

<論 文>

균열정지현상에 관한 기초적 연구

이억섭* · 김상철* · 송정일**

(1989년 8월 17일 접수)

A Basic Study on the Crack Arrest Phenomena

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

Key Words : Dynamic Fracture Mechanics(동적 파괴역학), Crack Arrest Fracture Toughness(균열정지 파괴인성치), Crack Initiation Stress Intensity Factor(균열개시응력확대 계수), Thick Walled Structure(厚壁構造物), Fast Running Crack(빠른진전균열), Material Property(재료물성치), Nuclear Reactor Pressure Vessel(핵반응 압력용기)

Abstract

Catastrophic fracture cannot be avoided after cracks(initiated from pre-existing defects) propagate rapidly with speeds comparable to a sound wave velocity of the materials. Preventing catastrophic failure, crack arrest fracture toughness defined from dynamic(or kinetic) fracture mechanics point of view has been introduced in determining accurate and/or proper crack arrest fracture toughness of a material. For the past decades, many studies have been carried out to render proper theoretical and experimental backgrounds on the use of the static plain 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 has been considered as a measure of the ability 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, standards procedures for measuring toughness associated with fast running cracks are yet to exist. This study intends to give insight on the determination of the crack arrest fracture toughness of materials such as polymethylmethacrylate(PMMA), SM45C-steel, and A1 7075-T6. The effects of crack jump lengths and fast crack initiation stress intensity factor on the determination of K_{Ia} have been experimentally observed.

1. 서 론

종래에는 파괴현상을 조절하기 위해서 주로 균열의 성장개시의 기구(mechanism)를 연구하고 이들

을 제어하는 방법을 연구하는 것이 파괴역학 연구의 주종을 이루었다^(1,2). 그러나 파괴역학의 개념을 도입하여 안전, 경제적인 설계를 하였을 경우에도 예기치 않은 충격하중등에 의하여 균열의 급격한 성장이 불가피한 경우가 많다.

이러한 경우에는 이미 빠른 속도로 성장하고 있는 균열을 어떻게 정지 시키느냐가 공학적으로 중요한 문제가 된다^(3,4). 즉 갑작스런 熱荷重의 작용

*정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

**정회원, 산업과학기술연구소

(예: 원자로의 압력용기, 가스 수송 파이프)에 의해 균열의 성장개시가 불가피한 구조물 구성요소에서 균열정지현상은 파괴현상을 조정하고 사고를 방지하기 위하여 연구되어야 하는 분야이다. 동적(dynamic or kinetic) 파괴역학의 기본이론이 이러한 실용적인 측면에서 매우 중요한 개념들이기는 이미 잘 알려져 있다^(5,6). 미국의 Kobayashi⁽⁷⁾, Kanninen⁽⁸⁾, Popelar⁽⁹⁾, Hahn⁽¹⁰⁾, 독일의 Kalthoff⁽¹¹⁾ 등이 동적인 파괴역학의 기본개념을 이용하여 공학 구조물(engineering structures)내의 동적균열의 정지현상을 구명하려는 연구들을 시도한 바 있으며, 국내에서는 Lee⁽¹²⁾가 동적균열정지현상을 규명하여 안전설계자료를 발표하였다.

한편 미국의 MRL(Material Research Laboratory)의 Crosley와 Ripling등은 균열정지현상을 정적인 접근방법⁽¹³⁾으로 해결하는 시도를 하고 있다. 따라서 동적균열정지현상의 연구동향은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 즉, 동적인 파괴역학의 개념에 기초를 둔 접근법과 정적인 파괴역학의 개념에 기초를 둔 접근법이다. 어느 방법이 균열정지현상을 더 정확하게 모델링(modelling)하는 가는 계속 연구되어야 할 과제이며, 동적파괴역학을 연구하는 연구자들 사이의 여러가지 이견으로 말미암아 아직까지 완전히 규격화된 유일한 실험방법이나 실험값 처리방법등이 창출되고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 ASTM-E24.01.06⁽¹⁴⁾에서 제안하고 있는 실험방법을 응용하여 균열정지 파괴인성값을 측정하였다. 즉 췌기와 분리형 부싱(wedge and split bushing)으로 압축하중을 가함으로 균열선 웨지하중 시편[crack line wedge loaded specimen (CLWL시편)]에 인장력을 발생시켜서 균열정지 응력확대계수(K_{Ia})⁽¹⁵⁾를 결정하였다. 그리고 균열개시 응력확대계수가 균열정지 응력확대계수에 미치는 영향들을 여러가지 재료들에 대하여 체계적으로 검토하였다.

