

부균열을 가진 J-R곡선의 수정오프셋방법에 의한 평가

Evaluation by modified offset method on J-R curve with negative crack growth

안 광 주*·최 재 강**

Kwang-Ju Ahn · Jae-Gang Choi

(1997년 5월 15일 접수, 1997년 9월 5일 채택)

ABSTRACT

To evaluate the elastic-plastic fracture toughness by this modified offset method, the origin of J-R curve is set with drawing the blunting line on the maximum point of the negative crack growth and R curve is modified by adding the blunting factor of the experimented point on the R curve. The elastic-plastic fracture toughness J_{IC} of A5083-H112 material by the modified offset method are 44kN/m on the smooth CT specimens.

1. 서 론

탄소성 J_{IC} 를 평가하는 제하킴플라이언스법은 실험과 해석의 편리함 때문에 많이 사용되고 있으나 균열길이의 추정에 많은 문제점이 내포되어 있다.

제하킴플라이언스법으로 균열진전량을 계산에 의하여 추정하고 R곡선을 구하면 균열길이 감소현상에 의한 부균열(negative crack)이 많이 나타난다. 실제로 이러한 부균열은 존재할 수 없는 현상으로서 실험장비 등의 실험오차로 생각되며, 특히 고인성 고연성재료와 같은 R곡선의 구배가 큰

재료에서 더욱 현저하게 나타난다.

균열길이 감소현상이 나타나는 이유에 대하여 Voss 등¹⁾은 핀의 굽힘에 의한 하중선의 정열불량과 마찰 등으로 해석하고 있으며, 석 등²⁾은 하중 제거시 균열선단에 발생하는 압축응력의 영향이라 하였다. Voss 등¹⁾은 클레비스 핀(clevis pin)의 형태를 수정하거나 킴플라이언스의 수정식을 제안하여 균열진전량을 구하였으며, 석 등²⁾은 균열진전량 계산에 대한 수정식을 제안하였으나 해석상의 여러 문제점을 내포하고 있다.

Rosenthal등³⁾은 복잡한 이론적 해석 대신에 부균열의 최대점을 이용하는 오프셋방법에 의하여 R

* 동의대학교 기계공학과

** 동명전문대학 기계과

곡선을 구하고 있으나 이는 부균열값이 작을 때에는 상당한 타당성이 있으나 균열길이 감소현상이 크게 나타나는 고인성 혹은 연성이 큰 재료에서는 J_{IC} 평가에서 오차가 크게 나타날 것으로 생각된다.

균열길이 감소현상에 의한 부균열의 문제는 이에 대한 처리방법으로서 확연히 제안된 것이 없기 때문에 실험적인 문제점으로 대두되었으며 처리방법의 필요성이 제기되었다.

본 연구에서는 Al-Mg계 알루미늄 합금 A5083을 사용하여 평활 1/2CT 시험편으로 가공하고, 제하컴플라이언스법에 따라 파괴인성을 평가하고 탄소성 파괴인성 평가에서 나타난 부균열의 처리방법으로서 수정된 율셋방법을 제안하였으며 V_{OSS} 등¹⁾의 연구결과와 비교함으로써 제안된 수정 율셋방법의 유용성을 검토하였다.

2. 시험편과 실험방법

소재로 사용된 A5083-H112의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of A5083-H112

Comp. Mat.	(wt%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Bi	Pb
A5083-H112	0.15	0.23	0.03	0.56	4.54	0.03	0.014	0.31	0.01	0.02

Fig. 1은 시험편의 형상과 치수를 표시하였으며, 시험편의 기계노치는 폭 3mm의 슬롯(slot)로 가공하고 기계가공에 의한 전체 노치 길이 a_n 은 $a_n=0.5W$ 로 하였다.

시험편에 피로예균열삽입시 최대응력확대계수는 $10.75MPa\sqrt{m}$ 였고, 최종응력확대계수는 $9.28MPa\sqrt{m}$ 로 되었다.

