

파괴인성 및 균열진전의 평가

金 楨 圭

한양대학교 기계설계학과 교수



● 1946년 1월 1일생
● 금속재료의 정적 및 피로파괴거동을 연구하였으며, 현재 복합재료의 신뢰성 평가 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

오늘날 대형구조물이나 화학 플랜트(plant)의 각종 기기의 안전설계기준 또는 정기 점검시의 수명평가법으로서 파괴역학이 널리 이용되고 있다. 파괴역학에서의 파괴인성(fracture toughness)은 파괴 개시에 대한 재료의 저항값을 의미하는 것으로 에너지 해방율(energy release rate) G , 응력확대계수(stress intensity factor) K , 균열선단개구변위(crack tip opening displacement) CTOD 및 J-적분(J-integral) 등의 균열선단의 역학적 상태를 나타내는 단일 파라메타에 의해 표현되어진다. 이들 파라메타를 사용하여 균열 변위 Mode I 상태하의 파괴조건을 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_I &\geq G_{IC} & K_I &\geq K_{IC} \\ CTOD_I &\geq CTOD_{IC} & J_I &\geq J_{IC} \end{aligned} \quad (1)$$

이들 관계에서 파괴역학 파라메타는 균열길이, 시험편 또는 부재의 형상, 작용응력 등의 함수이고 우변이 파괴인성이다. 이들 파괴인성이 공학적으로 중요한 것은 고강도재료를 사용하여 종래의 설계방법으로 안전하게 설계를 하였다 고 생각되는 구조물에 있어서도 이 부재에 결함이 존재한다든지 또는 균열이 발생하는 경우에는 오히려 파괴하기 쉬운 결과를 초래하기 때문이다.

따라서 파괴개시의 검출 및 균열성장의 평가는 기계구조물의 안전성 및 신뢰성 향상을 위

해서 꼭 필요한 사항이다.

여기에서는 현재 규격화되어 있는 파괴인성 평가법(ASTM규격 및 JSME기준)과 균열길이 측정법 및 균열성장 속도의 결정법에 관하여 설명한다. 파괴역학 파라메타의 이론적 배경은 다른 문헌을 참고하기 바란다.

2. 평면 변형을 파괴인성

그림 1은 Maraging강의 판 두께 B 에 따른 파괴인성의 변화를 나타낸 것으로 영역 C에서의 하중 COD선도는 파괴하중까지 선형적이고 이 하중에서 급격한 불안정 파괴가 일어난다. 파면은 거의 벽개(cleavage)형이며 이 영역에서의 파괴인성을 평면 변형을 파괴인성(plane strain fracture toughness) K_{IC} 이라고 한다. 이 영역은 많은 실험 결과에 의하여

$$B \geq 2.5(K_C/\sigma_{ys})^2 \quad \sigma_{ys} : \text{항복강도} \quad (2)$$

로 되어 있다.

K_{IC} 시험은 현재 ASTM E 399에 상세히 규격화 되어있고 이 시험법의 개요는 다음과 같다.

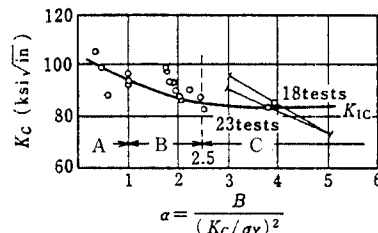


그림 1 α 와 K_C 와의 관계

표 1 최소요구의 판두께와 균열길이

σ_{ys}	(in)	(mm)
0.0050~0.0057	3	75
0.0057~0.0062	2 1/2	63
0.0062~0.0065	2	50
0.0065~0.0068	1 3/4	44
0.0068~0.0071	1 1/2	38
0.0071~0.0075	1 1/4	32
0.0075~0.0080	1	25
0.0080~0.0085	3/4	20
0.0085~0.0100	1/2	12 1/2
0.0100이상	1/4	6 1/2

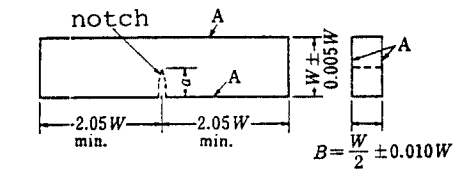
σ_{ys} : 항복강도

(1) 시험편 형상

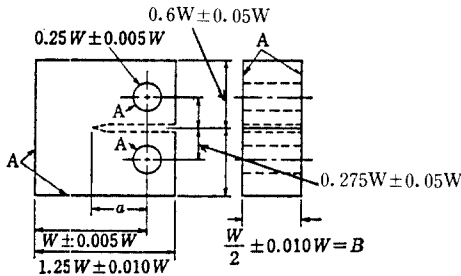
시험편은 식 (2)를 만족하는 3점 굽힘 시험편과 소형 인장 시험편(compact tension; CT형)이며 재료의 인성값이 그다지 높지 않은 경우에는 표 1에 의하여 판 두께를 정할 수 있다.

