소형편치시험법을 이용한 알루미늄 6061-T6 Type-3 용기 라이너의 파괴인성 평가

마영화 · 이승훈 · [†]윤기봉

중앙대학교 기계공학부

(2011년 5월 26일 접수, 2011년 7월 29일 수정, 2011년 7월 29일 채택)

Evaluation of Fracture Toughness Using Small Punch Test for Aluminum 6061-T6 Type-3 Cylinder Liner

Young-Wha Ma · Seong-Hoon Lee · [†]Kee-Bong Yoon

Dept. of Mechanical Engineering, Chung Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received May 26, 2011; Revised July 29, 2011; Accepted July 29, 2011)

요 약

Type-3 용기 라이너는 두께가 5 mm일뿐 아니라 곡률을 가지고 있기 때문에 파괴인성시험을 위한 표준형 시편의 제작에 어려움이 있다. 따라서 용기 라이너의 파괴인성을 평가하기 위해서는 소형시편 시험방법이 도입되어야 한다.

본 연구에서는 용기 라이너의 파괴인성을 평가하기 위해 소형편치(small punch, SP)시험법을 도입하였다. SP 시험으로부터 측정된 하중-변위 곡선 결과에서 라이너 재료는 연성이 소진하여 막신장 영역에서 파손되었다. 라이너 재료는 제작공정 특성에 기인하여 소성변형량이 방향에 따라 다름에도 불구하고 등방성 파괴양상을 보였다. SP시험 데이터를 사용하여 파괴인성을 평가한 결과 $J_{Ic}=13.0 \text{ kJ/m}^2$ 이었다. 이 값은 동종재료의 파괴인성 값과 유사하다. 따라서 SP시험 데이터를 사용하여 평가한 파괴인성은 타당하며, 완성된 용기 라이너는 유효한 파괴인성 값을 유지하는 것으로 확인 되었다.

Abstract - Type-3 cylinder liner has a limitation of machining the standard specimen for fracture toughness test because it has approximately 5 mm in thickness as well as a curvature. Hence, it needs to be employed a miniature specimen test technique to evaluate fracture toughness of the cylinder liner.

In this study, small punch (SP) test method was employed to evaluate fracture toughness of the cylinder liner. Load-displacement curve result measured from the SP test showed that the liner material was failed during membrane stretching in the general SP load-displacement curve. Additionally, it was shown that liner material was isotropic although the amount of plastic deformation was different depending on the direction due to manufacturing process characteristics. Fracture toughness, J_{Ic} , was evaluated using the SP test data. The value of fracture toughness obtained was 13.0 kJ/m^2 . This value was similar to that of the same kind of materials. Therefore, the fracture toughness evaluated using the SP test data was reasonable.

Key words : small punch test, fracture toughness, aluminum 6061-T6, Type-3 cylinder, liner

[†]주저자:kbyoon@cau.ac.kr

I. 서 론

완성된 Type-3 고압가스용기의 라이너에 대한 파괴인성(K_{Ic} 또는 J_{Ic})측정은 용기의 기하학적 형상과 재료의 제한성으로 인해 어려움이 있다. 즉, Type-3 용기 라이너는 두께가 약 5mm이고, 곡률을 가지고 있기 때문에 표준 파괴인성시험 규격에서 요구하는 시험편 제작이 어렵다. 이로 인해 파괴인성 측정을 위해서는 소형시험편 시험법(miniature specimen test technique) 도입이 필요하다.

표준형 시험편 제작에 어려움이 있는 요소재료의 파괴인성 값을 평가하기 위한 시험법으로 소형펀치(small punch, SP) 시험법이 널리 사용되고 있다. SP시험법은 재료의 연취성전이온도(ductile-brittle transition temperature, DBTT)를 측정하기 위해 처음 제안되었다[1]. 그 후 Manahan 등[1]에 의해 파괴인성(fracture toughness) 시험법으로 발전하였다. Mao 등[2]은 SP시험 결과 얻은 변위 데이터로부터 등가 SP 파단변형률(ϵ_{qf})을 정의하였고, 연성재료의 경우 이 변형률이 파괴인성 J_{Ic} 와 선형적인 관계에 있다고 보고하였다. 또한, 취성재료의 경우에는 SP 파단응력(σ_f)과 파괴인성 K_{Ic} 가 선형적 관계에 있다고 보고하였다. Mao 등의 연구 이후 많은 연구자들이 다양한 재료들에 대해 $\epsilon_{qf} - J_{Ic}$ 와 $\sigma_f - K_{Ic}$ 사이에 선형적인 관계가 있음을 보고하였다[3-4].

