

〈論 文〉

## 균열정지 인성치결정을 위한 원형시편의 제안

이역섭\* · 김상철\* · 송정일\* · 이규철\*\*

(1991년 3월 11일 접수)

### A Proposal of Round Specimen for the Determination of Crack Arrest Toughness

O.S.Lee, S.C.Kim, J.I.Song and K.C.Lee

**Key Words :** Crack Arrest Fracture Toughness(균열정지 파괴인성치), Thick Walled Structure(厚壁構造物), MRL-CLWL Specimen(표준썰기하중시편), Round-CLWL Specimen(원형썰기하중시편), Fast Running Crack(빠른진전균열), Nuclear Reactor Pressure Vessel(핵반응 압력용기)

#### Abstract

During the past decades, much studies have been carried out to render proper theoretical and experimental backgrounds on the use of the static plane strain crack arrest fracture toughness,  $K_{Ia}$  (which seems to be a material property).  $K_{Ia}$  has been used to predict the performance of thick walled structures and considered as an estimator of the resistance of a material to stop a fast running crack. Determination of such a material property is of prime importance to the nuclear reactor pressure vessel and bridge materials industries. However, even standards procedures for measuring toughness associated with fast running cracks have yet to be established. This study proposed a Round-CLWL (crack line wedge load) specimen to compare the determination of the crack arrest fracture toughness with the standard MRL-CLWL specimen. The shape coefficients of the proposed specimen which needs to estimate  $K_{Ia}$  were determined. The validity of the proposed Round-CLWL specimen has partially confirmed experimentally by comparing the crack arrest fracture toughness ( $K_{Ia}$ ) to those obtained by the standard MRL-CLWL PMMA specimen.

#### 1. 서 론

구조물내에서는 불가피한 사고로 빠르게 전파하게 된 균열이 완전히 정지되도록 안전설계를 하지 않으면 매우 큰 인명피해나, 경제적인 손실이 발생하는 대형사고로 발전되는 경우가 허다하다. 그 예로, 원자로의 압력 용기가 열충격이나 과대한 하중

을 받을 때, 중성자의 방사(irradiation)로 인하여 용기재료의 파괴인성치가 저하되어 있기 때문에 작은 결함이 균열 성장의 개시점이 되어 돌발적인 파괴를 발생시키는 것이 확인되었다. 또 장거리 가스 수송 파이프에서 균열이 수킬로미터(km) 이상 빠르게 전파되는 것이 관찰되었으며, 이를 방지하기 위하여 선박 구조물처럼 균열정지장치등을 설치하는 예를 찾아 볼 수 있다<sup>(1,2,3)</sup>. 이러한 경우에는 빠른 속도로 성장하고 있는 균열을 정지시키는 방법론이 공학적으로 중요한 문제가 된다.

Crosley와 Ripling은 불안정 균열의 전파길이를

\* 정회원, 인하대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 산업과학기술연구소 생체연구부

\*\*\* 인하대학교 대학원

감소시키면 응력확대계수에 미치는 동적효과는 무시될 수 있으며, 이 경우 균열 정지시 정적으로 산정한 응력확대계수, 즉 균열정지인성치( $K_{Ia}$ )는 실제 응력확대계수에 이상적으로 접근할 수 있음을 실험을 통하여 밝혔다<sup>(4)</sup>.

