

원자로 압력용기강 및 Al 합금재의 J-R곡선평가시 Load Ratio 해석의 유효성 검토

윤한기*·우대호**· 김연겸**· 차귀준***

Validity Examination on Evaluation of J-R Curve in the Nuclear Reactor
Pressure Vessel Steels and Aluminum Alloys by Load Ratio Analysis

H. K. Yoon*, D. H. Woo**, Y. K. Kim** and G. J. Cha***

Key Words : Load Ratio Analysis (하중비 해석), Unloading Compliance Method (제하컴플라이언스법), J-R Curve (탄소성 파괴저항 곡선), Load Ratio Calculated Crack Length (하중비에 의한 계산된 균열길이), Measured Crack Length (실측균열길이), J-Integral (J적분)

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the validity examination of the J-R curve characteristics for the nuclear reactor pressure vessel steels and Al alloys 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 agree 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 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.

* 동의대학교 기계공학과

** 동의대학교 대학원

*** 동명전문대학 가스냉동과

1. 서 론

기계의 구조물과 각종 동력기계에 사용되는 구조용 재료는 사용조건에 따라 재료특성이 점점 첨단화되어가고 있다. 이들 소재의 개발과 평가시스템은 계속 개발되고 있다. 미국 ASTM E813-89와 일본 JSME S001 규정에서는 이들 소재의 탄소성 파괴저항곡선 J-R 곡선평가법이 제안되어 있다. 그 중 복수시험편법은 각종 금속재료의 탄소성 파괴저항곡선 평가방법의 타당성을 인정받고 있다. 그러나 여러개의 시편을 사용하므로 경제적 및 실험기간상의 문제점이 지적되고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 단일시험편법으로 J-R 곡선을 평가하는 방법들이 연구되고 있다. 대표적인 방법으로 제하컴플라이언스법과 DC 혹은 AC 전위차법 등이 사용되고 있다. 제하컴플라이언스(unloading compliance)법은 Clarke 등¹⁾에 의해 소개되어 현재 표준시험법인 ASTM E813-81, 89²⁾에 규정되어 있다. 이러한 규정은 재료의 종류에 따라 적용범위와 유효성의 문제점이 제기되고 있으며, 그 중 균열감소현상이 큰 문제점으로 지적되고 있다. Voss 등³⁾은 제하컴플라이언스법으로 J_{IC} 를 평가할 때 균열길이 감소현상이 나타나는 문제점은 초기 하중상태에서 하중을 가할 때 균열길이가 감소하며, 지그의 정밀도와 하중을 받는 핀 등에 의해 생긴다고 지적하였다. 이러한 균열길이의 감소현상은 실제로는 존재하지 않아야 하므로 실험과 해석상에서 어려움을 갖고 있다.⁴⁾⁵⁾ 이것을 보정하는 방법으로 offset기법 등이 도입되고 있으나 이 결과도 복수시험편에 비해 일반적으로 재료에 따라서는 과대평가되는 문제점이 남아있다. 그리고 제하컴플라이언스법은 정밀한 계측장비와 많은 경험이 요구되는 문제점도 지적되고 있다.

Load Ratio 해석은 금속재료의 탄소성파괴저항곡선 평가시 하중의 증가에 따라 균열성장 및 재료의 소성변형에 따라 경화효과를 갖고 있다는 물리적 이해를 바탕으로 하기 때문에 탄소성영역에 대한 균열길이를 정밀계측장비의 도움 없이 만능인장시험기에서 단순 인장-변위곡선만을 이

용해서 계산할 수 있으며, J-R곡선을 간편하게 얻을 수 있다고 Kumar 등⁶⁾이 주장하고 있다. 이 방법은 ASTM과 JSME에서 인정하는 복수시험편법과 단일시험편법의 제하컴플라이언스법에 비해 신뢰성과 유효성만 입증되면 공학적으로 매우 유용한 방법으로 사용될 수 있다고 생각된다. 국내에서 윤 등⁷⁾은 Load Ratio해석법의 활용을 위해서 SA508C-3 과 A16061재에 적용하여 탄소성 파괴저항곡선의 평가를 시도하였으며, 차⁸⁾는 원자로용 구조용 합금강에 Load Ratio 방법과 복수시험편법의 실험결과를 비교하였다. 그러나 경화지수가 다른 재료에 대한 검정은 이루어져 있지 않은 실정이다. 따라서, 일반 구조용강 중에 하중과 변형률의 변화에 따른 가공경화지수가 다른 여러가지 재료에 대한 Load Ratio해석법에 의한 J-R 곡선의 유효성 검토는 매우 중요하다.

