

소형편치 시험의 파괴역학적 분석을 통한 SA 508 강의 파괴인성 평가

Evaluation of fracture toughness of SA 508 steel through fracture mechanical analysis of small punch test

주장복, 이백우, 장재일, 홍준화*, 권동일

서울대학교 재료공학부
서울시 관악구 신림동 산56-1
*한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150번지

요 약

원자로용 재료의 파괴특성을 평가하기 위한 방법으로 기존의 소형편치 시험법을 개선하여 보다 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하여 보았다. 이를 위해서 먼저 소형편치 시편의 중앙부위에 방전가공을 이용하여 균열을 형성시키고 시험시 발생하는 음향방출 신호를 분석하여 균열진전 개시점을 평가하였다. 또한, 관통형 균열을 가지는 박판이 급힘응력을 받고 있을 때의 응력확대계수식을 이용하고, 소형편치 시편의 변형양상을 고려하여 파괴인성식을 모델링하였다. 개선한 소형편치 시험을 통해 상온에서와 액체질소 온도에서 SA 508 강의 파괴인성을 평가하여 보았다.

ABSTRACT

Conventional small punch test was revised to evaluate the fracture mechanical toughness of nuclear pressure vessels. Namely, pre-cracked specimen using electro-discharge machining was prepared and acoustic emission signals during small punch testing were analyzed to determine the crack initiation point. Fracture toughness was modelled by using stress intensity factor of thin plate having through thickness crack and considering the deformation of small punch specimen. SA 508 steel was tested at room temperature(298K) and liquid nitrogen temperature(77K) and fracture toughness was evaluated.

1. 서 론

최근 소형시편을 이용하여 재료의 파괴특성을 평가하는 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. 특히, 원자로용 발전설비나 석유화학 설비와 같이 시편채취의 어려움으로 인해 표준시험법에 필요한 크기의 시편을 얻기 어려운 경우에 있어서 소형시편을 이용한 파괴인성을 평가법의 개발이 필요한 실정이다. 이러한 목적을 위해 제안되어진 방법들 중에 소형편치 시험법이 있다. 소형편치 시험법은 원래 미국이나 일본에서 원자로용 압력용기의 중성자 조사손상 평가 및 노벽재료 개발을 위해

도입, 연구되어 왔다¹⁾⁻⁴⁾. 이 방법은 실제 현장에서 쓰이고 있는 부품에 있어서 그 강도에 영향을 주지 않을 정도의 작은 영역에서도 시편의 채취가 가능하여 비교적 비파괴적인 방법으로 재료의 기계적 물성을 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

소형편치 시험법을 이용하여 파괴특성을 평가하는 기존의 연구를 살펴보면, Baik 등²⁾은 소형편치 시험시의 하중-변위 곡선의 모양이 온도에 따라 달라지는 것을 이용하여 재료의 연성-취성 전이온도를 평가하고 있다. 또, Mao 등³⁾은 소형편치 시험시 시편 두께의 변화를 파괴변형률로 정의하고, 이를 파괴인성(J_{IC})과의 실험적인 관계로부터 재료의 파괴특성을 평가하고 있다. 하지만, 기존의 연구에서는 파괴가 최대하중에서 일어난다고 가정하고 있으나, 연구결과 실제 균열은 소성막신장 영역에서 발생하여 성장한다고 알려져 있으므로⁴⁾ 기존의 연구에 의한 파괴인성값에는 균열개시뿐만 아니라 균열성장에 대한 정보도 모두 포함하고 있다고 말할 수 있다. 또한, 단순히 경험적인 실험식에만 의존할 뿐, 정량적인 파괴인성을 평가하고 있지는 않다는 단점을 가지고 있다. 파괴인성이라고 하면, 균열의 진전에 대한 저항성을 의미하는 값이므로 이러한 의미에서 보면, 기존의 방법에 의한 파괴특성의 평가법은 파괴역학에 기초하고 있다고 보기는 힘들다.

본 연구에서는 보다 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하기 위하여 먼저 시편에 미리 균열을 형성시키고, 소형편치 시험시 하중의 증가에 따른 음향방출 신호를 분석함으로써 균열진전의 개시점을 결정하도록 하였다. 즉, 이러한 균열진전의 개시점에서의 하중과 시편의 변형양상 및 균열주위의 응력장 해석을 바탕으로 파괴인성식을 모델링함으로써 관통형 균열을 가진 박판의 파괴인성을 평가하여 보았다.