그림 2는 시험편의 형상이며 시험편을 판 또는 봉으로부터 만들 때, 이의 채취방향은 고려되어야 한다.

(2) 균열길이 및 피로균열의 삽입조건



(a) 3점굽힘 시험편



(b) 소형 인장시험편

그림 2 시험편 형상

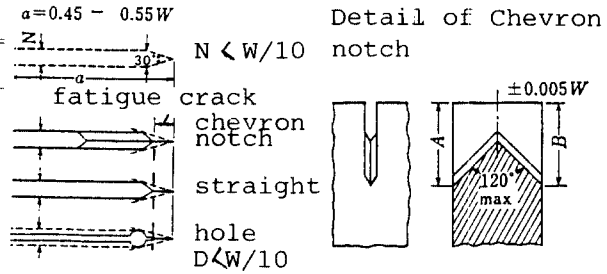


그림 3 노치의 형상

그림 3은 노치의 형상으로 균열길이(피로균열 길이 포함)는 $0.45W < a < 0.55W$ 이다. 피로균열(fatigue precrack)은 시험하기 전에 주어지며 이때 피로균열($a_f \geq 1.3\text{mm}$)선단의 소성영역을 충분히 작게 하기 위하여 피로균열 삽입시에 다음의 조건이 규정되어 있다.

$$K_f(\text{max})/E < 0.00032(m^{1/2})$$

$$K_f(\text{max}) < 0.6(\sigma_{ys1}/\sigma_{ys2})K_{IC} \quad (3)$$

$$K_f(\text{max}) - K_f(\text{min}) < 0.9K_f(\text{max})$$

여기에서 $K_f(\text{max})$, $K_f(\text{min})$ 는 반복하중의 최대값 및 최소값에 대한 응력확대계수이며, σ_{ys1} , σ_{ys2} 는 온도 T1(피로균열 삽입시의 온도) 및 T2(파괴인성 시험시의 온도)에서의 각각의 항복강도이다.

(3) 실험방법

3개 이상의 시험편을 준비하여 하중 P 와 노치선단에 붙인 클립 게이지(clip gage)에 의한 COD와의 관계를 자동 기록한다. 이때 하중 속도는 응력확대계수의 증가율로 환산하여 $\dot{K} = 0.55 \sim 2.75 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$ 의 범위이다.

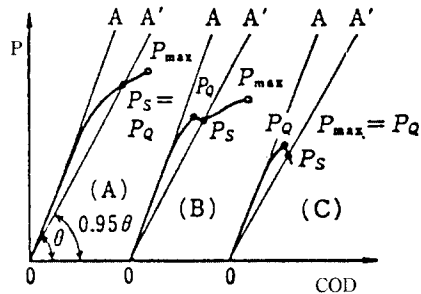


그림 4 P-COD관계

P-COD관계는 그림 4와 같은 3가지의 형태로 분류되며 K_{Ic} 계산에 있어서 필요한 P_Q 는 파괴가 개시할 때의 하중으로 생각하여 그림과 같이 평가된다. 여기에서 5% 기울기의 감소는 $\Delta a \approx 0.02a$ 의 균열길이에 의한 시험편의 컴플라이언스(compliance)변화와 거의 같은 것이다. ASTM규격에서는 pop-in 현상이 생기는 경우에 평면 변형율 상태의 소성영역의 크기와 Δa 가 같다고 가정하여 P_Q 에 물리적 의미를 부여하고 있다.

한편 균열선단에서의 변형 및 파괴가 거의 선형탄성임을 보증하기 위하여 P_Q 와 최고하중 P_{max} 와의 비는 식 (4)를 만족하여야 한다.

$$P_{max}/P_Q < 1.10 \quad (4)$$

이 식을 만족하지 않으면 식 (8)을 이용하여 파괴인성을 상대적으로 평가한다.

