論文 13-4-3

초음파법을 이용한 탄소성 파괴인성치 평가에 있어서 시험편 크기의 영향

Effects of Specimen Size in Evaluation of Elastic-Plastic Fracture Toughness by Ultrasonic Method

강 동 명* · 함 경 춘** · 우 창 기***
D.M. Kang · K.C. Ham · C.K. Woo

(1998년 5월 20일 접수, 1998년 10월 10일 채택)

ABSTRACT

Elastic-plastic fracture toughness(J_{IC}) by ultrasonic method is evaluated in terms of width and thickness. Widths of specimen in 6061-T6 aluminum alloy are 50mm and 100mm, thicknesses of those are 20mm and 25mm, respectively. Elastic-plastic fracture toughness by ultrasonic method is independent of specimen thickness and side groove. Angle beam probe which are placed on the end of the compact specimen detect the maximum crack extension effectively. Comparing with elastic-plastic fracture toughness by ultrasonic method and that of unloading compliance method, J_{IC} of ultrasonic method are underestimated to that of unloading compliance method. Elastic-plastic fracture toughness of width 100mm specimen are underestimated to that of width 50mm specimen about 20%.

1. 서 론

재료의 탄소성 파괴인성치(J_{IC})의 정확한 평가를 위해서는 안정파괴 개시점을 정확하게 검출할 필요가 있다. 현재까지 여러가지 안정파괴개시점의 검출법이 제안되어 있는데 그중에서 시험편 제작이 용이하고 직접적으로 안정파괴개시점을 찾을 수 있는 시험법은 단일시험편법이다[1~4]. 단일시험편법에는 제하컴플라이언스법, 전위차법, AE법 및 초음파법 등이 있다. 일반적으로 가장 많이 이용되는 제하컴플라이언스법은 단일시험편에 의한 효율적인 J_{IC} 결정의 장점이 있

* 유한대학 금형설계과
** 인하공업전문대학 기계설계과
*** 인천대학교 기계공학과

는 반면 실측 컴플라이언스와 교정 컴플라이언스 곡선의 대응관계의 불명확성 및 연속적인 균열길이의 측정이 불가능한 점 등의 문제점이 있다. 비파괴검사로 산업현장에 널리 이용되는 초음파탐상기를 이용한 J_{IC} 시험은 앞에서 언급한 제하컴플라이언스법의 단점을 해결할 수 있는 시험법으로 피로예균열의 개구, 소성둔화 및 파괴개시에 따른 불연속면의 증대에 기인하는 초음파의 투과량이나 반사량의 급격한 변화점에서 안전파괴 개시점을 검출한다.

본 연구에서는 알미늄 6061-T6재를 시험편의 두께와 크기를 다르게 가공하고, 단일시험편에 대하여 초음파법에 의한 탄소성파괴인성치(J_{IC}) 결정시험을 하였다. 이 시험결과를 제하컴플라이언스시험에 의한 J_{IC}와 비교 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서 사용된 재료는 Al-Mg-Si계로서 환경조건하에서 내식성이 우수한 A6061-T6 합금으로 화학적조성과 재료의 기계적성질은 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 시험편의 규격은 CT시험편으로 Fig. 1과 같다. 시험편은 T-L 방향으로 채취하고 시험편의 폭(W)은 50mm 및 100mm로 하였으며 각각의 시험편 두께를 20mm 및 25mm로 가공하였다. 또한, 각 시험편에 대하여 사이드그루브를 주지 않은 것(이하, S.G.=0%)과 사이드그루브를 준 것(이하, S.G.=20%)으로 나누어 와이어컷 방전가공기(wire cut E.D.M)로 가공하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 이용한 펄스반사법에 의 한 초음파탐상법의 실험장치이다. 그림에서와 같이 시험편의 상단면(Top-on)과 배단면(End-on)에 탐촉자를 설치하고 안정파괴 개시거동을 두 방향에서 측정하였다.