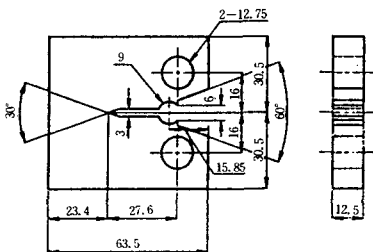


Fig. 1 CT specimen configuration

탄소성 파괴인성 시험에는 컴퓨터제어 유압서보식 재료시험기(computer controlled servo hydraulic material testing system MTS model 810)를 사용하였다.

제하컴플라이언스법에 의한 균열길이의 추정은 ASTM E1152-87⁴⁾에 따라 다음과 같이 결정하였다.

$$a_i/W = 1.00196 - 4.06319V_{LL} + 11.242V_{LL}^2 - 106.043V_{LL}^3 + 464.335V_{LL}^4 - 650.677V_{LL}^5 \dots (1)$$

$$\text{여기서, } V_{LL} = \frac{1}{[B_e E C_i]^{1/2} + 1}$$

E =탄성계수

$$B_e = B - (B - B_N)^2 / B$$

C_i =제하시의 탄성 컴플라이언스 ($\Delta V / \Delta P$)

이다.

J적분은 일반적으로 Merkle과 Corten의 간편식⁵⁾인 다음 식(2)를 이용하였다.

$$J = \frac{A f(a_i/W)}{B b} \dots (2)$$

여기서, A는 $P-V_{LL}$ 곡선하의 면적이며, a_o 는 피로예균열길이, b는 리거멘트, $f(a_i/W)$ 는

$$f(a_i/W) = 2 \left[\frac{1 + \alpha}{1 + \alpha^2} \right] \dots (3)$$

이며

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

이다.

3. 균열길이 감소현상과 R곡선의 수정 율셋방법에 대한 제안

Fig. 2는 균열길이 감소현상으로 부균열이 존재할 때의 R곡선의 대표적 회귀곡선을 가정하여 그린 것이다.

실험상의 실제 원점을 O라 하면 ASTM E813⁵⁾ 방법에서는 연성인열(ductile tearing)에 의한 균열 발생(crack initiation)점은 Fig. 2에서와 같이 둔화직선과 R곡선의 교점이 된다.

이때, 둔화직선과 종좌표사이의 모든 실험점은 ASTM방법에 따르면 무효처리 됨으로 연성인열의 균열발생점에 대하여 명확하게 평가할 수 없으

며 탄소성 파괴인성 J_{IC} 는 과대하게 평가될 수 있다.

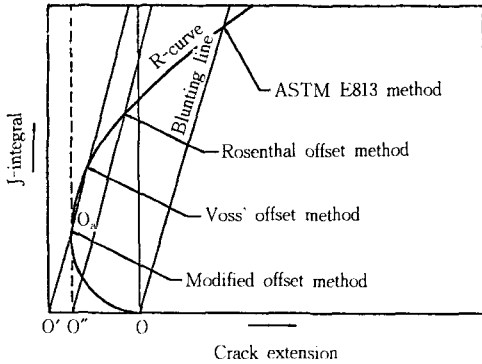


Fig. 2 Comparison with crack initiation point by ASTM E813 and offset methods

Rosenthal 등³⁾의 오프셋방법에 의하면 O'' 를 원점으로 한 둔화직선과 R곡선의 교점이 연성인열의 균열발생점이 되며 Voss 등¹⁾의 오프셋방법에 따른 연성인열의 균열발생점은 오프셋된 원점 O' 에서의 둔화직선과 R곡선의 교점이 된다.

수정제한된 오프셋방법에서는 O_a 점이 연성인열의 균열발생점이 된다. 이와 같이 오프셋방법에 따라 연성인열의 균열발생점에 대한 해석상의 차이는 크게 나타난다.

$O'O''$ 는 한계 스트레치영역폭(critical stretched zone width)으로 볼 수 있으며 JSME S001-92⁶⁾에서 J_{IC} 를 평가할 때에 이용하는 한계 스트레치 영역폭 방법의 연성인열의 균열발생점에 대한 기본적인 개념이 된다.