또한 파괴한 후의 균열길이 a 는 시험편 두께 방향을 4등분(그림 5)하여 3곳에서 측정할 값의 평균값으로 하며 각 균열길이(a_1, a_2, a_3

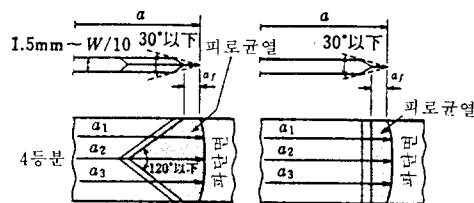


그림 5 피로균열선단의 형상

또는 양 측면)의 차이는 주어진 범위로 규정되고 있다.

이와 같은 과정에 의하여 구한 P_Q 와 a 로부터 파괴인성치 K_Q 를 계산할 수 있다. K_Q 의 계산식은 다음과 같다.

3점 굽힘시험편 :

$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (5)$$

여기에서 :

$$f(a/W) = \frac{3(a/W)^{1/2} [1.99 - (a/W)(1 - a/W) \times (2.15 - 3.93a/W + 2.7a^2/W^2)]}{2(1 + 2a/W)(1 - a/W)^{3/2}}$$

표 2 각종 재료의 K_{Ic} 값(실온)

재 료	열처리 등	항복강도 σ_{ys}		K_{Ic}		최소시편두께 B	
		kg/mm ²	MPa	kg/mm ^{3/2}	MPa√m	mm	in
강 재							
마르에이징강							
300급	900°F 3hrs	200	1962	182	56	2.1	0.09
300 "	850°F 3hrs	170	1668	300	93	7.8	0.31
250 "	900°F 3hrs	181	1776	238	74	4.3	0.18
4340강	Hardened	185	1815	150	47	1.7	0.07
A533B	압력용기강	35	345	≈ 630	≈ 195	810	33
탄소강	저강도	24	235	> 700	> 217	2150	82
티타늄 합금							
6Al-4V	($\alpha + \beta$)STA	112	1099	112	38	3	0.12
13V-11Cr-3Al	STA	115	1128	89	28	1.5	0.07
6Al-2Sn-4Zr-6Mo	($\alpha + \beta$)STA	120	1177	85	26	1.3	0.05
알루미늄 합금							
7075	T651	55	540	94	29	7.3	0.30
2014	T4	46	451	90	28	9.6	0.40
2024	T3	40	392	110	34	19.0	0.75

CT시험편 :

$$K_Q = \frac{P_Q}{BW^{1/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6)$$

여기에서 :

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2+a/W)(0.886+4.64a/W - 13.32a^2/W^2 + 14.72a^3/W^3 - 5.64a^4/W^4)}{(1-a/W)^{3/2}}$$

여기에서 S는 스패의 길이이다.

(4) K_{IC} 값의 결정

식 (5)와 (6)에 의하여 구한 K_Q 가 K_{IC} 가 되기 위해서는 식 (7)을 만족하여야 한다.

$$B, a \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}}\right)^2 \quad (7)$$

만약 이 조건식이 만족하지 않을 경우에는 시험편의 크기를 전체로서 1.5배하여 재 시험을 하든가 또는 식 (8)을 이용하여 재료간의 인성을 상대적으로 평가한다.

$$R_{sb} = \frac{6P_{max}W}{B(W-a)^2 \sigma_{ys}} : \text{3점굽힘시험편}$$

$$R_{sc} = \frac{2P_{max}(2W+a)}{B(W-a)^2 \sigma_{ys}} : \text{CT시험편} \quad (8)$$

표 2는 각종 재료의 K_{IC} 값이다.

3. 탄소성 파괴인성

K_{IC} 는 항복강도의 증가에 따라 저하하므로 공업재료로서 널리 사용되는 고인성재료의 K_{IC} 를 평가하기 위해서는 상당히 큰 시험편이 필요하게 된다. 또한 실제의 기계·구조물이 파괴할 때에는 불안정 파괴가 일어나기 전에 상당한 량의 소성변형이 존재하게 되고 이러한 경우는 어느 정도의 소성변형을 허용한 설계기준이 합리적인 파괴방지설계라고 할 수 있다.

따라서 탄소성 파괴인성이 평가되어야 하고, 현재 제안된 파라메타는 CTOD 및 J 적분이다. CTOD에 의한 파괴인성 평가법은 영국시험규격 ES 5762(1979)에 있지만 이 평가법은 여러 가지 시험편 형상에 대한 COD의 계산법이 확립되어 있지 않고 또한 이 값의 측정이 곤란한 점이 있다.