본 연구의 초음파탐상기는 SONIC 137(Staveley Instruments Inc.)이며, 시험편 상단면에 수직탐촉자(직경 8mm; 5 MHz)를 설치하고 배단면에는 균열길이를 보다 효과적으로 관찰하기 위해서 경사탐촉자(폭 7mm; 5 MHz)를 설치하였다. 진동자로부터 발진된 5 MHz 초음파는 직경보다 넓게 분포되나 초음파의 음압분포에서 입사 및 반사를 고려하면 실제 탐상되는 영역은 진동자 직경정도로 사료되며, 이 영역의 크기에서는 안정파괴 개시점 및 균열의 진전거동의 측정이 가능하다. 특히 균열진전량(Δa)은 배단면의 경사 탐촉자에 의한 에코파에 의한 것으로 CT 시험편의 최대 균열진전량이 측정된다[5].

초음파법에 의한 J_{IC} 시험은 서보유압피로시험기(Shimadzu Co.; 10 ton)를 사용하였고, 먼저 CT 시험편에 파형을 정현파로 주파수는 10 Hz의 조건에서 예비피로균열을 낸 후 일정변위 속도(0.5mm/min.)로 시험편에 하중을 가하였다.

피로시험기와 초음파탐상기의 출력단자를 이용하여 하중-하중선변위, 상단면 및 배단면의 에코출력전압변화들을 AD 변환기로 자료들을 자동 저장하였다. 배단면의 초음파 에코출력 가운데 X축(distance)에서 연속적으로 균열의 길이를 구하고 J 적분을 P-V_L 선도를 토대로하여 다음 식으로 부터 계산한다[6].

$$J=\left(\frac{1+\alpha}{1+\alpha^2}\right)\cdot\frac{2A}{Bb}$$

여기서,

$$\alpha=2\sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2+\left(\frac{a}{b}\right)+\frac{1}{2}}-\left(\frac{2a}{b}+1\right)$$

이며, A는 하중-하중선 변위곡선하의 에너지 면적, B는시편의 두께, b는 균열이 없는 원래의 리가멘트 (W-a_o)이며 a_o는 초기의 균열길이 이다.

Table 1 Chemical composition

(wt.-%)

Si	Fe	Cu	Mg	Cr
0.60	0.25	0.29	0.97	0.19
Zn	Ti	Mn	Al	
0.03	0.035	0.10	bal.	

Table 2 Mechanical properties of 6061-T6

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poission's ratio	Elongation (%)
315	249	77.56	0.32	16.1

