

# 박판시험편의 균열성장 시뮬레이션에 미치는 파괴기준 평가

권오현

부경대학교 안전공학과

(2000. 7. 24. 접수 / 2000. 10. 23. 채택)

## The Evaluation of the Fracture Criterion having an Effect on Crack Extension Simulation for a Thin Sheet

Oh-Heon Kwon

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received July 24, 2000 / Accepted October 23, 2000)

**Abstract** : The exact estimation of the ductile crack growth in a thin sheet would be needed in part of the commercial transport aircraft industry fields. A 2-dimensional elastic plastic finite element analysis was carried out to simulate a stable crack extension in a thin sheet 2024 aluminium alloy. Two kinds of crack modeling were used to evaluate curves of the stable crack extension. And then CTOA(crack tip opening angle) and CTED(crack tip energy density) were calculated in order to determine whether they can be used as useful crack extension criterions in a thin sheet. Results indicate that stable crack extension behaviors were simulated well and CTED is more admirable even though CTOA also is reasonable as a criterion for a stable crack extension in a thin 2024 aluminium alloy sheet.

**Key Words** : ductile crack extension, thin sheet, crack opening angle, crack tip energy density, fracture criterion, discontinuous plane model, node force releasing method

### 1. 서론

박판에서의 연성균열성장예에 대한 정확한 예측은 항공구조부의 파손해석에 있어서 대단히 중요한 역할을 하게 된다<sup>1)</sup>. 항공구조물의 외장은 수mm 두께의 박판을 주로 사용하여 구성되며, 운행중에 공압 및 기압변동에 의한 하중을 받게 됨에 따라, 리벳구멍이나 연결부위에서 균열이 발생 성장하여 항공기의 안전성에 중대한 영향을 미치게 된다. 이러한 항공기 등의 구조물의 안전성평가를 위하여 박판에서의 균열이 어떻게 성장거동하는지 파악해 두는 것이 필요할 뿐만 아니라 그 성장거동을 정확히 지배하는 파괴기준을 정립하는 것이 매우 중요하다. 지금까지 균열성장거동을 파악하기 위한 파라미터로서 여러 가지 파괴기준이 제시되어

연구되어 왔다. 균열의 개시조건으로서의 J적분 및 균열이 성장함에 따른  $dJ/da$ 의 평가법과 균열단개구각 CTOA(crack tip opening angle) 등을 사용하는 해석법 등이 주로 연구되어져 왔다<sup>2)</sup>. CTOA는 균열이 성장함에 따라 비교적 일정한 값을 유지하며 CTOA가 특정 일정한 값에 도달하면 균열이 진전하는 것으로 간주된다. 이러한 CTOA는 대부분 평면변형률상태에서 해석되어져 왔으며, Newman 등<sup>3)</sup>이 박판에서의 평면응력상태에서 3축 응력특성을 고려하여 CTOA를 사용하였다.

본 연구에서는 여러 관점에서 그 적절성이 확인되고 있는 균열에너지밀도(crack energy density; CED)개념을 이용하여 균열단에서의 에너지밀도인 CTED(crack tip energy density)를 균열진전 기준으로 사용하였다. 균열성장기법으로서의 비연속모델을 이용하여 시뮬레이션수법의 타당성과 박판에서의 균열에너지밀도 기준의 유효성을 제시하고, CTOA를 이용한 결과와 비교하여 성장시뮬

레이션에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 균열진전에 대한 모델링

### 2.1. CTOA모델

Fig. 1은 임계CTOA기준을 가진 균열성장모델을 나타낸다. 균열면은 대칭면과 일치하는 것으로 한다. 이 면에 제약된 절점면이 비균열부이고 절점이 고정되지 않는 부분은 균열면으로 간주하였다. 현재의 균열단 절점은 두 단면 사이의 첫 고정절점이며 다음 인접 자유절점에 의해서 Fig. 1에 나타내는 것과 같이 구성되는 CTOA의 정점으로 작용한다. 균열진전수법은 절점력 해방법을 이용하여 균열단 절점력을 해방시켜 CTOA가 일정한 값이 되면 분할요소의 하나만큼의 거리를 진전하는 것으로 하였다.

