

Load Ratio 해석에 의한 Al 5083 알루미늄합금 용접부의 J-R곡선 평가

Evaluation on J-R Curve of 5083 aluminum Alloy Weldment by Load Ratio analysis

윤한기* · 김연겸** · 우대호**

* 동의대학교, 부산

** 동의대학교 대학원, 부산

ABSTRACT

This research is to evaluate of the *J-R* curve characteristic in 5083 aluminum alloy weldment by utilizing the load ratio analysis. This analysis method can be evaluated the *J-R* curve only with load-displacement curve without any particular precision instrument equipment in CT specimen. For validity, the results of the load ratio analysis are compared with the those of the *J-R* curve, which are obtained by the ASTM standard unloading compliance method. The calculated crack length of the load ratio analysis is well appropriate that the measured final crack length. And the *J-R* curve slope estimated by the load ratio analysis is slightly smaller than that by the ASTM unloading compliance method.

1. 서론

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 파괴인성문제를 취급하고 있다. 파괴인성평가는 금속의 경우에 적용하는 ASTM E813의 복수시험편법¹⁾과 단일시험편법인 제하컴플라이언스법²⁾³⁾이 많이 사용되고 있다. 그러나 이들 방법은 균열개시점과 파괴저항곡선의 평가시 제약규정이 매우 복잡하며, 일반적으로 균열시작점을 파괴인성치로 사용하고 있지만 재료의 종류에 따라서는 균열진전 후에도 안정균열성장(stable crack growth)이 발생하면서 하중지지부가 감소하여도 파괴저항력은 증가함을 보여주고 있고, 균열진전시작점을 파괴인성치로 한 설계는 상당히 보수적(conservation)이라고 지적되고 있다. 따라서 균열진전시작점 이후의 파괴저항을 정밀하게 구하는 방법들이 요구되고 있다. Paris 등⁴⁾은 재료의 찢어짐 계수(tearing modulus)를 구하여 J-R곡선을 구하는 방법을 제안하였다.⁵⁾ Ernst⁶⁾는 Key-Curve해석방법을 발표하여 정밀도는 떨어지지만 하중-변위곡선만으로 J-R곡선을 평가하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 이론은 실제시험편의 크기와 비례적인 치수를 요구하며, 소형시험편의 노치의 경우 하중과 소성변형량의 관계로부터 실제 시험편의 균열진전량을 예측하는 것은 물리적 의미에 대한

배경이 부족하고 실제 적용절차가 단순하지 않는 문제점을 갖고 있다. 이 문제점을 해결하기 위해서 Kumar⁷⁾는 시험편의 치수에 대한 완전소성해를 통해 치수의 형상에 미치는 소성 변형의 경화효과를 입증하고 CT시험편의 탄소성해석을 구하여 시험편형상계수를 제시하였다. 坂 등⁸⁾⁹⁾은 연성균열 안정성장과 안정-불안정 천이점의 예측을 시도하였으며, 구조감쇠에 의한 연성불안정 파괴의 지연에 관한 제안을 보고하였다. 尹 등¹⁰⁾¹¹⁾은 제하컴플라이언스법에 의한 고주파전기저항용접한 강관의 파괴인성평가와 Load Ratio 해석방법에 의한 SA533B강, SA508C강의 탄소성파괴저항곡선을 평가하였다.

Load Ratio 해석방법은 연성재의 파괴인성시험시 하중의 변화와 균열성장에 따라 소성변형과 경화치수의 영향을 받는다는 물리적 의미를 바탕으로 하고 있다. 그리고 정밀계측장비의 도움없이 만능인장시험기에서 단순인장 하중-변위곡선만으로 파괴저항곡선을 평가할 수 있다는 가능성을 Kumar 등이 제시하고 있다.¹²⁾

본 연구에서는 Load Ratio 해석에 의한 Al 5083합금 용접부의 J-R곡선을 평가하기 위해서 ASTM E 813-89의 제하컴플라이언스법과 비교평가하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험편 재료

시험에 사용한 소재는 A5083-H1이고, 용접에 사용한 용접봉은 A5356이다. 이들 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고, 그리고 물리적 특성은 Table 2와 같다.

2.2 용접조건

용접은 MIG용접을 하였으며, 용접호는 30°의 한쪽베벨형(V형)으로 하였다. 용접소선경 ϕ 1.2 mm인 A5356재를 사용하였고 용접조건은 Table 3과 같이 하였다.