3. 실험결과 및 고찰

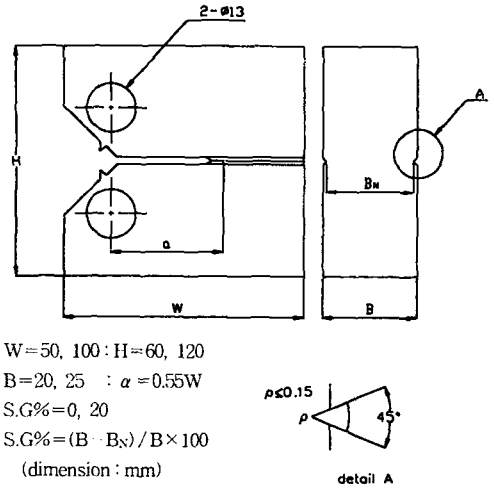

Fig. 1 Configuration of test specimen

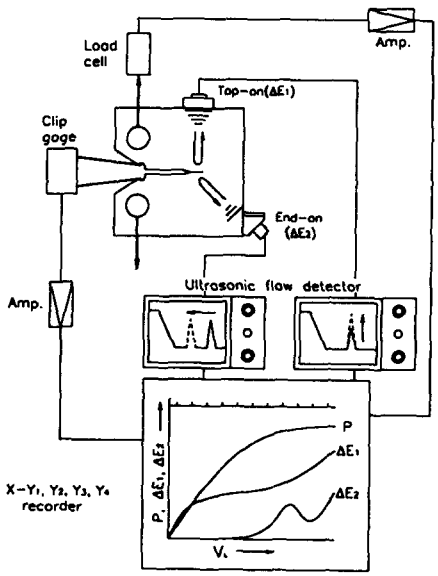

Fig. 2 Experimental apparatus

본 시험의 배단면의 초음파 에코 출력파형의 일례를 Fig. 3에 나타내었다. 이 에코의 출력위치는 균열의 진전에 따라 그 위치가 이동하며 Fig. 3에 모형적으로 나타낸 것 처럼 에코출력위치 및 그 변화량을 읽어들이면 균열의 진전길이를 측정할 수 있다. 일반적으로 피로파단된 파면은 터널링현상(tunneling)이 나타나는데 파면 관찰로부터 측정된 두께 중앙부의 최대균열진전량(Δa_{max})은 사이드그루브의 유무 및 그 깊이와 관계가 있다[7]. 그러나 광범위한 균열진전에서는 배단면의 초음파법에 의해 비파괴적으로 연속 측정한 Δa와 피로파단된 파면의 두께 중앙부의 최대균열진전량(Δa_{max})과는 1 대 1 대응관계가 성립함이 이미 밝혀져있다[8].

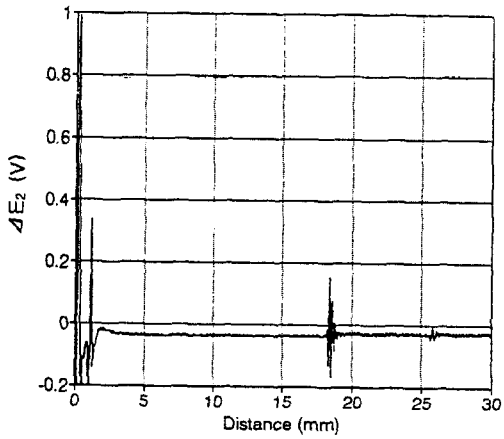

Fig. 3 Echo from an angle beam probe which was placed on the end of the compact specimen

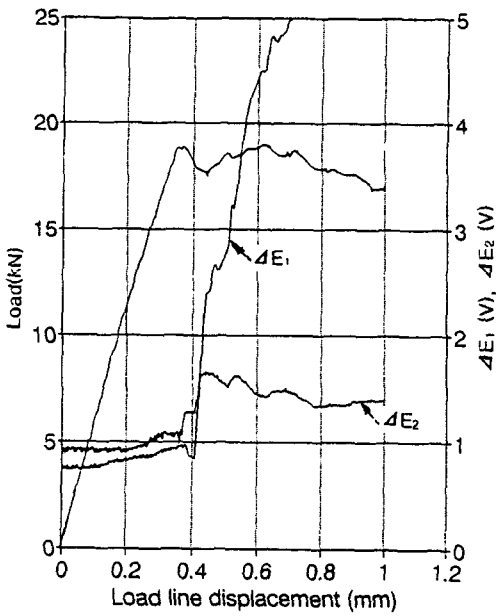

Fig. 4 Estimation of J_{IC} by ultrasonic method (W=50mm, B=25mm, S.G.=0%)

Fig. 4에는 대표적으로 폭이 50mm이며 두께 25mm인 시험편에 대한 실험 결과를 하중-하중선변위선도와 상단면 및 배단면의 에코출력전압변화(ΔE_1, $\Delta E_2 - V_L$) 관계로 나타내었다. 이 그림에서 보면 상단면에 에코출력전압변화(ΔE_1)가 급증하는 점 또는 버단면의 에코출력전압변화(ΔE_2)가 최초로 극대치로 나타나는 점에서 안정파괴 개시하중 P_{in}이 검출된다. 초음파법에 의한 J_{IC} 시험결과를 제하컴플라이언스법과 비교하였는데 이 방법에 의한 시험결과 역시 대표적으로 폭이 100mm이며 두께 25mm인 시험편에 대하여 Fig. 5에 나타 내었다.

