

研究論文

## Load Ratio 해석에 의한 알루미늄 5083 합금 용접부의 *J-R*곡선 평가

윤 한 기\* · 김 연 겸\*\*

### Evaluation of *J-R* Curve for Aluminum 5083 Alloy Weldment by Load Ratio Analysis

Han-Ki Yoon\* and Youn-Kyoum Kim\*\*

**Keyword** : Load ratio analysis(하중비 해석), Unloading compliance method(제하컴플라이언스법), *J-R* curve(탄소성 파괴저항곡선), Offset technique(오프셋기법), Weld metal(용착금속)

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the *J-R* curve characteristics for the 5083 aluminum alloy weldment by the load ratio analysis. The results of the load ratio analysis are compared with those of the *J-R* curve which are obtained by the ASTM unloading compliance method. The crack length calculated by the load ratio analysis is agrees well with the measured final crack length. The slope of the exponential *J-R* curve estimated by the load ratio analysis is slightly smaller than that by the ASTM unloading compliance method. The exponential correlation of the *J-R* curve for the 5083 aluminum alloy base metal by the load ratio analysis is  $J = 93.88 \Delta a^{0.375}$ . That for the weld metal and HAZ is  $J = 69.87 \Delta a^{0.389}$  and  $J = 70.59 \Delta a^{0.359}$  respectively. The *J-R* curve obtained by the ASTM unloading compliance method is over-predicted and should be offsetted due to the initial negative crack. On the other hand, the load ratio analysis method can evaluate the *J-R* curve by only load-displacement curve without particular crack measurement equipment.

\* 1997년 6월 18일 접수

\* 정희원, 동의대학교 기계공학과

\*\* 비희원, 동의대학교 대학원 기계설계학과

## 1. 서 론

최근 항공기 산업과 자동차산업의 발달에 따라 경량화를 목적으로 한 알루미늄합금의 수요가 증가되고 있다. 특히 LNG탱크 등에 많이 사용되는 알루미늄합금의 용접성에 대한 연구들이 많이 진행되고 있다. 이러한 소재들의 용접부에 대한 파괴의 안전성 평가로 피로균열진전과 파괴인성문제가 중요해지고 있다. 일반적으로 인성이 우수한 금속에 대한 파괴인성의 평가는 ASTM E813의 복수시험편법<sup>1)</sup>과 단일시험편법인 제하컴플라이언스법<sup>2,3)</sup>이 많이 사용되고 있다. 그러나 이들 방법은 균열개시점과 파괴저항곡선의 평가시 제약조건이 매우 복잡하며, 일반적으로 균열시작점을 파괴인성치로 사용하고 있지만 재료의 종류에 따라서는 균열진전 후에도 안정균열성장(stable crack growth)이 발생하면서 하중지지부가 감소하여도 파괴저항력은 증가함을 보여주고 있기 때문에 균열진전시작점을 파괴인성치로 한 설계는 상당히 보수적이라고 지적되고 있다. 따라서 균열진전시작점 이후의 파괴저항을 정밀하게 구하는 방법들이 요구되고 있다. 이를 위해 Paris 등<sup>4)</sup>은 재료의 찢어짐 계수(tearing modulus)를 구하여 J-R곡선을 구하는 방법을 제안하였으며<sup>5)</sup>, Ernst<sup>6)</sup>는 Key-Curve해석방법을 발표하여 정밀도는 떨어지지만 하중-변위곡선만으로 J-R곡선을 평가하는 방법을 제시하였다. 그러나 이들 이론은 실제시험편의 크기와 비례적인 치수를 요구하며, 소형시험편의 노치를 갖는 경우 하중과 소성변형량의 관계로부터 실제 시험편의 균열진전량을 예측하는 것은 물리적 의미에 대한 배경이 부족하고 실제 적용절차가 단순하지 않은 문제점 등을 갖고 있다. 이 문제점을 해결하기 위해서 Kumar<sup>7)</sup>은 시험편의 치수에 대한 완전소성해를 통해 치수의 형상에 미치는 소성변형의 경화효과를 입증하고 CT시험편의 탄소성

해석을 구하여 시험편형상계수를 제시하였다.坂 등<sup>8,9)</sup>은 연성균열 안정성장과 안정-불안정 천이점의 예측을 시도하였으며, 구조감쇠에 의한 연성불안정 파괴의 지연에 관한 제안을 보고하였다.尹 등<sup>10,11)</sup>은 제하컴플라이언스법에 의한 고주파전기 저항용접한 강판의 파괴인성평가와 Load Ratio 해석방법에 의한 SA533B강, SA508C강의 탄소성과 파괴저항곡선을 평가하였다. 특히 Load Ratio 해석방법은 연성재의 파괴저항곡선평가시 하중의 변화와 균열성장에 따라 소성변형과 경화지수의 영향을 받는다는 물리적 의미의 배경하에 탄성컴플라이언스를 정밀계측장비의 도움 없이 만능인장시험기에서 단순인장 하중-변위곡선만으로 구하여 CT시험의 형상에 따라 적용하는 J적분값을 사용하여 J-R 파괴저항곡선을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 Load Ratio 해석에 의한 알루미늄 5083합금 용접부의 J-R곡선을 평가하기 위해서 ASTM E813-89의 제하컴플라이언스법의 결과와 비교평가하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 시험편 재료