본 연구에서는 SP시험법을 도입하여 알루미늄 6061-T6로 제작된 Type-3 고압가스용기 라이너의 파괴인성을 평가하고자 한다. 이는 파괴인성이 고압용기의 설계 및 건전성 평가에 반드시 필요한 재료물성이기 때문이다. 또한, 완성된 용기 라이너의 파괴인성이 원재료의 파괴인성 값에 비해 어떻게 변화하였는지를 고찰할 필요가 있기 때문이다.

II. 실험

2.1. 시험 준비

SP시험은 압력용기의 실린더 부위에서 채취하였다. 파괴인성 측정에 사용된 SP시험의 형상 및 재원을 Fig. 1에 보였다. 시험편은 절삭공정에서 발생하는 재료의 변형층(deformed layer)을 최소화하기 위해 'Travelling wire EDM technique'을 사용하여 절삭하였다. 이 절삭방법은 시험편의 양쪽 표면에 0.01 mm ~ 0.016 mm의 변형층을 발생시킨다. 따라서 변형층이 없는 10 mm × 10 mm × 0.5 mm (가로×세로×두께)의 시험편을 준비하기 위해 10 mm × 10 mm × 0.6 mm로 절삭한 후, 연마지를 사용하여 두께가 0.5 mm가 될 때까지 양면을 표면연마 하였다. 최종연마는 1200 Grit 연마지를 사용하여 수행하였다.

2.2. 실험 방법

SP시험은 상온에서 동일한 조건으로 5회 반복 수행하였다. 하중은 변위제어 방식으로 0.5 mm/min의 일정한 속도로 가하였다. 시험 동안 하중과 편치의 처짐 변위 데이터는 컴퓨터로 자동 저장하였다. 전체 SP시험 장치 및 지그 형상을 Fig. 2에 보였다. 시험편은 Fig. 2의 하단에 보인 지그(jig) 안에 고정하였다.

Fig. 1. Small punch test specimen.

Fig. 2. Small punch testing machine and jig.

Fig. 3. Schematic representation of cross-section of small punch testing jig.

SP시험 지그의 단면형상을 Fig. 3에 개략적으로 나타내었다. Fig. 3에 보인바와 같이 지그는 시편을 고정시키기 위한 상부 및 하부다이와 시편에 하중을 가하기 위한 볼과 펀치로 구성된다. 볼의 직경(d)은 2.4 mm, 하부 다이의 내부 홀 직경(a)은 4 mm, 홀의 모서리 곡률(R)은 0.2 mm 이다. 시편과 하부다이 및 홀더 사이의 클램핑(clamping) 하중은 '0'에 가깝도록 체결하였다. SP시험에서 클램핑 부위는 시편의 지그부에 해당하므로 SP 하중-변위 곡선 결과 데이터에는 큰 영향을 주지 않는다.

III. 결과 및 고찰

3.1. SP 하중-변위 곡선

SP시험 결과 얻은 하중-변위 곡선을 Fig. 4에 도시하였다. SP 하중-변위 곡선은 일반적으로 탄성굽힘, 소성굽힘, 막신장(membrane stretching) 그리고 최대 하중 영역으로 구분할 수 있다. 여기서 소성굽힘 영역은 약 0.1 mm ~ 0.5 mm 구간에서 나타난다. 이후 약 1.5 mm까지 막신장이 발생하고, 최대하중에 도달한 후 파손이 발생한다. 이에 기초하여 Fig. 4에 보인 결과를 보면, 소성굽힘 영역이 발생한 후 막신장이 진행되는 과정에서 파손이 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 SP 하중-변위 곡선 결과는 연성이 소진된 재료에서 나타난다. 자세한 논의는 다음 3.2절에서 다룬다.