본 연구에서는 단순인장하중-변위곡선을 사용한 Load Ratio 해석에 의한 J-R곡선평가의 유효성을 검토하기 위해서 구조용강 중 경화지수가 다른 원자로 압력용기강 SA533B-1, SA508C-3 강과 알루미늄합금 A16061, A15083, A17075, A12024를 대상으로 제하컴플라이언스법의 실험결과와 Load Ratio 해석의 결과를 비교평가하여 유효성을 검토하였다.

2. Load Ratio의 이론적 해석

가공경화하는 연성재료의 균열진전 시작점은 탄성영역을 지나 최대하중점 이전의 어떤 한 점에서 시작된다는 것은 명백하다. 최대하중점을 지나서 균열진전이 계속되면 리거먼트(ligament) 단면적이 감소하면서 시편에 걸리는 총하중은 감소하지만 진응력의 개념에서 실제 리거먼트가 줄어지는 실제단면적으로 생각하면 하중지탱부의 단위면적당 작용하는 하중은 계속 증가하리라고 생각된다. 파괴인성평가에 사용하는 CT시험편의 경우 시험편의 리거먼트가 지탱하는 하중은 식(1)로 정의된 임계하중 P_0 로 정규화하여 균열길이에 따른 하중변화를 보정할 수 있다.

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

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

여기서, σ_{ys} 는 항복응력, B는 시험편 두께, a는 균열길이, b는 리저먼트 길이이다. 실제시험편에 작용하는 하중을 식(1)의 임계하중 P_0 로 보정하면 실제 균열길이가 진전할 때 시험편에 발생하는 가공경화 정도를 유추할 수 있다는 Kumar 등⁶⁾의 보고를 기초로 하여 Fig. 1의 하중-변위곡선 OA'를 OA로 보정할 수 있다. 여기서 초기균열길이가 a_0 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_i 점에서 균열을 정지시키고 변위를 증가시키면 P_i 는 P_i' 점으로 된다. P_i 점까지의 물리적 의미는 변위를 고정시킨 상태에서 균열을 Δa 만큼 증가시킨 결과이다. 그러나 P_i' 와 P_i 에서의 소성변형량은 동일하므로 P_i 점에서의 탄성 컴플라이언스 C_i 는 다음식으로 구할 수 있다.

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

여기서, C_0 는 초기탄성컴플라이언스이다.

CT시험편에서 탄성컴플라이언스는 균열길이와

직접적인 상관관계를 가지므로 Saxena 등⁹⁾이 제안한 균열길이 계산은 식(3)에 의해서 구해지는 것은 ASTM E813-81에 잘 알려져 있다.

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

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

이다.

ASTM 제하컴플라이언스법에 의한 균열길이 측정은 복잡한 계산과정과 실험기에 주변장치가 없이는 균열길이 측정이 불가능하다. 반면 Load Ratio 해석의 균열길이 계산은 Fig. 1의 OA선만 구하면 균열길이를 쉽게 구할 수 있다.

OA선은 Fig. 2와 같이 서로 다른 균열길이에 대해서 정규화한 하중-변위곡선들을 단순 근사적 방법으로 접근시켜 균열길이가 a_0 로부터 a_f 까지 점차적으로 증가할 때 증가하는 균열에 대해 정규화한 하중곡선은 Fig. 2의 실선과 같다고 가정하여 OF의 실선을 Fig. 1의 OA선으로 가정한다. 여기서 실험 후에 시험편의 파단으로부터 최종 균열길이를 ASTM 9점법으로 구할 수 있으므로 Fig. 2의 점 F는 실측값이다.