시험에 사용한 소재는 Al 5083-H1이고, 용접시 사용된 용접재료는 A5356이다. 이들 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

### 2.2 용접조건

용접은 MIG용접을 하였으며, 용접흡은 30°의 한쪽 베벨형(V형)으로 하였다. 용접재료는 직경이 1.2 mm인 A5356재를 사용하였고 용접조건은 Table 2와 같이 하였다.

Table 1. Chemical composition of Al 5083 alloy and weld metal deposited with A 5356 alloy filler (wt. %)

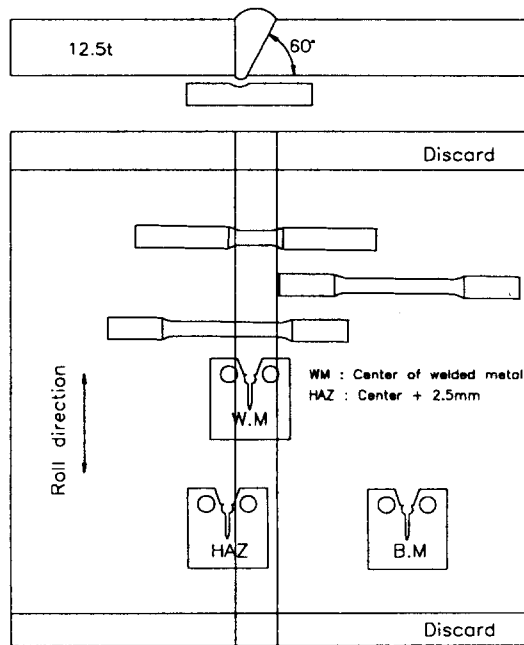
Com. Mat.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Bi	Pb	Al
Al 5083	0.15	0.23	0.03	0.56	454	0.03	0.014	0.31	0.01	0.02	Re.
A5356			≤0.10	0.20	5.00		≤0.10	0.20			

**Table 2.** MIG welding condition

Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Shielding gas flow (cfm)	Welding wire (mm)
110	20	45	25	∅ 1.2

**2.3 시험편 및 시험장치**

시험편의 채취는 Fig. 1과 같이 하였으며, 인장 시험편은 KS 가호 시험편을 사용하였고 용착금속부 시험편은 용착금속부 센터 중심선이 평행부의 중심이 되겠끔 가공하고 HAZ부 인장시험편은 용착금속부 센터선에서 2.5mm 떨어진 HAZ부를 평행부 중심이 되겠끔 가공하였다. 이들 시험편의 실험결과는 Table 3에 나타났다. 파괴인성 시험편은 두께 12.5 mm인 CT형 시험편을 모재(BM), 용착금속부(WM), 열영향부(HAZ)의 노치선단을 Fig. 1과 같이 가공하고 시험편의 형상은 Fig. 2와 같이 제작하였다. 인장시험과 제하컴플라이언스

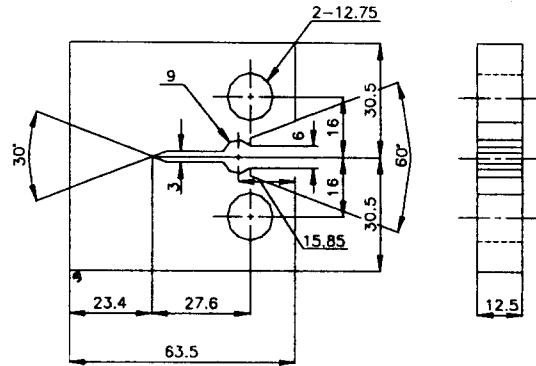


**Fig. 1** Sampling position and geometry of tensile test and CT specimen

법에 의한 *J-R*곡선 실험은 컴퓨터제어 유압서보식 피로시험기(MTS model 810 10tonf)를 사용하였으며, 하중선-변위측정은 측정범위 ±12 mm의 COD게이지를 사용하였다.

