

## 소형펀치 시험의 선형탄성 파괴역학적 분석을 통한 파괴인성 평가

朱章福 · 張宰溢\* · 李柏雨 · 權東一

서울대학교 재료공학부  
\*(주) 프론틱스 연구개발팀

### Evaluation of Fracture Toughness through Linear Elastic Fracture Mechanical Analysis of Small Punch Test

Jang-Bog Ju, Jae-il Jang\*, Baik-Woo Lee and Dongil Kwon

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea  
\*R & D Team, Frontics Inc., Seoul 151-742, Korea

**Abstract :** Small punch test is used to assess the reliability of industrial facilities such as fusion reactor structures and power generation systems. Conventional small punch tests evaluate transition temperature and fracture strain by analyzing the load-deflection curves and deformation behaviors, respectively. However, previous research did not consider fracture mechanical concepts such as flaw, stress analysis and fracture toughness. In this study, to obtain more reliable fracture characteristics based on linear elastic fracture mechanics in small punch tests, a pre-crack was introduced to small punch specimen. Stress and deformation behaviors near the crack tip were analyzed and the stress intensity factor was derived. Using the load at crack initiation point, the fracture toughness of SA 508 Cl.3 steel was successfully evaluated.

(Received August 1, 2000)

**Key words :** Small punch test, Pre-crack, Stress intensity factor, Crack initiation point, Fracture toughness, Linear elastic fracture mechanics.

#### 1. 서 론

산업이 발달함에 따라 구조물에 사용되는 재료는 점점 대형화, 복합화 되어가고 있는 추세이다. 이와 더불어 70년대 경제 성장기에 활발히 건설된 발전소나 교량과 같은 많은 대형 구조물의 경우에는 사용기간이 경과함에 따라 사용된 재료의 열화 및 노후화가 진행되고 있다. 이에 따라 최근에는 구조용 재료의 안전성 확보 및 잔여수명 예측을 위한 신뢰성 평가법 개발에 대한 연구가 활발히 이루어지게 되었다. 하지만, 현재 사용 중에 있는 대부분의 구조물에서는 현장에서의 시험편 채취가 매우 어려울 뿐만 아니라, 기존의 표준 시험법에 필요한 크기의 시험편을 얻기가 힘들다.

최근 이를 위해서 미국과 일본의 원자력 연구소를 중심으로 소형 시험편을 이용하여 재료의 기계적 물성을 평가하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1-5)</sup>. 이러한 시험법에는 미소인장 시험법, 미소경도 시험법, 소형펀치 시험법, 미소충격 시험법 등이 있으며, 이 중에서 재료의 파괴특성을 평가할 수 있는 시험법으로는 소형펀치 시험법이 널리 이용되고 있다. 소형펀치 시험법은 원래 미국이나 일본에서 원자로용 압력용기의 중성자 조사손상 평가 및 노벽 재료 개발을 위해 도입, 연구되어 왔다<sup>6-12)</sup>. 이 방법은 실제 현장에서 쓰이고 있는 부품에 있어서 그 강도에 영향을 주지 않을 정도의 작은 영역에서도 시험편의 채취가 가능하여 비교적 비파괴적인 방법으로 재료의 기계적 성질을 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

소형펀치 시험법을 이용하여 파괴특성을 평가하는 기존의 연구를 살펴보면, Baik 등<sup>7)</sup>은 소형펀치 시험시의 하중-변위 곡선

의 모양이 온도에 따라 달라지는 것을 이용하여 재료의 연성-취성 천이온도(Ductile-Brittle Transition Temperature; 이하 DBTT)를 평가하였다. 즉, 소형펀치 시험법을 이용하여 기존의 샐피 V-노치 충격 시험법에서 구한 DBTT와의 상관관계로부터 재료의 파괴특성을 평가한 것이다. 하지만, 이러한 접근법은 파괴역학적 분석을 통한 파괴인성값이 아닌 천이적 접근법에 의한 경험적인 파괴특성 값만을 제시하고 있다. 또한, 소형펀치 시험에 의한 DBTT 값이 기존의 샐피 충격시험에 의한 DBTT 값보다 작게 평가되는 단점을 가지고 있는데, 이는 시험편 두께의 감소 및 하중부하 속도의 차이에 기인한다고 알려져 있다<sup>13)</sup>. 한편, Mao 등<sup>11)</sup>은 소형펀치 시험 시 하중의 증가에 따른 시험편 두께의 변화를 유한요소법(finite element method)이나 직접적인 관찰을 통해 파괴변형률로 정의하고, 이를 파괴인성( $J_{IC}$ )과의 실험적인 관계로부터 재료의 파괴특성을 평가하였다. 하지만, 이 경우에도 균열진전 개시점이나 균열 주위의 응력장 해석과 같은 파괴역학적인 개념이 없이 재료에 따라 각기 다른 경험적인 실험식만을 제시하고 있는 실정이다.