2. 균열정지현상의 파괴역학적인 해석

빠르게 전파하는 균열과 균열정지현상의 파괴역학적 실험 및 해석은 공업적으로 매우 중요한 사항이며, 균열정지현상의 해석이 중요하게 응용될 대표적인 기계구조물의 예로는 파이프라인(pipelines)과 厚壁壓力容器[thick walled pressure vessels(TWPS)] 등이 있다.

TWPS에서는 熱的衝擊(thermal shock) 때문에 높은 응력이 벽의 내부표면에 작용하게되며 균열이 있는 경우 불안정한 균열 전파를 유발시킬 수도 있다. 허용가능한 동적인 균열성장(dynamic crack growth)이 상당히 제한적 일때는, 균열선단의 동적인 에너지는 현저하게 줄어든다는 사실을 기초로 동적인 파괴(dynamic fracture)를 해석하는 것이 Crosley와 Ripling의 균열정지인성치(crack arrest toughness)접근방법⁽¹⁴⁾이다.

Crosley와 Ripling에 의하면 불안정한 균열의 성장길이를 감소시키면 응력확대계수에 미치는 동적 효과는 무시할 수 있으며, 이 경우 균열정지시 산정한 정적인 응력확대계수(K_{Ia})는 실제 응력확대계수에 이상적으로 접근시킬 수 있다. 또한 K_{Ia} 는, 균열길이와 속도가 어떤 범위내에서는, 거의 일정하며 균열정지시의 동적응력확대값인 K_{Ia} 와 K_{Ic} 는 대체로 차이가 없는 것을 밝혔다.

수년동안 Crosely와 Ripling의 정적인 해석의 타당성에 관해서는 논란의 여지가 많았다. 특히 Kanninen, Kobayashi등은 균열정지시 응력확대계수를 결정할 경우에는 동적인 에너지 접근법(dynamic energy balance approach)을 사용해야 한다고 제안하였다. 이와같이 정적인 접근방법과 동적인 접근방법 등으로 균열정지시 동적파괴인성치(dynamic fracture toughness)를 정확하고 간편하게 결정하기 위하여 많은 연구가 계속되고 있다⁽¹⁵⁾.

3. 시험편 및 실험방법

본 실험에서 사용한 재료는 유리질 중합체의 일종인 Polymethylmethacrylate(PMMA), 기계구조용강인 SM45C, 그리고 고강도 알루미늄합금인 Al 7075-T6등이며, 그 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 시험편 형상과 치수는 ASTM E24.01.06에서 제안한 것과 같으며 Fig. 1에 도시하였다. 실험장치로서는 만능재료 시험기를 사용하였으며, 균열 개구 변위(COD)는 연신 측정기(extensometer)를 하중선(load-line)으로부터 0.25W 거리에 부착해서 측정하였다.