### 2.2. 비연속모델

비연속모델은 현실의 균열단 근방에서는 균열의 형태가 비연속성을 가지는 것으로 간주한 것으로서 변형할 때 물체의 내부에 변위의 비연속성이 고려하는 면이 존재하는 것으로 한 균열모델<sup>4)</sup>이다. 균열진전은 Fig. 2에 나타내는 것처럼 비연속면상의 절점력을 해방시키는 수법을 역시 이용하였다. 변형전 초기상태에서는 완전한 면이 부하를 받

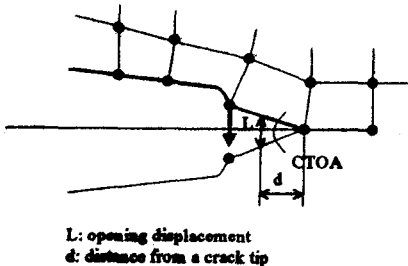


Fig. 1. Crack advance model with CTOA criterion

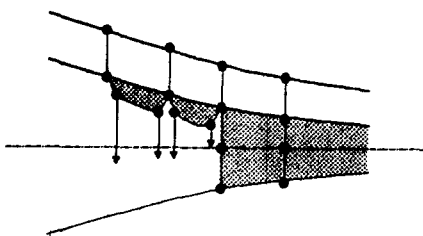


Fig. 2. Discontinuous crack extensive model

음으로써 잡아당기어질 때 그 중앙부 면을 절개하여 신생면을 생성시킨다. 이 때 지정된 균열진전기준이 일정치에 도달하면 생성된 신생면에서의 절점력을 해방시켜 한 요소거리만큼 균열이 진전하는 것으로 간주하였다.

## 3. 균열진전기준 평가법

### 3.1. CTOA기준

균열단개구각 CTOA는 파괴과정을 특징지을 수 있는 파라미터로서 널리 사용되어져 왔는데 여러 가지 정의가 있다. 여기서는 Kanninen<sup>5)</sup>에 의한 정의를 사용하였다. Fig. 1에 나타내는 것과 같이 CTOA는 균열단 뒤 임의의 거리(d)에서 측정된 균열단 개구변위(L)의 비로 식 (1)과 같이 주어지는 각이며 이 값의 일정치를 균열진전 기준으로 간주한다.

$$CTOA = 2 \tan^{-1} \left( \frac{L}{2d} \right) \quad (1)$$

### 3.2. CTED평가법

CTED(crack tip energy density)는 균열단에너지 밀도의 의미로서 정의된다. 균열진전을 포함하는 면내의 각 위치가 초기상태에서 현재까지 받아들인 에너지를 해석대상의 면내의 단위면적당으로 표시되는 에너지량으로 다음 식 (2)로 표현된다.

$$\epsilon(t, X_1) = \int_0^t [\sigma_n] \delta_n d\tau(t, X_1) \quad (2)$$

여기서  $\delta_n$ 는  $\frac{\partial \delta_n}{\partial \tau}$ 이며 비연속면에 있어서의 면외상대변위의 시간변화율을 의미한다.  $[\sigma_n]$ 은  $[\sigma_n] = [\sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{12}]$ 이며 응력에 대응되는 변형률상당량은 면외상대변위를 임의의 길이량  $h_n$ 으로 나눈 값인  $[\epsilon_n] = [\delta_n/h_n]$ 에 의해 구성된다. 이러한 정의에 기초하여 실제적으로 CTED를 구체적으로 평가하기 위하여 유한요소법에서 사용되는 다음의 적분식 (3)을 적용하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon = & \int_{\Gamma^+ + \Gamma^-} (W + T)n_1 - T_i u_{i,1} d\Gamma - \int_{\Gamma_n + \Gamma_s} d\Gamma \\ & - \int_{A_1 + A_2} \int_0^t (\sigma_{ij,1} d\epsilon_{ij,1}) dA + W_{plane}(X_\Gamma) \quad (3) \\ & - \int_{\Gamma^+} \int_0^t ([\sigma_n]_1 \{d\delta_n\} - [d\sigma_n] \{ \delta_n \}_1) d\Gamma \end{aligned}$$

