어 왔으며, 이런 요구로 발전된 것이 파괴역학이다.

이런 파괴역학적 관점에서 콘크리트의 특성이 광범위하고 깊이 있게 연구되어 왔다. 이 분야에 대한 실험적 방법과 수치적 기법이 선형문제와 비선형문제의 해를 통하여 동시에 발전하여 왔다. 그러나 지금도 파괴역학의 적용에는 해결할 부분이 많이 남아 있다.

취성재료의 혼합모드 파괴인성을 연구하기 위하여 Awaji와 Sato⁽¹⁾는 중앙에 노치가 있는 디스크에 반경방향 압축력을 가하는 실험을 수행하였다. 사용한 재료는 흑연, 석고 및 대리석이었다. 그후 Atkinson등⁽²⁾은 디스크의 응력확대계수를 구하는 식을 정식화하고 PMMA(polymethyl methacrylate)를 이용하여 혼합모드 파괴거동을 조사하였다. 한편 Irobe와 Peng⁽³⁾은 콘크리트 디스크에 대하여 응력확대계수를 탄성론으로 계산하고 유한요소법으로 비교하였으며 실험결과도 제시하였는데 모든 실험 값이 최대 원주방향 인장응력기준 궤적의 외측에 존재하였다.

본 논문에서는 콘크리트의 혼합모드 균열전파를 연구하기 위하여 중앙에 노치가 있는 콘크리트-디스크를 제작하였고, 노치면과 경사지게 쪼갬 인장하중을 가하여 균열 개시 하중을 구하였다. 이를 이용하여 응력확대계수를 구하였고, 유한요소해석 결과와 비교하여 혼합모드 균열전파를 추적하였다.

2. 콘크리트의 혼합모드 균열전파

2.1 최대 원주방향 인장응력 이론

최대 원주방향 인장응력 이론은 Erdogan과 Sih⁽⁴⁾에 의해 제안된 것으로 균열은 균열선단에서 최대 인장응력을 가지는 방향에 수직인 방향으로 진전한다고 보았다. 혼합모드 상태의 균열전파 이론 중에서 일반적으로 가장 널리 쓰이고 있는 이론이다.

혼합모드상태의 균열전파에서, 균열선단 부근의 임의 위치 (r, θ) 에서의 응력상태를 극좌표로 나타내면 식 (1)과 같다

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

여기서 K_I 과 K_{II} 는 각각 열림모드 및 면내전단 모드에서의 응력확대계수이다.

이에 대한 원주방향 인장응력성분 (σ_θ)과 반경방향 응력성분 (σ_r) 및 전단응력성분 ($\tau_{r\theta}$)은 Fig. 1과 같다.

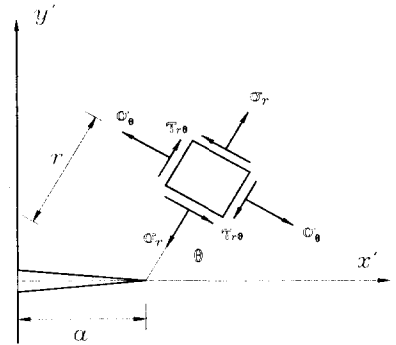


Fig. 1 Stress components around crack tip

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

- (1) 균열은 균열선단에서 시작되고 방사상으로 성장한다.
- (2) 균열은 최대 인장응력방향에 연직인 면내에서 시작된다.
- (3) 균열은 $\sigma_{\theta max}$ 가 재료의 한계치에 달할 때 성장한다.

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

$$\cos \frac{\theta_0}{2} [K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1)] = 0 \quad (2)$$

에 의해 식 (2)는 식 (3)과 같은 두 개의 해를 가진다.

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

따라서 균열전파각은 식 (4)로 구할 수 있다.