Fig. 3은 $J=C_1 \Delta a^{C_2}$ 의 지수곡선이 부균열을 갖는 실험곡선으로 가정하고 균열길이 감소현상에 대한 부균열의 수정곡선을 제안된 오프셋방법에 따라 그린 것이다.

이때 실험곡선의 J_Q 값은 ASTM E813-89⁵⁾방법에 따라 구하면 둔화직선을 기준으로 원편에 있는 실험점은 무효점(invalid data)으로 처리되고 J_{QA} 값이 된다.

Voss 등¹⁾의 오프셋방법에 따라 부균열의 최대점을 통과하는 둔화직선을 그리면 Δa 축과 만나는 점이 좌표축의 O' 점이 되며, J_Q 값은 J_{QV} 이다.

여기서 부균열 부분을 확대하여 그리면 Fig. 4

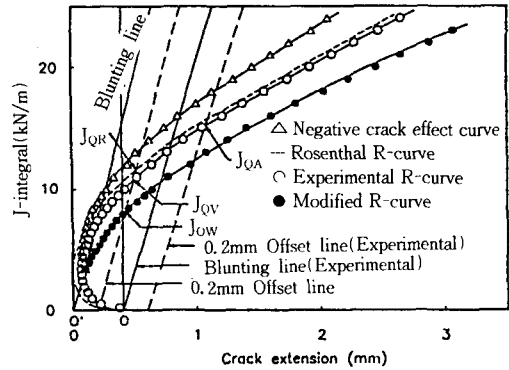


Fig. 3 Typical R-curve with negative crack effect behavior

와 같이 되며 둔화직선과 실험곡선의 교점이 O_a 와 A_0 에서 두개의 교점으로 표현되는 것은 균열의 발생점이 2개라는 모순된 문제점이 제기된다.

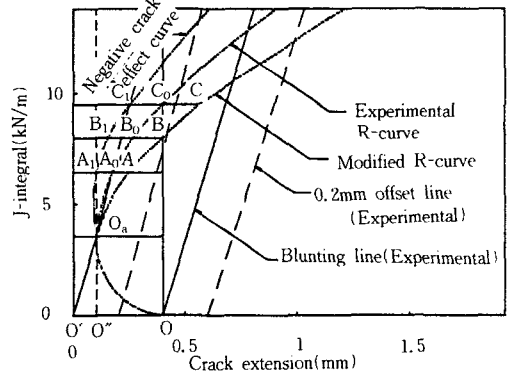


Fig. 4 Negative crack effect curve and R-cure by modified offset method

O_a 에서 예리한 인열에 의한 안정균열이 발생되고 J 값의 상승에 따라 안정균열진전량이 증가해야 하나 A_0 점에서는 둔화직선과 실험곡선의 교점이기 때문에, 균열은 둔화에 의한 증가부분 밖에 없으며 안정균열의 진전이 없는 것으로 된다. 이것은 O_a 점에서 안정균열이 발생되지 않고 인장하중이 증가하여 J 값이 증가함에 따라 둔화에 의한 균열은 둔화직선에 의한 균열의 둔화요소보다 오히려 상대적으로 감소되는 것으로 되며 A_0 점에서 균열진전량은 균열의 둔화요소와 다시 일치하게 되는 모순된 문제점이 생긴다.

실제 실험에서는 O_a 에서 A_0 구간은 재료가 연성

이 아닌 경우에는 그 범위가 크지 않기 때문에 이러한 것을 실험오차로 취급하고 무시할 수 있으나 연성이 크고 부균열이 크게 나타날 때에는 무시할 수 없다.