2. 이론적 해석

현재 사용 중에 있는 산업 구조물에서는 구조적 또는 재료적 불균질로 인해 응력집중이 발생하게 된다. 즉, 구조적 불균질로는 노치나 갑작스런 단면의 변화 등이 있으며, 재료적 불균질로는 재료 내부의 공동(vacancy)이나 결함, 계재물 등을 들 수 있다. 보통 이러한 불균질부에서의 응력집중으로 인해 균열이 발생되며, 외부 하중에 의한 균열의 갑작스런 진전으로 인해 구조물의 파괴에까지 이르는 등의 문제점을 야기할 수 있다. 그러므로 균열 주위의 응력장의 해석 및 파괴조건에 대한 평가가 필요하게 되었다. 이러한 균열첨단에서의 응력 singularity의 강도를 결정하는 인자인 응력확대계수는 균열을 포함하고 있는 재료의 파괴특성을 결정짓는 요소로서 매우 유용하게 사용되어져 왔다. 많은 연구자들에 의해서 여러 형상의 균열을 갖는 경우에 있어서의 응력확대계수에 대한 연구가 이루어져 왔으며, 특히 박판의 경우에 있어서 단순인장응력이나 굽힘 응력을 받고 있는 경우에 있어서의 응력확대계수에 대해서는 이미 많은 연구가 이루어져 있다.

Sih 등⁵⁾은 복소수 변수법(complex variable method)을 이용하여 박판의 응력확대계수식을 제안하였다. Fig. 1과 같이 관통형 균열을 가진 박판에 굽힘응력이 작용하고 있을 때, 균열첨단에서의 응력상태는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

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

여기에서 h는 박판의 두께를 의미하며, δ 는 박판의 중앙 평면(middle plane)에 수직 성분을 의미한다. r 및 θ 는 균열첨단에서의 위치를 의미하며, 응력확대계수로 정의할 수 있는 K₁과 K₂의 경우에는 복소수 변수법을 이용하여 식(2)와 같이 표시할 수 있다.

$$K = K_1 - iK_2 \quad (2)$$

Fig. 1과 같이 균열의 크기가 $2a$ 인 관통형 균열을 갖는 박판에 M_0 의 굽힘응력이 작용하고 있을 때, 균열 주위에서의 변형 및 응력 상태를 나타낼 수 있도록 식(3)과 같이 박판의 변형을 고려할 수 있는 함수(conformal mapping function)를 도입하고, 식(2)의 복소수 변수법을 이용하여 응력확대계수를 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

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

$$K_1 = \frac{6M_0}{h^2} \sqrt{a}$$

$$K_2 = 0 \quad (4)$$

여기에서 D 는 박판의 유동 인성도(flexural rigidity)를, ζ 는 함수에서의 복소수 변수를 의미하는 값이다. 식 (4)에서 살펴볼 수 있는 바와 같이, 굽힘응력을 받고 있는 박판의 응력확대계수는 인장 응력을 받고 있는 경우와 비슷한 형태를 갖게 되며, 이러한 식을 이용하여 소형핀치 시험에 의한 파괴특성을 평가할 수 있다.

즉, 소형핀치 시험에 의한 파괴특성을 평가하기 위해서 먼저 소형핀치 시험에 의한 시편의 변형 양상을 고려하여 굽힘응력을 평가하였다. 양끝이 고정된 박판에 중심부분으로부터 원주형태로 균일한 응력이 작용한다는 가정⁶⁾ 하에 굽힘응력은 식(5)와 같이 표시될 수 있다.

$$M_0 = \frac{1+\nu}{4\pi} P \left(\ln \frac{c}{b} + \frac{b^2}{4c^2} \right) \quad (5)$$

여기에서 P 는 박판에 가해주는 하중, b 는 집축반경, c 는 하부다이의 반경을 의미한다.

파괴역학이라고 하는 것에는 균열침단에서의 응력의 해석과 더불어 파괴조건을 필요로 한다. 그러므로, 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하기 위해서는 균열진전의 개시점을 평가하는 것이 매우 중요하게 된다. 그러나, 균열의 진전속도가 매우 느리기 때문에 소형핀치 시험에 의한 하중-변위 곡선 모양의 변화만으로는 이러한 균열진전의 개시점을 평가하기 어렵게 된다. 보통 재료 내부의 균열 등을 검출하기 위해서는 여러 가지 비파괴 검사 방법이 사용되고 있는데, 이 중에서 음향 방출법(acoustic emission)⁷⁾을 이용하여 소형핀치 시험시 재료에 발생하는 정보를 얻고, 이를 이용하여 재료의 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하여 보고자 하였다. 즉, 소형핀치 시험시 먼저 관통형 균열을 가진 시편에 하중이 가해지게 되고, 하중의 증가에 따라 균열의 침단부분에서의 응력집중으로 균열이 진전하게 된다. 이러한 균열진전시 발생하는 음향방출을 소형핀치 시험기에 부착되어 있는 센서를 이용하여 관찰할 수 있게 되는 것이다. 즉, 균열진전의 개시점을 이러한 음향 방출을 이용하여 결정함으로써 보다 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가할 수 있다.