3.2. 파단면 관찰

SP시험 후 시편 사진을 Fig. 5에 보였다. 시편들은

Fig. 4. Load-displacement curves measured from small punch test.

Fig. 5. Small punch specimens after small punch testing.

Fig. 6. SEM image of fracture surface for small punch specimen after small punch testing(specimen ID: No. 5).

모두 원형으로 파단 되었다. 시편들이 원형으로 파단 되었다는 것은 연구대상 재료의 기계적 거동 특성이 등방성임을 보여준다. 따라서 용기 제작과정에서의 열처리가 정상적으로 수행되었음을 알 수 있다. 만일, 열처리가 정상적으로 수행되지 않았다면, 용기 라이너의 제작공정 특성상 용기의 길이 방향으로 심한 가공경화가 발생하기 때문에 이방성 효과에 의해 직사각형 또는 타원형의 파단양상을 보여주었을 것이다[5]. 한편, 시편의 표면에서 발생한 균열은 닫힌 원형균열 형태를 보여주고 있다. 이는 가공경화에 의해 연성이 소진되었거나 취성재료의 경우에 나타나는 파손양상이다[5]. 즉, 연성이 작아 연성재료에서 나타나는 네킹이 발생하지 못하고 소성균열 또는 막신장이 진행되는 과정에서 균열이 발생하기 때문에 나타나는 현상이다. 이로 인해 SP 하중-변위 곡선은 Fig. 4에 보인 형태로 나타나게 된다.

Fig. 6은 No.5 시편의 파단면을 SEM (scanning electron microscope)으로 관찰한 결과이다. 결과에서 A1, A2 그리고 A3 위치 모두 동일한 파단양상을 보였다. 이는 앞에서 설명한 라이너가 등방성임을 뒷받침하는 또 다른 결과이다. 파단면은 전체적으로 판형 집합조직의 파단형태를 보여주고 있다. 이는 용기 제작과정의 딥드로잉 공정에 기인한 특성이며, 취성과 파괴와 연성파괴의 중간 단계로 볼 수 있다. 한편, 파

단면의 집합조직 일부에서 딥플(dimple)들이 관찰되었다. A2'은 딥플을 확대하여 나타낸 것이다. 딥플이 파단면의 일부에서만 관찰된다는 것은 연구대상 재료가 심한 소성변형에 의해 연성이 거의 소진된 재료이기 때문으로 볼 수 있다.

3.3. 파괴인성 평가

SP시험에서 파단변형률(ϵ_{qf})는 다음과 같이 정의된다[2,4].

$$\epsilon_{qf} = \ln\left(\frac{t_0}{t}\right) = \beta\left(\frac{\delta}{t_0}\right)^n \quad (1)$$

여기서 t_0 는 시험편의 초기 두께, t 는 시험후 시험편의 최소부위(파단부위) 두께, δ 는 파단점에서의 시험편 중심의 처짐 변위, β 와 n 은 실험을 통해 결정되는 보정 상수들이다. ϵ_{qf} 는 SP 에너지(W_f) 정의에 기초해서 다음과 같이 표현되기도 한다[3].

$$\epsilon_{qf} = \beta' W_f + n' \quad (2)$$

W_f 는 SP 하중-변위 곡선의 아래쪽 면적에 해당한다. 본 연구에서는 최대 하중점까지의 면적만을 SP 에너지로 고려한다. 이는 최대 펀치하중 이후 결과

