

원자로 압력용기강의 인성평가를 위한 샤피충격 하중-변위 곡선의 해석

김주학, 김 훈, 지세환, 이돈배, 홍준화
한국원자력연구소

요 약

국산 원자로 압력용기강(ASME SA508 cl.3)을 대상으로 표준 샤피충격시험편(2 mm V-notch)과 피로균열(pre-cracked Charpy) 시험편을 제작하여 계장화(instrumented)충격시험을 실시하고, 충격시험시 하중점(load point)의 변위(displacement) 혹은 시간의 변화를 하중의 변화와 함께 측정하였다. 측정결과를 파괴현상 및 파괴역학과 연계시켜 해석하므로써, 가능한 한 소량의 시험편(혹은 시험공정)을 사용하여 필요로 하는 인성평가 관련 정보를 획득할 수 있도록 시도하였다. 그 결과, 파괴과정을 나타내는 하중의 변화를 이용하여 Shear fraction 을 예측할 수 있었고, 하중의 변화와 관계된 변위로부터 Lateral expansion 을 추정할 수 있었다. 피로균열 시험편 시험결과로부터는 충격시의 항복하중, 항복변위, 최고하중 등을 획득하여 균열크기의 함수로 표시되는 시험편 Compliance 를 계산하였고, Equivalent energy 법과 J-integral 법을 적용하여 원자로 압력용기강의 탄소성 동적파괴인성을 평가할 수 있었다.

1. 서 론

원자로 압력용기의 조사전시험(pre-irradiation baseline test)과 가동중 감시시험(surveillance test)에서 샤피충격시험(Charpy impact test)은 필수이다. 중성자 조사 등으로 인한 원자로의 경년연화를 평가하기 위해서는 반드시 재료의 인성(toughness)을 평가하여야 하는데, 샤피충격시험은 비교적 간편하게 상대적인 인성치를 시험할 수 있기 때문이다.

최근에는 충격시 타점(load point)의 하중과 변위(혹은 시간)의 변화를 Dynamic load cell 과 광 Sensor 를 이용하여 측정하고, 이를 파괴역학 및 파괴현상에 직접 적용하여 하나의 시험편으로부터 보다 많은 정보를 얻어내려는 시도가 이루어지고 있다. 감시시험의 경우, 가동중에 방사화된 재료를 시험하기 위해서는 시험공정을 최대한 단축시킬 필요가 있는데, 예를들어 충격시험후 Shear fraction 과 Lateral expansion 을 하중-변위 곡선으로부터 예측할 수 있다면 그에 해당하는 공정을 생략할 수 있다.

따라서 본 연구에서는, 국내에서 생산된 원자로 압력용기강을 대상으로 샤피충격 하중-변위 곡선을 얻고, 이를 이용하여 Shear fraction 과 Lateral expansion 을 예측할 수 있는 실험식을 도출하는 등 하중-변위 곡선의 다각적인 해석을 모색하였으며, 피로균열 시험편을 이용하여 탄소성 동적파괴인성을 평가하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 한국중공업(주)에서 제작한 ASME SA508 Cl.3[1] 원자로 압력

용기용 단조강으로, 화학성분 및 기본적인 기계적성질(20 °C)은 각각 Table 1 및 Table 2에 보인 바와 같다. 시험편의 형상과 크기는 ASTM E 23-94a [2]의 표준형 사파 충격시험편으로 제작하였고, 피로균열 시험편의 경우 균열선단의 응력집중인자는 $K_f = 26.6 \text{ kg/mm}^{3/2}$ (최대하중은 $P_{\max} = 180 \text{ kg}$) 로, 균열길이와 시험편두께의 비는 $a/W=0.45\sim0.55$ 로 제어하였다.

충격시험은 사파 충격시험기에 시간에 따른 충격하중의 변화를 알 수 있도록 Dynamic load cell 과 광 Sensor 가 장착된 계장화 충격시험기(instrumented impact tester)를 사용하였다. 충격시의 균열진전에 따른 하중변화에 대한 원과형을 모두 저장 및 해석할 수 있도록 Computer 와 연결시켜, 하중과 변위, 충격흡수에너지의 변화 등을 알 수 있도록 하였다.