파괴역학이라는 개념은 균열 주위의 응력 및 변형률 상태를 해석하는 균열의 역학과 파괴의 조건으로 구성되어 있다. 그러므로 파괴역학에 기초한 파괴인성 시험이란 시험편에 균열을 도입하고, 그 균열 주위의 응력과 변형률을 역학적으로 해석하여 균열의 발생과 성장 등을 예측하는 올바른 시험기준을 확립한 후, 그 시험을 통하여 파괴가 일어날 조건을 구하는 방법을 의미한다.

본 연구에서는 소형펀치 시험법을 개선하여 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하고자 하였다. 먼저 소형펀치 시험편에 미리 균열을 형성시키고, 균열 주위의 응력장 해석 및 시험편의 변형

양상 해석을 바탕으로 개선한 소형펀치 시험법의 선형탄성 파괴역학(LEFM; Linear Elastic Fracture Mechanics)적 분석을 통하여 재료의 파괴인성을 평가하였다.

## 2. 이론적 해석

파괴역학은 모든 공학적 재료들이 파손의 시발점 역할을 하는 균열을 포함한다는 가정에 기초하고 있다. 그러므로, 파괴역학에 기초하여 기계나 구조물의 잔여수명을 예측하기 위해서는 구조물 내부에 존재하는 균열의 성장 조건과 함께 균열의 존재로 인해 발생하는 응력의 재분포 효과를 평가하여야 한다. 즉, 균열은 균열 첨단에서 높은 응력을 유발하게 되고, 이러한 응력 집중부에서 균열의 성장이 발생하기 때문에 균열 및 균열 주위의 응력 재분포에 대한 보다 체계적인 분석이 필요하다. 한편, 균열을 포함하는 구조물에 하중이 인가되면 보통 완전 취성재료를 제외하면 비탄성적인 변형과 기타 비선형적인 효과가 균열 첨단에서 나타나게 된다. 하지만, 균열의 크기나 다른 구조물의 기하학적 특성과 비교할 때 이러한 비탄성적이고, 비선형적인 효과의 정도가 매우 작은 경우가 있다. 이러한 경우에는 선형적인 이론이 균열을 포함하는 구조물의 응력 재분포 문제를 분석하는데 적합하게 적용될 수 있다. 이러한 의미에서 균열 첨단에서의 응력 특이성(stress singularity)의 강도를 결정하는 인자인 응력확대계수(stress intensity factor)가 균열을 포함하고 있는 구조물의 응력 재분포 효과를 선형탄성 파괴역학적으로 분석할 수 있는 기본적인 요소로서 매우 유용하게 사용되어 왔다<sup>14)</sup>. 여러 연구자들에 의해 간단한 기하학적 형상에서부터 실구조물과 유사하게 복잡한 형상을 가지는 다양한 형태의 균열 및 하중 방식에서의 응력확대계수에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다<sup>15-17)</sup>. 특히, 최근에는 복합적인 하중의 인가 및 복잡한 형상의 균열 등과 같이 실제 구조물이 처한 상황에 있어서의 변형상태를 수치해석이나 유한요소법 등을 이용하여 분석함으로써 보다 유효한 응력확대계수를 구하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>18,19)</sup>.

본 연구에서는 이러한 응력확대계수를 소형펀치 시험법에 도입하여 보다 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 기존의 시험법과는 달리 소형펀치 시험편의 중앙부위에 관통형 균열을 형성시켰는데, 이는 선형탄성 영역에서는 소형펀치 시험 시 응력이 시험편의 중앙부위에 집중된다는 기존의 연구에 근거한 것이다<sup>20)</sup>. 또한, 응력확대계수는 소형펀치 시험편의 경우 얇은 박판 형태이기 때문에 Sih 등에 의해 제안된 식<sup>17)</sup>을 이용하였다.

그림 1(a)와 같이 균열의 길이가  $2a$  인 관통형 균열을 가진 박판에 굽힘 응력이 작용하고 있는 경우에 균열첨단에서의 응력 상태는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \frac{2\sqrt{2}(1+\nu)\delta r K_1}{(3+\nu)t} \left[ \frac{\cos \theta}{\sqrt{r}} - \frac{K_2}{2} \frac{\sin \theta}{\sqrt{r}} \right] \quad (1)$$

여기에서  $\sigma_r$  및  $\sigma_\theta$ 는  $(r, \theta)$  방향으로의 굽힘응력을 나타내는 요소이고,  $r$  및  $\theta$ 는 균열첨단으로부터의 위치,  $t$ 와  $\delta$ 는 각각 시험편의 두께 및 중앙 평면(middle plane)에 대한 수직 변위,  $\nu$ 는 재료의 Poisson 비를 나타낸다. 이 때, 응력 확대계수로 정의할 수 있는  $K_1$ 과  $K_2$ 는 복소수 변수법 및 사상 함수(mapping