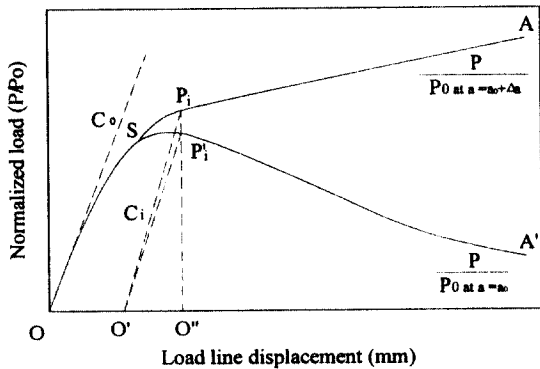


Fig. 1 The basic idea diagram of Load Ratio method for direct determination of the elastic compliance

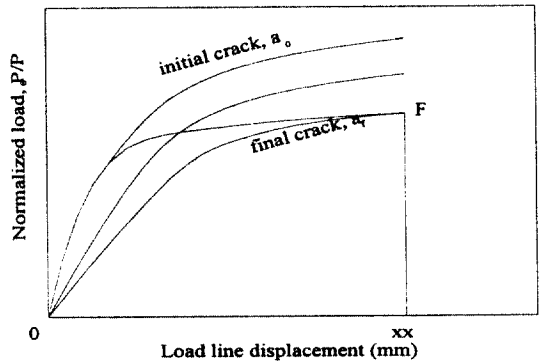


Fig. 2 Normalized load-displacement curves for various crack length (The solid line is for growing crack and the difference are exaggerated)

점진적인 균열진전에 대한 정교화한 하중곡선을 근사적인 직선으로 가정하면 Fig. 3과 같이 최종점 F로부터 실측된 하중-변위곡선의 최대점에 접선을 그음으로써 수정된 하중곡선을 얻을 수 있다. 식(2)는 초기 크기로 정지된 균열에 대하여 유도된 컴플라이언스 관계식이므로 Fig. 3의 수정된 근사곡선을 이용하기 위해서는 식(4)와 같이 컴플라이언스 증분 형태로 변환한다.

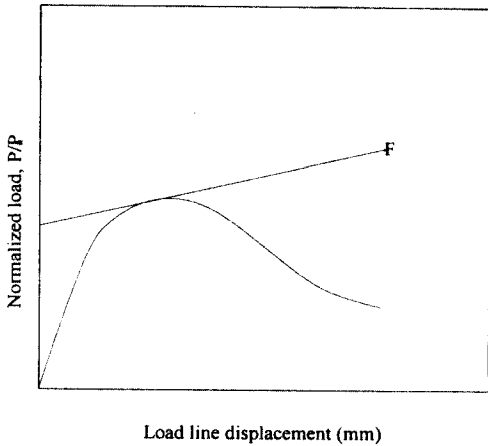


Fig. 3 Approximation of the reference curve by a tangent line

$$C_i = C_{i-1} \times \frac{\left(\frac{P_i}{P_{0,i}}\right)}{\left(\frac{P_i}{P_{0,i-1}}\right)} \quad (4)$$

여기서 $P_{0,i}$ 는 i 번째 점에서 (1)식으로 계산된 한계하중이다.

하중-변위 선상에서 적당한 간격의 기준점들을 선택하면 초기균열길이에 대한 이론적 컴플라이언스와 식(4)를 사용하여 점진적인 컴플라이언스 변화를 계산할 수 있다.

J적분 계산은 ASTM E813-89 규정과 회전보정을 고려한 E1152-87규정¹⁰⁾의 식(5)를 이용하여 구하였다. 이들 관계를 이용하여 J-R곡선을 평가하였다.

$$J_i = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (5)$$

$$J_{(i)} = \frac{(K_i)^2(1-\nu^2)}{E} + J_{pl(i)} \quad (6)$$

여기서, J_{el} 은 탄성영역의 J적분값이며, J_{pl} 은 소성영역의 J적분값이다.

3. 재료 및 실험방법

3.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 SA533B-1강

Table 1 Chemical composition of SA533B and SA508C steel (wt%)

Comp. Mat.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Al	Sn	As	Sb
SA533B	0.20	0.27	1.45	0.020	0.012	0.60	0.14	0.51	0.160	0.010	0.023	0.010	0.014	0.93
SA508C	0.17	0.04	1.42	0.004	0.003	0.98	0.22	0.58	0.045	0.003	-	-	-	-

Table 2 Chemical composition of Aluminum alloy (wt%)