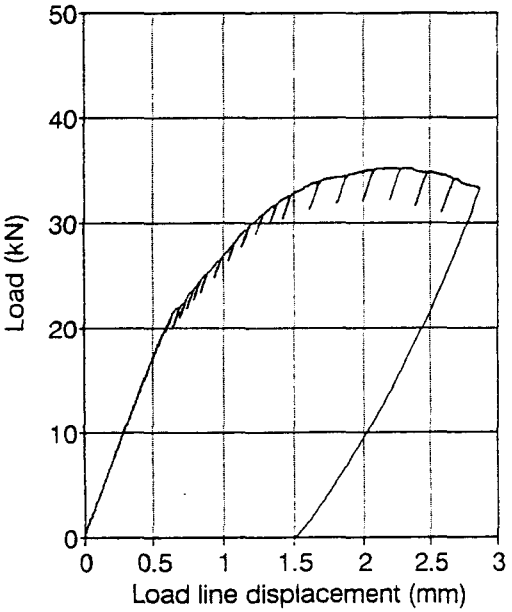

Fig. 5 Estimation of JIC by unloading compliance method (W=100mm, B=25mm, S.G.=0%)

시편 폭이 50mm이며 두께가 20mm 및 25mm인 시험편에 대한 J 적분과 Δa_{max}의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 Δa_{max}는 배단면의 초음파 법에 의한 비파괴적으로 연속측정된 균열진전량이며 이 그림에는 각 시험편에 대해 사이드그루브를 낸 것과 내지 않은 것에 대한 결과를 함께 나타내었다. Fig. 6의 J-Δa_{max}에서 보면 사이드그루브의 영향을 받지는 않음을 알 수 있는데 이는 앞에서 언급된 J 적분식이 시험편 두께 중앙에서 구한 균열 최대길이와 잘 일치 하는 것과 유관하다고 사료된다[9]. Table 3에는 초음파 법의 안정파괴 개시점에 의한 J_{IC} 값을 나타내었는데 두께와 사이드그루브의 유무에 관계없이 유사한 값을 보인다.

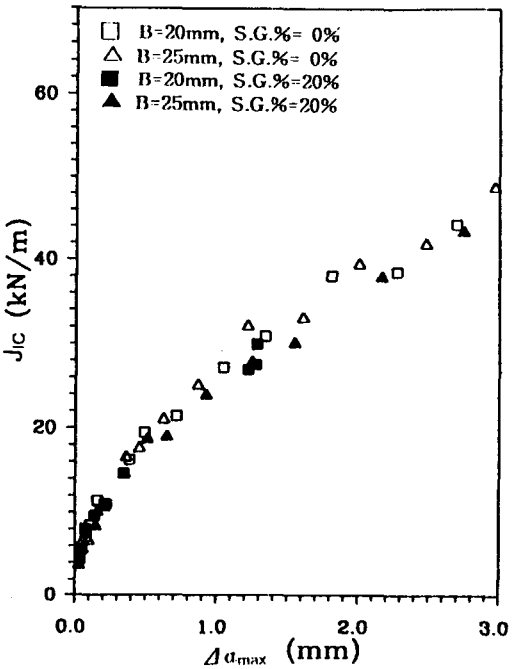

Fig. 6 J versus Δa_{max} curves by ultrasonic method (W=50mm)

Table 3 Comparision between J_{IC} (ultrasonic) and J_{IC} (unloading compliance, R)

W (mm)	B (mm)	S.G %	J_{IC} (ultra.) kN/m	J_{IC} (R) kN/m
50	20	0	10.6	12.3
		20	11.2	11.9
	25	0	10.8	12.1
		20	10.2	11.6
100	20	0	8.8	10.5
		20	7.5	9.2
	25	0	8.2	9.2
		20	7.0	8.2

Fig. 7에는 시편폭이 100mm이며 두께가 20mm 및 25mm인 시험편에 대하여 J 적분과 Δa_{max}의

관계를 나타내었다. Fig.6의 시편 폭이 50mm 경우의 J 값과 비교하여 보면 값이 낮게 나타나며, 사이드그루브를 낸 것이 내지 않은 것에 비하여 약간 낮게 나타남을 보이나 그 값은 10% 이내로 나타났다. 이 시험편에 대한 J_{IC} 값을 Table 3에 함께 나타내었는데 시편폭이 50 mm의 J_{IC} 값들보다 약 20%정도 낮은 값들을 보인다.