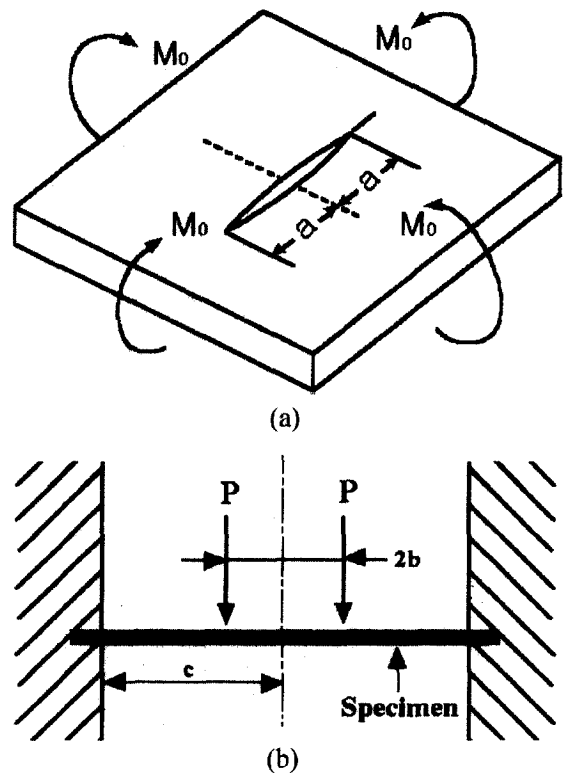


Fig. 1. Schematic diagrams of (a) small punch specimen with through-thickness crack and (b) loading condition in small punch test.

function)를 도입하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K = K_1 - iK_2 \\ = -\frac{12D(3+\nu)}{t^2 a^{1/2}} \psi'(\zeta) \Big|_{\zeta=1} \quad (2)$$

여기에서  $D$ 는 박판의 유동 인성도(flexural rigidity)를,  $\zeta$ 는 사상함수( $\psi$ )에서의 복소수 변수를 나타낸다. 복소수 변수법은 굽힘 하중이 작용할 때, 재료의 변형을 나타내는 Airy 응력함수 등과 같은 상호 조화 방정식에 경계조건을 대입하여 복소수 변수를 결정하는 방법으로, 본 연구에서는 복소수 변수  $\zeta$ 를 수식적으로 표현할 수 있는 사상함수의 도입을 통해 응력확대계수를 결정하였다. 즉, 본 연구에서 개선한 소형펀치 시험법과 같이 관통형 균열을 갖는 박판에  $M_0$ 의 굽힘 하중이 작용하고 있을 때, 균열 주위에서의 변형 및 응력 상태를 나타내는 사상함수는 식 (3)과 같이 표시할 수 있다<sup>17)</sup>.

$$\psi(\zeta) = -\frac{M_0 a}{4D(1+\nu)} \left[ \zeta + \frac{1-\nu}{3+\nu} \frac{i}{\zeta} \right] \quad (3)$$

결과적으로 응력확대계수는 식 (3)을 식 (2)에 대입함으로써 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_1 = \frac{6M_0}{t^2} \sqrt{a} \quad \text{and} \quad K_2 = 0 \quad (4)$$

식 (4)에서 살펴볼 수 있는 바와 같이, 응력확대계수는 굽힘 하중, 시험편의 두께 및 균열 길이의 함수로서 단순한 인장응력을 받고 있는 경우와 같이  $K_1$  모드만으로 표시될 수 있다.

한편, 실제 소형펀치 시험 시 시험편에 작용하는 굽힘 하중은 구형 볼 하부에서의 복잡한 변형양상으로 인해 유한요소법 등을 통해서 평가되고 있다<sup>11)</sup>. 하지만, 본 연구에서와 같이 선형탄성 영역에서 시험편이 변형을 겪게 되는 경우에는 그림 1(b)에서와 같이 균일한 하중이 시험편에 작용하고 있다고 가정할 수 있다<sup>20,21)</sup>. 즉, 양끝이 고정된 박판에 중심부분으로부터 시험편 전체에 균일한 하중이 작용한 경우에 시험편에 작용하는 굽힘 하중은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$M_0 = -D(1+\nu) \frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_{x=0} \tag{5}$$

$$= \frac{1+\nu}{4\pi} P \left( \ln \frac{c}{b} + \frac{b^2}{4c^2} \right)$$

여기에서  $x$ 는 시험편 중앙부분에서부터의 위치를 나타내고,  $w$ 는 작용하는 하중에 의한  $x$ 에서의 수직 변위를 나타낸다. 또한,  $P$ 는 소형펀치 시험편에 작용하는 하중,  $b$ 는 접촉반경,  $c$ 는 소형펀치 시험장치에서 하부다이(lower die)의 반경을 나타낸다.