이를 종합하여 보면, 식(4)와 식(5)를 이용하여 관통형 균열을 갖는 경우에 있어서 굽힘응력을 받는 소형핀치 시편의 파괴인성은 시편의 변형양상을 고려하고, 균열진전의 개시점에서의 하중을 이용함으로써 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_c = \frac{3}{2} \frac{P_i(1+\nu)}{\pi h^2} \left(\ln \frac{c}{b} + \frac{b^2}{4c^2} \right) \sqrt{a} \quad (6)$$

3. 실험방법

본 연구에 사용된 재료로는 원자로용 압력용기에 사용되는 SA 508 강을 사용하였으며, 각 시편의 화학적 조성을 표 1에 나타내었다. 시편은 먼저 $10 \times 10 \times 0.5\text{mm}$ 의 크기로 와이어 커팅을 이용

하여 제작하였으며, 연마지(emery paper)를 이용하여 시편의 양면을 1500번까지 연마하였다. 이후에 초음파 세척기를 이용하여 세척하고, 시편의 중심부위에 방전가공을 이용하여 균열을 형성시켰다. 균열의 크기는 길이와 폭이 2:1 정도가 되도록 하였으며, 균열의 길이는 평균 1.2mm 정도가 되도록 하였다.

Table 1. Chemical compositions of tested materials; B-base metal and W-weld metal.

	Chemical composition(wt.%)									
	C	Mn	Si	Al	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu
SA-B1	0.20	1.42	0.07	0.005	0.79	0.15	0.57	0.007	0.003	0.06
SA-B2	0.19	1.35	0.09	0.009	0.82	0.16	0.52	0.008	0.004	0.04
SA-W	0.08	1.74	0.26	0.01	0.13	0.05	0.51	0.011	0.002	0.03

소형펀치 시험에 사용된 장비를 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다. 기존의 시험기와는 달리 전체 시스템의 축일치(alignment)를 위해서 펀치(puncher) 윗 부분에 홈을 파서 강구를 이용하여 누르도록 하였으며, 펀치선단에 HRC 62-67의 경도를 갖는 2.4mm의 강구를 놓고, 이를 통하여 시편의 상부에 하중을 가하도록 하였다. 소형펀치 시험기는 Instron 5565에 설치하였으며, 부하속도를 1.2mm/min으로 하여 실험하였다. 또한, 균열진전의 개시점을 평가하기 위하여 시험기의 하부다이에 음향방출(acoustic emission) 센서를 부착하였다. 센서는 pre-amplifier를 통해서 컴퓨터로 연결시켰으며, 신호를 받아들이기 위해서 PAC 사에서 나온 Mistras 2001 프로그램을 이용하여 energy, count, waveform 등의 신호를 얻을 수 있었다. 소형펀치 시험은 균열이 있는 시편과 없는 시편을 나누어서 실험하였으며, 상온과 액체질소 온도에서 각각 실험하였다.