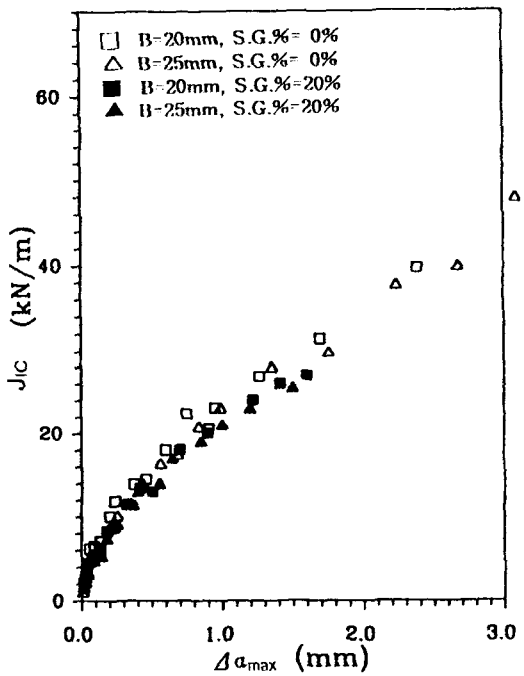

Fig. 7 J versus Δa_{max} curves by ultrasonic method (W=100mm)

이상 초음파법에 의하여 구한 J_{IC} 값들을 제하컴플라이언스법에 의한 결과와 비교하여 고찰하면 다음과 같다.

Fig. 8에는 시편 폭이 50mm이며 두께가 20mm 및 25mm인 시험편에 대한 J 적분과 Δa의 관계를 나타내었다. 이 그림을 보면 사이드그루브를 낸 시험편이 내지않은 시험편의 J 값보다 약간 저하하나 그 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. Table 3에는 제하컴플라이언스법에 의해 구한 J_{IC} 값을 나타내었다.

시편폭이 100mm이며 두께가 20mm 및 25mm

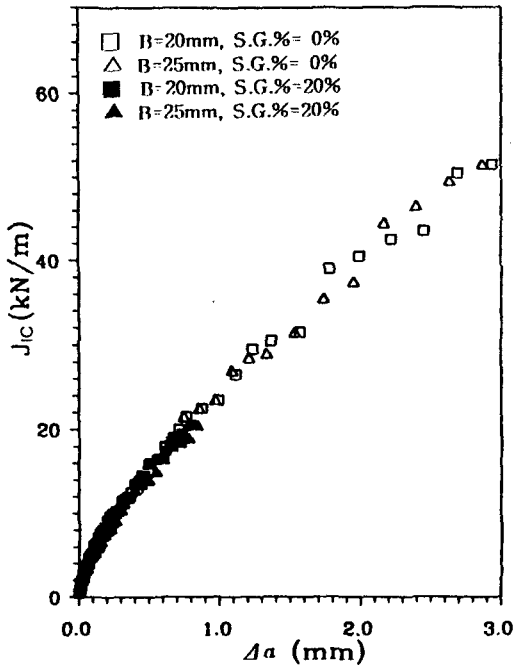

Fig. 8 J versus Δa curves by unloading compliance method (W=50mm)

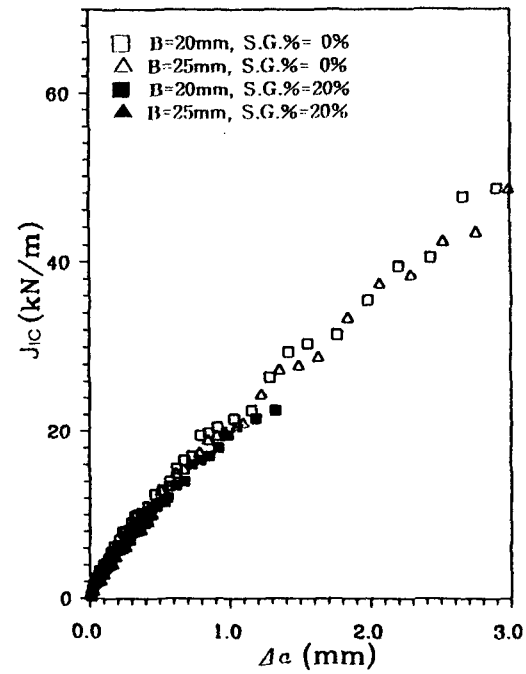

Fig. 9 J versus Δa curves by unloading compliance method (W=100mm)