Comp. Mat.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb	Al
Al6061	0.53	0.43	0.30	0.08	0.94	0.18	0.09	0.01	0.005	bal
Al5083	0.15	0.23	0.03	0.56	4.54	0.03	0.014	0.31	0.02	bal
Al7075	0.40	0.50	1.60	0.30	2.50	0.23	5.60	0.05	-	bal
Al2024	0.50	0.50	4.35	0.60	1.50	0.10	0.25	0.15	-	bal

Table 3 Mechanical properties of test specimens

Materials	Prop.	Yield stress (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SA533B-1		485	622	23.9
SA508C-3		513	667	23.4
Al6061		360	500	18.3
Al5083		189.5	295	19.0
Al7075		483.6	538	7.0
Al2024		270.8	428	15.0

과 SA508C-3의 원자로용 구조용 합금강과 Al6061, Al5083, Al7075, Al2024의 알루미늄합금이며, Table 1에 원자로용 구조용합금강과 Table 2에 알루미늄합금의 화학성분을 나타내었다.

Table 3은 이들 재료의 기계적성질을 나타내고 있다. Fig. 4는 J-R곡선 평가시험을 하기 위하여 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타내었다.

시험편 중 연강재는 두께를 25mm로 하고 알루미늄합금은 두께를 12.5mm로한 CT시험편이며, 시험편의 기계노치는 폭 2mm의 슬로터로 가공하고, 기계가공에 의한 전체 노치길이는 $a_0=0.5a/W$ 로 하였다. 시험편에서 균열이 발생될 때까지 최대 응력확대계수는 위의 각 시험편 크기에 따라서 $29.68 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $23.96 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 으로 되었다. 파괴 예비균열 길이 삽입은 ASTM E647-88 규정

에 따라 상온 대기 중에서 응력비 $R = 0.05$ 인 정현파형으로 하였으며, 주파수는 15 Hz로 하여 노치 양끝에서 약 3mm의 예비균열을 삽입하였다.

예비균열길이 a_0 는 균열비에 대한 $0.5 \leq a_0/W \leq 0.75$ 의 규정에 따라 $a_0/W \approx 0.6$ 이 되게 하였다.

3.2 실험장치 및 실험방법

탄소성파괴인성시험에 사용한 시험기는 전기유압서어보식 피로시험기(모델 MTS 810, 10tonf)이다. 하중선 변위를 측정하기 위하여 COD 게이지는 게이지 길이 3mm, 측정범위 7mm가 되는 것을 사용하였다. 파괴인성시험의 정적부하(static loading)는 변위제어로 하였으며, 부하속도는 0.1 mm/min로 일정하게 유지하였다. R곡선부의 균열길이 측정은 COD로부터 측정된 제하탄성컴플라이언스를 자동입력할 수 있는 Test link 759 컴퓨터 제어 시스템을 사용하여 구하였다.

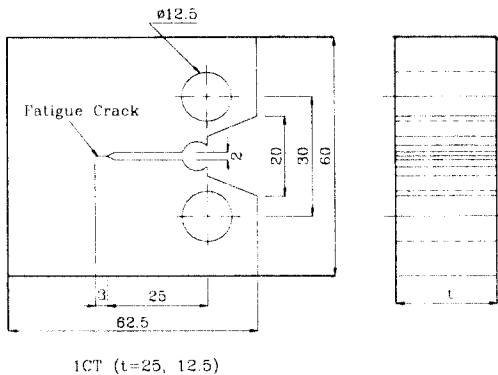
ASTM E813-89에 의한 제하컴플라이언스법의 균열길이는 부하제하 반복의 탄성컴플라이언스를 이용하여 식(3)에 의하여 구하였다.

제하컴플라이언스법의 J적분 계산은 하중과 변위곡선에서 탄성성분과 소성성분으로 나누어 계산한 ASTM E813-89규정에 따라 계산하였다.