한편 Rice에 의하여 제안된 J 적분은 탄성·

탄소성에 관계없이 균열선단 근방의 특이성을 나타낼 수 있으며 이러한 의미에서 K 와 같은 성질을 갖고 있다. J_{IC} 의 개념은 Begley와 Landes에 의하여 최초로 제안되었고, 그 후 각국에서 J_{IC} 파괴조건에 관하여 활발한 연구가 행하여져 파괴조건으로서의 개념의 유효성이 확립되어 ASTM 및 JSME에서 J_{IC} 시험법이 제정되었다.

3.1 안정파괴 개시의 검출방법

그림 6은 이상균열이 소성둔화에서 파괴개시 및 안정파괴개시의 진행과정을 둔화곡선(blunting line) 및 R 곡선(fracture resistance R curve)과 함께 나타낸 것이다. 또한 둔화영

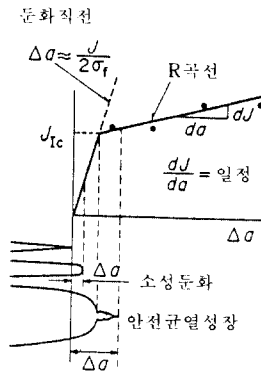


그림 6 소성둔화 및 균열전진

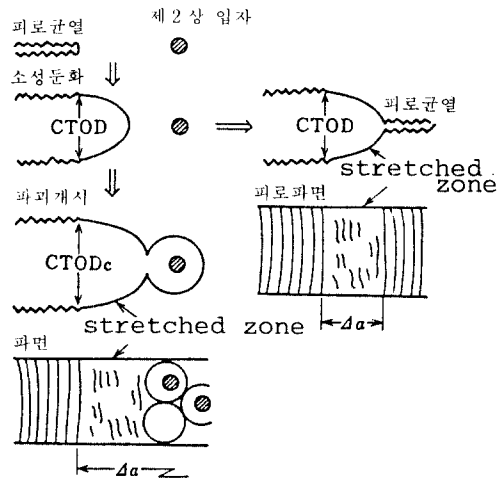


그림 7 SZ의 형성과정 및 소성둔화의 한계

역(stretched zone, SZ)의 형성과정 및 이의 거동을 모식적으로 나타내면 그림 7과 같다. 이와같이 균열선단은 하중 증가에 따라 둔화하고 벽개파괴 또는 덤플(dimple)에 의해 균열이 진전하므로 한계 스트레치 존의 폭(stretched zone width) SZW_c 는 안정균열 발생점 J_{IC} 또는 한계균열선단개구변위 $CTOD_{IC}$ 와 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 J_{IC} 를 평가하기 위해서는 안정파괴개시점을 정확하게 찾을 필요가 있다.

현재까지 제안되어 있는 방법은 여러 개의 시험편을 사용하는 R곡선법, SZ법과 한 개의 시험편에 의한 컴플라이언스법, 전위차법, AE법 등이 있으며 대표적인 것은 다음과 같다.

(1) R곡선법

그림 8은 R곡선법의 개념도이다. 여러 개의 시험편을 소정의 변위까지 부하하여 제하한 후, 실측한 R곡선과 가정된 둔화직선과의 교점으로부터 J_{in} 또는 $CTOD_{in}$ 을 결정한다. 이 방법은 ASTM규격의 J_{IC} 시험법으로 되어 있으나 뒤에서 설명하는 바와 같은 문제점이 지적되고 있다.