2.3 시험편 및 실험장치

시험편의 채취는 Fig. 1과 같이 하였으며, 인장시험편은 KS 가호 시험편을 사용하였고 실험결과는 Table 4에 나타냈다. 파괴인성 시험편은 두께 12.5 mm인 CT형 시험편을 Fig. 2와 같이 제작하였다. 인장시험과 제하컴플라이언스법에 의한 J-R곡선 실험은 컴퓨터제어 유압서보식 피로시험기(MTS model 810 10tonf)를 사용하였으며, 하중선변위측정은 측정범위 ± 12 mm 의 COD게이지를 사용하였다.

2.4 해석 및 실험방법

(1) Load Ratio 해석

연성재료의 가공경화에 의한 균열진전은 탄성영역을 지나 최대하중점 사이에 있다는 가정 하에서 최대하중점을 지나서는 하중지탱 단면적의 감소에 따라 시험편에 작용하는 총하중은 감소하지만 하중지탱부의 단위면적당 작용하는 하중은 계속 증가한다. CT시험편의 진응력-진변형률을 가상할 때 시험편의 리거멘트가 지탱하는 하중은 다음과 같은 임계하중 P_0 를 식 (1)과 같이 정규화하여 균열길이에 따른 하중변화를 보정할 수 있다.¹²⁾

$$P_0 = 1.455\sigma_{ys} \cdot B \cdot \beta \cdot b \quad (1)$$

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

여기서, σ_{ys} 는 항복응력, B 는 시험편 두께, a 는 균열길이, b 는 리거먼트길이이다. 이개념에서 Fig. 3의 OA' 하중-변위곡선을 OA로 보정할 수 있다. 초기균열길이 a_0 를 갖는 시험편에 균열진전을 구속한 가상재료의 변위에 따른 가공경화의 하중은 OA선을 따라 증가한다. 실제 실험중 균열이 OA선을 따라 진전하므로 불안전 균열이 시작되는 점 S에서 OA'로 분리된다. P'점에서 균열을 정지시키고 변위를 증가시키면 P'는 P점으로 된다. 이 P점의 물리적 의미는 변위를 고정시킨 상태에서 균열을 Δa 만큼 증가시킨 결과이며, 이때 탄성하중이 발생하여 시험편에 걸리는 하중은 P'로 줄어지는 의미와 같다. 이때 P와 P'사이의 소성변형량은 동일하므로 P'점에서의 탄성킴플라이언스 C 는 다음식으로 구할 수 있다.

$$C(a_0 + \Delta a) = C_0 \times \frac{P}{P'} \quad (2)$$

여기서 구한 C 를 Saxena 등¹³⁾이 제안한 CT시험편의 균열길이 계산식 (3)에 대입하면 균열길이를 계산할 수 있다.

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

여기서 $u = \frac{1}{\sqrt{B \cdot E \cdot C + 1}}$, E 는 탄성계수이다.

실제 CT시험편에서 최종파면의 균열길이 1개로 이 개념에 근사시키는 PC프로그램을 개발하여 (2)식의 킴플라이언스를 (3)식에 대입하여 균열길이를 예측하고, 이때 J 적분계산식은 ASTM E 813-89 규정 (4)식과 E1152-87규정¹⁴⁾ (5)식을 이용하여 구하고, 이들 관계를 이용하여 J - R 곡선을 평가하였다.

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

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

(2) 제하킴플라이언스법의 실험

ASTM E 813-89에 규정되어 있는 방법으로, 균열길이는 단일시험편의 부하제하 하중에 따른 제하킴플라이언스를 (3)식에 대입하여 구하였다. J 적분계산은 (4)식에 의해 계산하였다.

3. 해석 및 실험결과

3.1 용접부의 강도와 경도특성

인장실험결과 용접부의 최대인장강도는 모재보다 약간 높고, 연신율은 약간 적게 나타났다. 열영향부(HAZ)의 최대인장강도는 모재에 비해 현저히 감소하였다. 경도측정은 마이크로 비커스 압자(Micro Vicker's indenter)를 사용하여 하중 300gf, 부하시간 15초로 하였다.