4. 해석 및 실험결과 고찰

4.1 실측균열길이와 제하컴플라이언스법에 의한 균열길이의 비교

제하컴플라이언스법에 의해 계산된 최종균열



1CT (t=25, 12.5)

Fig. 4 Geometry and configuration of smooth specimen for fracture toughness test

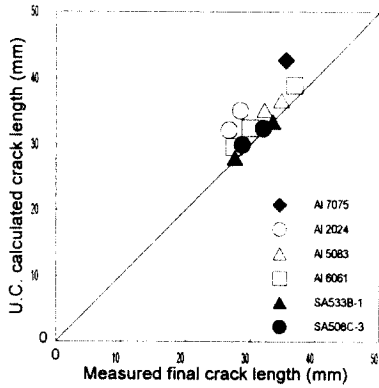


Fig. 5 Comparison of unloading compliance calculation crack length and final measure crack length

길이와 실험 후 파면에서 ASTM 9점법으로 실측한 평균균열길이를 비교한 결과 Fig. 5에 나타내었다. 고강도 알루미늄합금 Al7075와 Al2024는 20%정도의 오차를 가지고 저강도 알루미늄합금 Al5083과 Al6061은 10%이내의 오차로 나타났다. 원자로용 구조용 합금 SA533B-1강과 SA508C-3재는 거의 일치하고 있다. 이것은 연성재 구조용 합금강에서는 부하제하 반복에 의한 탄성컴플라이언스의 측정에 의한 계산균열길이는 실제 파단면의 실측길이와 거의 일치한다는 것을 의미하며, 알루미늄 합금의 경우 고강도일수록 실측길이와 컴플라이언스에 의해 계산된 균열길이의 오차는 저강도 합금에 비해 크다는 것을 의미한다.

4.2 실측균열길이와 Load Ratio 해석에 의한 균열길이의 비교

실측균열길이와 Load Ratio 방법에 의해 계산된 균열길이의 비교결과를 Fig. 6에 표시하였다. Load Ratio 해석에 의해 계산된 균열길이는 실측치의 1% 이내로 잘 일치하고 있다. 이것은 재료의 종류와 경화지수에 관계없이 Load Ratio 해석에 의해서 균열길이를 정확하게 계산할 수 있음을 의미한다. 그러나 제하컴플라이언스법에 의한 균열길이는 재료의 경화지수에 따라 실측치에 비해 매우 높은 오차가 있으므로 Load Ratio 해석

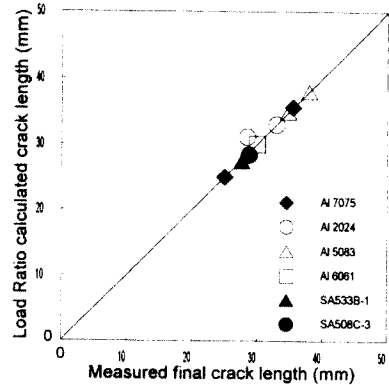


Fig. 6 Comparison of load ratio calculation crack length and final measured crack length

에 의해 계산된 균열길이가 실측치에 더 근접하다는 것을 알 수 있다.

4.3 옴셋기법에 의한 수정 제하컴플라이언스 J-R 곡선

Fig. 7은 SA533B-1강의 J-R곡선을 평가한 것이다. 둔화직선은 ASTM의 이론둔화직선식을 사용하였다. 여기서 옴셋수정하지 않은 것은 ○로 나타내었으며 이때 균열감소길이 최대값 Δa_{err} 는 0.125 mm이며 옴셋수정한 데이터는 ●로 나타내었다. 수정하기 전의 J-R곡선의 지수곡선 $J=558.94\Delta a^{0.43}$ 이며 수정한 J-R곡선의 지수곡선 $J=553.09\Delta a^{0.59}$ 이다.

Fig. 8은 고연성 알루미늄합금인 Al6061재의 제하컴플라이언스법의 결과를 나타내었다. 강재나 고강도 알루미늄합금에 비하여 균열감소현상이 두드러지게 나타났으며 Δa_{err} 는 0.668mm이다. 수정한 J-R곡선의 지수곡선 $J=119.72\Delta a^{0.67}$ 이다.

Fig. 9는 저연성 고강도 알루미늄 합금인 Al7071재를 컴플라이언스법으로 실험한 결과를 나타내었다. Al7071재는 균열감소현상을 나타내지 않고 있다.