본 연구에서는 Rectangular Compact Tension(CT) 시편을 수정하여 만든 표준 시편인 MRL-CLWL시편(material research laboratory-crack line wedge loaded specimen)으로 균열정지인성치를 결정하였다. 그리고 CT 시편과 같은 효과를 갖는 Newman<sup>(5)</sup> 등이 제안한 round compact tension(RCT) 시편을 수정한 Round-CLWL 시편으로 균열정지인성치를 결정하여 상호 비교평가를 하였다. Round-CLWL 시편은 시편제작시 round-bar를 절단하여 시편으로 가공할 수 있으므로 가공성이 좋으며 따라서 가공비가 적게 든다. 특히 균열 위치 및 방향을 임의로 선택하여 가공하기가 용이하므로 방향성이 있는 소재의 균열정지인성치를 결정하는 데 매우 편리한 시편이라 생각된다. 본 논문에서는 Round-CLWL 시편으로  $K_{Ia}$  값을 제안하는 데 필요한 형상계수를 결정하였으며, polymethylmethacrylate(PMMA)를 사용하여 Round-CLWL 시편 채택의 타당성 확인을 위한 MRL-CLWL과 Round-CLWL시편의  $K_{Ia}$ 결정 실험을 하였다.

2. 정적 균열정지의 기본 개념

균열정지는 에너지평형식(energy balance equation)으로 부터 해석될 수 있으며, 동적 균열전파시 균열선단에서의 동적 에너지해방률(dynamic crack tip energy release rate),  $G_{ID}$ 를 다음과 같이 표시할 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$G_{ID} = \frac{dW^D}{dA} - \frac{dU^D}{dA} - \frac{dT^D}{dA} \quad (1)$$

- 여기서, A : 균열길이
- W : 외력이 물체에 한 일(work done)
- U : 변형에너지(strain energy)
- T : 운동에너지(kinetic energy)

Irwin과 Wells<sup>(7)</sup>, Crosley와 Ripling<sup>(4)</sup>은 식(1)을 정적으로 해석하여, 운동에너지 항인  $dT^D/dA$

를 무시하고, 균열정지시에  $dW^D/dA$ 과  $dU^D/dA$ 를 정적인 해석에 의해 유도된 다른 값으로 대체할 수 있다는 가정하에 균열정지현상에 관한 이론을 수정, 전개시켰다. 이 정적인 해석에서의 균열정지 조건은 식(2)와 같다.

$$K_{Ia} \equiv K_{ID, min} > K_I^{stat} \quad (2)$$

여기서,  $K_{ID, min}$ 는 동적파괴인성치의 최소값이다. 식(2)로 제안된 정적 응력확대계수( $K_I^{stat}$ )가 최소의 동적파괴인성치인,  $K_{ID, min}$ 보다 작을때 전파는 균열이 정지되며, 이 최소의 동적파괴인성치가 균열정지인성치( $K_{Ia}$ )가 됨을 의미한다. 이 식은 다시 평면변형인 경우의 응력확대계수(K)와 에너지해방률(G)과의 관계로부터 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_I^{stat} = \frac{E}{1-\nu^2} \left[ \frac{dW^S}{dA} - \frac{dU^S}{dA} \right] \quad (3)$$

여기서,  $\nu$ 는 프와송 비, E는 탄성계수이다.

3. Round CLWL 시편의 균열정지인성치 계산식의 유도

MRL-CLWL시편의 형상계수를 구할 때 Crosley 등이 제안한 방법과 동일한 과정으로, Round-CLWL 시편의 응력확대계수에 대한 형상계수인 무차원 응력확대계수( $Y_c$ )를 결정하였다.

Newman<sup>(5)</sup>은 Srawley<sup>(8)</sup>가 표준CT시편에서 제

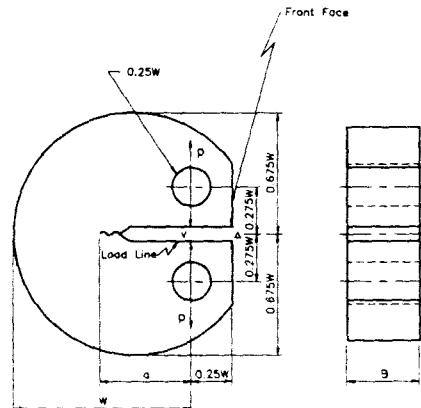


Fig. 1 Configuration of round compact tension specimen

안한 것과 동일한 방법으로 Fig. 1과 같이 ASTM E399에 규정된 RCT 시편에서 작용하중( $P$ )과 응력확대계수( $K$ )와의 관계를 무차원화한 균열길이( $a$ )에 대하여 식(4)와 같이 나타내었다.