균열정지 인성치(K_{Ia})를 결정하기 위해서는 진전균열이 멈춘 후 짧은 시간(10^{-3} sec)내에 변위측정을 해야하므로 균열개구변위와 시간(COD와 time)관계를 기록하기 위하여 데이터 기록계(data-recorder)와 linear-corder를 사용했고, 시험중

Table 1 Chemical compositions of each materials(weight %)

Compositions materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Fe	Mg	Zn	Al	Ni
SM45C (round bar)	0.43	0.18	0.7	0.015	0.016	-	-	-	-	-	-	-
Al 7075-T6		0.4	0.3	-	-	0.21	1.6	0.5	2.5	5.7	rem.	-

*rem. : remainder

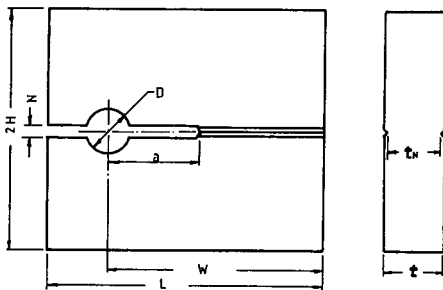
Table 2 Mechanical properties of each materials

Properties materials	Tensile strength σ_u (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Poisson's ratio, (ν)	Young's modulus E (MPa)	Elongation (%)
PMMA	58	56	0.29	3430	2
SM45C	640	365	0.31	212000	22
Al 7075-T6	539	480	0.30	75000	8

하중과 균열개구변위 (P 와 COD) 관계는 X-Y 기록계 (X-Y recorder) 로 도시하였다.

하중은 균열진전이 개시될 때까지 균열선웨지 (crack line wedge) 하중을 5mm/min 속도로 일정하게 가하였으며 균열이 정지한 후 순간적으로 하중을 제거하였다. 또한 균열점프길이 (crack jump length)의 측정을 위해서 알루미늄 (Al 7075-T6)인 경우는 균열정지 후 웨지 (wedge)를 뽑기 전에 착색잉크를 삽입하였다.

그리고 잉크가 완전히 마르도록 항온조 안에서 150°C로 2시간 정도 가열한 후 시편을 파단하였다. 또한 SM45C도 실험 직후 전기로에 넣고 250°C온도에서 2~3시간 가열하여 열착색 (heat tinting)한 후 파단하였다. 파단시킨 시편의 표면에 나타난 균열전파길이는 1/100mm의 정밀도를 갖는 이동식 현미경 (traveling microscope)으로 측정하였다.



$H = 0.6W, t_N = 0.75t, N = 12.7mm$

Fig. 1 Compact crack arrest specimen

실험결과와 정리를 위해서는 Crosely와 Ripling이 제안⁽⁴⁾한 다음 식을 이용하였다.

$$K = \frac{\delta E}{\sqrt{W(T/T_n)}} Y(a/W)$$

여기서, E : 시편재료의 탄성계수

W : 시편폭

δ : 균열개구변위

T : 시편두께

T_n : 시편순수두께

$Y(a/W) =$

$$\frac{2.2434(1.7164 - 0.9(a/W) + (a/W)^2)\sqrt{1-a/W}}{9.85 - 0.17(a/W) + 11.0(a/W)^2}$$

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 2~Fig. 8은 각 시편의 균열정지인성치

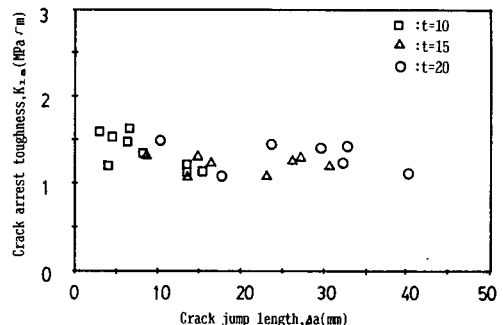


Fig. 2 Crack arrest toughness vs. crack jump length PMMA(100×100)

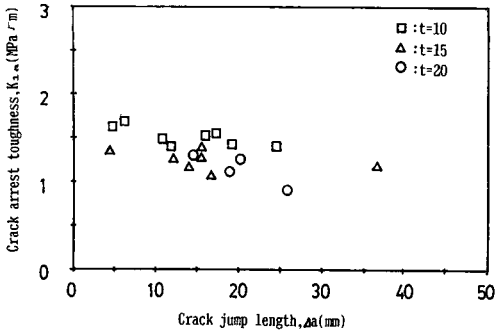


Fig. 3 Crack arrest toughness vs. crack jump length PMMA(150×150)