Fig. 10역시 저연성 고강도 알루미늄 합금인 Al2024재를 컴플라이언스법으로 실험한 결과를 나타내었다. 균열감소 현상이 약간 나타났으며

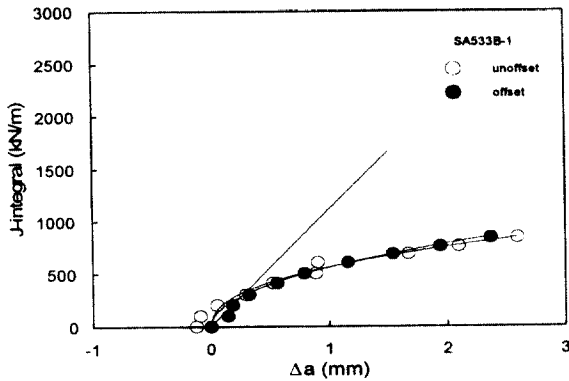


Fig. 7 J-R curves of the unloading compliance method by ASTM E813-81 for SA533B-1

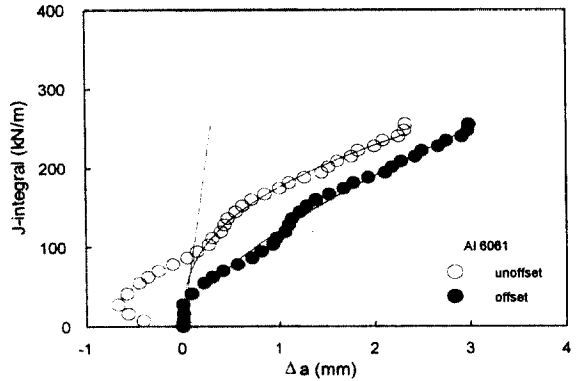


Fig. 8 J-R curves of the unloading compliance method by ASTM E813-81 for Al6061

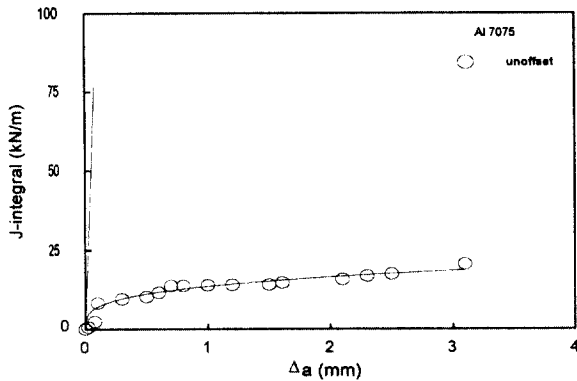


Fig. 9 J-R curves of the unloading compliance method by ASTM E813-81 for Al7075

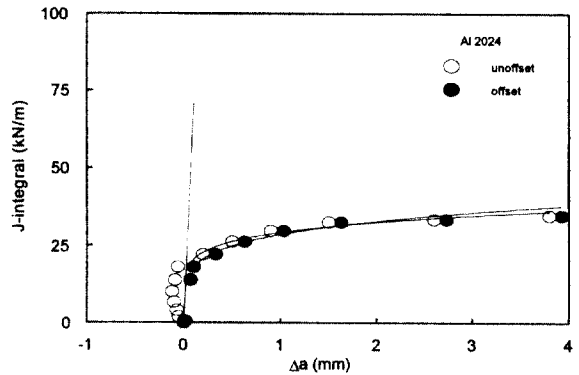


Fig. 10 J-R curves of the unloading compliance method by ASTM E813-81 for Al2024

Table 4 The test results on J-R curve by using unloading compliance method, ASTM E813-89

Material	Experimental J		Modified offset J		Variation (%)	
	C_1	C_2	C_1'	C_2'	ΔC_1	ΔC_2
SA533B-1	578.94	0.43	553.09	0.59	-4.46%	37.21%
SA508C-3	773.39	0.65	650.61	0.87	-15.88%	33.85%
Al6061	175.41	0.38	119.72	0.67	-31.75%	76.32%
Al5083	147.69	0.33	117.24	0.60	-20.62%	81.82%
Al7075	17.48	0.50	-	-	-	-
Al2024	38.25	0.25	37.50	0.30	-1.96%	20.00%

Δa_{err} 는 0.12mm이다. 수정후의 J-R곡선의 지수곡선 $J = 37.50 \Delta a^{0.30}$ 이다.