충격치와 Shear fraction 그리고 Lateral expansion 은 공회 ASTM E 23-94a[2] 의 시험기 준을 준수하여 측정되었고, 동적파괴인성은 ETI Report 75-43[3] 을 근거로 하는 ASTM E 636[4], "Standard Practice for Conducting Supplemental Surveillance Tests for Nuclear Power Reactor Vessels, E 706 (IH)" 를 참고하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Shear fraction 의 예측

Fig. 1 은 사파충격 하중-변위 곡선을 도식적으로 나타낸 그림으로, 각 파괴단계에 있어서의 하중과 변위값을 특성화한 것이다. 이를 이용하여 Europe Structural Integrity Society(ESIS) 는 실험적으로 구한 Shear fraction 예측식을 다음과 같이 제안하고 있다[5].

$$\text{shear fraction} = 1 - \frac{(Pu - Pa)}{Pm} \quad (1)$$

$$\text{shear fraction} = 1 - \frac{(Pu - Pa)}{(Pm - Py)} \quad (2)$$

$$\text{shear fraction} = 1 - \frac{(Pu - Pa)}{Pm + 0.5(Pm - Py)} \quad (3)$$

$$\text{shear fraction} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{Py}{Pm} + 2}}{3} \times \left[\sqrt{\frac{Pu}{Pm}} - \sqrt{\frac{Pa}{Pm}} \right] \quad (4)$$

여기서 Py 는 항복점하중(yield point load), Pm 은 최대하중(maximum load), Pu 는 불안정 균열전파하중(load at the initiation of unstable crack propagation) 그리고 Pa 는 균열정지하중(crack arrest load)이다. 또한, Nanstad 등[5]은 다음 식으로 표시되는 예측식을 제안하였다.

$$\text{shear fraction} = 1 - \frac{(Pu - Pa)}{0.5(Pm + Py)} \quad (5)$$

Fig. 1 에 나타낸 바와같이, 시험편 변위에 따른 하중의 변화는 시험편의 파괴과정과 밀접한 관련이 있으며, $Pu - Pa$ 는 짧은 시간에 급격히 하중이 감소하는 불안정 균열성장(unstable crack growth) 즉 취성파괴(brittle fracture)량을 나타낸다. 따라서, 재료의 파괴과정에서 발생하는 하중의 변화는 $Pu - Pa$ 부분을 제외하고는 모두 연성파괴(shear fracture)와 관계가 있으며, 이 중 Py 는 탄성변형과 관계하므로 제외된다. 즉, Pm 과 $Pm - Pu$ 그리고 Pa 를 합하여 분모로 하고 $Pu - Pa$ 를 분자로 하여 나누어주면 이는 불안정균열성장(unstable crack growth)의 분률을 나타내고, 따라서 나머지는 Shear fraction 을 나타낸다. 본 연구에서는 이러한 개념을 토대로 하여 새로운 예측식인 식(6)을 도출하였다.

$$\text{shear fraction} = 1 - \frac{Pu - Pa}{2Pm - Pu + Pa} \quad (6)$$

ASTM E 23-94a 에 따라 실측된 Shear % 와 위에서 제안된 예측식에 의한 계산결과를

1:1 로 비교한 것이 Fig. 2 이다(식(2)는 계산중 대부분 error(-) 를 발생시켜 비교를 생략했습). ESIS 나 Nanstad 등[5]이 제시한 식들에 비하면, Shear % 의 경향을 예측하는데 훨씬 근접된 결과를 보였다.

3.2 Lateral expansion 의 예측

샤피충격 하중-변위 곡선으로부터 Lateral expansion 을 예측하는 방법에 대해서는 아직 알려진 바가 없으나, 여기서는 다음과 같이 추정하여 보았다. 앞서 Fig. 1 에서 본 바와같이, 시험편의 변위에 따른 하중의 변화곡선으로부터 시험편의 변위와 관련하여 Lateral expansion 에 영향을 미칠 수 있는 부분은 오로지 $dm-dy$ 뿐이다. 왜냐하면, dy 는 탄성력에 의한 변위이고, dm 으로부터 파단에 이르는 변위는 하중감소를 동반하므로 Lateral expansion 에 기여를 하지 못한다고 판단되기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 다음과 같이 Lateral expansion 예측식을 제안하였다.

