

〈논 문〉

CT 시편을 이용한 박판재료의 파괴인성 특성

이억섭* · 이윤표** · 강인모** · 김선용*** · 김승권**

(1997년 3월 25일 접수)

Fracture Toughnesses of Thin Sheet Materials by Using CT Specimens

O. S. Lee, Y. P. Lee, I. M. Kang, S. Y. Kim and S. G. Kim

Key Words : Crack Opening Displacement(균열개구변위), Thin Sheet Materials(박판재료), Stable Crack Growth(안정균열성장), Plane Stress Fracture Toughness(평면응력 파괴인성), Compact Tension Specimen(CT 시험편), R-Curve(R-곡선)

Abstract

The plane stress fracture toughness for thin aluminum alloy (2024-T3 and 7075-T6) specimens are characterized by using compact-tension(CT) specimens. Anti-buckling plates were fabricated on both sides of the thin CT specimens to prevent the buckling phenomena which caused by the 45° plastic yielding at the crack tip under the plane stress condition. The plane stress fracture toughnesses determined by three different procedures are compared with each others. The plane stress fracture toughnesses are also compared with a few published values which were determined by using center-cracked panel specimens.

1. 서 론

평면응력 파괴인성치는 박판재료를 사용하는 항공기 구조물의 안전설계 및 손상누적설계에 필요한 중요한 재료의 기계적인 특성중의 하나이다. Fedderson,⁽¹⁾ Anderson⁽²⁾ 및 Broek⁽³⁾ 등 많은 연구자들이 평면응력 파괴인성치를 결정하는데 미치는 안정균열성장과 버클링 등의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 균열이 안정성장을 하는 동안 재료의 균열성장에 대한 저항은 R-곡선으로 특징 지을 수 있으며, 평면응력 파괴인성치 K_{IC} 는 미국재료시험학회(ASTM E561-86)⁽⁴⁾에서 정한 R-곡선방법을 이용하여 구할 수 있다.

날카로운 균열선단으로부터 탄소성 균열이 성장

할 때, 소성영역이 성장하기 때문에 나타나는 현상인 R-곡선을 이용하면 불안정 파괴가 일어나는 임계하중을 결정할 수 있고, 이 값을 균열성장 저항 값을 결정하는 공식에 대입하여 탄소성 균열의 불안정파괴저항값 K_{IC} 를 결정할 수 있다.

이 K_{IC} 를 재료의 설계특성값인 평면응력 파괴인성치로 채택할 수 있으나 실제적으로는 불안정파괴를 일으키는 하중값을 정확하게 결정하기가 상당히 힘들기 때문에 본 연구에서는 3가지 다른 방법으로 임계하중을 결정하여 탄소성 파괴에 대한 저항값 K_{IC} 값을 산정하는 방안을 제시하였다.

기존의 평면응력 파괴인성치는 주로 중앙크랙 인장시험편을 이용하여 결정된 것이다.

본 연구에서는 두께 1.02 mm인 2가지의 알루미늄 박판재료를 Compact Tension(CT) 시험편으로 가공하여 평면응력 파괴인성실험을 수행하였다. 박판재료의 평면응력 파괴인성치 K_{IC} 를 결정하기 위하여 CT 시험편을 이용할 경우 균열선단에서 발생

*회원, 인하대학교 기계공학과

**인하대학교 대학원 기계공학과

***유한전문대학

Table 1 Chemical composition of specimens (Weight percent)⁽⁶⁾

Material C.C.	Al 2024-T3	Al 7075-T6
	Mg	1.44
Fe	0.23	0.22
Ti	0.02	0.055
Zn	0.03	5.50
Cu	4.46	1.60
Si	0.11	0.16
Mn	0.58	0.10
Cr	0.02	0.21
Be	N ^a	0.002
Ni	N ^a	N ^a

C.C. : Chemical Composition

N^a : Negligible**Table 2** Mechanical properties(M.P.) of specimens⁽⁶⁾

Material	M.P.	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
	Al 2024-T3		442.	324.
Al 7075-T6		468.	424.	13.3