ASTM E813-89⁵⁾에서는 둔화선 왼편에 있는 모든 실험점을 무효실험점으로 취급하여 J_{IC} 를 평가하며, 부균열이 적은 경우에는 J_{IC} 평가에 미치는 영향이 근소하여 오차로 취급할 수 있으나 이론적 해석상엔 문제점이 될 수 있다. 부균열이 크거나 R곡선의 구배가 크게 되는 고인성재료에서는 이를 무효실험점으로 하면 J_{IC} 의 유효조건을 만족시키는 R곡선이 구해질 수 없는 경우가 많다.

실제 균열진전량 Δa_{actual} 은 둔화에 의한 균열진전량 $\Delta a_{blunting}$ 과 연성인열에 의한 균열진전량 $\Delta a_{tearing}$ 을 합하여 구하나 균열길이감소현상에 의한 균열의 감소량 $\Delta a_{negative\ effect}$ 만큼 실제보다 감소되어 평가되므로 J-R곡선상에서 $\Delta a_{negative\ effect}$ 만큼 보정하여 수정되어야 한다.

Fig. 4의 A_0 점에서

$$\overline{A_1A_0} = (\Delta a_{actual})_{O_a} - (\Delta a_{tearing})_{O_a} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $\overline{A_1A_0} = (\Delta a_{tearing})_{O_a}$ 이므로

$$(\Delta a_{negative\ effect})_{O_a} = (\Delta a_{blunting})_{O_a}$$

로 나타낼 수 있으며 $\overline{A_1A_0}$ 는 O_a 점을 기준으로 할 때, A_0 점에서의 둔화에 의한 균열의 증가요소이며, 동시에 균열진전량의 감소요소이다.

O_a 를 원점으로 한 실제 균열진전량 $(\Delta a_{actual})_{O_a}$ 는

$$\begin{aligned} (\Delta a_{actual})_{O_a} &= (\Delta a_{blunting})_{O_a} + (\Delta a_{negative\ effect})_{O_a} \\ &= 2\overline{A_1A_0} \\ &= \overline{A_1A} = (\Delta a_p)_{O_a} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

이다.

즉 실제 균열진전량은 실험곡선에서 주어진 균열길이에 이 실험점에 대한 둔화에 의한 균열진전요소를 첨가해야 한다는 것을 알 수 있다.

B_0 점에서는 $\overline{B_1B_0}$ 가 둔화에 의한 균열진전량과 같으며 B점에서 수정된 R곡선이 O의 종좌표축과 교차하게 되며 $\overline{B_1B} = (\Delta a_p)_{O_a}$ 이다.

C_0 점에서는 $\overline{C_1C_0}$ 가 균열의 둔화요소와 같으며 $\overline{C_0C} = \overline{C_1C_0}$ 로서 균열진전량 C_0 점에 대한 수정된 실험점은 C점이 되며 $\overline{C_1C} = \Delta a_p$ 이다.

따라서 가정한 실험곡선으로 주어진 R곡선상의 $O_a-A_0-B_0-C_0$ 의 각 실험점에 둔화요소를 더한 수정곡선은 $O_a-A-B-C$ 의 지수곡선이 된다.

균열길이의 감소영향곡선(negative crack effect curve)은 각 실험점에서 균열의 둔화요소를 감(minus)한 $O_a-A_1-B_1-C_1$ 곡선으로 표시할 수 있다.

ASTM E813-89⁵⁾규정에 따라서 둔화직선의 0.15mm 윗선과 1.5mm 윗선내에 있는 실험점으로써 R곡선의 지수곡선식 $J=C_1\Delta a^{C_2}$ 을 구하면 $J=14.60\Delta a^{0.46}$ kN/m로 되며, 수정된 윗선방법에 따라 각 실험점에 그 실험점의 둔화에 의한 균열진전량을 가하여 수정된 R곡선의 지수곡선식을 구하면 $J=12.60\Delta a^{0.51}$ kN/m로서 Fig. 5와 같이 표시된다.