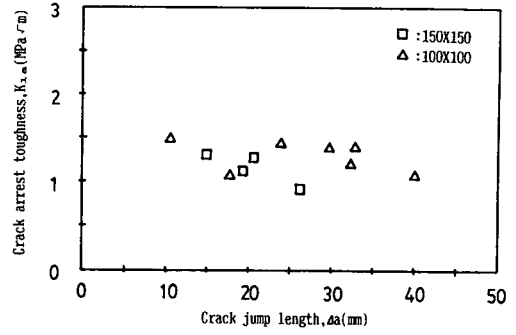


Fig. 6 Crack arrest toughness vs. crack jump length PMMA($t=20$)

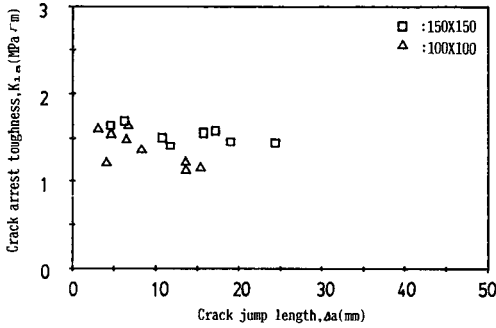


Fig. 4 Crack arrest toughness vs. crack jump length PMMA($t=10$)

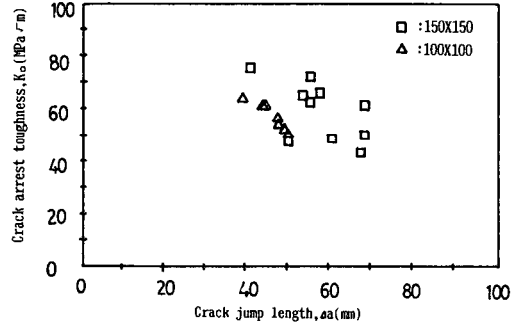


Fig. 7 Crack arrest toughness vs. crack jump length SM45C($t=13$)

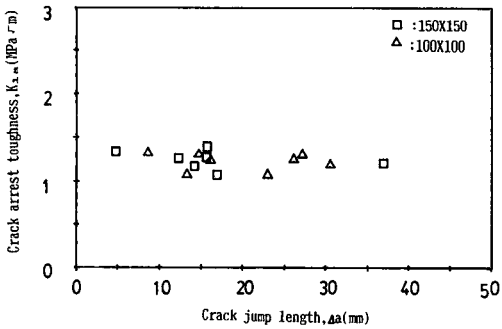


Fig. 5 Crack arrest toughness vs. crack jump length PMMA($t=15$)

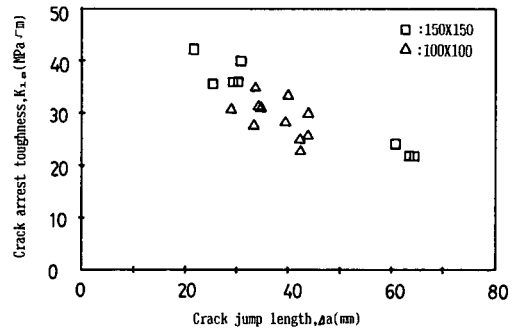


Fig. 8 Crack arrest toughness vs. crack jump length AL7075-T6($t=13$)

(K_{1a})와 균열점프길이(Δa)의 관계를 나타낸 것으로 각 재료의 크기는 100mm^2 (100S)와 150mm^2 (150S)로 가공했으며, 여러가지 다른 두께에 대한 측정값을 함께 표시한 선도이다.