$$\frac{KB\sqrt{W}}{P} = f_r(a) \quad (4a)$$

여기서,  $K$ : 응력확대계수  
 $B$ : 시편두께  
 $W$ : 하중선으로부터 시편 끝까지의 길이

$$f_r(a) = \frac{(2+a)}{(1-a)^{3/2}(0.76+4.8a-11.58a^2+11.43a^3-4.08a^4)} \quad (4b)$$

$$a = a_0/W$$

$a_0$ : 하중선으로부터 측정된 초기균열길이  
 에너지해방률( $G$ )과 컴플라이언스( $C$ )와의 관계는 식(5)와 같이 표시된다<sup>(9)</sup>.

$$\frac{K^2}{E} = G = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} \quad (5)$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수이다.

식(4)의 양변을 제곱하여 식(5)와 같게 놓아 정리하면 식(6)이 된다.

$$EB \frac{dC_r}{da} = 2[f_r(a)]^2 \quad (6)$$

여기서 아래첨자  $r$ 는 본 연구에서 제안한 Round-CLWL 시편을 의미하며,  $C_r$ 는 컴플라이언스(단위 하중( $W$ )에 대한 하중선변위( $J_r$ ))이고,  $dC_r/da$ 는 무차원 균열길이에 대한 컴플라이언스의 변화율이다.  $[f_r(a)]^2$ 은 식(4b)를 제곱함으로써 다음과 같이 다항식의 형태로 표시할 수 있다.

$$[f_r(a)]^2 = \frac{1}{(1-a)^3} \sum_{n=0}^{10} a_n a^n \quad (7)$$

식(7)에서 다항식의 계수,  $a_n$ 을 간단한 수치프로그래밍<sup>(10)</sup>을 이용하여 결정하며 아래와 같다.

$$a_{r0}=2.0976, a_{r1}=35.649, a_{r2}=18.031, \\ a_{r3}=-203.16, a_{r4}=241.22, a_{r5}=45.530,$$

Table 1  $f_r(a)$  of ASTM and calculated values

$a$	ASTM E399	Calculated	Error(%)
0.20	4.125	4.125	0.0
0.25	4.846	4.846	0.0
0.30	5.629	5.629	0.0
0.35	6.504	6.504	0.0
0.40	7.501	7.510	0.12
0.45	8.705	8.705	0.0
0.50	10.171	10.171	0.0
0.55	12.043	12.043	0.0
0.60	14.512	14.503	0.07
0.65	17.891	17.891	0.0
0.70	22.792	22.792	0.0
0.75	30.304	30.304	0.0

$$a_{r6}=-161.92, a_{r7}=72.753, a_{r8}=98.841, \\ a_{r9}=109.45, a_{r10}=-100.09$$

Table 1은 식(4b)으로 주어지는  $f_r(a)$ 에 대하여 ASTM E399에 규정된 값과 여기서 구한 다항식의 계수( $a_n$ )를 식(7)에 대입하고 계곱근을 취한 값을 비교한 것으로 거의 오차가 없이 나타났다.

식(7)을 적분형태로 나타내면 다음과 같다.

$$(EEC)_r = C_{r0} + 2A_r \ln(1-a) + \frac{2}{(1-a)^2} \sum_{m=0}^{10} C_m a^m \quad (8)$$

상수  $A_r$ 과  $C_m$ 값은 식(8)을 미분하고, 식(7)에서 같은 차수의  $a$ 계수와 등치시킴으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_r=441.85, C_{r1}=443.95, C_{r2}=-645.0, \\ C_{r3}=153.29, C_{r4}=-12.467, C_{r5}=43.257, \\ C_{r6}=29.217, C_{r7}=-6.436, C_{r8}=-13.117, \\ C_{r9}=2.2379, C_{r10}=12.512$$