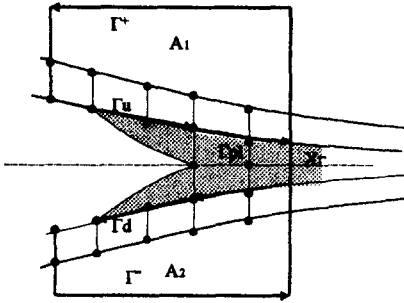


Fig. 3 CTED evaluation method by a domain integration

여기서 각 기호는 Fig. 3에 주어지며,  $T_i$ ,  $u_i$ ,  $n$ 은 각각의 적분경로상에서의 표면력, 변위 및 단위법선벡터를 의미하며 변형률에너지밀도  $W$ 는 식 (4)와 같다.

$$W = \int_0^t \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dt \quad (4)$$

또한  $\Gamma_u$ ,  $\Gamma_d$ ,  $\Gamma^+$ ,  $\Gamma^-$ ,  $\Gamma_{pl}$  등은 각 위치에서의 적분경로를 나타내며,  $A_1$ ,  $A_2$ 는 각각 비연속면 바깥 영역의 상하부분 면적을 표시한다.  $x_r$ 는 적분경로상의 비연속면에 존재하는 임의점의  $x$ 위치를 나타낸다.

#### 4. 수치해석

##### 4.1. 해석모델

해석에 사용된 시험편의 모델은 AL 2024-T3 재료의 두께 2mm의 박판시험편으로 균열의 형태는 Fig. 4와 같이 중앙균열시험편의 경우를 상정하여 1/4 부분에 대하여서만 해석하였다. Table 1에는 그 기계적 성질을 나타내었다.

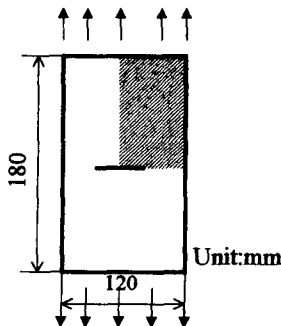


Fig. 4. The schematic of the analyzed specimen

Table 1. Mechanical properties

Tensile Strength	Yield Strength	Young's Modulus	Elongation
470Mpa	345Mpa	71.3Gpa	22%

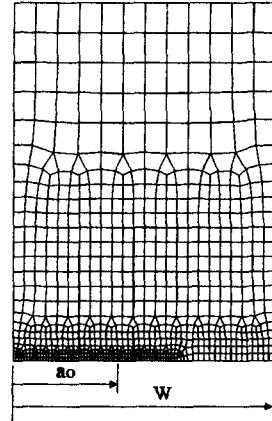


Fig. 5. An example of finite element mesh for an analysis

유한요소해석에 사용된 프로그램은 ANSYS5.4 코드를 이용하였으며 요소분할의 예를 Fig. 5에 나타내었다. 사용된 요소는 4절점 아이소메트릭 요소와 비연속면 요소로써 총요소수는 766이며 절점수는 836이다.

해석에 사용된 가공경화법칙은 Ramberg-Osgood 관계를 이용하여 식 (5)에서 재료상수  $\alpha=1.25$ , 가공경화지수  $m=5.2$ 을 사용하였다.  $\sigma_0$ ,  $\epsilon_0$ 는 각각 기준 응력과 변형률을 나타낸다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \epsilon_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \quad (5)$$

##### 4.2. 해석결과및고찰

균열성장은 균열성장기준이 임계치에 도달하였을 때 한 요소(0.6-0.7mm)만큼 이동하는 것으로 하여 해석하였다. Fig. 6은 균열진전해석에 필요한 하중과 균열성장길이와의 관계인 실험에 의한 결과 (6)를 나타내고 있다. 주어진 거시적 자료는 초기균열개시 이후의 해석조건으로 입력된다.

Fig. 7은 균열진전에 따른 CTED 기준의 변화를 나타내고 있다.