**Table 3.** Mechanical properties of Al 5083 alloy weldment

Properties / Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
base metal	188.5	295.4	19.0
weld metal	147.5	315.4	18.0
HAZ	130.2	243.8	19.7



**Fig. 2** CT specimen configuration

**2.4 해석 및 실험방법**

**2.4.1 Load Ratio 해석**

가공정확하는 연성재료의 균열진전 시작점은 탄성영역을 지나 최대하중점 이전 임의의 한 점에서 시작된다는 것은 명백하다. 최대하중점을 지나서 균열진전이 계속되면 리거먼트 단면적이 감소하면서 시험편에 걸리는 총하중은 감소하지만 진용력의 개념에서 실제 리거먼트가 줄어지는 실제단면적으로 생각하면 하중지탱부의 단위면적당 작용하는 하중은 계속 증가하리라고 생각한다. 파괴인성평가에 사용하는 CT시험편의 경우 시험편의 리거먼트가 지탱하는 하중은 식(1)로 정의된 임계하중  $P_0$ 로 정규화하여 균열길이에 따른 하중변화를 보

정할 수 있다.<sup>12)</sup>

$$P_0 = 1.455\alpha_s \cdot B \cdot \beta \cdot b \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{4(a/b)^2 + 4(a/b) + 2} - (2a/b + 1)$$

여기서,  $\alpha_s$ 는 항복응력, B는 시험편 두께, a는 균열길이, a는 리거먼트길이이다. 실제시험편에 작용하는 하중을 (1)식의 임계하중  $P_0$ 로 보정하면 실제 균열길이 a가 진전할 때 시험편에 발생하는 가공경화 정도를 유추할 수 있다는 Kumar 등<sup>12)</sup>의 보고를 기초로 하여 Fig. 3의 하중-변위곡선 OA'를 OA로 보정할 수 있다. 여기서 초기균열길이 a<sub>0</sub>이고 균열진전을 구속한 가상재료는 변위에 따라 가공경화의 하중이 OA선을 따라 증가한다. 실제 실험중 균열이 진전하는 실제의 재료는 초기에 OA선을 따라 진전하다가 불안전 균열이 시작되는 점 S에서 OA' 선으로 분리된다. 임의의 P<sub>i</sub>' 점에서 균열을 정지시키고 변위를 증가시키면 P<sub>i</sub>'는 P<sub>i</sub>점으로 된다. P<sub>i</sub>'점까지의 물리적 의미는 변위를 고정시킨 상태에서 균열을  $\Delta a$ 만큼 증가시킨 결과이다. 그러나 P<sub>i</sub>'점과 P<sub>i</sub>점에서의 소성변형량은 동일하므로 P<sub>i</sub>점에서의 탄성컴플라이언스 C<sub>i</sub>는 다음식으로 구할 수 있다.

$$C_i \text{ at } a = a_0 + \Delta a = C_0 \times \frac{P_i}{P_i'} \quad (2)$$

CT시험편에서 탄성컴플라이언스는 균열길이와 직접적인 상관관계를 가지므로 Saxena 등<sup>13)</sup>이 제안한 균열길이 계산은 (3)식에 의해서 구해지는 것은 잘 알려져 있다.

$$a/W = 1.000196 - 4.06319u + 11.242u^2 - 106.043u^3 + 464.335u^4 - 650.677u^5 \quad (3)$$

여기서  $u = \frac{1}{\sqrt{B \cdot E \cdot C_i + 1}}$ 이며, E는 탄성계수이

고, B는 시험편두께, C<sub>i</sub>는 탄성컴플라이언스이다.

ASTM 제하컴플라이언스법에 의한 균열길이 측정법은 복잡한 계산과정과 실험기에 주변장치가 없이는 측정이 불가능하다. 반면 Load Ratio 해석에

의한 균열길이 계산은 Fig. 3의 OA선을 구하면 (3)식에 의해서 쉽게 구할 수 있다.

본연구에서는 최종과단면의 실측균열길이를 ASTM 9점법에 의해 구하고 이것을 보정하는 방법에 의해 OA곡선을 예측하여 OA선상의 임의의 P<sub>i</sub>점의 탄성컴플라이언스를 사용하여 균열길이를 계산하였다.

J적분 계산은 ASTM E 813-89 규정의 (4)식과 E1152-87규정<sup>14)</sup>의 (5)식을 이용하여 구하였다. 이들 관계를 이용하여 J-R곡선을 평가하였다.

$$J_i = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (4)$$

$$J_{(i)} = \frac{(K_i)^2(1 - \nu^2)}{E} + J_{pl(i)} \quad (5)$$

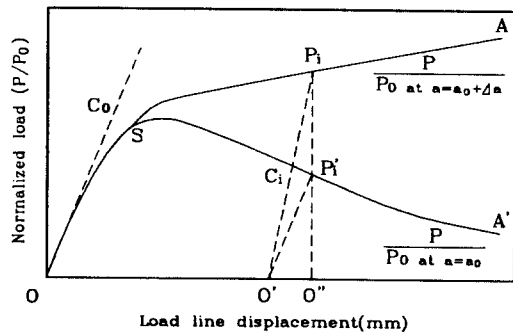


Fig. 3 The basic idea diagram of Load Ratio method for direct determination of the elastic compliance.