Fig. 2~Fig. 6은 PMMA에 대한 것으로서 100S에서는 균열정지인성치(K_{1a})가 $1.23\text{MPa}\sqrt{m}$, 150S는 $1.18\text{MPa}\sqrt{m}$ 이고 표준편차는 두 경우, 같이 $0.11\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 큰 편차를 보이지 않은 것으로 보

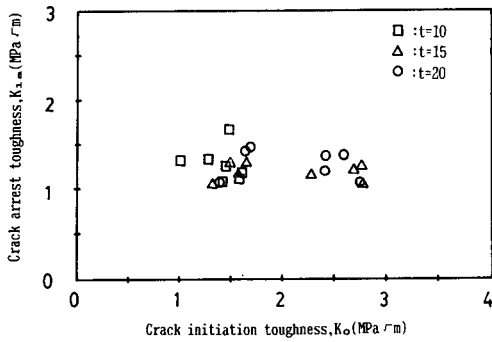


Fig. 9 Crack arrest toughness vs. crack initiation toughness PMMA(100×100)

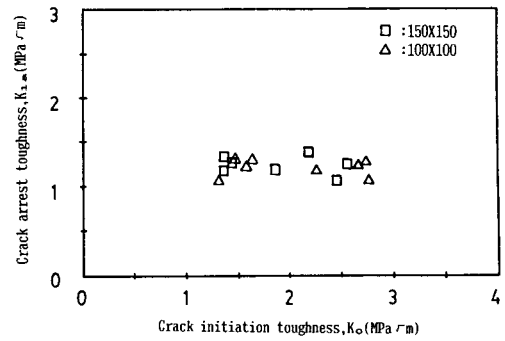


Fig. 12 Crack arrest toughness vs. crack initiation toughness PMMA(t=15)

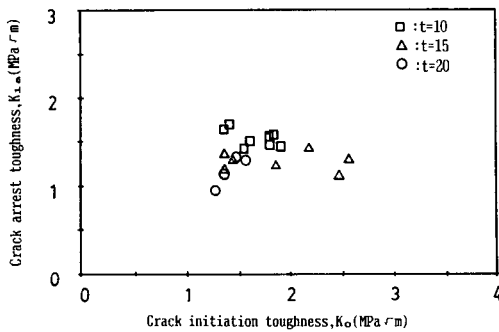


Fig. 10 Crack arrest toughness vs. crack initiation toughness PMMA(150×150)

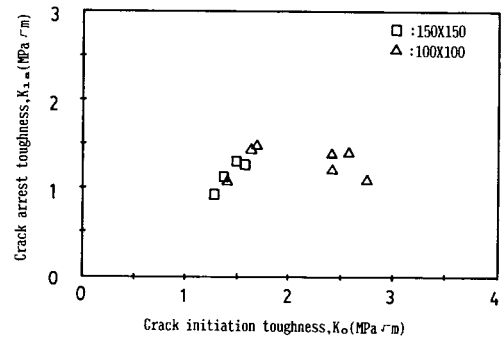


Fig. 13 Crack arrest toughness vs. crack initiation toughness PMMA(t=20)

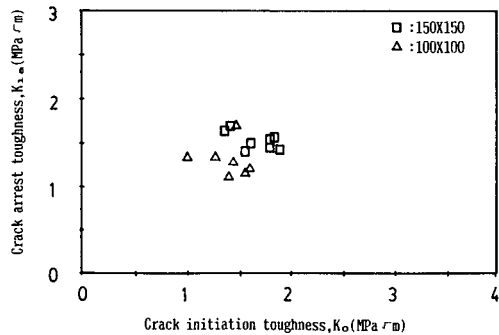


Fig. 11 Crack arrest toughness vs. crack initiation toughness PMMA(t=10)

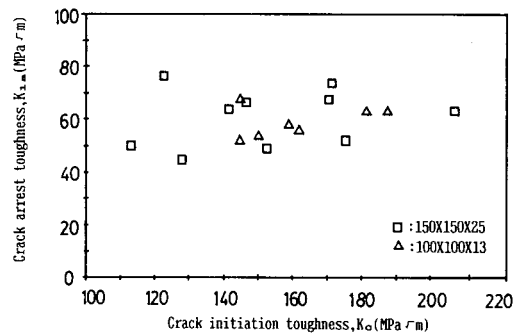


Fig. 14 Crack arrest toughness vs. crack initiation toughness SM45C

아 균열정지인성치($K_{i,a}$)는 크기와 두께의 영향이 없는 것으로 밝혀졌다.