파괴역학 개념에는 균열 첨단에서의 응력해석을 통한 응력확대계수의 결정과 함께 균열의 발생 및 성장 등의 시험기준 확립을 통한 파괴조건 설정이 필요하다. 본 연구에서는 소형펀치 시험 시 하중의 증가에 따라 균열 첨단에서의 응력집중으로 균열이 발생, 성장하는데, 이러한 균열 개시점에서의 하중은 하중-변위 곡선의 모양변화 등을 통해 결정할 수 있다. 즉, 관통형 균열을 갖는 경우에 있어서 굽힘 응력을 받는 소형펀치 시험편의 선형탄성 파괴인성( $K_{Ic}$ )은 식 (5)에서와 같이 시험편의 변형양상을 고려한 굽힘 하중과 균열진전의 개시점에서의 하중( $P_i$ )을 식 (4)에 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{Ic} = \frac{3}{2} \frac{P_i(1+\nu)}{\pi t^2} \left( \ln \frac{c}{b} + \frac{b^2}{4c^2} \right) \sqrt{a} \tag{6}$$

### 3. 실험 방법

#### 시험편 준비

본 연구에 사용된 재료는 원자로 압력용기에 사용되는 SA 508 Cl.3 강으로 표 1에는 각 시험편의 화학적 조성을 나타내었다. 소형펀치 시험편은 먼저 10×10×0.5 mm(가로×세로×두께)의 크기로 절단하였으며, 시험편의 중심 부위에 그림 2에서와 같이 정밀한 와이어를 이용하여 관통형 균열을 형성시켰다. 이때, 균열 첨단에서의 곡률은 대체로 20 μm가 되도록 하여 소형펀치 시험 시 응력이 집중될 수 있도록 하였다. 시험편의 표면상태가 전체 하중-변위 곡선에 영향을 줄 수 있으므로, 연마지(emery paper)를 이용하여 시험편의 양면을 2000번까지 연마하

Fig. 2. Pre-crack shape and location of small punch specimen.

였다. 소형펀치 시험에 앞서 시험편의 두께 및 균열의 길이 등을 광학 현미경으로 측정하였다.

#### 소형펀치 시험

그림 3에는 본 연구에 사용된 소형펀치 시험장치 및 소형펀치 지그의 실물사진을 나타내었다. 소형펀치 시험장치는 시험편을 지지하는 상부다이(upper die) 및 하부다이, 그리고 시험편에 하중을 인가하기 위한 펀치(punch)와 강구(steel ball)로 구성되어 있다. 이때, 시험편은 완전 클램핑(clamping) 하여 하중인가 시 시험편의 컵(cup)형 변형을 억제시킴으로써 재료의 변형이 강구의 직하에 집중될 수 있도록 하였다. 또한, 기존의 시험기와는 달리 전체 시스템의 축 일치(alignment)를 위해서 펀치 및 부분

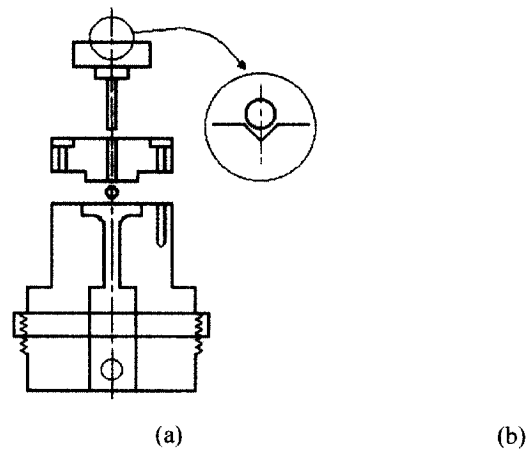


Fig. 3. (a) Schematic diagram and (b) photograph of small punch jig used in this study.

Table 1. Chemical compositions of tested materials in this study.

	Chemical compositions (wt.%)									
	C	Mn	Si	Al	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu
SA508-1	0.19	1.35	0.09	0.009	0.82	0.16	0.52	0.008	0.004	0.04
SA508-2	0.20	1.42	0.07	0.005	0.79	0.15	0.57	0.007	0.003	0.06
SA508-3	0.21	1.36	0.24	0.022	0.92	0.21	0.49	0.007	0.002	0.03

에 홈을 파서 강구를 이용하여 누르도록 하였다.