#### 2.4.2 제하컴플라이언스법의 실험

ASTM E 813-89의 규정에 의한 제하컴플라이언스법의 균열길이 측정방법은 Fig. 4와 같이 단일 시험편을 사용하여 부하후 15% 제하 하중을 반복할 때, 기울기변화에 따른 제하컴플라이언스 C를 구하여 C<sub>i</sub> 대신에 대입하여 구하였다. C의 측정과 측정장비는 컴퓨터 컨트롤 유압피로시험기(모델 MTS 810 10tonf)을 사용하였으며 TestLink 759의 J<sub>IC</sub> 실험 프로그램을 사용하여 자동측정하였으며 이때 사용한 J적분계산은 (4)식에 의해 계산하였다.

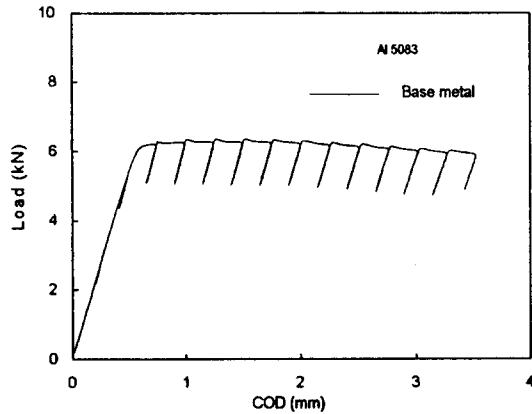


Fig. 4 Loading-unloading curve by unloading compliance method in Al 5083

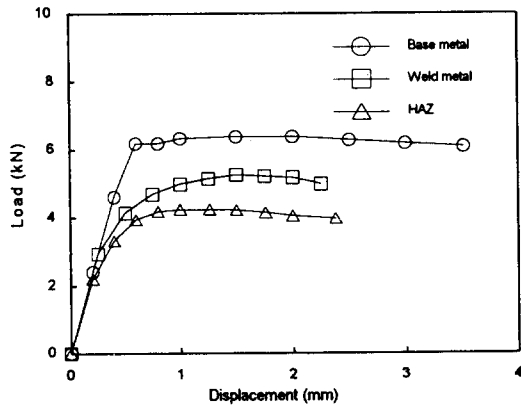


Fig. 5 Load-displacement curve in CT specimens

### 3. 해석 및 실험결과

#### 3.1 용접부의 하중-변위곡선

인장실험결과 용접부의 최대인장강도는 모재보다 약간 높고, 연신율은 약간 적게 나타났다. 열영향부(HAZ)의 최대인장강도는 모재에 비해 현저히 감소하였다. CT시험편의 하중-변위곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 용접부 시험편의 하중-변위곡선이 모재시험편에 비해 적은 이유는 균열선단이 하중 증가, 즉 COD증가에 따라 HAZ부로 진전되면서 강도가 저하된 것으로 생각된다.

#### 3.2 균열길이 검증

##### 3.2.1 실측균열길기와 제하컴플라이언스법 균열길기의 비교

제하컴플라이언스법에 의해 계산된 최종균열길이(U.C. 법의 계산균열길이)와 실험후 파면에서 ASTM 9점법으로 실측한 평균균열길이(실측균열길이)를 비교한 결과를 Fig. 6에 표시하였다. 균열진전길이가 적은 경우, U.C. 법의 계산된 균열길이는 실측치의 1% 이내로 잘 일치하고 있다. 그러나 균열진전길이를 크게 한 경우, 실측치보다 약간 큰 것도 나타났다. 그리고 모재, 용접부 및 HAZ부 시험편에 대한 특성은 크게 나타나지 않았다.

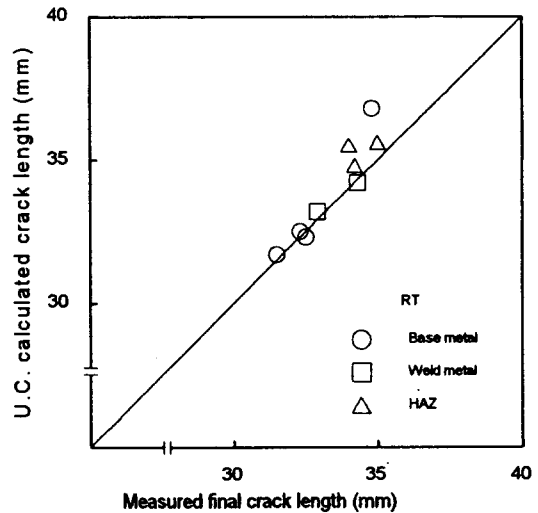


Fig. 6 Comparison of U.C. method crack length and final measured crack length

##### 3.2.2 실측균열길기와 Load Ratio해석 균열길기의 비교

Load Ratio해석에 의한 균열길이 계산은 재료정수인 경화지수의 개념을 사용하였으므로 계산된 균열길이의 타당성을 조사하기 위해서 Load Ratio해석의 최종균열길기와 실측한 균열길이(ASTM E 9점법의 평균길이)를 비교하였다. 이들 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 Load Ratio해석에 의해 계산된 균열길이는 실측치와 거의 유사하였다. 여기서도 재료의 종류에 따른 모재, 용접부, HAZ

부에 관계없이 거의 유사하였다. 따라서 용접부, HAZ부에 관계없이 이 해석법을 사용할 수 있음을 알았다.