하는 소성역 때문에 일어나는 버클링을 방지하기 위하여 버클링방지판을 시험편의 양쪽에 부착시키야만 한다.⁽⁵⁾

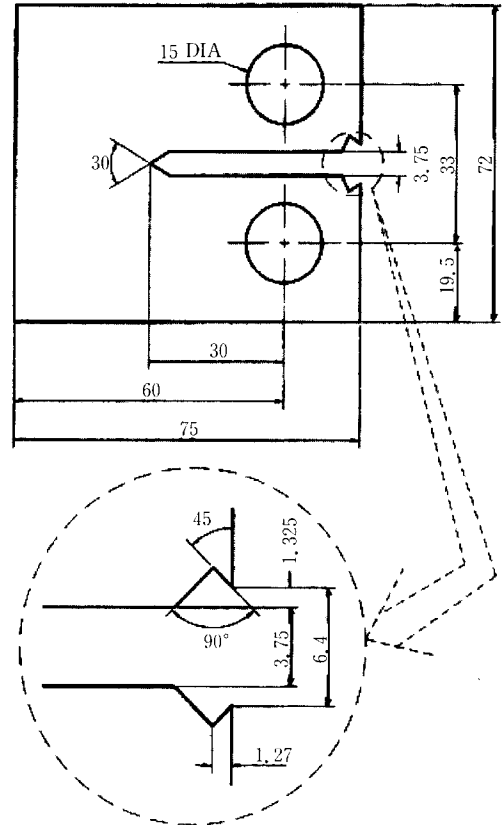
본 연구는 버클링방지판을 장착한 CT 시험편으로 결정한 평면응력 파괴인성치의 신뢰도를 검증하기 위한 것이며, 본 연구에서 얻어진 결과를 중앙 크랙 인장시험편에서 얻어진 결과와 비교하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에서 사용한 시험편 재료는 Al 2024-T3, Al 7075-T6 합금이며, 화학적 조성을 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 각각 나타내었다.

시험편의 기하학적 형상은 CT(compact-tension) 형으로 미국재료시험학회에서 정한 시험법(ASM

**Fig. 1** Geometry of specimen (unit : mm)

E561-86)⁽⁴⁾에 따라 제작하였다.

알루미늄 박판을 일정크기(80 mm×75 mm)로 절단기를 이용하여 자른 후 Fig.1과 같은 시험편의 크기(75 mm×72 mm)로 만들기 위하여 단면을 밀링연마하였으며, EDM(Electric Discharge Machine)을 이용하여 시험편에 노치를 가공하고 잔류응력부분은 수작업으로 제거하였다. 평면응력 파괴인성치를 결정하는 경우에는 균열선단에서 무덤(blunting) 현상이 발생하기 때문에 균열선단의 노치형상이 K_c 결정에 미치는 영향을 무시할 수 있으므로 초기피로균열성장을 시키지 않았다. 시험편의 형상과 균열선단의 모양을 Fig.1에 자세히 나타내었다.

2.2 실험방법

실험방법의 개략도를 Fig.2에 도식화하여 나타내었다. 시험편의 두께가 얇기 때문에(두께 1.02 mm) CT 시험편을 사용할 경우 발생하는 버클링현상을 방지하기 위하여 Fig.2에 나타난 바와 같이 버클링방지판을 시험편의 양쪽에 장착하였다. 본 연구

에서는 균열성장과정을 직접 모니터링할 수 있게 하기 위하여 두께가 10 mm인 투명한 아크릴판을 버클링방지판으로 사용하였다. 배근하게 표면가공한 시험편과 버클링방지판 사이에 발생하는 마찰의 영향을 최소화하기 위하여 액체상의 윤활유를 얇게 도포하였으며 시험편과 버클링방지판은 볼트로 밀착력을 무시할 수 있도록 느슨하게 체결하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 각각 시험편 장착상태와 실제의 실험장치를 나타내었다.

시험편에 작용하는 하중의 방향은 시험편의 압연방향과 일치하며, 하중속도는 2 mm/min이었다. 위와 같은 조건으로 2가지 알루미늄재료에 대하여 각각 3번씩 동일한 실험을 수행하여 매우 유사한 실험결과를 얻었다.