소형펀치 시험기는 용량 5 kN 인 Instron 5565에 설치하였으며, 펀치선단에 HRC 62-67의 경도를 갖는  $\Phi 2.4$  mm의 강구를 부착하여 1.2 mm/min의 부하속도로 하중을 인가하였다. 하중은 펀치와 연결된 로드셀을 통해서 측정하였으며, 변위의 경우에는 크로스헤드의 이동거리로부터 얻었다. 실험은 상온 및 액체질소 온도(77K)에서 수행하였으며, 저온 실험은 저온 용기를 제작하여 시험편과 소형펀치 시험장치를 냉매 속에 직접 담근 상태에서 30분 이상 유지한 후에 실험하였다. 실험 후에 시험편의 파괴양상, 균열 진전 여부 및 파면을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope; 이하 SEM)을 이용하여 관찰하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

그림 4(a)에는 상온에서 SA 508-1 시험편에 대하여 소형펀치 시험에 의한 하중-변위 곡선을 나타내었는데, 펀치 위 부분에 볼을 이용하여 전체 시스템의 축일치가 유지되도록 한 결과, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 재현성 있는 곡선의 모양을 얻을 수 있었다. 균열을 도입하지 않은 시험편에 대하여 소형펀치 시험에 의한 하중-변위 곡선의 모양(그림 4(b))을 살펴보면, 기존 연구에서의 시험 결과와 마찬가지로 4단계의 탄/소성 거동을 보이고 있음을 알 수 있다<sup>7)</sup>. 즉, 하중-변위 곡선은 탄성 굽힘 영역(elastic bending region) - 소성 굽힘 영역(plastic bending region)

-소성막 신장 영역(plastic membrane stretching region) -소성 불안정 영역(plastic instability region)으로 나눌 수 있다. 하중의 증가에 따른 시험편의 변형 양상을 하중-변위 곡선의 변화와 연결시켜서 살펴보면, 먼저 곡선의 초기 직선부분은 탄성 굽힘 영역으로 시험편에 탄성변형과 국부적인 항복이 일어나는 영역에 해당하며, 탄성계수, 항복강도 등에 의해서 좌우된다. 일반적으로 시험편의 항복은 볼 아래 부분과 시험편을 고정하는 가장자리 부근에서 우선적으로 발생하게 된다<sup>11)</sup>. 소성 굽힘 영역에서는 하중의 증가에 따라 시험편 두께 방향 및 반지름 방향으로 이러한 항복영역이 확장되어 나가면서 직선부분에서 벗어나게 된다. 이 때, 시험편의 대부분에서 항복이 발생한다. 하중이 계속 증가하면, 하중-변위 곡선은 소성 굽힘 영역에서 소성막 신장 영역으로의 전이가 일어나게 되는데, 실제로 이 부분에서는 소성막 신장 뿐만 아니라 계속적인 굽힘도 일어나므로 두 가지의 변형 양상이 혼합된 부분이라고 할 수 있다. 최근, 음향방출 신호(acoustic emission signal)를 이용하여 소형펀치 시험에서의 균열 개시점을 조사한 결과, 기존의 연구에서처럼 최대 하중에서가 아니라 소성막 신장 영역에서 균열이 발생한다고 보고하고 있다<sup>10)</sup>. 마지막으로 소성 불안정 영역에서는 최대하중 이후에 하중이 감소하게 되는데, 이러한 하중의 감소는 국부적으로 진행되는 네킹(necking)으로 인해 두께가 감소하고, 이러한 네킹 부분에서 발생한 균열이 성장하면서 최종파괴가 일어나기 때문이다.

그림 5와 6에는 SA 508-1 시험편에 대하여 시험 온도에 따른 하중-변위 곡선의 모양과 시험편의 최종 파괴양상을 나타내었다. 저온에서는 하중, 변위가 작은 상태 즉, 저에너지에서 파괴되나, 상온에서는 파괴에 요구되는 에너지(하중-변위 곡선 하부의 면적)가 증가되고 있다. 이러한 현상은 시험온도에 따른 항복강도의 변화로 인해 재료의 유동특성이 변화하기 때문이다. 또한, 상온에서의 하중-변위 곡선의 거동은 4단계의 탄/소성 거동을 모두 보이고 있으며, 시험편의 원주 부분에서 균열이 발생하는 연성 파괴거동을 보이고 있다. 또한, 그림 6(b)의 파면관찰 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 덩굴 형태의 연성파면을 얻을 수 있었다. 상온에서 원주방향으로 균열이 발생하는 것은 기존의 유한요소 해석결과<sup>11)</sup>로부터 알 수 있는 바와 같이 시험편의 원주부분에 최대응력이 작용하기 때문이다. 하지만, 저온에서는 소성굽힘 영역 또는 탄성굽힘 영역에서 파괴가 일어나는데, 이는 미소