(2) SZ법

R곡선법이 안정파괴에 대한 균열진전량에 주목하고 있음에 대하여 SZ법은 균열선단에 형성된 SZ에 주목하고 있다. R곡선법과 같이

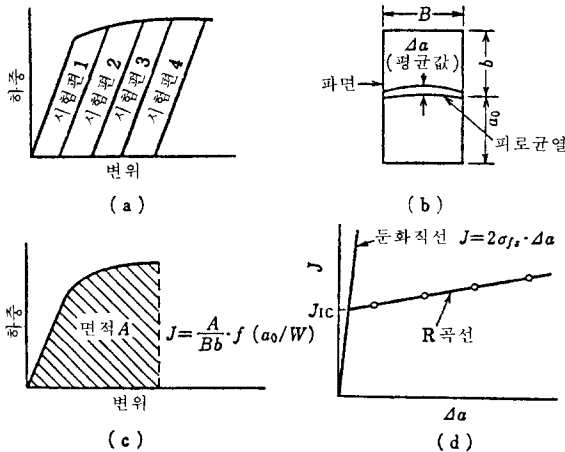


그림 8 R곡선법의 개념도

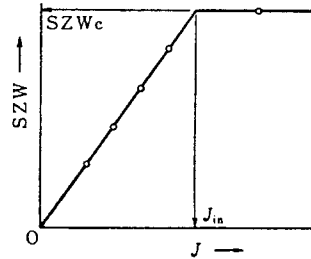


그림 9 SZ법

소정의 변위에서 제하하여 피로파단을 시킨 후, 전자현미경에 의하여 SZW를 측정하여 이 값을 J적분에 대하여 나타내어 둔화직선을 실측한다. 이 직선과 SZW_c 의 교점이 J_{in} 이다. 이 방법은 재료에 따라 SZW가 불명확한 경우에는 데이터의 신뢰성이 떨어지는 등의 문제점이 있다. 그림 9는 이 방법의 개념도이다.

(3) 제하 컴플라이언스법

이 방법은 앞에서 언급한 방법들이 비용 및 시간이 걸린다는 등의 결점을 개선하기 위하여 고안된 것 중의 하나이다. 한 개의 시험편을 일정한 변위까지 부하한 후, 그림 10과 같이 제하하는 것을 반복하여 컴플라이언스를 얻고 이로부터 계산에 의해 Δa 를 구하고 이것과 각 점에서의 J적분과의 관계를 나타내면 R곡선이 얻어진다. 이 방법은 실측과 교정 컴플라이언스

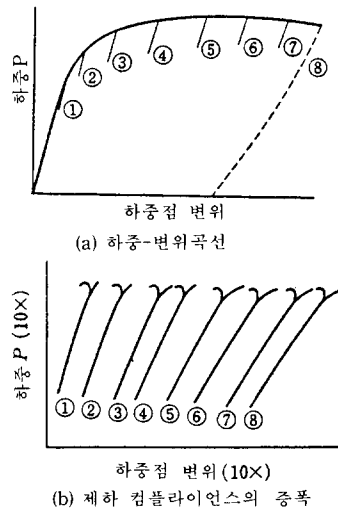


그림 10 제하 컴플라이언스법

언스 곡선의 대응관계가 불명확하고 안정과파에 미치는 제하의 영향 및 연속적인 균열길이의 측정이 불가능하며 또한 미소한 Δa 에 의한 컴플라이언스의 측정이 어렵다는 등의 결점이 있다.

3.2 J_{IC} 시험법 (ASTM E813-81, JSME S001-81)

이 방법은 이미 설명한 바와 같이 둔화직선과 R곡선과의 교점으로부터 J_{IC} 를 결정하는 것이다.

(1) 시험장치 및 시험편 형상

시험장치는 K_{IC} 시험법과 거의 같으며 시험편 형상은 그림 11과 같은 3점 굽힘시험편 또는 하중점 변위의 측정이 가능한 CT 시험편이다. 시험편 두께 B 및 폭 W 는 $B \geq 25(J_{IC}/\sigma_{fs})$, $W = 2B$ 이다. 또한 사이드 그루브(side groove)의 가공이 허용($B_N/B \geq 0.75$, 각 $\leq 90^\circ$, 선단곡률반경 $= 0.4 \pm 0.2 \text{ mm}$, B_N 은 판의 유효두께)되고 있다.

(2) 균열길이 및 피로균열의 삽입조건

피로균열을 포함한 균열길이는 $0.5 \leq a_0/W \leq 0.75$ 이다. 이 경우 피로균열($a_f \geq 0.05a_0$ 또는 $a_f \geq 1.27 \text{ mm}$)의 삽입시의 하중 $P_f(\text{max})$ 의 조건은 다음과 같다.

$$P_f(\text{max}) \leq 0.4 P_L$$

$$\text{또는 } \Delta K/E \leq 0.005 \text{ mm}^{1/2} \quad (9)$$

$$P_L = \frac{4}{3} \cdot \frac{Bb^2 \sigma_{ys}}{S} \quad (\text{3점굽힘시험편}),$$

$$\frac{Bb^2 \sigma_{ys}}{2W+a} \quad (\text{CT 시험편})$$

이 식에서 ΔK 는 응력확대계수의 범위이며, S 및 b 는 스패의 길이($=4W$)와 리가먼트(ligament)의 길이($W - a_0$)이다.