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

또 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 파괴궤적식은 식 (5)를 표준화하여 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

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

2. 2 균열 전진의 판단

균열선단에서 균열의 전진 여부를 판단하기 위해, 먼저 주어진 균열선단의 위치와 주어진 하중에서의 응력확대계수를 구하여 새로운 균열 전파각 θ_0 를 얻은 뒤, 균열선단에서의 국부적인 안정성을 판단하는 순서로 진행된다. $\sigma_{\theta_{max}}$ 기준으로 계산된 응력확대계수 쌍이 Fig. 2에 보여지는 파괴궤적선 안에 있으면, 균열은 응력확대계수가 더욱 커지지 않는 한 전진되지 않고, 밖에 있으면 균열은 불안정하게 되어 균열이 자유면에 도달할 때까지나 또는 응력확대계수 쌍이 궤적선 안으로 돌아올 때까지 균열은 계속하여 전파하게 된다.

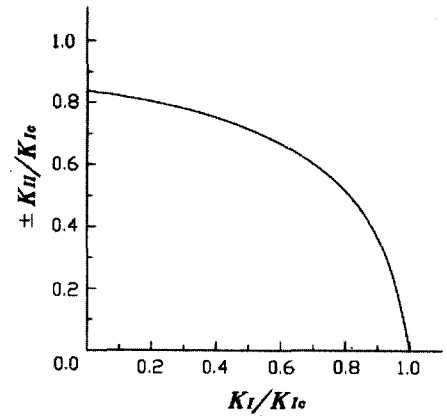


Fig. 2 Locus of fracture diagram for $\sigma_{\theta_{max}}$ theory

3. 디스크 실험 및 유한요소해석

3.1 실험체 제작 및 실험 방법

콘크리트의 혼합모드 균열전파에 대한 파괴특성을 조사하기 위하여 강도수준이 430 kgf/cm² 인 콘크리트 디스크를 제작하였다. 사용된 콘크리트의 배합은 Table 1과 같다.

콘크리트의 혼합은 강제식 믹서를 사용하여 시멘트와 골재를 투입한 후 2분간 건비빔을 실시하고, 물을 투입하여 8분 정도 충분한 비빔을 실시하였다.

모든 실험체는 타설 24시간 후에 몰드에서 꺼내어 수중양생하였다. 강도 측정은 $\phi 10 \times 20$ cm의 원주공시체를 사용하여 혼합모드 균열전파에 대한 실험을 수행하는 재령 145일에 압축강도를 측정하였다.

실험체는 중앙에 두 개의 균열선단이 있는 디스크로 제작하였다. 이때 초기 균열은 알루미늄판을 이용하여 콘크리트 타설 시 만들었다. 실험할 디스크의 상대 균열길이 비(a/R) 0.3, 0.4,

Table 1 Mix proportion of concrete

G _{max} (mm)	Slump (cm)	w/c (%)	s/a (%)	Unit weight(kgf/m ³)			
				C	W	S	G
13	12±1.0	50	51.3	390	195	838	841

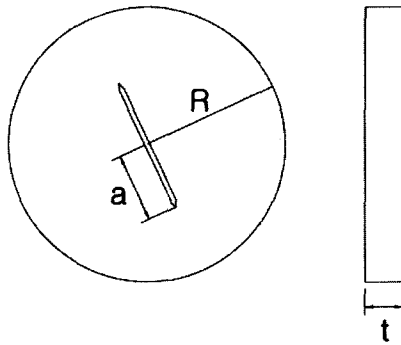


Fig. 3 Geometry and size of specimen

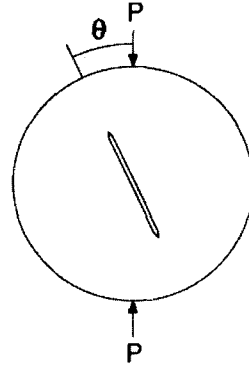


Fig. 4 Angle of applied load

0.5, 0.6의 4가지를 각각 10개씩 제작하였고 반경 R은 15 cm이다.(Fig. 3 참조)

디스크는 균열 축에 대해 0°, 15°, 30°, 45°, 60°의 각도로 하중을 재하하였고 Fig. 4에 하중 재하 각도가 나타나 있다. 실험은 UTM을 사용하여 변위제어로 수행하였고 재하속도를 0.1 mm/min로 하였다. 디스크에 파괴하중의 1/3 수준까지 loading-unloading을 3회 반복한 후 일정속도로 파괴가 일어날 때까지 하중을 증가시켰다.