3. 실험결과 및 검토

오실로스코프에서 얻은 균열개구변위(Crack Opening Displacement, COD) 값을 실제 변위의 COD값으로 환산하기 위하여 COD 보정시험을 수행하였다. 보정결과는 Fig. 4에 나타내었으며, Al 2024 T3

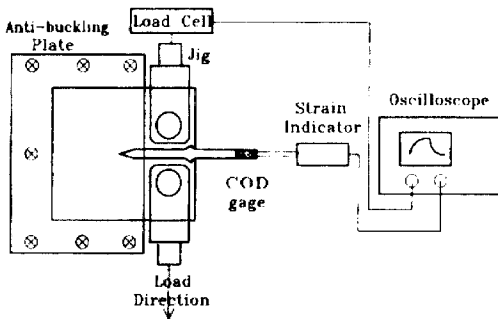


Fig. 2 Schematics of experimental setup

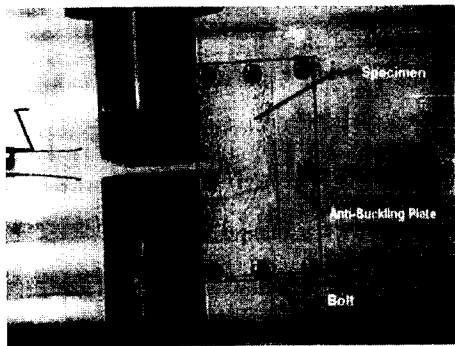


Fig. 3(a) Photograph of setting of the specimen and anti-buckling plates

와 Al 7075-T6에 대한 하중-COD 선도를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

위의 하중-COD 결과들을 이용하여 평면응력 파괴인성치를 결정하기 위하여 다음과 같은 3가지 방법을 사용하였다.

3.1 최대하중 (P_{max})과 초기균열길이 (a_0)에 의한 평면응력 파괴인성치 (K_{app}) 결정법

초기조건 : $a_0=30$ (mm)

$W=60$ (mm)

$B=1.02$ (mm)

여기서, a_0 는 초기균열길이, W 는 시험편의 폭, B 는 시험편의 두께이다.

K_{app} 를 구하기 위하여 사용한 식은 다음과 같다.

$$K_{app} = \frac{P_{max}}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a_0}{W}\right) \quad (1)$$

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^3 \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a_0}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a_0}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a_0}{W}\right)^3 - 5.60\left(\frac{a_0}{W}\right)^4 \right] \quad (2)$$

여기서, $f\left(\frac{a_0}{W}\right)$ 는 시험편의 형상계수이다. 위의 식에 a_0 와 W 를 대입하여 구한 형상계수는 $f\left(\frac{a_0}{W}\right) = 9.659$ 이다. K_{app} 를 구하기 위하여 하중은 최대하중값을 사용하였고 균열길이와 시험편의 폭과 두께는 초기조건 값의 값을 사용하였다.

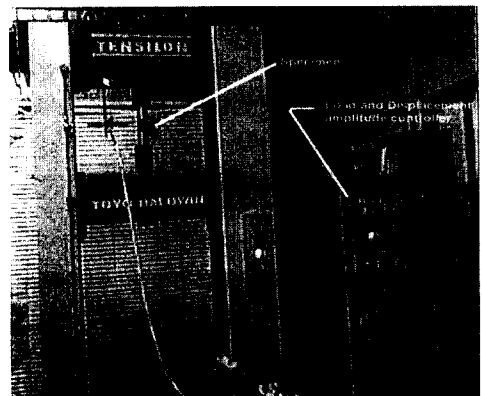


Fig. 3(b) Photograph of experiment apparatus

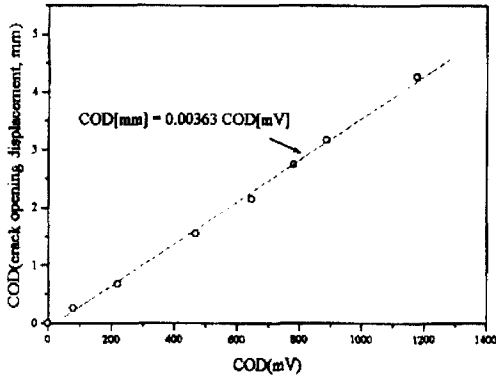


Fig. 4 crack opening displacement calibration

3.2 최대하중 (P_{max}) 과 유효균열길이 (a_{eff}) 에 의한 평면응력 파괴인성치 (K_R) 결정법 초기조건은 3.1에서의 값과 동일하다.