(3) R곡선

최소한 5개의 시험편을 준비하여 변위제어로서 소정의 변위까지 부하하여 제하한 후, 가열착색 또는 피로시험에 의해 파단시켜 Δa 를 측정한다. Δa 는 B 를 8등분하여 9점에서 측정하고 양 표면의 평균값과 나머지 7점의 측정치의 평균값으로 한다. 이 값과 식 (10)에 의해 구한 J 값에 의하여 R곡선을 구한다.

$$J = \frac{A \cdot f(a_0/W)}{Bb} \quad (10)$$

$$\text{3점굽힘시험편: } f\left(\frac{a_0}{W}\right) = 2$$

$$\text{CT 시험편: } f\left(\frac{a_0}{W}\right) = 2 \left[\frac{1+\alpha}{1+\alpha^2} \right]$$

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{2a_0}{b}\right)^2 + 2\left(\frac{2a_0}{b}\right) + 2} - \left(\frac{2a_0}{b} + 1\right)$$

(4) 결과의 해석 및 J_{IC} 의 결정법

그림 12와 같이 둔화직선과 R곡선과의 교점에서 J_{IC} 를 결정한다. 이 때 필요한 사항은 표 3과 같다.

한편 JSME의 기준은 ASTM의 결정(Δa 의

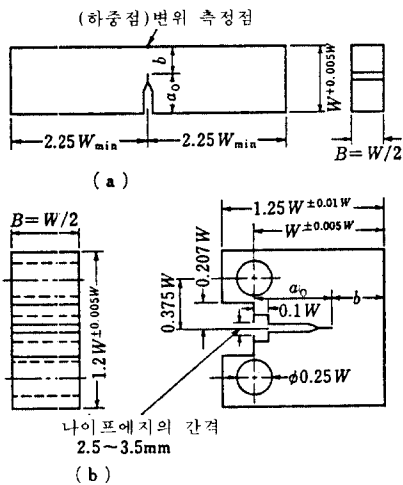


그림 11 시험편 형상

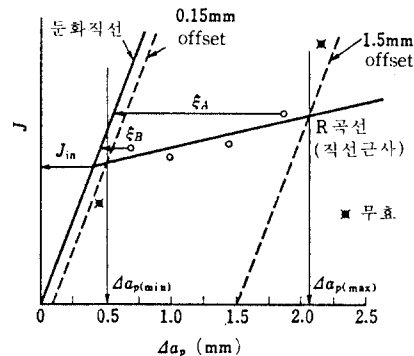


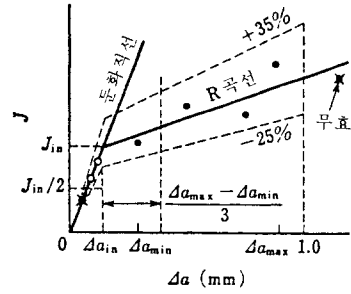
그림 12 R곡선에 의한 J_{IC} 평가 (ASTM)

표 3 J_{IC} 결정에 필요한 사항

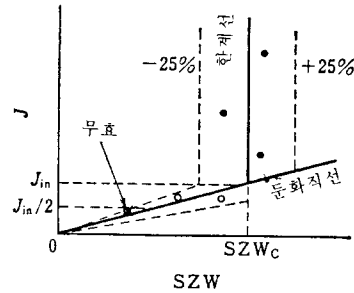
사 항	조 건
둔화직선	$J = 2 \sigma_{fs} \Delta a_p$, 여기에서 $\sigma_{fs} = \frac{1}{2}$ (인장강도 + 항복강도)
R곡선상의 자료	$B(B_N) \geq 15(J/\sigma_{fs})$, $b \geq 15(J/\sigma_{fs})$ 이고 또한 최소 4점의 Δa_p 는 $0.15\text{mm} \leq \Delta a_p \leq 1.5\text{mm}$ 그리고 $\xi_B \leq \xi_A/3$
$J_{in} = J_{IC}$	$B(B_N)$, $b \geq 25(J_{in}/\sigma_{fs})$, $dJ/da \leq \sigma_{fs}$

측정법 및 범위, 둔화직선)을 어느 정도 보완하여 정확한 파괴개시점을 찾음에 목적을 두고 있다. 따라서 부하장치, 시험편 형상 및 J 적분의 계산법은 같지만 파괴개시의 검출법과 J_{IC} 결정법에 다음과 같은 차이가 있다.

J_{IC} 의 결정은 R곡선법 또는 SZ법 중 어느 것을 사용하여도 무방하며, 둔화직선은 실측에 의하여 구함을 원칙으로 하고 있고, 이때 피로 균열의 삽입조건은 다음 식을 만족해야 한다.