3.2 실험 결과 및 분석

각각의 실험에서 디스크가 파괴될 때까지 하중을 증가시켰는데 균열 개시 하중은 파괴하중의 약 50퍼센트에서 발견되었다. 상대균열 길이 비에 따른 균열 개시 하중은 Table 2에 있다. 또한 파괴인성(K_{Ic})은 식 (7)과 Fig. 5를 이용하여 구하였다(Table 3).⁽²⁾

Table 2 Crack initiation loads(P_{ini}) according to relative crack length

unit : kgf

a/R \ $\theta(^{\circ})$	0	15	30	45	60
0.3	3,690	3,680	3,230	2,975	3,680
0.4	3,105	3,145	2,760	2,535	2,590
0.5	2,260	2,185	2,005	1,620	1,915
0.6	1,820	1,555	1,205	1,025	1,540

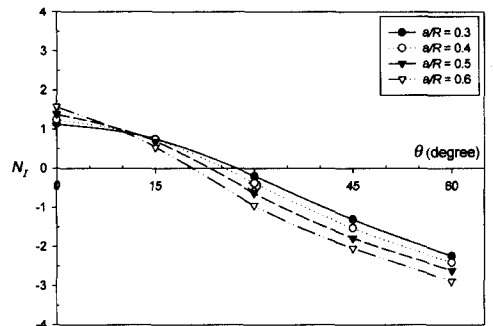


Fig. 5 Angle of applied load according to relative crack length vs N_I

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

여기서 N_I 는 상대균열 길이 비와 하중 재하 각도의 함수로 구해지는 무차원 계수이다.

실험에서 측정된 디스크의 균열전파 경로를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 모드 I 상태인 $\theta = 0^{\circ}$ 에서는 균열면을 따라 균열이 전파되고 혼합모드상태인 $\theta = 15^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 에서는 균열선단에서 하중 작용방향으로 균열이 전파되는 것을 알 수 있었다. $\theta = 60^{\circ}$ 일 때는 균열이 균열선단에서 발생되지 않고 균열선단에서 디스크의 중심 쪽으로 조금 이동한 지점에서 발생하였다.

아래 Table 3과 Table 4에는 각각 $a/R = 0.3 \sim 0.6$ 일 때의 파괴인성과 최종 균열전파각을 요약하였다.

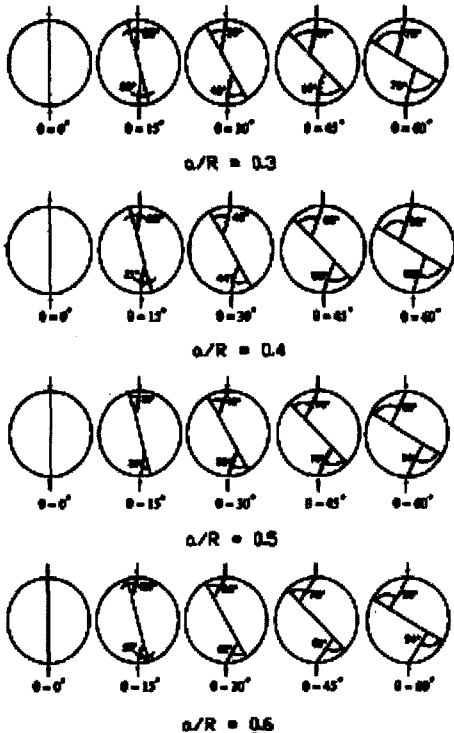


Fig. 6 Crack propagation path by experiments

Table 3 Fracture toughness (K_{Ic})
unit : $\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-3/2}$

a/R	0.3	0.4	0.5	0.6
K_{Ic}	44.58	47.42	43.06	43.21

Table 4 Crack propagation angle by experiments
unit : degree (°)

a/R	θ (°)	0	15	30	45	60
		0.3	0	25	39	57
	bottom	0	23	42	60	78
0.4	top	0	23	46	60	82
	bottom	0	21	44	58	80
0.5	top	0	30	49	75	86
	bottom	0	30	55	70	89
0.6	top	0	30	65	78	98
	bottom	0	30	61	81	94