3.2 균열길이 검정

(1) 실측균열길이와 제하킴플라이언스법 균열길이의 비교

제하컴플라이언스법에 의해 계산된 최종균열길이(U.C.법의 계산균열길이)와 실험후 파면에서 ASTM 9점법으로 실측한 평균균열길이(실측균열길이)를 비교한 결과를 Fig. 4에 표시하였다. 균열진전길이가 적은 경우, U.C.법의 계산된 균열길이는 실측치의 1% 이내로 잘 일치하고 있다. 그러나 균열진전길이를 크게한 경우, 실측치보다 약간 큰 것도 나타났다. 그리고 재료의 모재, 용접부 및 HAZ부 시험편에 대한 특성은 크게 나타나지 않았다.

(2) 실측균열길이와 Load Ratio해석 균열길이의 비교

Load Ratio해석에 의한 균열길이 계산은 재료정수인 경화지수의 개념을 사용하였으므로 계산된 균열길이의 타당성을 조사하기 위해서 Load Ratio해석의 최종균열길이와 실측한 균열길이(ASTM E 9점법의 평균길이)를 비교하였다. 이들 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 Load Ratio해석에 의해 계산된 균열길이는 실측치와 거의 유사하였다. 여기서는 재료의 모재, 용접부, HAZ부에 관계없이 거의 유사하였다. 따라서 용접부, HAZ부에 관계없이 이 해석법을 사용할 수 있음을 알았다.

3.3 읍셋법에 의한 수정 J - R 곡선

ASTM법에서 권장하고 있는 제하컴플라이언스법에 의한 J - R 곡선은 단일시험편에서 부하-제하를 반복하여 탄성컴플라이언스변화로 균열길이를 계산함으로써 복수시험편법에 비해 경제적이다는 장점은 있으나, 초기균열길이 감소현상이 재료의 인성크기에 따라 피할수 없으므로 이로 인한 정확한 J_{ic} 및 J - R 곡선 평가가 어렵다는 것이 문제점으로 지적되고 있다.¹⁵⁾¹⁶⁾ 본 연구에서는 Al 5083재의 용접부에 적용하기 위해서, Voss 등¹⁷⁾이 제안한 초기균열감소현상을 간편법으로 감소균열길이의 최대치 Δa_{err} 를 읍셋처리기법을 사용하여 수정 J - R 곡선을 구하였다.

Fig. 6에 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 모재의 감소균열길이 최대치 Δa_{err} 는 0.382mm이며, 용접부에서 Δa_{err} 0.195mm, HAZ부에서 Δa_{err} 0.520mm이었다. Voss가 제안한 읍셋법으로 이들 감소균열길이를 수정한 J - R 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. ASTM E 813-89에서는 R 곡선을 구할때 유효범위 내에 속한 실험점을 이용하여 지수곡선식 $J=C_1\Delta a^{C_2}$ 로 표현하도록 규정하고 있다. Voss 등은 이러한 결과를 기초로 연성이 큰 재료에서는 복수시험편의 결과와 비교해서 J - R 곡선 평가의 가능성을 제안하고 있으나 약간 과대평가되는 점에 대한 많은 문제점을 제시하고 있다. 이들 문제점을 확인 하기 위해서 차¹⁸⁾는 원자로 압력용기강을 대상으로 복수 시험편법과 U.C.법의 실험결과를 비교하여 결과 Voss 등의 결과를 확인하고, Load Ratio 해석결과와도 비교하였다.

3.4 Load-Ratio해석의 J - R 곡선

Load-Ratio해석에 의해 계산된 균열길이와 ASTM E 813-89에 규정된 CT시험편의 J 적분계산식을 사용하여 구한 J 와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 이 결과에서는 초기균열감소현상이 나타나지 않으므로 J - R 곡선을 보정 없이 평가할 수 있다. Fig. 5에서 검토한 결과와 같이 Load Ratio해석에 의한 균열길이와 실측균열길이가 거의 일치하므로 여기서 얻어진 J - R 곡선은 시험편의 형상과 재료의 경화지수를 고려한 탄소성파괴저항곡선으로 생각할 수 있다. Al 5083 모재의 지수곡선 $J=93.88\Delta a^{0.375}$ 이며, 용접부의 $J=67.87\Delta a^{0.389}$ 이고, HAZ의 $J=70.59\Delta a^{0.359}$ 이다.