또한 상수  $C_{r0}$ 의 값은 RCT 시편에 대해 식(9)로 주어지는  $(EBV/P)_r$ 와 식(8)에서의  $\{(EBC)_r - C_{10}\}$ 를 비교하여 그 차이의 최적치로 취하면 5.8이 된다.

$$\ln \frac{EBV}{P} = \sum_{n=1}^5 A_n a^n \quad (9)$$

Table 2 Compliance for round-CLWL specimen

Compliance $\alpha$	(EBV/P) <sub>r</sub> (Eq.9)	(EBC) <sub>r</sub> (Calculated with Eq.8)	Error (%)
0.30	13.48	13.90	3.1
0.35	17.38	17.57	1.1
0.40	22.46	22.47	0.0
0.45	29.16	29.03	0.5
0.50	38.10	37.91	0.5
0.55	50.35	50.18	0.5
0.60	67.69	67.69	0.0
0.65	93.45	93.71	0.3
0.70	134.20	134.60	0.3

Table 2는 식(9)에 의한 컴플라이언스(EBV/P),  
와 식(8)의 (EBC)<sub>r</sub>을 비교한 것이다.

다음 하중선 변위(load line displacement, V)와  
균열개구변위(crack opening displacement, Δ)는  
Hertzberg<sup>(11)</sup>등이 발표한 V와 Δ에 대한 비율(V/  
Δ)<sub>r</sub>을 α의 3차 다항식으로 나타낸 식(10)과 같이  
결정하였다.

$$(V/\Delta)_r = 0.36040 + 0.83237\alpha - 0.23759\alpha^2 - 0.24851\alpha^3 \quad (10)$$

결국 Round-CLWL 시편의 무차원 응력확대계  
수(Y<sub>r</sub>)는 시편에 가공된 측면홈(side grooves)과  
는 (B/B<sub>n</sub>)<sup>1/2</sup>의 관계가 있으며 식(4b), 식(8) 그  
리고 식(10)으로부터 식(11)을 얻을 수 있다.

$$Y_r = \frac{K\sqrt{W}}{E} \left(\frac{B_n}{B}\right)^{1/2} = \frac{f_r(\alpha)(V/\Delta)_r}{(EBC)_r} \quad (11)$$

여기서, B<sub>n</sub>=B(시편두께)-측면홈 깊이

Table 3은 무차원 응력확대계수(Y<sub>r</sub>)를 무차원 균  
열길이(α)에 대하여 나타낸 것이고, 이 Y<sub>r</sub>를 이용  
하여 본 연구에서 제안한 Round-CLWL 시편의 균  
열정지인성치(K<sub>Ia</sub>)는 식(12)와 같이 표현할 수 있다.

$$K_{Ia} = \frac{\Delta \cdot E}{\sqrt{W(B/B_n)}} Y_r \quad (12)$$

4. 실험 방법

Table 3 Dimensionless stress intensity factor for  
Round-CLWL specimen

a/W	Y <sub>r</sub>	a/W	Y <sub>r</sub>	a/W	Y <sub>r</sub>
0.30	0.236	0.50	1.184	0.70	0.126
0.31	0.234	0.51	0.181	0.71	0.123
0.32	0.233	0.52	0.178	0.72	0.120
0.33	0.231	0.53	0.175	0.73	0.118
0.34	0.229	0.54	0.172	0.74	0.114
0.35	0.226	0.55	0.169	0.75	0.111
0.36	0.224	0.56	0.166	0.76	0.108
0.37	0.222	0.57	0.163	0.77	0.105
0.38	0.219	0.58	0.160	0.78	0.102
0.39	0.216	0.59	0.157	0.79	0.099
0.40	0.214	0.60	0.154	0.80	0.096
0.41	0.211	0.61	0.152	0.81	0.093
0.42	0.208	0.62	0.149	0.82	0.089
0.43	0.205	0.63	0.146	0.83	0.086
0.44	0.202	0.64	0.143	0.84	0.083
0.45	0.199	0.65	0.140	0.85	0.080
0.46	0.196	0.66	0.137	0.86	0.076
0.47	0.193	0.67	0.134	0.87	0.073
0.48	0.190	0.68	0.131	0.88	0.070
0.49	0.187	0.69	0.128	0.89	0.066