SM45C의 100S와 150S에 대한 균열정지인성치($K_{i,a}$)는 Fig. 7에서 함께 도시했으며 각각 $50.80 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 과 $60.50 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 산정되었고, 표준편차

는 각각 $4.6 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 과 $10.4 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이다. 150S에 대한 값이 100S에 대한 값보다 약간 편차가 크게 나타났고, Δa 가 클수록 $K_{i,a}$ 값은 작아졌다.

Fig. 8은 기계구조용강(SM45C)과 같은 크기로 가공한 고강도 알루미늄합금(Al 7075)에 대한 결과

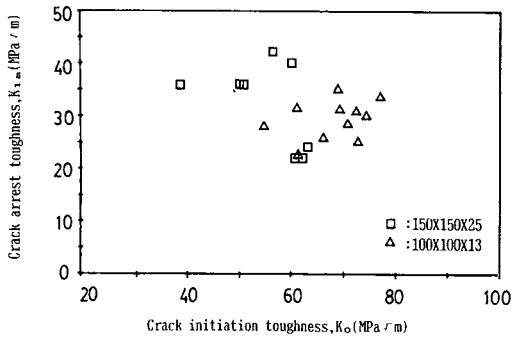


Fig. 15 Crack arrest toughness vs. crack initiation toughness Al 7075-T6

를 나타낸 것으로 서로 다른 크기의 시편에 대한 결과들을 종합한 선도이다. 100S와 150S의 K_{1a} 값은 각각 $38.48\text{MPa}\sqrt{m}$ 과 $29.00\text{MPa}\sqrt{m}$ 이며, 편차는 $3.35\text{MPa}\sqrt{m}$ 와 $3.50\text{MPa}\sqrt{m}$ 이었다. SM45C와 같이 Δa 가 커질수록 K_{1a} 값이 작았으나, 편차는 대체로 일정한 경향을 보였다.

Fig. 9~Fig. 15는 균열정지인성치(K_{1a})와 균열개시인성치(K_0)의 관계를 각 시편에 관해 나타낸 것이다. 먼저 크기와 두께가 서로 다른 PMMA 시편을 종합한 선도들에서 균열개시인성치(K_0)는 2~3배의 변화를 보이고 있으나 K_{1a} 는 편차가 $0.11\text{MPa}\sqrt{m}$ 범위로 대체적으로 일정함을 알 수 있다. 이러한 양상은 Fig. 9~Fig. 13의 선도에서처럼 시편의 크기를 달리한 경우에서도, 또는 Fig. 14~Fig. 15에서 보인 바와 같이 SM45C와 AL7075에서도 K_0 에 의존성이 없음을 확인할 수 있었다.

PMMA인 경우는 구조용강이나 알루미늄합금강과는 달리 균열점프길이가 균열정지인성치(K_{1a})에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있었다. 기계구조용강(SM45C)과 고강도 알루미늄합금(AL7075-T6)의 경우, 균열정지인성치(K_{1a})는 균열점프길이가 커짐에 따라 작아짐을 관찰할 수 있었으며, 100S보다 150S가 이러한 경향이 더욱 뚜렷했다.