유효균열길이는 소성영역을 고려하여 수정한 다음의 식을 이용하여 산정하였다.

$$a_{eff} = a_0 + \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3)$$

여기서, σ_{ys} 는 재료의 항복강도이며, K 값은 초기균열길이와 최대하중값을 식 (1)에 대입하여 구한 값을 사용하였다. K_R 을 산정하기 위해서는 식 (3)에서 구한 유효균열길이 (a_{eff})를 식 (1)의 a_0 에 대신 대입한 다음의 식을 이용하였다.

$$K_R = \frac{P_{max}}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a_{eff}}{W}\right) \quad (4)$$

$$f\left(\frac{a_{eff}}{W}\right) = \frac{2 + \frac{a_{eff}}{W}}{\left(1 - \frac{a_{eff}}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a_{eff}}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a_{eff}}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a_{eff}}{W}\right)^3 - 5.60\left(\frac{a_{eff}}{W}\right)^4 \right] \quad (5)$$

식 (5)에 나타난 것과 같이 형상계수에도 a_0 대신 a_{eff} 를 대입한 식을 사용하였다. 시편의 폭과 두께는 초기조건의 값을 사용하였다.

3.3 5% 오프셋 라인을 이용하여 결정한 하중 (P_{secant})과 유효균열길이에 의한 평면응력 파괴인성치 (K_{secant}) 결정법

$$a_{eff} = a_0 + \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (6)$$

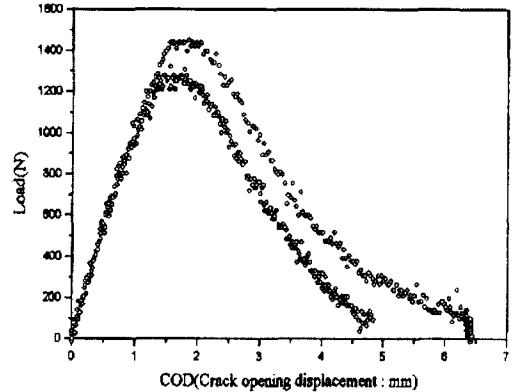


Fig. 5 Load vs. COD curves for Al 2024-T3 CT specimens (load speed : 2 mm/min)

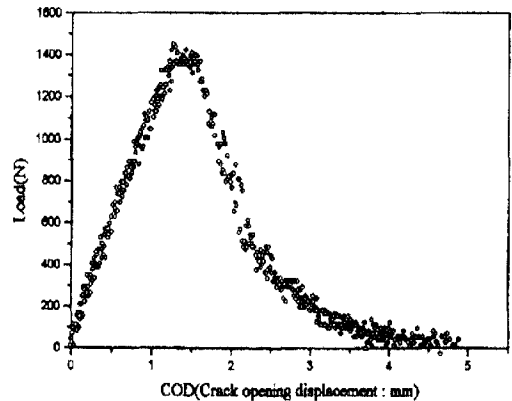


Fig. 6 Load vs. COD curve for Al 7075-T6 specimens (load speed : 2 mm/min)

$$K_{secant} = \frac{P_{secant}}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a_{eff}}{W}\right) \quad (7)$$

$$f\left(\frac{a_{eff}}{W}\right) = \frac{2 + \frac{a_{eff}}{W}}{\left(1 - \frac{a_{eff}}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a_{eff}}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a_{eff}}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a_{eff}}{W}\right)^3 - 5.60\left(\frac{a_{eff}}{W}\right)^4 \right] \quad (8)$$

식 (6)에서의 K 의 값은 a_{eff} 가 K 의 함수이고, K 는 K_{secant} 의 함수이므로 반복법으로 결정해야 하지만 초기균열길이와 5% 오프셋할 선(offset secant line)으로 결정한 하중값 (P_{secant})과 초기조건에 해당되는 값들을 대입하여 구한 값과는 차이를 보이지 않아서 실용적으로 간단한 후자를 사용하였다.

K_{secant} 를 산정하기 위하여 사용한 하중은 5% 오프셋 라인을 이용하여 구한 하중이다. 균열길이는 식 (6)을 이용하여 산정한 유효균열길이를 이용하였고 시편의 폭과 두께는 초기조건 값 사용하였다. 5% 오프셋 라인을 그릴 것을 AI 2024 T3를 예로 들면 Fig. 7과 같다.

Fig. 7을 보면 처음 시작부분의 선형성을 이루는 부분을 기준으로 하여 5% 기울기가 작은 선을 그리고 그 선이 실험결과와 만나는 점을 P_{secant} 값으로 취하여 식 (7)의 P_{secant} 대신 대입하여 K_{secant} 값을 산정하였다.