3.3 유한요소해석과 계산 예

본 연구에서 사용한 프로그램(LFRC)⁽⁵⁾에 최대 원주방향 인장응력 이론을 적용하여 콘크리트 디스크의 균열전파 경로를 유한요소법으로 해석하였다. Fig. 7은 유한요소 해석에 사용된 디스크의 요소분할을 보여주고 있다. 요소분할은 8절점 사변형 등매개변수요소를 사용하고 균열선단 부근에서 1/4점 6절점 삼각형 특이요소를 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 압축강도, 탄성계수 및 프와송비를 Table 5에 나타내었다.

각 경우에 대한 하중은 실험에서 구해진 균열 개시 하중을 초기 하중으로 사용하여, 하중을 점진적으로 증가시켜 균열전파 경로를 해석하였다. 유한요소 해석에 의한 균열전파 경로는 Fig. 8에 있다.

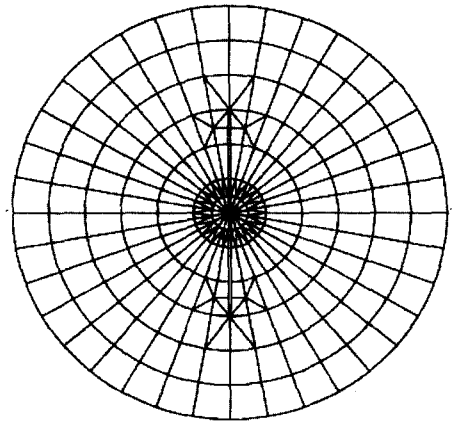


Fig. 7 Finite element mesh of disk

Table 5 Material properties using finite element analysis

Compressive strength (kgf/cm^2)	Elastic modulus (kgf/cm^2)	Poisson's ratio
430	287,700	0.18

아래 Table 6에 프로그램(LFRC)을 이용해 유한요소 해석을 수행한 콘크리트 디스크의 최종 균열전파 각을 요약하였다.

Table 6 Final crack propagation angle by finite element analysis
unit : degree(°)

$a/R \backslash \theta(^{\circ})$	0	15	30	45	60
0.3	0	24	45	64	76
0.4	0	20	46	64	84
0.5	0	28	51	72	92
0.6	0	35	62	83	98

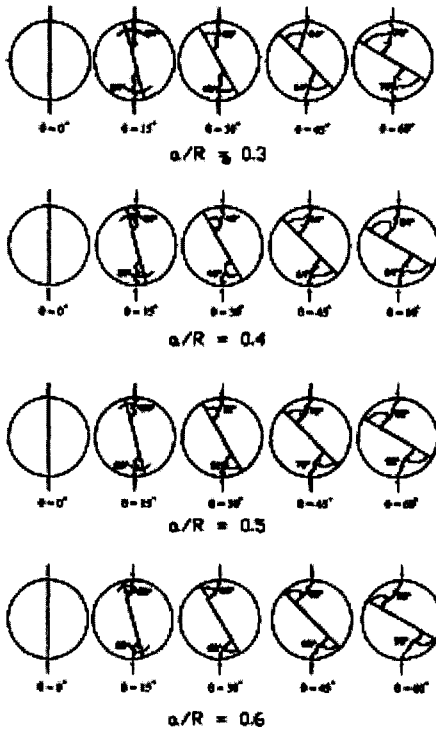


Fig. 8 Crack propagation path by numerical analysis

3.4 고찰

- 1) Fig. 6에서 보는 바와 같이 모드 I 상태인 $\theta = 0^{\circ}$ 에서는 균열면을 따라 균열이 전파되고 혼합모드상태인 $\theta = 15^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 에서는 균열선단에서 하중 작용방향으로 균열이 전파되는 것을 알 수 있다. $\theta = 60^{\circ}$ 일 때는 균열이 균열선단에서 발생되지 않고 균열선단에서 디스크의 중심 쪽으로 조금 이동한