CTED의 해석결과에는 균열이 진전함에 따라 급격히 증가하다가 균열성장길이가 1mm( $<t/2$ , t: 시험편 두께) 정도 되었을 때 일정치(약 0.0081kN/

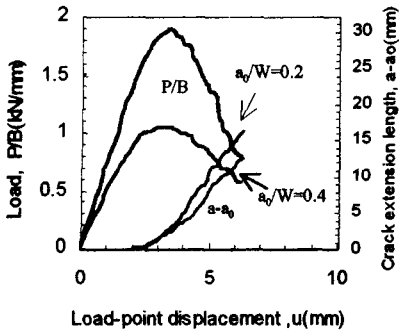


Fig. 6. The results from experiments<sup>6)</sup>

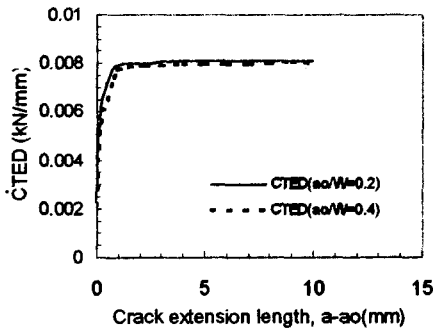


Fig. 7. CTED criterion variation for crack extension length

mm)에 도달하여 이후 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 초기균열성장개시시의 CTED의 값은 초기균열길이  $a_0$ 에는 무관함을 나타낸다. 균열진전 길이가 1mm정도 이후부터 CTED가 일정치를 유지하는 것은 초기에 시편두께의 약 1/2정도까지 전단이 발생한 후 이후 평탄한 파면을 유지하는 파괴를 하는 것에 기인한다고 여겨진다.

Fig. 8은 균열진전에 따른 CTOA의 변화를 나타내고 있다. CTOA의 변화는 균열진전개시부터 균열성장길이가 약 2mm정도가 될 때까지 점진적

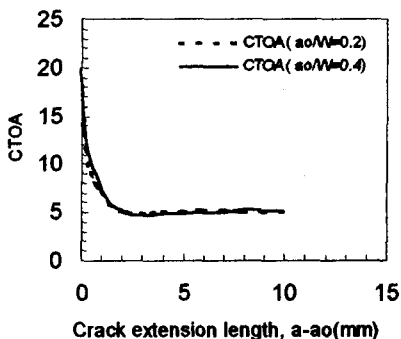


Fig. 8. CTOA criterion variation for crack extension length

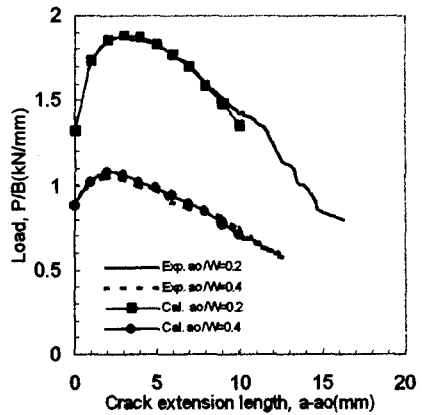


Fig. 9. Load-crack extension length responses by using CTED

로 감소하다가 그 이후 안정적인 값을 나타내고 있다. 현재의 해석에서 약 2mm의 임계치는 시험편의 두께와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 초기부분에는 CTED의 경우와는 반대로 감소하는 경향이 있으나 CTED보다 훨씬 느리게 일정치에 도달하는 것을 알 수 있다. 이것은 CTED를 사용할 때 나타난 비연속면의 도입에 따른 효과가 CTOA의 경우에는 해당되지 않는 것으로 파악될 수 있다. 또한 CTED와는 다르게 초기균열길이비  $a_0/W$ 에 따라 초기균열진전개시시의 CTOA의 값이 차이가 있어 초기균열길이의 영향을 받는 것으로 여겨진다.

Fig. 9는 CTED의 기준을 사용하여 얻어진 각각  $a_0/W=0.2$ 와 0.4의 하중-하중점변위의 곡선을 나타내고 있다. 각 해석에 있어서 어느 경우에 있어서도 절점력의 해방은 10단계에 걸쳐서 점진적으로 이루어지도록 하였다. Fig. 9에 나타내듯이 CTED에 의한 균열진전해석은 균열진전초기부터 초기균열길이  $a_0$ 에 관계없이 비교적 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 사용된 균열진전수법의 타당성을 나타낸다고 여겨진다.