4. 실험결과 및 고찰

소형펀치 시험 결과, 시편의 종류에 따라 각기 다른 형태의 하중-변위 곡선을 얻을 수 있었다. 균열이 있는 것과 없는 것으로 나누어 실험하였으며, 상온(298K) 및 액체질소 온도(77K)에서 실험하였다. Fig. 3에는 SA-B1 시편의 경우에 각각 다른 온도에서의 균열이 있는 경우와 없는 경우의 하중-변위 곡선 모양의 변화를 나타내었다. 이를 살펴보면, 먼저 균열이 없는 경우(Fig. 3(a)), 상온에서는 일반적인 4단계의 탄/소성 거동을 모두 보이며 파괴가 일어나지만, 이에 비해 액체질소 온도에서는 기존의 연구결과²⁾와 마찬가지로 탄성굽힘 영역에서 파괴가 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 최종 파괴 후의 균열의 모양을 살펴보면, 상온에서는 균열이 원주를 따라서 생성되었으나, 액체질소 온도에서는 중심부분에서 파괴가 일어난 것을 관찰할 수 있었다. 시편에 미리 균열을 형성시킨 경우(Fig. 3(b))의 하중-변위 곡선을 살펴보면, 상온에서는 균열이 없는 경우에 비해 최대하중과 최대하중까지 이르는 변위가 더 작게 나오는 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 균열의 존재로 시편이 지지할 수 있는 하중의 크기가 균열이 없는 시편의 경우에 비해 더 작기 때문인 것으로 사료되어 진다. 액체질소 온도에서는 하중이 변위의 증가에 따라 부분적으로 감소하는 특이한 결과를 보이는 것을 살펴볼 수 있었는데, 미리 형성시킨 균열의 끝부분에서 불연속적인 균열의 진전에 기인한 것으로 보인다. 최종 파괴 후의 파괴양상에서도 미리 형성시킨 균열의 끝 부분에 응력이 집중되게 되고, 바로 그 부분에서 균열이 성장한 것을 관찰할 수 있었다.

소형펀치 시험법을 이용하여 파괴인성을 평가하기 위해서 액체질소 온도에서는 하중이 감소하는 부분을 균열개시점으로 평가할 수 있었고, 상온에서는 하중-변위 곡선의 모양 변화를 통해서 균열의 진전을 평가할 수 없으므로, 소형펀치 시험시 발생하는 음향방출 신호의 분석에 의해 균열

개시점을 평가하였다. Fig. 4에는 상온에서 미리 균열을 형성시킨 SA-B1 시편의 경우에 있어서의 하중-변위 곡선과 함께 음향방출 신호를 동시에 나타내었다. 음향방출 신호의 경우에는 시간에 따른 정보를 얻을 수 있으며, 소형편치 시험법의 경우에는 crosshead 속도가 일정하므로 이를 시간에 따른 하중으로 변환하여 동시에 곡선을 얻을 수 있었다. Ju 등⁸⁾에 의하면, 음향방출 신호의 초기부분은 소성변형에 의한 것으로, 최대하중부분은 최종파괴로 인한 것으로 설명될 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 소성굽힘 영역에서의 신호를 균열진전에 기인한 것으로 판단할 수 있었다. 그러므로 이러한 균열진전으로 발생하는 음향방출 신호가 시작하는 부분을 균열진전의 개시점으로 정의할 수 있다. 균열진전 개시점에서의 하중을 이용하여 구한 파괴인성 값을 표 2에 나타내었다.

Table 2. Fracture toughness values from pre-cracked small punch specimen.

	Fracture toughness at 77K		Fracture toughness at 298K	
	P(N)	K _c (MPam ^{1/2})	P(N)	K _c (MPam ^{1/2})
SA-B1	400	35.03	505	52.55
SA-B2	380	38.19	548	57.03
SA-W1	-	-	600	62.44

한편, ASTM E1921⁹⁾은 벽개 파괴가 일어나는 페라이트계강에서 확률, 통계적 모델을 이용하여 연성-취성 전이영역에서 파괴인성을 특정짓는 특성온도(T₀)를 구하기 위해 파괴인성의 온도 의존성을 나타내는 마스터 곡선(master curve)을 다음과 같이 제안했다.

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

여기서, T₀는 25mm 두께의 시편에서 파괴인성치가 100MPa로 평가되는 온도를 나타낸다. SA508 강에서의 T₀ 값¹⁰⁾과 식 (7)을 이용하여 구한 상온 및 액체질소 온도에서의 파괴인성 값을 표3에 나타내었다. 표 2와 3을 비교해 보면, 먼저 액체질소 온도에서의 경우에는 어느 정도 일치한 결과를 얻을 수 있었으나, 소형편치 시험에 의한 값이 약간 크게 평가되는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 파괴역학에서는 무한히 날카로운 균열의 존재를 가정하고, 파괴특성을 평가하고 있으나 본 실험에서는 방전가공에 의해서 균열을 형성시켰으므로 균열 끝부분의 무딘 정도에 기인한 것으로 보인다. 상온에서의 결과를 살펴보면, 매우 작은 값으로 평가된 것을 알 수 있다. 이는 연성재료가 갖는 소성효과인 것으로 사료되며, 이를 해결하기 위한 방안으로 하중-변위 곡선 아래부분의 면적, 즉 에너지적 관점에서의 J_{IC}를 평가하기 위한 연구를 수행 중에 있다.