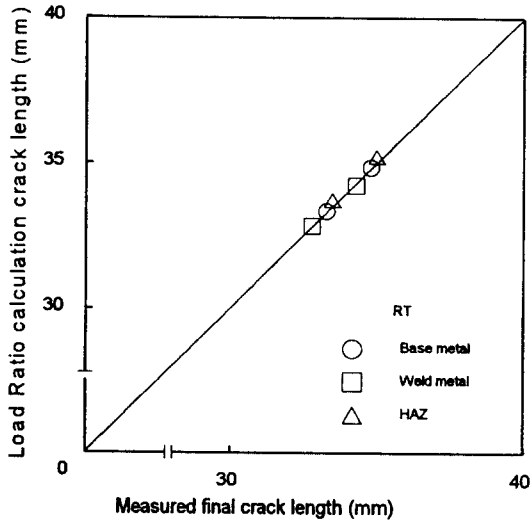


Fig. 7 Comparison of Load Ratio calculation crack length and final measured crack length

### 3.3 옴셋법에 의한 수정 $J$ - $R$ 곡선

ASTM법에서 권장하고 있는 제하컴플라이언스 법의  $J$ - $R$ 곡선은 단일시험편에서 부하-제하를 반복하여 탄성컴플라이언스변화로 균열길이를 계산함으로써 복수시험편법에 비해 경제적이다는 장점이 있으나, 재료의 인성크기에 따라 초기균열길이 감소현상을 피할 수 없으므로 이로 인한 정확한  $J_{IC}$ 와  $J$ - $R$ 곡선 평가는 몇 가지 문제점이 있다고 지적되고 있다.<sup>15, 16)</sup> 본 연구에 사용한 Al 5083재의 경우도 균열감소현상이 나타나므로 용접부와 HAZ부에 적용하기 위해서, Voss 등<sup>15)</sup>이 제안한 초기균열감소현상을 간편수정하는 감소균열길이의 최대치  $\Delta a_{err}$ 를 옴셋치리기법을 사용하여 수정  $J$ - $R$ 곡선을 구하였다.

Fig. 8에 Al 5083의 모재와 용접부 및 HAZ부 시험편의 초기감소균열길이를 수정하지 않은 상태, 즉 ASTM E 813-89법을 사용하여 MTS 810모델 TestLink 프로그램으로 구한 결과를 나타내었다. 여기서 둔화직선은 ASTM 규정의  $J = 2\sigma_y \Delta a$  식을

사용하였으며 (1)은 모재의 둔화직선  $J = 484\Delta a$ 이며 (2)는 용착금속부의 둔화직선  $J = 462\Delta a$ 이고, (3)은 HAZ부의 둔화직선  $J = 374\Delta a$ 이다. 여기서 모재의 경우 둔화직선 (1)을 기준으로 감소균열길이 최대치  $\Delta a_{err}$ 는 0.382mm이며, 용착금속부에서는 (2)를 기준으로  $\Delta a_{err}$  0.195mm, HAZ부에서 둔화직선 (3)의 기준으로  $\Delta a_{err}$  0.520mm이었다. Voss가 제안한 옴셋법으로 이들 감소균열길이를 수정한  $J$ - $R$ 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. ASTM E 813-89에서는  $R$ 곡선을 구할 때 둔화직선을 기준으로 ASTM규정의 유효범위 내에 속한 실험점을 이용하여 지수곡선식  $J = C_1 \Delta a^{C_2}$ 로 표현하도록 규정하고 있다. Voss 등은 이러한 결과를 기초로 연성이 큰 재료에서의 제하컴플라이언스법은 복수시험편의 결과와 비교해서  $J$ - $R$ 곡선 평가시 약간 과대평가 되는 문제점을 지적하고 있다. 이들 문제점을 확인하기 위해서 차<sup>17)</sup>는 원자로 압력용기강을 대상으로 복수시험편법과 U.C. 법의 실험결과를 비교하여 Voss 등의 결과를 확인하였다. 이들 결과를 참고하여 본 연구에서는 U.C. 법에 의한 Al 5083재의 용접부의  $J$ - $R$ 곡선을 옴셋수정하여 구하고 이들 결과를 Load Ratio 해석결과와 비교하였다.