3.5 Load Ratio 해석과 제하컴플라이언스법의 비교

Fig. 9는 AI 5083 모재에 대한 U.C.법의 실험결과와 Load Ratio해석의 결과를 비교표시하였다. Load Ratio해석한 균열길이와 J 적분계산은 CT시험편의 회전보정을 고려한 E 1152-87법의 결과를 \square 로 하고, 회전보정을 고려하지 않은 E 813-89법의 결과를 \triangle 로 하여 함께 비교하였다. 여기서 J - R 곡선을 지수곡선으로 정리한 결과 E 1152-87법의 경우 $J=89.544a^{0.367}$ 이고, E 813-89법의 경우 $J=93.884a^{0.37}$ 이다. 육섯수정한 제하컴플라이언스법의 $J=109.704a^{0.634}$ 이다. 여기서 E 1152-87법과 E 813-89법의 R 곡선계수 C_1 은 U.C.법보다 18.38%, 14.42% 적게 나타났고, C_2 는 42.11%, 41.64%적게 나타났다.

Fig. 10은 용접부의 실험결과를 나타내었다. 여기서도 Load Ratio해석과 E1152-87법의 $J=63.844a^{0.376}$ 이며, E813-89법의 $J=64.874a^{0.389}$ 이고, U.C.법의 $J=66.214a^{0.610}$ 이었다. Load Ratio 해석의 E 1152-87법과 E 813-89법의 R 곡선계수 C_1 은 U.C.법보다 3.58%, 2.02%적었으며, C_2 는 38.4%, 36.23% 적게 타나났다.

Fig. 11은 HAZ부의 J - R 실험 및 해석결과를 나타내었다. 여기서도 Load Ratio 해석과 E 1152-87법의 $J=64.974a^{0.339}$, E 813-89법의 $J=70.594a^{0.359}$ 이며, U.C.법의 $J=110.824a^{0.778}$ 이었다. HAZ부의 Load Ratio 해석에 의한 R 곡선계수 C_1 은 U.C.법의 C_1 보다 40.63%, 36.30% 감소하였으며, C_2 역시 56.43%, 53.85% 감소하였다. 여기서는 R 곡선의 계수가 매우 큰 차이가 타났다.

이들 결과를 종합하면 Load Ratio 해석의 경우 시험편의 회전보정을 고려한 E 1152-87법의 R 곡선계수 C_1 , C_2 는 회전보정하지 않은 E 813-89법보다 약간 적게 나타나고 U.C.법에 비해서는 모재의 경우 매우 과소평가되었다. 따라서 U.C.법이 Load Ratio 해석보다 과대 평가되는 이유중 U.C.법은 단일시험편에서 하중변위곡선상에서 부하제하시 컴플라이언스 차이를 갖고 Saxena식에서 균열길이를 계산하므로 균열길이 보정문제의 타당성과 탄소성에 대한 정확한 보정을 할 수 없기 때문으로 생각된다. 반면에 Load Ratio 해석은 단일시험편에서 하중-변위곡선에서 부하제하 없이 완전소성해석의 개념으로 재료의 경화지수를 고려한 균열계산과 실측길이를 보정하여 구하였으므로 U.C.보다 물리적 의미를 갖는 결과로 생각된다.

4. 결론

Load ratio 해석에 의한 AI 5083 합금 용접부의 탄소성 파괴저항곡선(J - R 곡선)의 유효성을 평가하기 위해서 ASTM E 813-89의 제하컴플라이언스법과 비교평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Load ratio해석에 의해 계산된 균열길이는 실험후 ASTM 9 점에 의해 실측한 평균균열 길이와 거의 유사하였다.
2. Load Ratio해석에 의한 CT시험편의 회전보정을 고려한 E 1152-87법의 R 곡선계수 C_1 , C_2 는 E 813-89법보다 약간 적고, 시험편의 회전보정의 영향도 고려되어야 하며, U.C.법에 비해서 매우 적게 나타났다.
3. 이 해석방법은 CT시험편에서 복잡한 균열측정시스템의 장치없이 단순인장 하중-변위 곡선만으로 J - R 곡선의 지수곡선계수 C_1 , C_2 를 간단히 구할수 있고, 용접부, HAZ부에도 적용할 수 있다.

후기

이 논문은 동의대학교 1996년도 학술연구조성비의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고논문

- (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遅延に関する提案, 日本機械學會 第516号, 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 SA508C-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 JIC", ASTM.
- (16) 최용식, 석창성, "J-R곡선에의 균열길이 감소현상에 관한 연구(I)", 대한기계학회논문집, 제16권, 제6호, 1992, pp. 1115~1120.