Table 3. Parameters of estimated fracture toughness master curves and fracture toughness values of SA508 steel from master curve.

	Master curve		Fracture toughness	
	q	T ₀ (°C)	77K	298K
SA-B1	0.0196	-40.0	33.29	280.25
SA-B2	0.0215	-64.5	34.14	509.50
SA-W	0.0186	-57.8	35.35	356.54

5. 결 론

본 연구에서는 소형편치 시편에 미리 균열을 도입하고, 균열주위의 응력장에 대한 파괴역학적 분석을 통해 보다 파괴역학에 기초한 파괴인성을 평가하여 보았다.

- 1) 소형편치 시험기의 윗 부분에 흡을 파서 볼을 사용하여 누르도록 설계함으로써 전체 시스템

의 축일치(alignment)를 유지하도록 하여 재현성 및 신뢰성 있는 하중-변위 곡선을 얻을 수 있었다. 이러한 하중-변위 곡선은 상온에서는 4단계의 탄/소성 거동을 모두 보이고 있었으며, 액체질소 온도에서는 탄성영역에서 파괴가 일어나는 것을 관찰할 수 있었다.

2) 파괴역학적 인성 평가를 위해 방전가공을 이용하여 소형편치 시편에 미리 균열을 형성시켰으며, 최종 파괴가 일어난 이후의 결과 이러한 균열이 응력집중부로 작용하고 있다는 결론을 내릴 수 있었다.

3) 관통형 균열을 가진 소형편치 시편의 파괴인성은 균열 주위의 응력장 해석에 바탕을 둔 응력확대계수식과 소형편치 시험에 유사하게 모델링한 박판의 굽힘응력을 이용하여 다음 식과 같은 파괴인성 식을 얻을 수 있었다.

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

4) 상온에서는 소형편치 시험시 하중의 증가에 따른 음향방출 신호를 분석함으로써 균열진전의 개시점을 평가할 수 있었으며, 액체질소 온도에서는 하중이 감소하는 부분의 하중을 균열진전 개시점으로 평가하였다. 이러한 균열진전 개시점에서의 하중을 식 (6)에 대입하여 SA 508 강의 파괴인성을 평가할 수 있었으며, 이를 통계, 확률적인 파괴인성 값과의 비교를 통하여 확인한 결과, 액체질소 온도에서는 어느 정도 일치한 결과를 얻을 수 있었으며, 상온에서는 소성효과의 고려 등을 통한 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다.

참고문헌

1. G.E. Lucas, Metal. & Mater. Trans. A, 21A, (1990) 1105.
2. J.M. Baik, J. Kameda and O. Buck, Scripta Metal., 17, (1983) 1443
3. X. Mao, H. Takahashi and T. Kodaira, Mater. Sci. Engng., A150, (1992) 231.
4. J. Foulds and R. Viswanathan, Trans. ASME, 116, (1994) 457.
5. G.C. Sih, P.C. Paris and F. Erdogan, J. Appl. Mech., 29, (1962) 306.
6. S. Timoshenko, in "Strength of Materials", 3rd ed., (1956) 109
7. T. P. Weihs, Mat. Res. Soc., 203, (1992) 361.
8. J.-B. Ju and D. Kwon, Metals and Materials, 4(4), (1998) 742.
9. ASTM Standard E1921 (1998).
10. 이봉상, 윤지현, 김주학, 변택상, 홍준화, 제5회 원전기기 건설성 Workshop, (1998) 415.

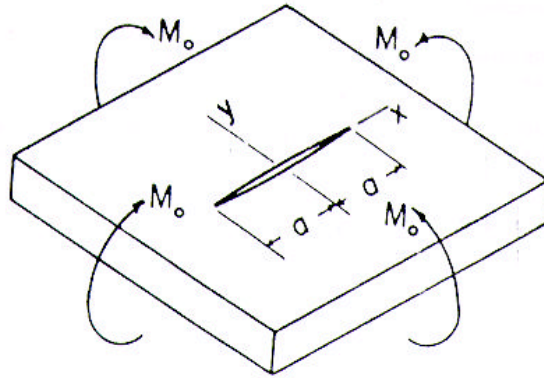


Fig. 1. A schematic diagram of small punch specimen having through thickness crack under bending moment.