데이터는 네킹에 의한 것이 아니고 균열의 발생 및 성장에 따른 결과이었기 때문이다. 식(1), (2)에 주어진 β 와 n , β' 와 n' 의 값들은 여러 연구자들에 의해 제안되었다. Mao 등[2]은 다양한 재료들(HT-90, A508, HT-9, SUS304, A533, 9Cr, Cu-Be-Co)에 대해 $\beta = 0.09$, $n = 2$ 의 값을 갖는다고 제안하였다. Wang 등[3]은 압력용기나 증기터빈에 사용되는 일반 저합금강에 대해 $\beta = 0.15$, $n = 1.5$; $\beta' = 0.58$, $n' = 0.052$ 의 값을 제시하였다. Budzakoska 등[4]은 본 실험재료와 동종인 Al6061 합금에 대해 SP시험을 수행하여 $\beta = 0.2 \pm 0.1$, $n = 1.0 \pm 0.6$ 의 값을 보고하였다. 여러 연구자들에 의해 보고된 β 와 n 의 값들은 실험대상 재료들이 바깥에 따라 다른 값을 갖는 것처럼 보인다. 즉, 재료 의존적 상수 값들로 보여 질 수 있다. 하지만, 이 값들은 재료와 무관한 상수들이며, 실험의 측정오차 범위 내의 값을 알 수 있다. 즉, Mao 등과 Wang 등이 제시한 값들이 Budzakoska 등이 제시한 값의 오차범위 안에 포함되어 있다.

SP 파단변형률 ε_{qf} 와 파괴인성 J_{Ic} , SP 파단강도 σ_f 와 파괴인성 K_{Ic} 사이의 관계들은 Mao 등[2]에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$J_{Ic} = k\varepsilon_{qf} - J_0 \quad (3)$$

$$K_{Ic} = C\sigma_f^{2/3} \quad (4)$$

식(3)에서 상수 k 와 J_0 는 표준형 C(T)시편으로부터 측정된 J_{Ic} 와 SP시험으로 얻은 ε_{qf} 사이의 경험적 관계를 나타내는 상수들이다. 또한, 식(4)에서 상수 C 는 평면변형률 조건을 만족하는 C(T)시편으로부터 측정된 K_{Ic} 와 SP시험으로 얻은 σ_f 사이의 관계를 나타낸다. 이들 상수들은 식(1), (2)에서 정의된 상수들과 달리 재료 및 환경에 의존하는 상수들이다. Mao 등은 앞에 기술한 재료들에 대해 $k = 345 \text{ kJ/m}^2$, $J_0 = 113 \text{ kJ/m}^2$ 을 제안하였다. 이 값들은 연성이 비교적 큰 재료들에 대해서는 타당한 파괴인성 값을 예측한다. 하지만 본 과제의 실험재료인 Al6061-T6

합금과 같이 가공경화에 의해 연성재료와 취성재료의 중간 특성을 갖고 있는 재료에 대해서는 적용에 한계가 있다. 따라서 Budzakoska 등이 제안한 Al6061합금에 대한 해당 변수 값들($k = 82 \text{ kJ/m}^2$, $J_0 = 23 \text{ kJ/m}^2$)을 사용하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 식(4)는 완전 취성재료에 대해 정의된 관계식이므로 가공경화에 의해 연성이 소진되었으나, Fig. 6에 보인바와 같이 연성이 남아있는 본 연구대상 재료에 대해서는 적용하는 것이 타당하지 않다. 따라서 본 논문에서는 식(3)을 사용하여 J_{Ic} 값만을 평가한다.

Al6061-T6로 제작된 Type-3 고압가스용기 라이너의 파괴인성 값을 평가하기 위해 먼저, Fig. 4에 보인 SP 하중-변위곡선 결과 데이터로부터 파단점의 처짐변위 δ 를 얻었다. 다음으로, δ 를 식(1)의 우측항에 대입하여 파단변형률 ε_{qf} 를 얻었다. 이때, β 와 n 은 Budzakoska가 제안한 평균값을 사용하였다. 이는 Budzakoska가 제안한 상수 값들이 본 실험대상 재료와 동종 재료(Al6061 합금)에 대해서 얻어진 값이므로 파괴인성 평가 결과의 신뢰도가 다른 상수 값을 사용하는 경우보다 높을 것으로 판단되었기 때문이다. 마지막으로, 얻어진 ε_{qf} 를 식(3)에 대입하여 파괴인성 J_{Ic} 를 평가하였다. 이때, k 와 J_0 역시 Budzakoska가 제안한 값들을 사용하였다. SP 시험으로부터 예측된 파괴인성 값은 $J_{Ic} = 13.0 \text{ kJ/m}^2$ 이었다. 이 결과 값은 Al6061 합금의 일반적인 파괴인성 J_{Ic} 값 약 11.0 ~ 15.0 kJ/m²[4]의 범위에 포함된다. 이 결과는 두 가지로 해석이 가능하다. 첫 번째는 Type-3 용기 라이너는 비록 심한 소성변형에 의한 가공경화로 인해 연성이 상당부분 소진되었지만, 일반적인 동종재료의 파괴인성 값과 근사한 값이므로 여전히 유효한 파괴인성 특성을 가진다는 것이다. 또 다른 하나는 SP시험 결과 데이터를 사용하여 평가한 파괴인성 값에도 신뢰성을 부여할 수 있다는 것이다. 파괴인성 결정 과정에서 얻어진 데이터들을 포함하여 파괴인성평가 결과를 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Results of evaluating fracture toughness using small punch test data