5. 결 론

ASTM E24.01.06에서 추천한 기하학적인 형상을 갖는 시편을 제작하여 유리질 중합체의 일종인 PMMA, 국산 구조용강인 SM45C, 그리고 항공산업 등에 널리 이용되는 고강도 알루미늄 합금인

Al 7075-T6에 대해서 균열정지현상을 정적인 접근 방식인 실험으로 구명하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 균열점프길이가 균열정지 인성치(K_{1a})에 미치는 영향을 살펴보면; PMMA에 대해서는 거의 영향이 없었으나, SM45C와, Al 7075-T6는 균열점프길이가 커짐에 따라 균열정지 인성치가 작아지는 현상을 보였다.

(2) 본 실험에서 사용한 모든 재료에 있어서 균열개시 응력확대계수(K_0)의 변화에 관계없이 균열정지인성치(K_{1a})는 대체로 일정한 값을 얻었다.

(3) 균열정지인성치(K_{1a})는 PMMA가 $1.21(\pm 0.11)\text{MPa}\sqrt{m}$, SM45C는 $59.15(\pm 7.5)\text{MPa}\sqrt{m}$, Al 7075-T6에 대해서는 $30.70(\pm 5.6)\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 산정할 수 있었다.

후 기

본 연구는 1987년 문교부(자유공모과제) 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 관계자 제위계 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Mott, N. F., 1948, "Fracture of Metals : Theoretical Considerations", Engineering, Vol. 165, p. 16.
- (2) Rosenfield, A. R., et. al., 1987, "A Micromechanical Model for Cleavage Crack Reinitiation", Met. Trans. A, Vol. 18A, pp. 1053~1059.
- (3) Crosly, P. B. and Ripling, E. J., 1977, "Characteristics of a Run Arrest Segment of Crack Extention", ASTM STP 627, pp. 203~227.
- (4) Weiner, R.J. and Rogers, H.C., 1980, "A High-Speed Technique for Precision Measurement of Crack Velocities", ASTM STP 627, pp. 321~337.
- (5) Rosenfield, A. R., et. al., 1976, "Influence of Metallurgical Factors on the Fast Fracture Energy Absorption Rates", Met. Trans. A, Vol. 7A, p. 49.
- (6) Hoagland, R.G., Rosenfield, A.R., 1977, "A Crack Arrest Measuring procedure for K_{1m} , K_{1a} and K_{1a} Properties", ASTM STP 627, pp. 177~202.
- (7) Kobayashi, A.S., 1973, "Photoelasticity Techniques, Experimental Techniques in Fracture Mechanics, Society for Experimental Stress Analysis", Iowa State Press, Chapter 6., Monograph No. 1, pp. 126~145.

- (8) Kanninen, M.F., 1974, "An analysis of Dynamic Crack Propagation and Arrest in the DCB Test Specimen", *Int'l. J. of Fracture*, Vol. 10, pp. 415~430.
- (9) Popelar, C.H., 1979, "A Method of Extracting Dynamic Fracture Toughness from CT Tests", *Int'l. J. of Fracture*. Vol. 15, p. 69.
- (10) Hahn, G.T., et. al., 1973, "The Characterization of Fracture Arrest in a Structural Steel", *Pressure Vessel Technology*, American Society of Mechanical Engineers, Part II. pp. 981~994.
- (11) Kalthoff, J.F., et. al., 1980, "Experimental Analysis of Dynamic Effects in Different Crack Arrest Test Specimens, Crack Methodology and Applications", ASTM STP 711, pp. 107~127.
- (12) 이억섭, 1984, "동적파괴역학에 대하여", *대한기계학회지*, 제24권, 제 6 호, pp. 452~458.
- (13) Crosley, P.B. and Ripling, E.J., 1986, "A Review of Static Crack Arrest Concepts", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 23, No. 1, pp. 21~33.
- (14) Crosley P.B., et. al., 1983, *Cooperative Test program on crack toughness Measurements*, ASTM. E24.01.06, pp. 1~20.
- (15) Crosley, P.B. and Ripling, E.J., 1980, "Significance of Crack Arrest Toughness(K_{Ia}) Testing", ASTM STP 711, pp. 321~337.