지점에서 발생하였다. 이러한 현상은 θ 가 증가할 수록 전단효과가 증가하여 균열전진에 대한 저항성이 증가하는 것을 의미한다.^(6,7)

- 2) 실측된 최종 균열전파 각(Table 4)과 유한요소해석에 의한 최종 균열전파 각(Table 6)을 비교했을 때 좋은 일치를 보여주었다.
- 3) 재료의 파괴인성(K_{Ic})을 구하기 위하여 주로 3점 휨 시험법이 이용되고 있다. 그러나 이 시험은 중앙에 노치가 있는 보를 사용하여 하중-변위 곡선을 얻어 파괴에너지(G_F)를 구한 뒤 파괴인성을 구해야 하는 어려움이 있다. 그러나 디스크를 이용하면 균열 개시 하중(Table 2)만 측정하여 식(7)과 Fig. 5를 이용하여 파괴인성을 쉽게 구할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 혼합모드 상태의 하중을 받는 디스크의 균열전파를 추적하였다. 최대 원주방향 인장응력 기준을 적용하여 유한요소해석 프로그램의 수치 예에서 구한 결과와 실험에서 측정된 결과를 비교해 봄으로써 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 모드 I 상태의 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 좋은 일치를 나타내고 있어, 본 연구에 적용한 유한요소 프로그램을 혼합모드 균열전파에 효과적으로 적용할 수 있다.
- 3) 파괴인성(K_{Ic})을 구하는 데 3점 휨 시험보다 디스크를 이용하는 것이 더 편리함을 알 수 있었다.

이상의 결과로서 최대 원주방향 인장응력 기준이 콘크리트의 파괴거동 해석에 적용 가능하고, 유한요소해석을 통해 응력확대계수를 구하여 실제 콘크리트와 같은 취성재료의 파괴거동 추적이 가능하다. 또한 파괴인성을 측정할 때 디스크 시험법이 3점 휨 시험보다 더욱 편리한 것으로 판단된다.

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, 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. 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.
5. 진치섭, "파괴역학의 기초", 부산대학교 대학원 토목공학과 강의노트, pp. 1-390, 1999.
6. 이광명, "모르타르-골재 계면의 파괴인성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제15권 제2호, pp. 357-365, 1995.
7. 안기석, 이광명, "모르타르-골재 계면 파괴인성에 영향을 미치는 인자에 관한 연구" 대한토목학회 논문집, 제18권 제I-6호, pp. 819-828, 1998.

요 약

콘크리트 디스크를 이용하여 응력확대계수를 구하고 디스크 시험이 3점 휨 시험보다 더 유용하다는 것을 확인하기 위해 실험하였다. 균열면에 경사진 쪼갬인장하중을 받는, 중앙에 노치가 있는 디스크의 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 를 유한요소해석으로 구하였다. 또한 실험에서 측정된 균열 개시 하중으로 콘크리트의 파괴인성 K_{Ic} 을 구하였다.

유한요소해석과 디스크 실험을 통해 모드 I 상태의 균열은 균열면을 따라 전파하고 혼합모드 상태의 균열은 균열선단에서 하중 작용점으로 전파한다 것을 확인하였다. 유한요소해석과 실험을 비교해 볼 때, 최대 원주방향 인장응력 이론을 적용한 유한요소해석은 실험결과와 좋은 일치를 보였다.

3점 휨 시험은 하중-변위곡선 형상이 불규칙하고 안정된 균열 발생 후 최종균열이 발생하기 때문에 정확한 파괴인성을 구하는 것은 어렵다. 그러나, 디스크 시험은 균열 개시 하중만 알면 쉽게 파괴인성을 구할 수 있다. 따라서 혼합모드 실험을 할 때에는 디스크 시험이 3점 휨 시험보다 더 편리함을 알 수 있었다.

(접수일자 : 1999. 12. 14)