위와 같은 방법으로 각각의 실험결과에 적용하여 산정한 평면응력 파괴인성치에 대한 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3에는 중앙 균열인장실험으로 산정한 파괴인성치도 첨부하여 본 연구의 결과와 비교하였다.

AI 2024-T3에 대한 결과를 DTDH와 비교하여 보면, K_{app} 는 34.22%, K_R 는 15.37% 그리고 K_{secant} 는 24.43%의 차이를 나타내고 있다. AI 7075-T6시편의 경우에는 DT DH와 비교하였을 때

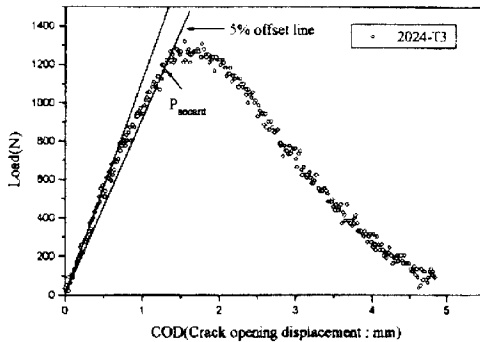


Fig. 7 5% offset line of load vs. COD curve for AI 2024-T3

K_{app} 는 4.92%, K_R 는 10.36% 그리고 K_{secant} 는 5.26%의 차이가 있음을 알 수 있다.

본 연구에서의 3가지 방법에 의한 결과들을 DT-DH의 결과들과 비교하여 보면 K_R 이 모두 10~15% 내외의 차이를 보이므로, 알루미늄 박판의 CT 시험편을 이용하여 평면응력 파괴인성치를 결정할 경우, K_R 을 적용하여 산정하는 것이 가장 바람직하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

박판 알루미늄 합금(AI 2024-T3와 AI 7075-T6)의 평면응력 파괴인성치를 버클링방지판을 취부한 CT 시험편을 사용하여 측정하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) CT 시험편을 이용하여 박판의 평면응력 파괴인성치를 구할 때, 균열선단에서 발생하는 버클링을 방지하면 중앙균열 인장시험편을 이용하여 결정된 파괴인성치의 값과 유사한 값을 결정할 수 있다.

(2) 본 연구에서 세 가지 방법에 의한 결과를 보면 알 수 있듯이, AI 2024-T3와 AI 7075-T6의 박판 CT 시험편을 이용하여 평면응력 파괴인성치를 산정할 경우, AI 2024-T3에서는 최대하중과 유효균열길이에 의한 파괴인성치 결정법(K_R 방법)이 15% 내외의 차이를 보였고, AI 7075-T6에서는 세 가지 방법 모두(K_{app} , K_R , K_{secant} 방법)에서 10% 내외의 차이를 나타내었다. 따라서 K_R 방법이 각 재료에 대해서 가장 바람직한 방법으로 생각된다.

후 기

본 연구의 일부는 KOSEF 지정 인하대 RRC

Table 3 Comparison between DTDH and the results of present study for the plane stress fracture toughness

Specimen	2024 T3			7075-T6		
	Present (Average)	Diff. (%)	DTDH	Present (Average)	Diff. (%)	DTDH
K_{app}	54.5	34.22	82.7	56.	4.92	58.9
K_R	70.	15.37		65.	10.36	
K_{secant}	62.5	24.43		62.	5.26	

※ DTDH : Damage Tolerant Design Handbook (WL-TR-94-4052 Vol. 1), Diff. : Difference.

(황해권 수송시스템 연구센터)와 대한항공(주) 항공기술연구원의 후원을 받아 이루어진 것이며, 관계제위에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Feddersen, C. E. et al., 1970 *An Experiment and Theoretical of Plane Stress Fracture of 2024-T351 Al-alloy*, Battelle Columbus Rept.
- (2) Anderson, T. L., 1995, *Fracture Mechanics*, CRC Press Inc., pp. 365~385.
- (3) Broek, D. and Vlieger, H., 1974, *The Thickness Effect in Plane Stress Fracture toughness*, Nat. Aerospace Lab. TR 74032.
- (4) E561-86, 1989, "Standard Practice for R-Curve Determination," *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.
- (5) 이억섭, 1996, "CT 시편을 이용한 박판재료의 파괴인성 특성," 재료 및 파괴부문 학술대회논문집, 대한기계학회, pp. 85~89.
- (6) Irwin, G. R., 1948, "Fracture Dynamics" *Fracturing of Metals*, American Society for Metals, Cleveland, pp. 144~166.