(a) 둔화직선과 R곡선



(b) 둔화직선과 한계선

그림 13 J_K 의 결정법 (JSME S001)

표 4 각종 재료의 J_{IC}

재료 (채취방향)	시험편	σ_{fs} (MPa)	J_{IC} (kN/m)			
			ASTM	JSME	JSME(SZW _c)	기타 시험법
A533B-1(L-T)	1CT	553		242	285	254
A533B-1(S-L)	1CT	553	299	175	149	254
A533B-1(L-T)	1CT	490(149°C)	255 ± 35			282
A533B-1(L-T)	1CT	610			185	193
HT60(L-T)	1CT	617	204	144	131	169
HT60(T-L)	1CT	617	100	67	118	84.6, 70.6 ~123
HT80(T-L)	1CT	789	295	174	278	262, 281
HT80(T-L)	1CT	789	132			150, 129
SM50(L-T)	1CT	441	358			126, 287
SM50(T-L)	1CT	441	138			61, 127
SM50A(L-T)	1CT	456				131, 120
2 1/2Cr-Mo	1CT	584				159, 157
2024-T3(L-T)	1CT	411				12.6, 11.3
5083-0(L-T)	1CT	217				13.8, 14.1
7075-T6(L-T)	1CT	538				7.24, 6.7

$$\Delta K \leq 0.6 \sqrt{\frac{E J_{in}}{1-\nu^2}} \quad (11)$$

SZW 및 Δa 의 측정은 평면변형을 조건이 만족되는 (3/8~5/8) B 의 범위에서 3개 이상의 위치에서 행하여 이의 평균값으로 하며, Δa 의 제한 및 한계조건은 그림 13에서 보는 바와 같이 $\Delta a_{max} \leq 1.0mm$, $\Delta a_{max} - \Delta a_{in} > 3(\Delta a_{min} - \Delta a_{in})$ 이다. 또한 R 곡선의 기울기 $(dJ/da)_R$ 은 둔화직선의 기울기 $(dJ/da)_B$ 에 대해서 $(dJ/da)_R \leq \frac{1}{2}(dJ/da)_B$ 이다.

이 밖에 JSME 기준의 단일시험편 방법으로 서 전위차, 초음파, AE의 3가지 방법이 있다. 표 4는 각종 재료의 J_{Ic} 값이다.

4. 균열진전량 측정법

파괴인성 평가에 있어서는 이미 설명한 바와 같이 균열길이를 파괴검출에 의한 직접 측정이 추천되고 있지만 균열진전의 평가에서는 주로 광학적방법, 컴플라이언스 법, 스트레인 게이지 법 등이 사용되고 있다. 특히 광학적 방법에 의한 균열길이의 측정은 시험편 내부의 균열진전상태를 파악하기 어렵다는 등의 결점이 있지만 균열길이가 확실하고 균열선단의 형상이나 조직도 동시에 관찰할 수 있는 이점 등이 있으므로 ASTM E647-83 "10⁻⁸m/cycle 이상의 일정하중 진폭 피로균열 진전속도의 시험방법"에서는 이 방법에 의한 측정을 추천하고 있다.

(1) 균열길이 측정

시험은 ΔP 일정으로 하고 다른 부하조건은 고정하는 것이 좋으며, 광학적 방법에 의한 균열길이 측정에 있어서는 시험을 중단하지 않는 것이 원칙이며 중단하는 경우에는 이 시간을 최소 10분 이하로 하고 있다. 시험편 형상에 있어서 추천하고 있는 균열길이의 측정간격은 다음과 같다.

CT시험편 :

$$\Delta a \leq 0.02W \quad (0.25 \leq a/w \leq 0.60),$$

$$\Delta a \leq 0.01W \quad (a/W \geq 0.60)$$

CCT(중앙 노치 인장) 시험편 :

$$\Delta a \leq 0.03W \quad (2a/W \leq 0.60),$$

$$\Delta a \leq 0.02W \quad (2a/W \geq 0.60) \quad (12)$$

또한 어떠한 경우에서도 최소의 Δa 는 0.25mm 이상이며, 균열길이를 측정할 때 $B/W \leq 0.15$ 시험편의 경우는 한쪽 표면만 하고 이 값 이상의 시험편에서는 양 표면을 측정하여 이의 평균값을 사용하지만 이때 2점의 차이는 0.025W 이하, 0.25B 이하로 되어 있다. 또한 균열은 시험편의 대칭면에서 $\pm 5^\circ$ 이상 벗어나면 안 된다.