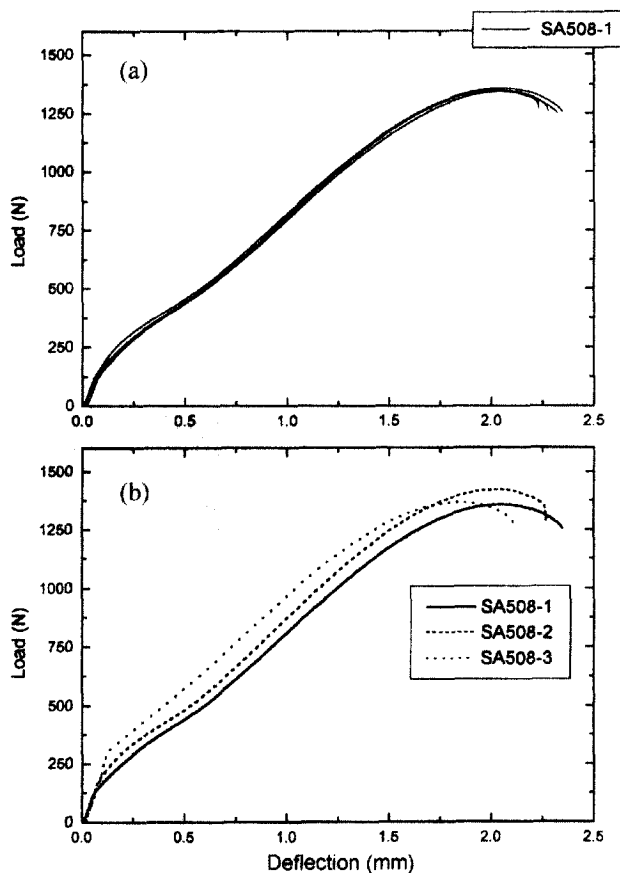


Fig. 4. Load-deflection curves of small punch test representing (a) reproducible results and (b) comparison between tested materials.

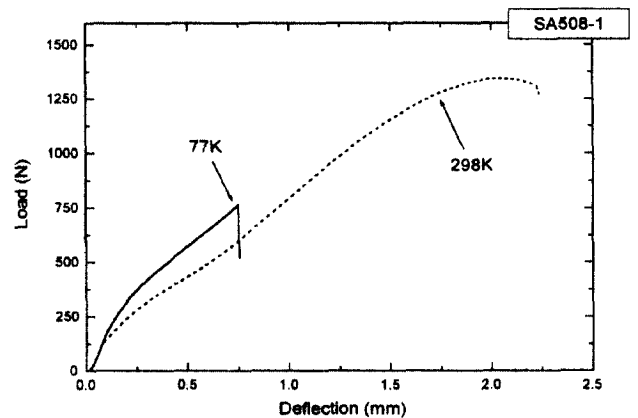


Fig. 5. Comparison of load-deflection curve shapes at 77K and 298K for SA 508-1 specimen without pre-crack.

Fig. 6. SEM micrographs: crack shapes (a) at 298K and (c) at 77K and their fractographs (b) at 298K and (d) at 77K.

균열의 발생이 소성막 신장 영역에서 소성굽힘 영역이나 탄성굽힘 영역으로 천이되고, 이러한 미소균열이 발생과 동시에 성장하여 시험편의 두께를 관통하는 취성파괴 거동을 보이기 때문이다. 또한, 균열도 원주부분이 아닌 시험편의 중앙부위에서 발생하고 있다. 이러한 결과로부터 시험온도 77K는 하부 에너지 영역(lower shelf energy regime)에 해당하므로 본 연구에서 가정한 선형탄성 파괴역학을 적용할 수 있다.

시험편에 미리 균열을 형성시킨 경우 상온에서 SA 508-1 시험편에 대한 소형편치 시험의 하중-변위 곡선 및 음향방출 신호를 그림 7에 나타내었다. 균열이 없는 경우에 비해 최대하중과 최대하중까지 이르는 변위가 더 작게 나오는 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 균열의 존재로 시험편이 지지할 수 있는 하중의 크기가 균열이 없는 시험편의 경우에 비해 더 작기 때문인 것으로 판단된다. 상온에서는 재료의 충분한 소성변형을 수반한 후에 파괴가 일어나는 연성파괴 양상을 보이고, 균열의 진전속도가 매우 느리기 때문에 하중-변위 곡선 모양의 변화만으로 균열 진전 개시점을 확인할 수 없다. 이에 본 연구자들은 음향방출 신호를 이용하여 재료의 선형탄성 파괴인성 평가에 대한 연구를 기 수행한 바 있다<sup>22)</sup>.