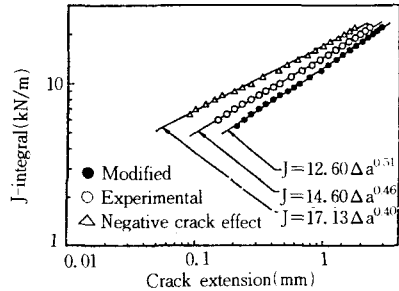


Fig. 5 Comparison with exponential curve fitting for R-curve

이때 R곡선의 계수차 ΔC_1 은 2.0이며 지수차 ΔC_2 는 0.05이다.

균열길이 감소현상의 영향에 대한 지수곡선식은 $J=17.13\Delta a^{0.40}$ kN/m로서 부균열의 영향곡선식이 된다.

이때 부균열의 영향곡선식과 가정한 실험곡선식의 계수차 ΔC_1 은 2.53이며 지수차 ΔC_2 는 0.06으로서, 실험곡선과 수정된 윗선방법에 의한 R곡선식에서의 계수 및 지수차와 거의 일치함을 알 수 있다.

이들 지수곡선식에서 보면 균열길이 감소현상에 의한 부균열의 영향은 균열진전량이 작은 영역에서는 크게 되고 균열이 진전됨에 따라 그 영향은 감소하게 되나 J_0 평가에서는 안전균열의 발생(initiation) 혹은 개시(onset)점에 대한 것임으로 부균열의 영향은 크게 되며, 이러한 부균열의 영향을 단순히 실험적인 오차로 취급하여 무시할 수 없다.

수정된 윗선방법의 유용성을 명확히 하기 위하여, Voss 등¹⁾의 실험결과에서 시뮬레이션(simula-

tion)방법으로 구한 부균열을 갖는 R곡선을 Fig. 6에 나타내었다.

제안된 수정 윤셋방법에 따라 구한 R곡선은 Voss 등¹⁾의 윤셋방법에 따라 구한 R곡선보다 실제의 균열진전량곡선(그림에서의 ▲곡선)에 근접하고 있다.

부균열진전량이 없을 때의 Voss 등¹⁾의 실험곡선에 대한 R곡선식은 $J=190.30 \Delta a^{0.29}$ 이며 Voss 등¹⁾의 윤셋방법에 따른 지수곡선식은 $J=213.34 \Delta a^{0.18}$ 로서 Fig. 7과 같다.

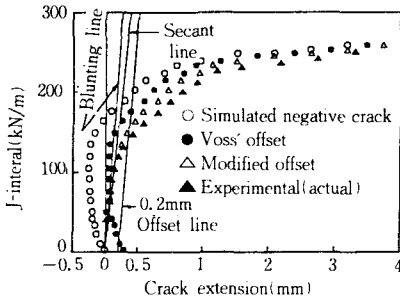


Fig. 6 Comparison with offset method for R-curve

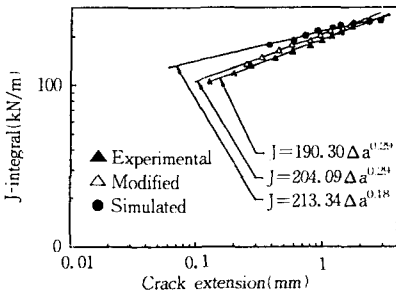


Fig. 7 Comparison with exponential curve fitting for R-curve

여기서 부균열이 없을 때의 Voss 등¹⁾의 실험곡선을 기준으로 할 때, Voss 등¹⁾의 윤셋방법에 따라 그려진 R곡선식은 C_1 이 12.1% 증가, C_2 는 38% 감소되어 큰 차이를 나타내었고, Voss 등¹⁾의 윤셋방법에 따라 균열진전량을 수정하여 R곡선을 구하면 실제의 R곡선과 많은 차이를 나타내었다.

수정된 윤셋방법에 따른 R곡선의 지수곡선식은 $J=204.09 \Delta a^{0.29}$ 로서 C_1 값은 7.8% 증가, C_2 는 완전히 일치하였으며, 따라서 균열길이 감소현상에 의한 부균열이 있을 때, 처리방법으로서 수정된

윤셋방법에 따라 균열진전량을 해석하면 실제 균열진전량(actual crack growth)을 근접하게 구할 수 있으며 각 실험점에서의 둔화요소를 가(plus)하여 균열의 실제 진전량을 해석하는 방법이기 때문에 간편하고 유용한 처리방법이라 생각된다.