	Specimen ID					Average
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	
Fracture Displacement, δ (mm)	1.009	1.140	1.136	1.093	1.103	1.096 ±0.053
Fracture Strain, ε_{qf} (mm/mm)	0.404	0.456	0.454	0.437	0.441	0.438 ±0.021
Fracture Toughness, J_{Ic} (kJ/m2)	10.1	14.4	14.3	12.9	13.2	13.0 ±1.7

IV. 결 론

본 연구에서는 소형펀치(small punch, SP) 시험법을 도입하여 Al6061-T6로 제작된 Type-3 고압가스 용기 라이너의 파괴인성을 평가하였다. 연구결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) SP시험 결과 얻은 하중-변위 곡선으로부터 시편이 막신장이 발달하는 과정에서 파손되었음을 알 수 있었다. 이 결과는 전형적인 연성이 소진된 재료에서 나타나는 특성이다.

(2) SP시험 후 시편 관찰 결과로부터 실린더 부위 재료는 등방성 파괴양상을 보였다. 이는 SP시편 표면의 균열양상이 원형인 것에 근거한다. 이방성 재료의 경우, SP시편 표면의 균열양상은 일반적으로 직사각형 또는 타원형의 형상을 보인다.

(3) Type-3 용기 라이너에서 채취한 Al6061-T6의 평가된 파괴인성 J_{IC} 값은 13.0 kJ/m^2 이었다. 이 값은 동종 재료(Al6061 합금)의 파괴인성 J_{IC} 값의 범위에 포함된다. 따라서 SP시험 결과 데이터로부터 평가된 파괴인성 값은 신뢰할 만하며, 완성된 라이너의 파괴인성은 유효한 값을 유지하고 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0029816).

참고문헌

- [1] Manahan, M. P., Argon, A. S. and Harling, O. K., "The Development of a Miniaturized Disk Bend Test for the Determination of Post-Irradiation Mechanical Properties", *Journal of Nuclear Materials*, **103&104**, 1545-1550, (1981)
- [2] Mao, X. and Takahashi, H., "Development of a Further-Miniaturized Specimen of 3 mm Diameter for TEM Disk (3mm) Small Punch Tests", *Journal of Nuclear Materials*, **150**, 42-52, (1987)
- [3] Wang, Z. X., Shi, H. J., Lu, J., Shi, P. and Ma, X. F., "Small Punch Testing for Assessing the Fracture Properties of the Reactor Vessel Steel with Different thickness", *Nuclear Engineering and Design*, **238**, 3186-3193, (2008)
- [4] Budzakoska, E., Carr, D. G., Stathers, P. A., Li, H., Harrison, R. P. and Hellier, A. K., "Predicting the J Integral Fracture Toughness of Al 6061 Using the Small Punch Test", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **30**, 796-807, (2007)
- [5] Ma, Y. W. and Yoon, K. B., "Assessment of Tensile Strength Using Small Punch Test for Transversely Isotropic Aluminum 2024 Alloy Produced by Equal Channel Angular Pressing", *Materials Science and Engineering A*, **527**, 3630-3638, (2010)