이론식으로 결정한 Round-CLWL 시편과 MRL-  
CLWL 시편에서의 균열정지 인성치 결정에 대한  
타당성을 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 수  
행하였다. ASTM E24.01.06에서 제안한 방법<sup>(2)</sup>에  
따라서 Fig. 2와 같이 쐐기(wedge)와 분리형부싱  
(split pin and bushing)을 시편의 치수에 알맞게  
공구강(SK5)으로 제작하여, 쐐기에 압축하중을  
주어 정적인 균열정지인성치(K<sub>Ia</sub>)의 결정 실험을  
하였다.

Fig. 3(a)은 MRL-CLWL시편과 Fig. 3(b)는 본

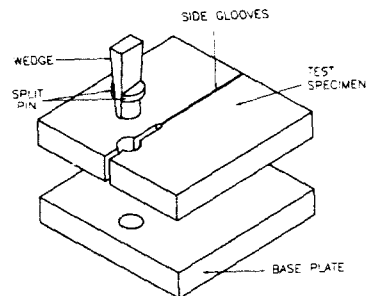


Fig. 2 Schematic drawing of the crack line wedge loaded arrangement

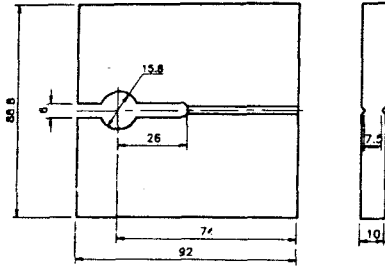


Fig. 3(a) Configuration of MRL-CLWL specimen

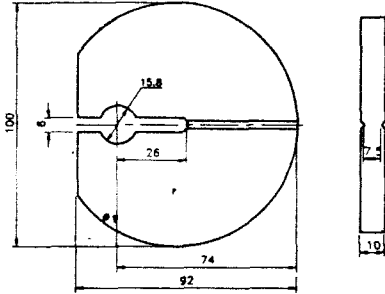


Fig. 3(b) Configuration of Round-CLWL specimen

논문에서 제안한 Round-CLWL시편의 형상을 각각 나타내었다. 균열의 진전시 균열전파의 직진성과 평면변형의 효과를 증진시키기 위하여 시편의 균열선단에서부터 시편 끝까지 측면홈(side groove)을 가공하였다.

실험장치로는 만능재료시험기(Tensilon, 10 Ton, Japan)를 이용하였다. 압축하중시 하중속도는 5 mm/min로 일정하게 시편에 가하였으며, 균열개구변위(COD)의 변화는 하중 작용선에서 0.25W만큼 떨어진 곳에 균열개구변위 게이지(COD gage)를 부착하여 측정하였다. 재료는 균질하며, 취성인 PMMA (polymethyl-methacrylate)를 사용하였는데, 실험전 0°C분위기의 항온조에서 2시간 정도 유지시킨 후 바로 꺼내어 실험을 실시하였다.

일반적으로 정적인 균열정지인성치의 결정은 균열이 전파개시후 1msec 이내에 전파하고 정지하여야 하는 조건<sup>(4)</sup>을 확인하기 위하여 COD의 변화를 데이터 기록계(data recorder)에 기록 후 시간기록계(time recorder)를 통해 출력시켜 확인하였다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 4는 균열정지인성치( $K_{Ia}$ )와 균열진전길이