사용된 CTED의 값은 진전개시초기의 절점해방에서 0.0024kN/mm이다. 그 후 균열진전은 Fig. 7에서 얻어진 CTED 기준에 따라 한 분할요소씩 약 10mm까지 진전시켰다. 균열성장길이가 약 8mm 이후부터는  $a_0/W=0.2$ 에서 약간의 실험치와의 편차가 발생되나 이것은 실험에 의한 오차로 여겨진다. Fig. 10은 CTOA에 기준한 균열진전 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. CTOA를 4.5°, 5.1°, 5.5°의 3경우에 대하여 균열진전기준치로 정하여 해석한 결과,  $a_0/W=0.4$ 의 경우에는 5.1°의 경우가 가장 실험치에 근접함을 알 수 있었다.

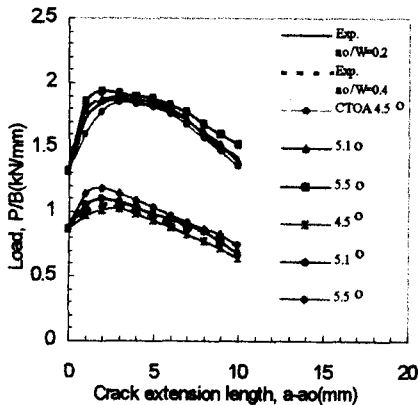


Fig. 10. The variation of the load-crack extension length according to CTOA value

그러나  $a_0/W=0.2$ 의 경우에는  $4.5^\circ$ 의 경우가 실험치의 하중곡선에 가장 근접하여 초기균열길이의 영향이 있음을 알 수 있다. 여기에서도 균열진전의 초기단계에서는 약간의 편차를 나타내고 있다. 이것은 균열진전초기의 균열단 둔화현상에 의한 것으로 여겨진다.

## 5. 결론

박판 알루미늄재료에 있어서 균열진전기준의 영향에 대한 안정균열성장해석을 유한요소법으로 시뮬레이션하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CTED균열진전조건에 의한 하중-균열성장길이의 관계는 초기균열길이와 관계없이 실험의 결과와 매우 잘 일치하였다.
- 2) CTED는 천전개시 임계값에서 균열이 성장함에 따라 초기단계에서 급격히 증가하다가 시험편

두께의 1/2지점부터 거의 일정치를 나타내었고, CTOA는 시험편두께 이후부터 안정적인 값을 나타내었다.

3) CTOA와 CTED는 양쪽 모두 안정균열진전기준으로서 비교적 유용하나, CTED의 경우가 보다 더 파괴현상을 현실적으로 나타내는 기준으로 여겨진다.

감사의 글 : 본 논문은 부경대학교 기성희연구지원비로 이루어진 것으로 관계자에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) D. S. Dawick and J. C. Newman Jr. and C. A. Bigelow, "Finite element analysis and fracture simulation in thin-sheet aluminum alloy", NASA-TM-107662, pp. 1~22, 1992.
- 2) E. P. Sorensen, "A numerical investigation of plane strain stable crack growth under small scale yielding conditions", ASTM STP 668, pp. 151~174, 1979.
- 3) J. C. Newman, B. C. Booth, and N. K. Shivakumar, "An elastic-plastic finite element analysis of the J-resistance curve using a CTOD criterion", ASTM STP 945, pp. 665~685, 1988.
- 4) K. Watanabe, Y. Sato, "A fundamental study on discontinuous crack model", JSME(A), Vol. 53, No. 488, pp. 786~794, 1984.
- 5) M. F. Kanninen and C. H. Popelar, "Advanced fracture mechanics", Oxford press, pp. 367~387, 1985.
- 6) K. Watanabe, H. Azegami, "An evaluation of the fracture resistance of a stably growing cracks by crack energy density", JSME(A), Vol. 52, No. 475, pp. 736~741, 1983.