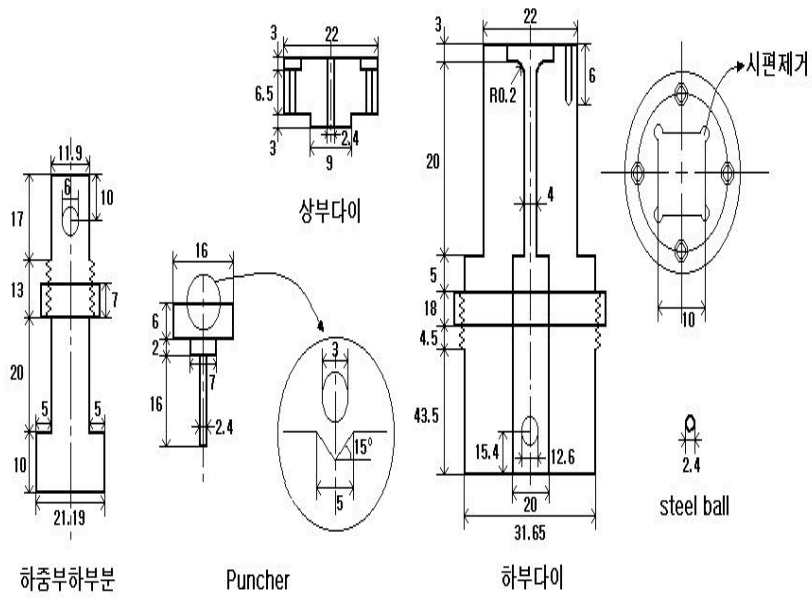


Fig. 2. A schematic diagram of small punch tester.

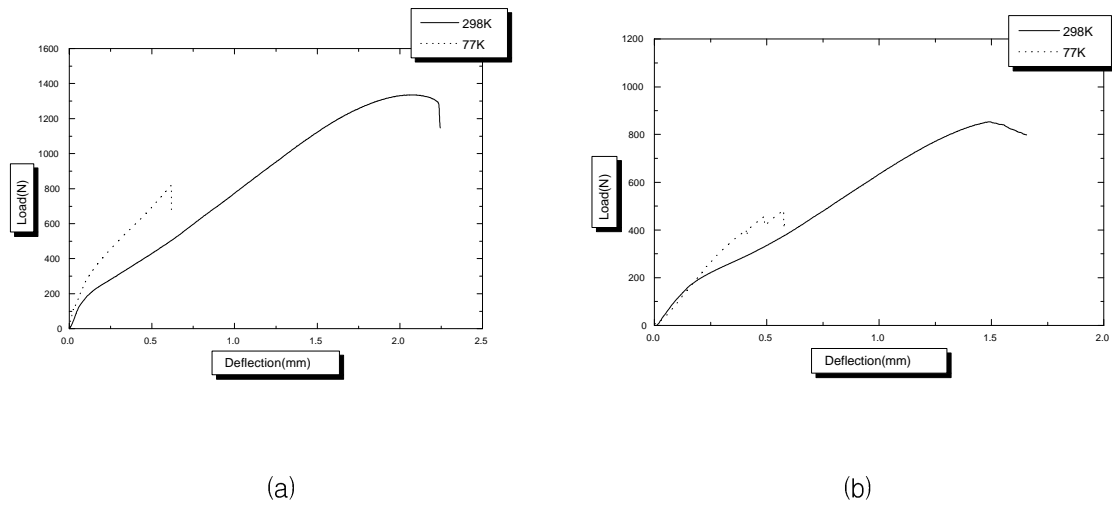


Fig. 3. Load-deflection curves of SA-B1 specimen (a) without crack and (b) with crack (- : 298K, ... : 77K).

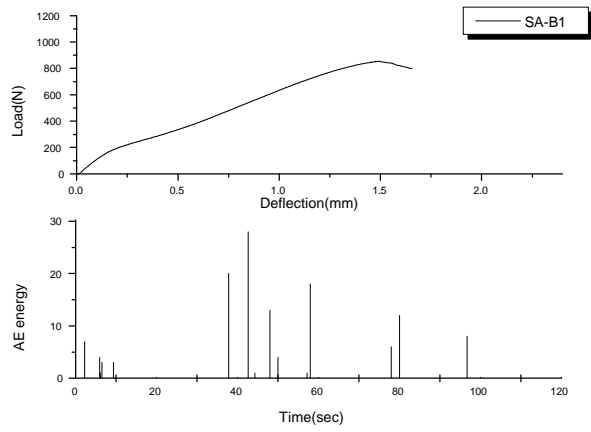


Fig. 4. Load-deflection curve and AE signal of SA-B1 specimen at 298K.