### 3.4 Load-Ratio해석의 $J$ - $R$ 곡선

Load-Ratio해석에 의해 계산된 균열길지와 ASTM E 813-89에 규정된 CT시험편의 J적분계산식을 사용하여 구한  $J$ 와의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. Load Ratio해석에서는 초기균열감소현상이 나타나지 않으므로  $J$ - $R$ 곡선을 보정 없이 평가할 수 있다. Fig. 7에서 검토한 결과와 같이 Load Ratio해석에 의한 균열길지와 실측균열길지가 거의 일치하므로 여기서 얻어진  $J$ - $R$ 곡선은 시험편의 형상과 재료의 경화지수를 고려한 탄소성파괴저항곡선으로 생각할 수 있다. Al 5083 모재의 탄소성파괴저항곡선의 지수곡선식  $J = 93.88\Delta a^{0.375}$ 이며, 용접부의 경우  $J = 67.87\Delta a^{0.389}$ 이고, HAZ의 경우  $J = 70.59\Delta a^{0.359}$ 이다.

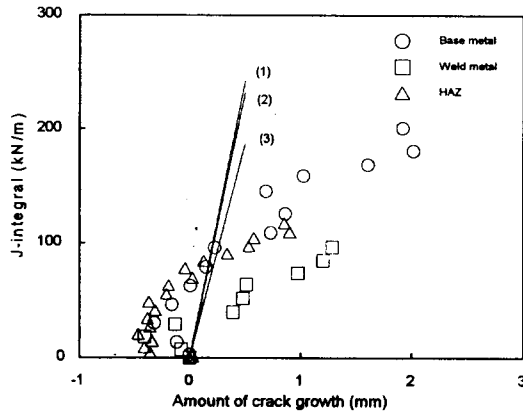


Fig. 8 *J-R* curve of unoffset unloading compliance method

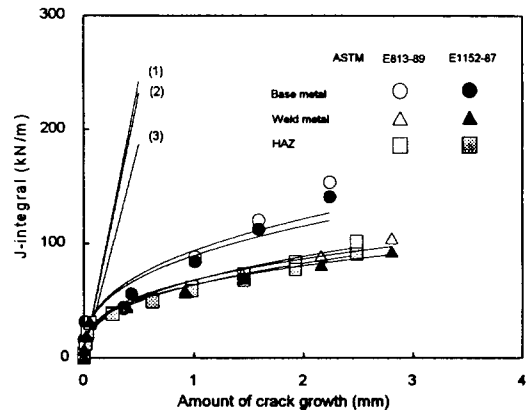


Fig. 10 *J-R* curve of Load-ratio analysis

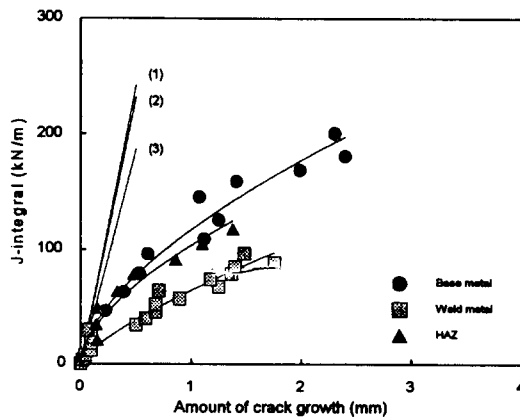


Fig. 9 *J-R* curve of modified offset technique by unloading compliance method

### 3.5 Load Ratio 해석과 제하컴플라이언스법의 결과비교

Fig. 11은 Al 5083 모재에 대한 U.C. 법의 실험결과와 Load Ratio해석의 결과를 비교표시한 것이다. Load Ratio해석의 균열길이와 *J*적분계산은 CT시험편의 회전보정을 고려한 E1152-87법의 결과를  $\square$ 로 표시하고, 회전보정을 고려하지 않은 E813-89법의 결과를  $\triangle$ 로 표시하여 함께 비교하였다. 여기서 *J-R*곡선을 지수곡선으로 정리하면 E1152-87법의 경우  $J = 89.54\Delta a^{0.367}$ 이고, E813-89법의 경우  $J = 93.88\Delta a^{0.375}$ 이다. 읍셋수정된 제하컴플라이언스

법의 결과  $J = 109.70\Delta a^{0.634}$ 이다. 여기서 Load Ratio 해석의 E1152-87법과 E813-89법의 R곡선계수  $C_1$ 은 U.C. 법보다 18.38%, 14.42% 적게 나타났고,  $C_2$ 는 42.11%, 41.64% 적게 나타났다.

Fig. 12는 용착금속의 실험결과를 나타내었다. 여기서도 Load Ratio해석의 E1152-87법의 경우  $J = 63.84\Delta a^{0.376}$ 이며, E813-89법의 경우  $J = 64.87\Delta a^{0.389}$ 이고, U.C. 법의 경우  $J = 66.21\Delta a^{0.610}$ 이다. Load Ratio해석의 E1152-87법과 E813-89법의 R곡선계수  $C_1$ 은 U.C. 법보다 3.58%, 2.02% 적었으며,  $C_2$ 는 38.4%, 36.23% 적게 나타났다.