$$L.E. = \frac{2(dm-dy)}{3} \quad (7)$$

여기서 dm 은 최대하중까지의 변위(displacement to maximum load)이고 dy 는 항복하중까지의 변위(displacement to yield load)이다. 식(7)을 이용하여 예측한 Lateral expansion 과 ASTM E 23-94a 에 따라 실측한 값을 1:1 로 비교한 것이 Fig. 3 에 나와있다. 실측편차를 고려할 때[6], 매우 유효한 결과라고 사료되었다.

3.3 천이곡선에서의 위치 및 USE(Upper Shelf Energy)의 추정

이밖에도 샤피 하중-변위 곡선으로부터 얻을 수 있는 실용적인 정보 가운데 또 하나는, 하나의 시험편을 시험하였을 때 얻어진 하중-시간(변위) 곡선으로부터 하중변화특성분석에 의해 천이곡선의 어느 부분에 위치하는 data 인가를 예측할 수 있다는 점이다. 앞서 논의한 P_u-P_a 가 0 이라면 이는 upper shelf energy 영역에 해당되는 시험편의 시험결과이다. $P_u-P_y = 0$ 이면 lower shelf 에 해당되는 시험편의 시험결과임을 예측할 수 있다. P_u-P_a 의 분률을 알 수 있으므로 천이영역의 어느정도 위치인지를 짐작할 수 있고, 시험 온도를 높여 한 두 번의 시험에 의해 upper shelf 를 찾을 수 있다. 이러한 방법으로 중성자가 조사된 시험편의 시험횟수와 시험공정을 최소화할 수 있다.

3.4 동적파괴인성의 측정

원자로 압력용기강은 천이온도 이상에서 항복하중보다 큰 최고하중을 보이며($P_y < P_m$), 따라서, 탄소성 파괴거동을 나타내는 경우의 Equivalent energy method[3]와 J-integral 을 이용한 방법[4]을 적용할 수 있다. 탄성 기울기의 역수로 표시되는 Total compliance 는

$$C_t = \frac{D_y}{P_y} \quad (8)$$

로 표시되고, Specimen compliance 는 균열길이(a/W)의 함수로

$$C_s = \frac{EBD/P}{EB} \quad (9)$$

와 같아, 도표에서 구할 수 있다[3,4]. 따라서 Machine compliance 는

$$C_m = C_t - C_s \quad (10)$$

로서

$$E_m = \frac{1}{2} P_{\max}^2 C_m \quad (11)$$

을 구하여

$$E_I = W_I - E_m \quad (12)$$

과 같이 실제 시험편이 흡수한 최대하중까지의 에너지를 구한다. Equivalent energy 법은

$$P^* = \left(\frac{2E_I}{C_s}\right)^{1/2} \quad (13)$$

에서 구한 등가의 최대하중치를 파괴인성치에 적용하여 계산하게 된다. 즉

$$K_d^* = \frac{6Ya^{1/2}P^*}{BW} \quad (14)$$

이고, 여기서 $Y=f(a/W)$ 로 주어진다[3,4]. 또한, J-integral 을 이용하여

$$J_d = \frac{2E_I}{bB} \quad (15)$$

로부터

$$K_{Jd} = (EJ_d)^{1/2} \quad (16)$$

를 구할 수도 있다. 여기서 E 는 탄성계수로, 다음과 같이 온도에 의존한다.

$$E = 207200 - 57.09 T(^{\circ}C) \text{ (MPa)} \quad (17)$$

Fig. 4 는 시험온도에 따른 동적파괴인성치를 도시한 것으로, ASME Code Sec. III, App. G에 제시되어 있는 참조파괴인성(K_{IR})곡선과 비교하여 볼때 대상재의 동적파괴인성이 기준곡선보다 상회함을 알 수 있었다. 그림에서 K_{pci} 는 precracked Charpy 에 의한 K_d^* 혹은 K_{Jd} 를 나타낸다.