4. 평활 CT시험편에 의한 탄소성 파괴인성

소재는 A5083-H112로서 가공경화된 상태에 있는 재료를 TL 방향으로 평활 CT시험편으로 가공하고 제하킴플라이언스법으로 $J-\Delta a$ 관계를 Voss 등¹⁾의 윤셋방법에 따라 부균열 부분만 윤셋하여 R곡선을 구하면 Fig. 8과 같다.

둔화직선은 ASTM E813-89⁵⁾방법에 따라 $J=484 \Delta a$ kN/m이며, 시컨트 직선(secant line)은 $J=322.7 \Delta a$ kN/m였고, J_{max} 은 시험편 과단 후에 b_0 를 측정하여 $J_{max}=b_0 \sigma_Y/15$ 임으로 $J_{max}=278.5$ kN/m로 하였다.

ASTM E1152-87⁴⁾ 규정에서는 $J_{max}=b_0 \sigma_Y/20$ 로 정의하여 유효점을 엄밀히 제한하고 있으며, 이에 따르면 $J_{max}=208.9$ kN/m였다.

유효점으로 회귀곡선을 구한 R곡선의 식은 $J=88.64 \Delta a^{0.51}$ 였으며, J_Q 는 $J_Q=52.0$ kN/m였다.

J_{IC} 의 판정조건을 적용하여 J_Q 를 평가하면 Δa_Q 에서 R곡선의 구배 dJ_Q/da 가 σ_Y 보다 작으며 다른 조건도 모두 만족되었으므로 J_Q 는 J_{IC} 로 평가할 수 있었다.

그러나 ASTM E1152-87⁴⁾에서는 제하킴플라이언스에 의한 J_{IC} 판정조건을 엄격히 규정하고 있으며 이에 따르면 시컨트 직선을 기준으로 5개의 유효점뿐임으로 적어도 8개의 유효점이 있어야 한다는 조건은 만족되지 않았다.

따라서 ASTM E1152-87⁴⁾ 규정에 따르면 J_Q 는 J_{IC} 로 평가될 수 없으나 R곡선의 구배가 점진적인 안정균열의 진행거동을 나타내고 있음을 볼 때, 제하점을 보다 많이 한다면 조건을 만족시키는 유사한 R곡선이 재현될 것이며 이런 경우 J_Q 는 J_{IC} 로 평가하여도 유효한 평가치가 될 것으로 생각된다.

Fig. 9에 제안된 수정윤셋방법에 따라 R곡선을 나타내었으며, R곡선의 식은 $J=83.52 \Delta a^{0.53}$ kN/m이고, 수정된 R곡선과 0.2mm 윤셋선과의 교점에

서 J_Q 를 구하면 $J_Q=44.0\text{kN/m}$ 이었다. ASTM E813-89⁵⁾방법에 의한 J_{IC} 평가조건은 만족되었으나 ASTM E1152-87⁴⁾에서의 규정조건은 만족되지 않았다.

ASTM E813-89⁵⁾방법에 따라 구한 J_{IC} 값과 비교하여 수정된 J_{IC} 값은 15.38% 감소되어 평가되었다.

ASTM E813-89⁵⁾법에 따른 지수곡선식과 수정 윗셋방법에 따라 구한 지수곡선식을 Fig. 10에 비교하여 나타내었다.