Fig. 13은 HAZ부의 실험과 및 해석결과를 나타내었다. 여기서도 Load Ratio 해석의 E1152-87법의 경우  $J = 64.97\Delta a^{0.339}$ 이고, E813-89법의 경우  $J = 70.59\Delta a^{0.359}$ 이며, U.C. 법의 경우  $J = 110.82\Delta a^{0.778}$ 이었다. HAZ부의 Load Ratio 해석에 의한 R곡선계수  $C_1$ 은 U.C. 법의  $C_1$ 보다 40.63%, 36.30% 감소하였으며,  $C_2$  역시 56.43%, 53.85% 감소하였다.

이들 결과를 종합하면 Load Ratio 해석의 경우 시험편의 회전보정을 고려한 E1152-87법의 R곡선계수  $C_1$ ,  $C_2$ 는 회전보정하지 않은 E813-89법보다 약간 적게 나타나고 U.C. 법에 비해서 모재의 경우는 매우 적게 나타났으며 용착금속부 HAZ부도 적게 나타났다. U.C. 법이 Load Ratio 해석보다 비교적 크게 평가되는 이유는 U.C. 법이 단일시험편에서 하중변위곡선의 부하제하시 컴플라이언스량의 차이를 사용하여 Saxena식에서 균열길이를 계산할때

균열길이 보정문제와 탄소성영역에 대한 정확한 보정을 제공 할 수 없기 때문으로 생각된다. 반면에 Load Ratio 해석은 단일시험편의 하중-변위곡선에서 부하제하 없이 완전소성해석의 개념으로 재료의 경화지수를 고려한 균열계산과 실측균열길이를 보정하여 구하였으므로 U.C. 법에 비해 물리적인 의미를 갖는  $J-R$ 곡선 평가의 기법으로 생각된다. Load Ratio 해석의 신뢰성은 재료의 종류와 용접조건과 시험편 형상의 치수에 따라 변할 수 있으므로 이들에 대한 검토가 앞으로 요망되고 있다.

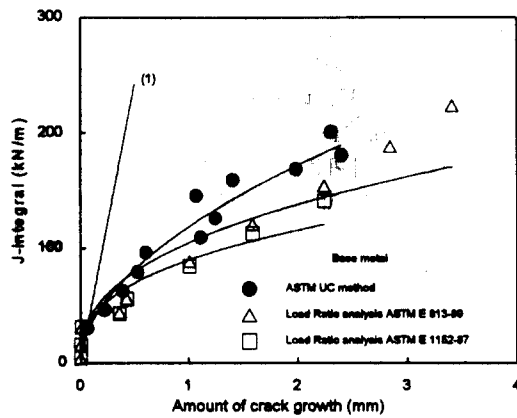


Fig. 11 Relation of  $J-R$  curve on the U.C. method and load ratio analysis for base metal

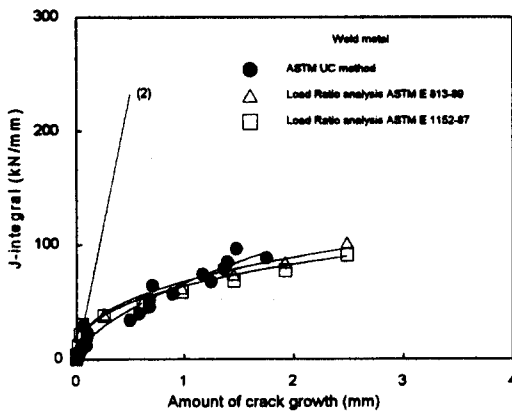


Fig. 12 Relation of  $J-R$  curve on the U.C. method and load ratio analysis for weld metal

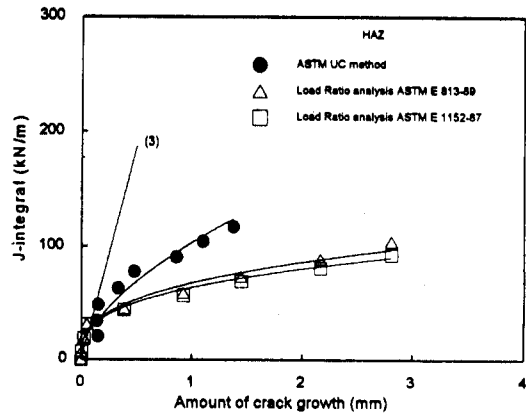


Fig. 13 Relation of  $J-R$  curve on the U.C. method and load ratio analysis for HAZ

#### 4. 결 론

Load ratio 해석에 의한 Al 5083 합금 용접부의 탄소성과파괴저항곡선 ( $J-R$ 곡선)을 평가하기 위해서 ASTM E 813-89의 제하컴플라이언스법과 비교 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Load ratio 해석에 의해 계산된 균열길이는 실험후 ASTM 9 점에 의해 실측한 평균균열길이와 거의 유사하였다.