(2) 균열진전속도

ASTM규격에서는 균열길이 a 와 하중 반복수 N 의 관계로부터 균열진전속도 da/dN 을 결정하기 위하여 시컨트(Secant)법과 증분다항식(Incremental Polynominal)법이 추천되고 있다. 그림 14는 시컨트 법으로, 인접하는 2개의 균열길이의 점을 직선으로 연결하고 이의 기울기로부터 da/dN 을 결정한다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (13)$$

이 경우 da/dN 은 $(a_{i+1} - a_i)$ 에 대한 평균값이므로 ΔK 는 평균균열길이 $(a_{i+1} + a_i)/2$ 에 대한 값이다.

(3) ΔK 계산

표준 시험편인 소형인장시험편(CT)과 중앙노치 인장시험편(CCT)에 대한 ΔK 의 산출식은 다음과 같다.

CT시험편 :

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (14)$$

$\alpha = a/W$ 임

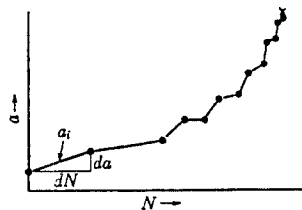


그림 14 균열 진전속도의 결정법

표 5 da/dN-ΔK 관계

년 도	저 자		비 고
1963	Paris	$da/dN = C(\Delta K)^2$	<ul style="list-style-type: none"> 정상영역 정상영역, 균열선단에서의 소성영역의 크기를 고려함 정상영역에서 최종파괴영역까지 적용시킴
1967	Roberts	$da/dN = C(\Delta K)^{a_1} \cdot (K_{max})^{a_2}$	
1967	Forman	$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dN} &= \frac{A(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \\ \frac{da}{dN} &= \frac{(\Delta K)^a (K_{max})^b}{(1-R)K_{fc} - \Delta K} \\ \frac{da}{dN} &= \frac{A(\Delta K)^m}{\{(1-R)K_c - \Delta K\}^n} \end{aligned} \right\}$	<ul style="list-style-type: none"> 균열닫힘(crack closure)을 고려함. $U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}}$
1971	Ishida		
1972	Pearson		
1971	Elber		

이 식은 $a/W \geq 0.2$ 에서 유효함.
CCT시험편 :

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi a}{2W} \sec \frac{\pi a}{2}} \quad (15)$$

$$a = 2a/W,$$

이 식은 $2a/W < 0.95$ 에서 유효함.
이 밖에 균열진전의 하한계측정을 위한 하중감소 시험이 일반적으로 행하여지고 있고, 10^{-8} m/cycle 이하의 da/dN의 측정을 포함하여 정상상태의 피로균열진전속도의 시험방법도 ASTM에서 검토되고 있다.

지금까지 보고되고 있는 균열진전속도 da/dN와 ΔK와의 관계식을 정리하면 표 5와 같다. 이들 관계식에서 c, m, a₁, a₂, a, b, n은 재료상수이며 또한 K_c는 파괴인성, K_{fc}는 피로 파괴인성, R은 응력비(stress ratio)이다.

5. 맺 음 말

파괴인성은 내적 및 외적요인 등에 의해 변할 뿐만 아니라 조직의 불균질성 때문에 소성둔화 및 파괴가 균일하게 일어나지 않으므로 이에 대응한 파괴인성을 선택하여 평가함이 가장 중요하다. 또한 기계의 고속화에 따라 충격적인 하중에 의한 동적파괴의 문제가 중요하게

되고 이에 따라 동적파괴인성 평가법의 확립에도 많은 연구가 필요하다. 한편 피로균열진전 거동의 실험에는 많은 시간과 인적 노력이 필요로 하며 이러한 문제점을 해결하여 균열진전 측정의 정밀화 및 효율성을 높이기 위해서는 컴퓨터의 이점을 적극적으로 응용할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- (1) ASTM E399-78, E399-83, Standard Test Method for Plane-Strain Fracture toughness of Metallic Materials.
- (2) ASTM E813-81, Standard Test Method of J_{IC}, Measure of Fracture Toughness.
- (3) ASTM E647-83, Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10⁻⁸m/cycle.
- (4) JSME 日本機械學會基準, 1981, 彈塑性破壞靱性 J_{IC}試驗方法 JSME S001.
- (5) 國尾, 中澤, 林, 岡村, 1984, “破壞力學實驗法”, 朝倉書店.
- (6) D. Broek, 1986, “Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4th edition”, Martinus Nijhoff Publishers.