그림 8에는 균열을 도입한 시험편에 대하여 77K에서의 소형편치 시험에 의한 하중-변위 곡선을 나타내었다. 탄성 굽힘 영역에서 균열이 성장하여 하중-변위 곡선 모양의 변화가 발생하였으며, 이 부분의 하중을 균열 개시점에서의 하중으로 결정할 수 있었다. 이 때, SA 508-1 시험편의 하중-변위 곡선에서는 균열

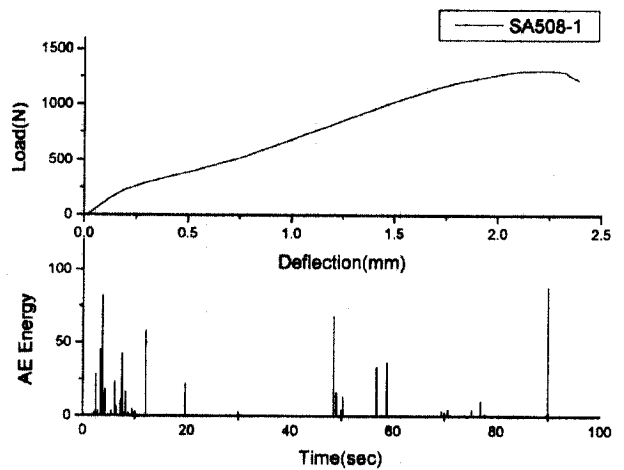


Fig. 7. Load-deflection curve and acoustic emission signals at 298K for SA 508-1 specimen with pre-crack.

이 발생하더라도 하중이 변위의 증가에 따라 부분적으로 감소한 후 다시 증가하는 특이한 결과를 보이고 있었는데, 이는 SA 508 강 내부에 존재하는 탄화물과 같은 이상입자가 파괴의 개시점으로 작용하여 불연속적인 균열이 성장하였기 때문이다. 그림 9에는 최종 파괴 후의 파괴양상을 나타내었는데, 본 연구에서 미리 형성시킨 균열의 끝 부분에서 균열이 성장한 것을 관찰할 수 있었으며, 이를 통해 본 연구에서 도입한 균열이 충분히 응

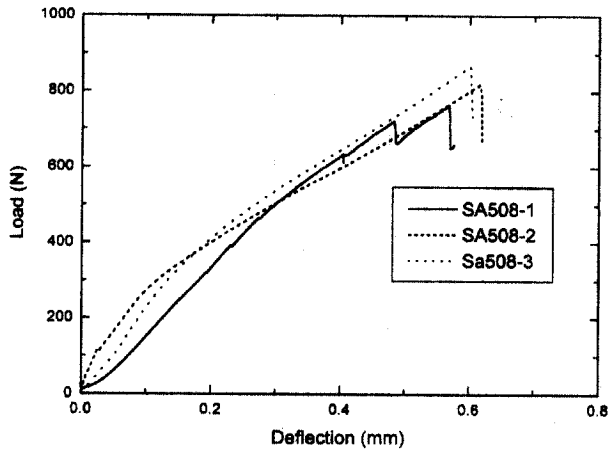


Fig. 8. Load-deflection curves at 77K for specimens with pre-crack.

Table 2. Fracture toughness values obtained by revised small punch test and master curves.

	Revised small punch test	Master curves	
	Fracture toughness (MPam <sup>1/2</sup> )	T <sub>0</sub> (°C)	Fracture toughness (MPam <sup>1/2</sup> )
SA508-1	38.19	-64.5	35.75
SA508-2	35.03	-40.0	33.61
SA508-3	41.02	-75.0	37.02

취성 천이영역에서의 파괴인성을 특정 짓는 특성온도(T<sub>0</sub>)를 구하기 위해 파괴인성의 온도 의존성을 나타내는 마스터 곡선(master curve)을 다음과 같이 제안했다<sup>23)</sup>.

$$K_{JC(\text{med})} = 30 + 70e^{[0.019(T-T_0)]} \quad (7)$$

여기서,  $K_{JC(\text{med})}$ 는 마스터 곡선에 의해 계산된 파괴인성의 평균 값을 의미하며, T<sub>0</sub>는 25 mm 두께의 시험편에서 파괴인성 값이 100 MPa인 온도(°C)를 나타낸다. SA 508 Cl.3 강에서 피로예비균열을 도입한 샤피 시험편을 이용하여 구한 정하중에서의 T<sub>0</sub><sup>24)</sup>를 식 (7)에 대입하여 구한 파괴인성 값과 본 연구에서 균열을 도입한 소형펀치 시험에 의한 파괴인성 값의 비교를 표 2에 나타내었다. 이를 살펴보면, 소형펀치 시험에 의한 파괴인성 값이 약간 크게 평가되었는데, 이는 본 연구에서 도입한 균열이 선형탄성 파괴역학에서 가정한 무한히 날카로운 균열이 아니라 어느 정도의 곡률을 가지고 있었으며, 시험편의 두께가 매우 얇아서 평면응력 파괴인성 값만을 얻을 수 있었기 때문이다. 하지만, 충분한 경향성을 확인할 수 있어서 균열을 도입한 소형펀치 시험에 의한 선형탄성 파괴인성이 구조물의 파괴역학적 안전성 평가에 유효하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 소형펀치 시험편에 미리 균열을 도입하고, 균열 주위의 응력장에 대한 분석을 통해 보다 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하였다.