4. 결 론

가. 파괴과정에서 나타난 하중의 변화는 파괴양상을 보여주는 파면의 Shear fraction 과 직접적인 관계가 있으며, 추정식은 다음과 같다.

$$\text{shear fraction} = 1 - \frac{Pu - Pa}{2Pm - Pu + Pa}$$

나. 변위와 관계된 하중의 변화로부터 Lateral expansion 을 유발하는 급격한 하중상승량에 비례하는 변위량을 정량화한 결과, Lateral expansion 예측식은 다음과 같다.

$$L.E. = \frac{2(dm - dy)}{3}$$

다. 하나의 시험결과가 천이곡선의 어느 부분에 위치하는 data 인가를 예측할 수 있으며, 적은 수의 시험편으로 천이곡선의 작성이 가능하다.

라. 피로균열 샤프시험편을 이용하여 탄소성 동적파괴인성의 측정이 가능하다.

5. 참고문헌

- 1) ASME Sec. II, Part A, SA508 cl.3, 1992
- 2) ASTM Standard E-23, 1994
- 3) D. R. Ireland et al., ETI Technical Report 75-43, EPRI, 1975
- 4) ASTM Standard E-636, 1983
- 5) R. K. Nanstad et al., Pendulum Impact Machines, ASTM STP 1248, 1995, pp 111 - 139
- 6) B. F. Dixon, Welding J., Aug. 1994, pp 39 - 46

Table 1 Chemical compositions of ASME SA508 cl.3 steels for reactor pressure vessel

Elements	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
wt. %	0.20	1.42	0.07	0.007	0.003	0.79	0.15	0.57	0.007	0.06
Elements	Al	As	Sn	N	Ti	Nb	Co	B	W	Zr
wt. %	0.005	0.0048	0.0036	0.004	0.002	0.002	0.01	0.002	0.004	0.002

Table 2 Mechanical properties of ASME SA508 cl.3 steel for reactor pressure vessel

Test Temperature (°C)	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
20	430.3	566	26	72