2. Load Ratio 해석에 의한 알루미늄 5083 합금 모재의  $J-R$ 곡선 지수곡선식은  $J = 93.88\Delta a^{0.375}$ 이며, 용착금속, HAZ부의 경우  $J = 67.87\Delta a^{0.389}$ ,  $J = 70.59\Delta a^{0.359}$ 이다.

3. Load Ratio 해석에 의한 CT 시험편의 회전보정을 고려한 E1152-87법의 R곡선계수  $C_1$ ,  $C_2$ 는 E 813-89법의  $C_1$ ,  $C_2$  보다 약간 적으며 용착금속부와 HAZ부에서도 같은 경향이였다. 이 값은 U.C. 법의 값에 비해 전반적으로 적게 나타났다.

4. 알루미늄 5083 합금 용착금속, HAZ부의 U.C. 법에 의한  $J-R$ 곡선은 초기균열길이 감소현상 때문에 옅어 수정해야하며, 과대평가의 문제점을 갖고 있는 반면 Load Ratio 해석은 복잡한 균열측정시스템의 장치 없이 단순인장-변위곡선만으로 평가할



수 있다.

## 후 기

이 논문은 동의대학교 1996년도 학술연구조성비의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다. 그리고 시험편 제공에 도움을 준 최재강 교수님과 Load Ratio 해석 프로그램에 도움을 준 에너지 연구소 이봉상 선임연구원과 실험 및 결과정리에 수고한 우대호군에게도 감사드립니다.

## 참 고 논 문

1. K. W. Carlson and J. A. Williams, "A More Basic Approach to the Analysis of Multiple - Specimen R-Curve for Determination of  $J_{IC}$ ", ASTM STP 743 (1981), pp. 503~524
2. G. A. Clarke, W. R. Andrews, P. C. Paris, and D. W. Schmidt, "Single Specimen Test for  $J_{IC}$  Determination", ASTM STP 590, American Society for Testing and Materials (1976), pp. 27~42.
3. Standard Test Method for J-R Curve, ASTM E 813-87, (1987)
4. P. C. Paris, "Fracture Mechanics in the Elastic-Plastic Regime", in Flaw Growth and Fracture, ASTM STP 631, American Society for Testing and Materials (1977), pp. 3~27
5. P. C. Paris, H. Tada, A. Zahoor, and H. Ernst, "the Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth", in Elastic-Plastic Fracture, ASTM STP 668, American Society for Testing and Materials (1977), pp. 5~36.
6. J. A. Joyce, H. Ernst and P. C. Paris, "Direct Evaluation of J-Resistance Curve from Load Displacement Records", ASTM STP 700, (1980), pp. 222~236
7. V. Kumar, M. D. German and C. F. Shih, "Estimation Techniques for the Prediction of Elastic-Plastic Fracture of Structural Components of Nuclear System", EPRI, No. RP1237-1, (1980).
8. 坂眞燈, "材料強度問題の最近の話題", 日本機械學會特輯, 6, 1985, pp. 19~23
9. 坂眞燈, 井戸眞嗣, "構造減衰による延性不安定破壊の遲延に關する提案", 日本機械學會第516, A編, 55卷, pp. (1989), pp. 1841~1847.
10. 윤한기, 오세욱, 안광주, "제하컴플라이언스법에 의한 고주파 전기저항 용접한 강관의 파괴인성평가", 대한용접학회, Vol. 5, No. 2, 1987, pp. 44~52.
11. 윤한기, 차귀준, "Load-Ratio방법에 의한 SA 508C-3 및 Al 6061재의 탄소성파괴저항곡선평가", 한국해양공학회지, 제10권, 제2호, (1996), pp. 107~112.
12. V. Kumar, M. D. German and C. F. Shih, EPRI NP-1931, (1981)
13. A. Saxena and S. I. Hudak, Int. Journal of Fracture, Vol. 14, No. 5, (1978), pp. 453~467
14. Standard Test Method for Determining J-R Curve, ASTM E 1152-87, (1987)
15. B. Voss and R. A. Mayville, "The Use of the Partial Unloading Compliance Method for the Determination of J-R curve and  $J_{IC}$ ", ASTM STP 856, pp. 117-130, 1985
16. 최용식, 석창성, "J-R곡선에 의한 균열길이 감소현상에 관한 연구(I)", 대한기계학회논문집, 제16권, 제6호, (1992), pp. 1115~1120.
17. 차귀준, "Load Ratio 방법에 의한 원자로 압력 용기강의 파괴저항곡선 및 탄소성파괴인성평가", 동의대학교 대학원 박사학위논문, (1996).