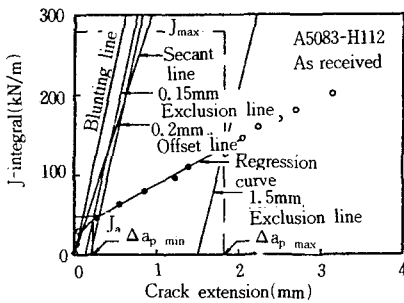


Fig. 8 R-curve by ASTM E813-89 method

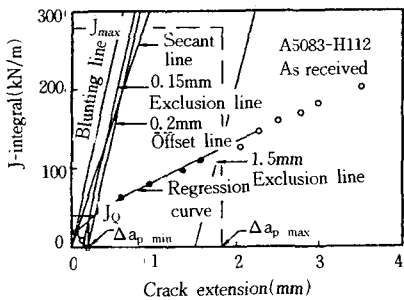


Fig. 9 R-curve by modified offset method

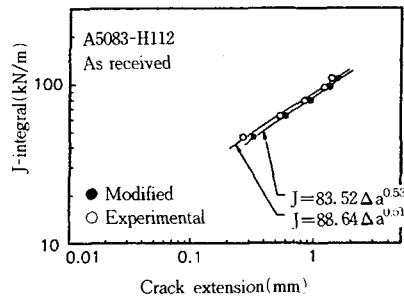


Fig. 10 Comparison with exponential fitting curve by ASTM E813-89 and modified offset method

유효범위에 속한 실험점으로 구한 R곡선의 계수 C_1 는 수정 윗셋방법으로 구했을 때에 5.78% 감소되었고, 지수 C_2 는 3.92% 만큼 증가되어 나타났다. 계수 C_1 과 지수 C_2 에서 증감의 차이가 대단히 근소함으로 R곡선의 지수곡선식은 유사하게 되며 따라서 R곡선의 형태상의 차이는 근소하다고 할 수 있다.

5. 결 론

균열길이 감소현상에 의한 부균열에 대하여 수정된 윗셋처리 방법을 제안하고 기존의 방법과 비교하였으며 Al-Mg계 A5083-H112 알루미늄합금을 이용하여 평활 1/2CT 시험편으로 가공하고 ASTM E813-89방법의 단일시험편법인 제하컴플라이언스법에 따라 탄소성 파괴인성을 평가하였다.

- 1) 제안된 수정 윗셋처리방법에 따라 균열길이 감소현상에 의한 부균열의 최대점에 둔화직선을 그려서 J-R곡선의 원점을 구하고 R곡선상의 실험점에 그 실험점의 균열길이의 둔화요소를 가하여 R곡선을 수정하면 안정균열의 발생점을 명확하게 평가할 수 있다.
- 2) 둔화요소보다 작은 균열진전량을 갖는 실험점을 ASTM 규정에서는 무효처리하나 수정 윗셋방법에 따르면 유효점으로 처리되고 미세한 균열 진전량까지 포함하여 수정된 R곡선을 그릴 수 있다.
- 3) 수정 윗셋방법으로 A5083-H112소재에 대하여 탄소성 파괴인성 J_{IC} 를 평가하면 평활 CT시험편에서 J_{IC} 는 44kN/m이다.

이 논문은 '동의대학교 산업기술개발연구소 학술연구 조성비'의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) B. Voss and R. A. Mayville, "The Use of the Partial Unloading Compliance Method for the Determination of J-R Curves and J_{IC} ", ASTM STP, 856, pp. 117-130, 1985.
- 2) 석창성, 최용식, "J-R 곡선에서의 균열길이 감소현상에 관한 연구(1)", 대한기계학회논문

- 집, 제16권, 제6호, pp. 1115-1120, 1992.
- 3) Y.A. Rosenthal, R.L. Yobler, and P.T. Purtscher, "J_{IC} Data Analysis Methods with a Negative Crack Growth Correction Procedure", J TEVA, Vol. 18, No. 4, pp. 301-304, 1990.
 - 4) ASTM E1152-87, "Standard Test Method for Determining J-R Curves", ASTM, 1992.
 - 5) ASTM E813-89, "Standard Test for J_{IC}, A Measure of Fracture Toughness", ASTM, 1989.
 - 6) JSME S001-1992, "Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness J_{IC}", JSME, 1992.