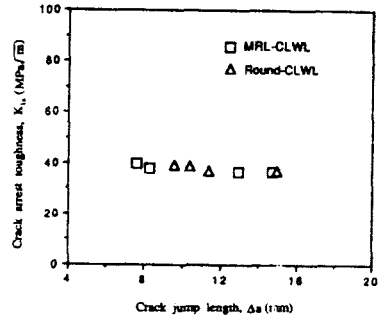


Fig. 4 Crack arrest toughness vs. crack jump length (PMMA)

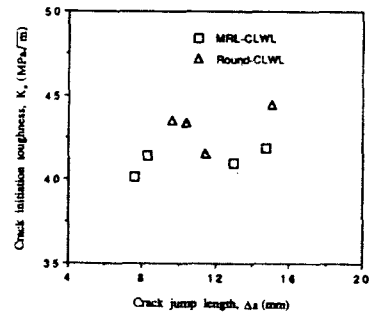


Fig. 5 Crack initiation toughness vs. crack jump length (PMMA)

( $\Delta a$ )의 관계를 도시한 것이며, 시편의 형상과는 관계없이 균열정지인성치가 균열진전길이에 무관하게 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 균열정지인성치( $K_{Ia}$ )값의 평균값은 MRL-CLWL 표준시편과 Round-CLWL 시편이 각각 37.68(MPa√m)와 38.07(MPa√m)의 결과를 얻었고, 표준편차는 각각 1.52와 1.09(MPa√m)이었다. 균열개시인성치( $K_{I0}$ )와 균열진전길이( $\Delta a$ )의 관계는 Fig. 5에서 보는 바와 같이  $K_{I0}$ 가 클수록  $\Delta a$ 는 길어진다.

Fig. 6에는 균열개시인성치( $K_{I0}$ )에 대한 균열정지인성치( $K_{Ia}$ )와의 관계를 나타내었는데, 여기서  $K_{I0}$ 는 피로 균열과같이 균열선단의 끝이 날카롭지 않고, 가공노치를 주었기 때문에 인성치를 나타내는 응력확대계수는 아니다. 다만 가공된 초기노치가 있을 때의 응력확대계수를 나타내는 형식적 의미에서의 값이며, 이 그림에서  $K_{Ia}$ 는  $K_{I0}$ 에 의존성이 없이 일정함을 보여준다.  $K_{Ia}$ 를 일정하다고 보면  $K_{I0}$ 가 증가할수록 균열진전거리가 더 크다는 것을 의미한다.

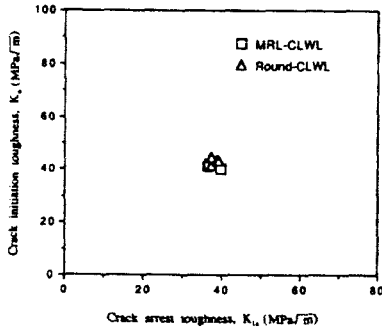


Fig. 6 Crack initiation toughness vs. crack arrest toughness (PMMA)

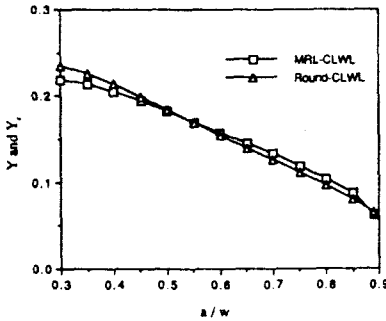


Fig. 7 Dimensionless stress intensity factor vs. dimensionless crack length of MRL-CLWL and Round-CLWL specimen

이상과 같은 결과를 종합하여 고찰해 볼때 Round-CLWL 시편과 MRL-CLWL 표준시편의 무차원 응력확대계수 ( $Y_c$ )가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 여기서 참고로 Round-CLWL과 MRL-CLWL에 대한 무차원 응력확대계수를 Fig. 7에 나타내었다.