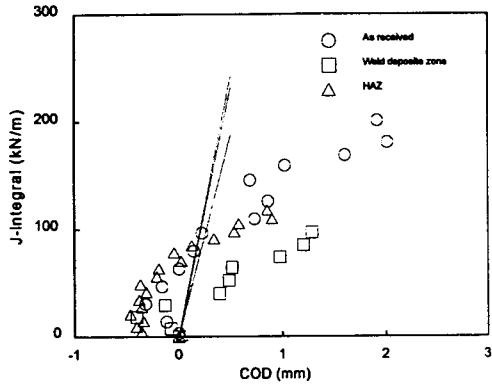


Fig. 6 J-R curve of unoffset unloading compliance method

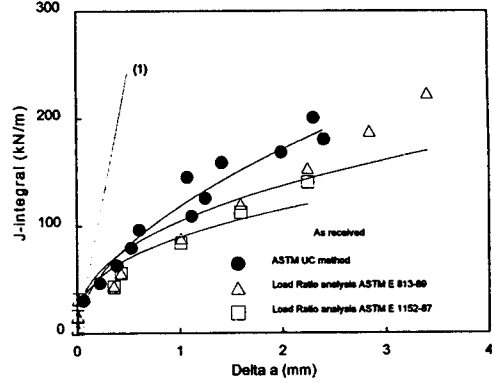


Fig. 9 Relation of J-R curve on the U.C. method and load ratio analysis for as received material

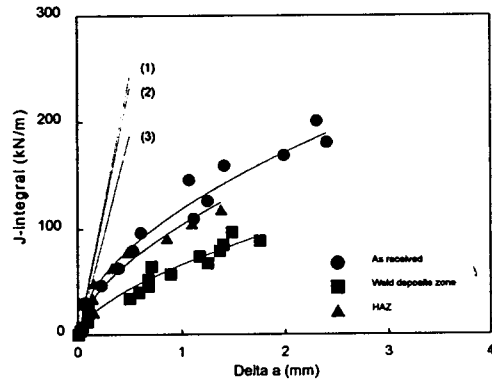


Fig. 7 J-R curve of modified offset technic by Unloading Compliance method

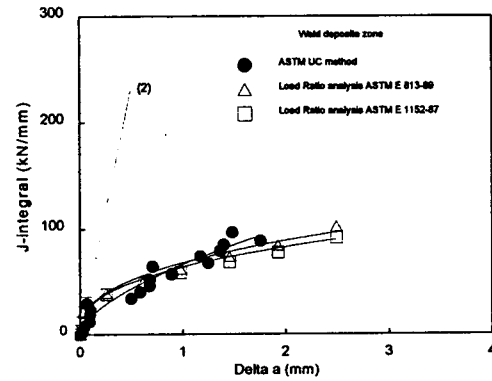


Fig. 10 Relation of J-R curve on the U.C. method and load ratio analysis for weld deposit zone

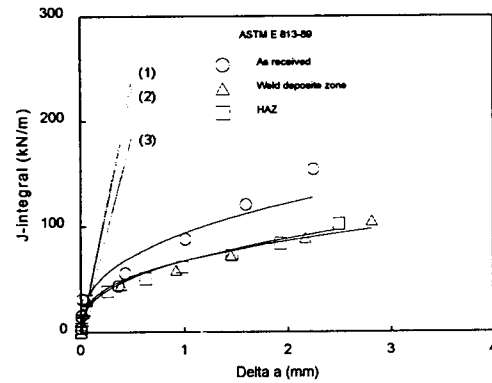


Fig. 8 J-R curve by load-ratio analysis

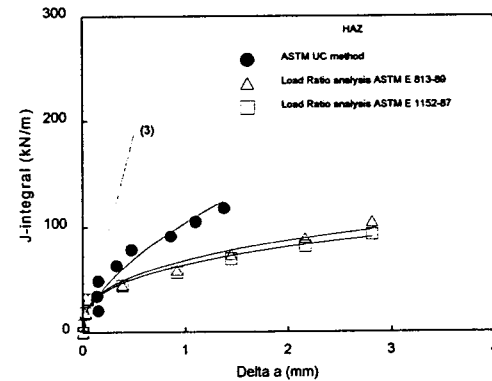


Fig. 11 Relation of J-R curve on the U.C. method and load ratio analysis for HAZ