1. 소형펀치 시험기의 위 부분에 홈을 파서 불을 통하여 하중이 인가되도록 설계함으로써 전체 시스템의 축일치가 유지되도록 하여 재현성 및 신뢰성 있는 하중-변위 곡선을 얻을 수 있었다. 이러한 하중-변위 곡선은 상온에서는 4단계의 탄/소성 거동을 보였으며, 77K에서는 탄성 영역에서 파괴가 일어났다.

2. 파괴역학적 인성평가를 위해 소형펀치 시험편에 미리 관통형 균열을 형성시켰으며, 최종 파괴가 일어난 이후의 SEM 사진 관찰로부터 이러한 균열이 응력 집중부로 작용하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

3. 관통형 균열을 가진 소형펀치 시험편의 선형탄성 파괴인성 평가를 위해 균열 주위의 응력장 해석을 통한 응력확대 계수 식과 굽힘 응력, 균열 개시점에서의 하중을 통하여 다음 식으로부터 파괴인성을 평가할 수 있었으며, SA 508 Cl.3 강에 대해서 파괴인성을 측정된 결과, 기존의 파괴인성 값과 일치하는 경

Fig. 9. SEM micrographs for SA 508-1 specimen after test showing brittle crack propagation.

력집중부로서 작용한 것으로 판단할 수 있었다.

균열을 도입한 소형펀치 시험법에 의한 선형탄성 파괴인성 값의 유효성을 검증하기 위해서 다음과 같이 표준 시험법에 의한 파괴인성 값과 비교해 보았다. ASTM E1921은 벽개 파괴가 일어나는 페라이트계 강에서 확률, 통계적 모델을 이용하여 연성

향을 얻을 수 있었다.

$$K_c = \frac{3P_i(1+\nu)}{2\pi t^2} \left( \ln \frac{c}{b} + \frac{b^2}{4c^2} \right) \sqrt{a}$$

4. 원자로용 발전설비나 석유화학 설비와 같이 시험편 채취의 어려움으로 인해 표준 시험법에 필요한 크기의 시험편을 얻기 어려운 경우, 본 연구에서와 같이 균열을 도입한 소형편치 시험법을 이용함으로써 보다 파괴역학적인 방법에 의한 파괴인성의 평가가 가능할 것으로 판단되었다.

## REFERENCES

1. G. E. Lucas : Metall. Trans. A, **21A** (1990) 1105
2. P. Jung, A. Hishinuma, G. E. Lucas and H. Ullmaier : J. Nucl. Mater., **232** (1996) 186
3. V. Viswanathan : EPRI Journal, January/February (1995) 40
4. R. A. Wullaert and W. L. Server : Nucl. Engng. and Design, **57** (1980) 153
5. A. Kohyama and A. Hishimura : J. of the Atomic Energy Soc., Japan, **36**(6) (1994) 13
6. J. -M. Baik, J. Kameda and O. Buck : Scripta Metall., **17** (1983) 1443
7. J. -M. Baik, J. Kameda and O. Buck : The Use of Small-Scale Specimens for Testing Irradiated Materials, ASTM STP 888, W.R. Corwin and G.E. Lucas(Ed.), ASTM, Philadelphia (1986) 92
8. G. E. Lucas, A. Okawa and M. Kiritani : J. Nucl. Mater., 141-143 (1986) 532
9. J. Kameda and O. Buck : Mater. Sci. and Engng., **83** (1986) 29
10. J. Foulds and R. Viswanathan : J. Engng. Mater. and Tech., **116** (1994) 457
11. X. Mao, T. Shoji and H. Takahashi : J. Test. Eval., **15** (1987) 30
12. J. Kameda and X. Mao : J. Mater. Sci., **27** (1992) 983.
13. Y. -H. Joo, T. Hashida and H. Takahashi : J. Test. Eval., **20** (1992) 6
14. E. E. Gdoutos : Fracture Mechanics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1993) 15
15. G. R. Irwin : Fracture Mechanics, Pergamon Press., New York (1960) 557
16. M. L. Williams : J. Applied Mech., **28** (1961) 78
17. G. C. Sih, P. C. Paris and F. Erdogan : J. Applied Mech., **29** (1962) 306
18. N. Hasebe, T. Nakamura and J. Iida : Engng. Frac. Mech., **37** (1990) 87
19. P. S. Theocaris : Engng. Frac. Mech., **33** (1989) 707
20. Y. -H. Joo, T. Hashida, H. Takahashi and K. Shimomura : J. Test. Eval., **20** (1992) 336
21. J. S. Cheon and I. S. Kim : J. Test. Eval., **24** (1996) 255
22. J. -B. Ju and D. Kwon : Metals and Mater., **4** (1988) 742
23. ASTM Standard E1921 (1998)
24. B. S. Lee, W. J. Yang, M. J. Huh and J. H. Hong : Proc. of the Thirteenth Conference on Mechanical Behaviors of Materials, Kihung (1999) 333