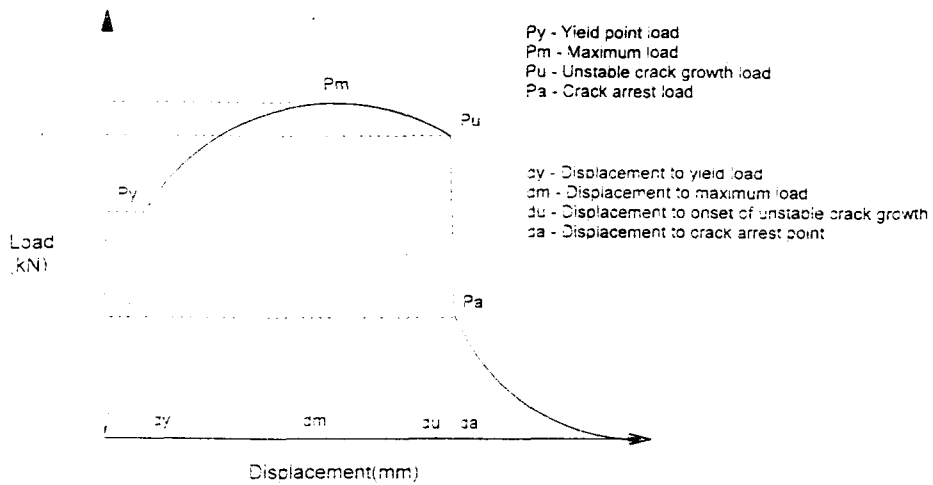


Fig. 1 Schematic Charpy impact load-displacement trace

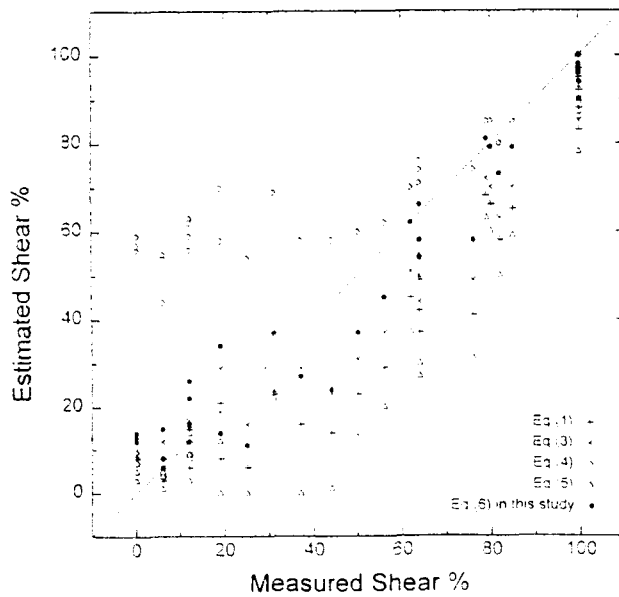


Fig. 2 Estimation of shear percentage using proposed equations

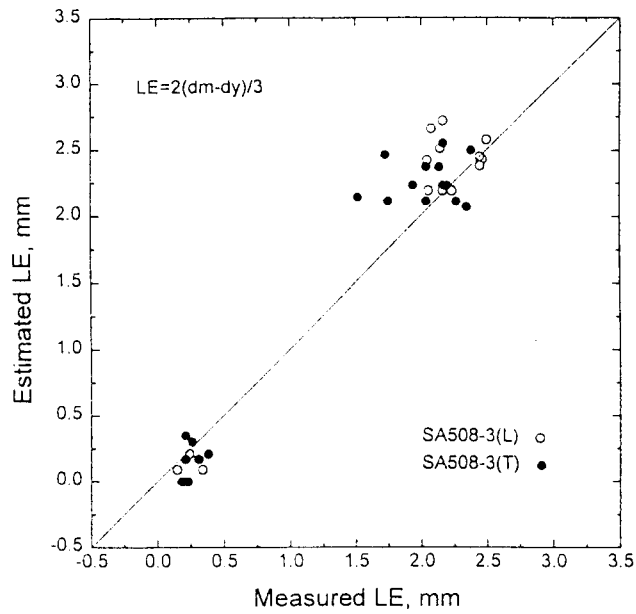


Fig. 3 Estimation of lateral expansion using proposed equation in this study

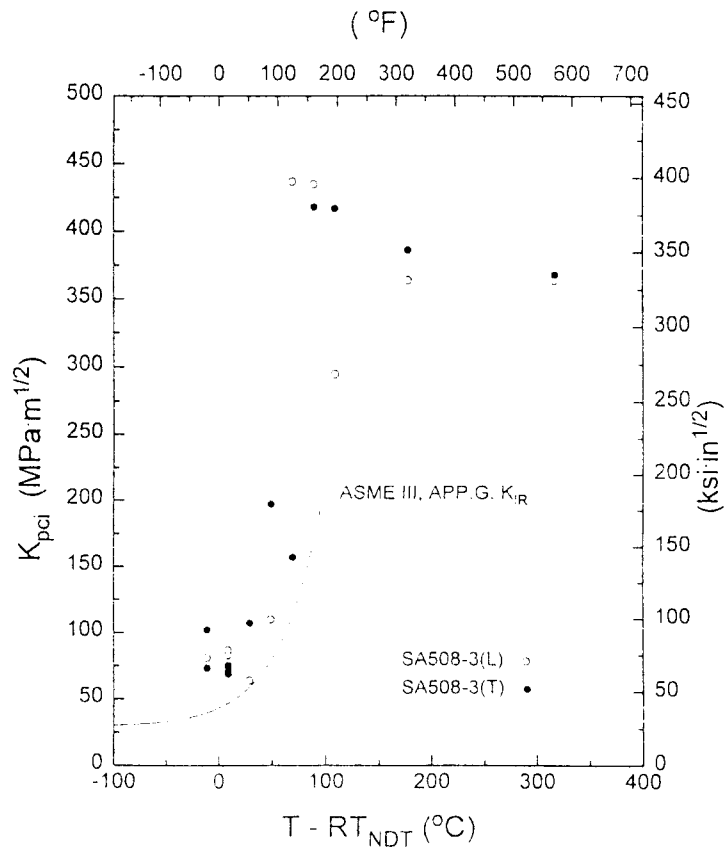


Fig. 4 Comparison of K_{pci} (precracked Charpy K_d' or K_{Jd}) with K_{IR}