인 시험편에 대하여 J 적분과 Δa의 관계로 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8의 시편 폭이 50mm 경우의 J 값과 비교하여 보면 J 적분값이 낮게 나타나며, 사이드그루브를 낸 것이 내지 않은 것에 비하여 낮게 나타남을 보인다. 이 경우에 대한 J_{IC} 값을 Table 3에 함께 나타내었는데 시편폭이 50mm의 J_{IC} 값들 보다 약 20%정도 낮은 값들을 보인다. 제하컴플라이언스 법에 의한 적분값은 균열진전범위가 $\Delta a \leq 0.06(W-a)$의 조건을 만족해야 하며 최대하중(P_{max})을 넘어도 인정되지 않으므로 J 적분해석에 있어서 애로점이 많다[10].

4. 결 론

본 연구에서는 시험편 두께와 폭을 다르게 가공한 알미늄 6061-T6재에 대하여 초음파법에 의한 탄소성파괴인성치(J_{IC}) 결정시험을 행하였고, 이 시험결과를 제하컴플라이언스시험에 의한 J_{IC}와 비교 검토하였는데 그 결과는 다음과 같다.

1) 초음파법에 의해 구한 J_{IC} 값은 제하컴플라이언스법에 의해 구한 J_{IC} 값보다 작으며, 시험편 폭이 100mm에 대한 J_{IC} 값은 50mm시편의 J_{IC} 값보다 약 20% 낮게 평가된다.
2) CT 시험편의 배단면의 탐촉자는 경사탐촉자를 이용하는 것이 균열탐지에 효과적이며, 연속측정된 균열진전량(Δa_{max})에 의한 J_{IC} 평가는 두께 및 사이드그루브의 유무에 관계없이 잘 일치한다.
3) 단일시험편을 이용한 J_{IC} 평가에 있어서 초음파법의 간편성, 범용성 및 측정정도에 따른 유효성을 확인하였다.

본 연구는 유한 대학 산업과학기술연구소의 학술연구 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) G.A. Clarke, W.R. Andrews, P.C. Paris, "Single Specimen Tests for J_{IC} Determination", ASTM STP 590, pp. 27~42, 1976.
2) D.M. Kang, Y.S. Kim and K.H. Sin, "An Experiment Study on the Fracture Behavior for Flash Butt Welding Zone", KIIS, Vol. 7, No. 1, pp. 65~72, 1992.
3) J.D. Landers and D.E. McCabe, "Load History Effects on the JR-Curve", ASTM STP 803 II, pp. 723~738, 1983.
4) K. Hirano, R. Kuboto, H. Kobayashi and H. Nakazawa, Transactions of JSME, Vol. 49, No. 448, pp. 1556~1564, 1983.
5) J.H. Underwood, D.C. Winters and D.P. Kendall, "The Detection and Measurements of cracks", The Welding Institute, pp. 31~38, 1976.
6) J.G. Merkle and H.T. Corten, "A J-integral Analysis for the Compact Specimen, Considering Axial Forces as well as Bending Effects", J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 96, pp. 286~293, 1974.
7) K. Hirano, H. Kobayashi and H. Nakazawa, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 13, No. 5, pp. 356~362, 1985.
8) C.F. Shih, H.G. deLorenzi and W.R. Anderew, "Elastic Plastic Fracture", ASTM STP 668, pp. 5~36, 1979.
9) K. Hirano, R. Kuboto, H. Kobayashi and H. Nakazawa, "A Single Specimen Determination of Elastic-Plastic Fracture Resistance by Ultrasonic Method", ASTM STP 905, pp. 415~434, 1986.
10) "Standard Test Method for J_{IC}, A Measure of Fracture Toughness", ASTM E 813-89, pp. 628~642, 1995.