또한 비교적 상사해석이 쉬운 PMMA 재료를 사용하여 두 시편의 균열정지인성치 ( $K_{Ia}$ ) 결정 실험 결과도 역시 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 Round-CLWL 시편도 균열정지인성치의 결정시편으로 채택이 가능하며, 이는 균열 위치 및 방향을 임의로 선택하여 가공하기가 용이하므로 특히 방향성을 갖는 소재의 균열정지 인성치를 결정하는 데 매우 편리하다. 또한 원형시편의 제작은 가공성이 좋으며, 가공비가 적게 들어 시간적 경제적으로 매우 유리하다 하겠다.

그리고 본 저자들은 이미 기계구조용강이나 고강도 알루미늄합금강 등에 대해서도 MRL-CLWL시

편을 이용하여 균열 정지인성치를 실험적으로 결정<sup>(1)</sup>한 바 있으며, 이러한 결과를 통해 볼때 PMMA 재료뿐 아니라 금속재료에도 확대적용이 가능하다고 사료된다.

### 6. 결 론

ASTM E24.01.06에서 제안한 표준시편 (MRL-CLWL)과 본 논문에서 해석하여 제안한 Round-CLWL 시편의 정적인 균열정지인성치 결정에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Round-CLWL 시편의 무차원 응력확대계수 ( $Y_c$ )를 이론적으로 유도하였다.

(2) PMMA의 균열정지인성치 ( $K_{Ia}$ )는 MRL-CLWL 표준시편이  $37.68(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ , Round-CLWL 시편은  $38.07(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ 이었고, 표준편차는 각각 1.52와 1.09( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )이었다.

(3) (2)의 결과 Round-CLWL 시편도 정적인 균열정지인성치 ( $K_{Ia}$ ) 결정을 위한 시편으로 채택하여도 타당하며, 해석의 결과가 만족함을 입증하였다.

(4) 본 해석 및 실험 결과를 감안할 때 균열정지인성치 ( $K_{Ia}$ ) 결정 시험시, 방향성을 갖는 재료와 재료의 형상이 원형인 경우 Round-CLWL 시편을 채택하면 경제적인 측면에서 매우 유리하다고 판단된다.

### 후 기

과학기술처의 연구비지원에 감사드립니다(1990).

### 참 고 문 헌

- (1) 이억섭, 김상철, 송정일, 1990, "균열정지현상에 관한 기초적연구", 대한기계학회논문집, pp. 112~118.
- (2) 이억섭, 한민구, 1989, "Polymer 재료의 등적균열 전파속도 측정", 대한기계학회 춘계학술대회 초록집 (I), p.337.
- (3) Rosenfield, A.R., et al., 1976, "Influence of Metallurgical Factors on the Fast Fracture Energy Absorption Rates." Met. Trans. A., Vol.7A, p.49.
- (4) Crosley P.B. and Ripling, E.J., 1969, Trans. ASME 91, Series D 525.
- (5) Newman, J.C., Jr., 1979, "Crack-Opening Displacement in Center-Crack Compact and Crack Line

- Wedge Loaded Specimens," NASA, Technical Note, TND-8268.
- (6) Kanninen, M.F. and Popelar, C.H., 1985, *Adv.Frac. Mech.*, pp.207~208.
- (7) Irwin, G.R. and Wells, A.A., 1965, *Met.Rev.* 10, p. 223.
- (8) Srawley, J.E., 1976, "Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM E399 Standard Fracture Toughness Specimens," *Int. J. Frac. Mech.*, Vol. 12, pp.475~476.
- (9) Broek, D., 1978, "Elementary Engineering Fracture Mechanics," pp.116~119.
- (10) Boland International, Inc., 1987, "Eureka." California 95066.
- (11) Hertzberg, R. Jablonski, Journet, D.A., B. and Evcchio, R.S., 1985, "Compliance Functions for Various Fracture Mechanics Specimens," *Engineering Fracture Mechancis*, Vol. 22, No.5, pp.819~827.
- (12) Crosley P.B. and Ripling, E.J., et.al., 1983, "Cooperative Test Program on Crack Arrest Toughness Measurements," Final Report, p.82.