실험한 결과를 Table 4에 정리하여 표시하였다. 여기서, 실험의 지수곡선과 읍셋수정한 J-R곡선의 지수곡선에서 R곡선의 계수 C_1 과 지수 C_2 를 비교하면 고강도 저연성인 Al7075의 경우 균열감소현상은 나타나지 않으므로 J-R곡선을 수정하지 않고 얻을수 있고 Al2024 경우 수정 전과 수정한 후 R곡선의 계수의 C_1 과 C_1' 의 차이 ΔC_1 은 1.96%이다. 반면 고연성알루미늄합금 Al6061과 Al5083재의 오차는 31.75%와 20.62%로 큰 차이를 나타내고 있다. 원자로 합금강에서는 4.46%, 15.88%로 고연성 알루미늄 합금재 보다 적게 나타났다.

4.4 Load Ratio방법과 제하컴플라이언스법과의 비교

Fig. 11과 Fig. 12는 SA533B-1과 SA508C-3 재의 읍셋수정한 제하컴플라이언스법의 J-R곡선 실험결과와 Load Ratio해석의 결과를 비교표시한 것이다. 여기서 읍셋수정한 제하컴플라이언스법의 결과는 ○표로 표시하고 Load Ratio해석의 결과는 △, □로 표시하였다. Load Ratio 해석의 균열 길이와 J적분계산시 CT시험편의 회전보정을 고려한 E1152-87법을 □로 표시하고 회전보정을 하지 않은 E813-89법의 결과를 △으로 표시하였

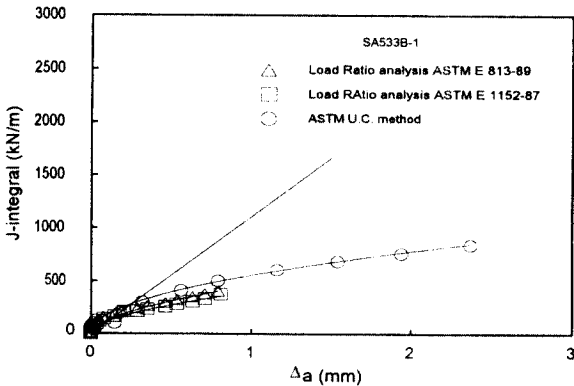


Fig. 11 J-R curves of the unloading compliance and load ratio method by ASTM E813-89, E1152-87 for SA533B-1

다. SA533B-1재의 J-R곡선을 지수곡선으로 정리하면 E1152-87법의 경우 $J = 398.29 \Delta a^{0.55}$ 이고 E813-89법의 $J = 414.66 \Delta a^{0.56}$ 이다. U.C.법의 경우 $J = 553.09 \Delta a^{0.59}$ 이므로 E1152-87규정의 R곡선의 계수 C_1 과 지수 C_2 및 E813-89규정의 R곡선의 계수 C_3 와 지수 C_4 라고 할 때 E1152-87규정과 E813-89규정의 R곡선의 계수 C_1 와 C_3 는 U.C.법의 값보다 38.87%, 33.38% 적게 나타났고, C_2 , C_4 는 7.27%, 5.36% 정도 적게 나타났다. Fig. 12의 SA508C-3재는 E1152-87규정과 E813-89규정의 C_1 , C_3 는 U.C.법 값보다 51.36%, 47.72% 적고, C_2 와 C_4 는 28.85%, 26.09% 적게 나타났다. 이와 같은 고연성재료의 경우 U.C.법의 J값은 Load Ratio

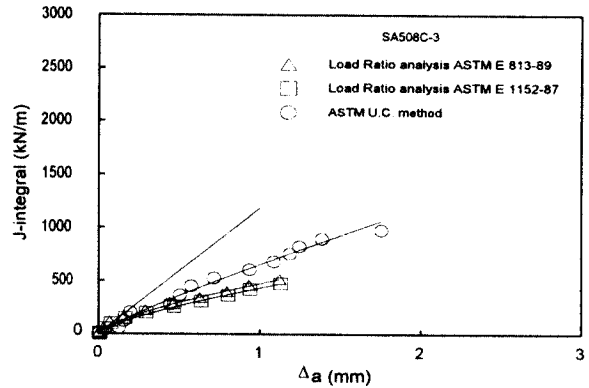


Fig. 12 J-R curves of the unloading compliance and load ratio method by ASTM E813-89, E1152-87 for SA508C-3

해석값보다 매우 크게 나타났다. 회전보정을 한 E1152-87의 C_1' 은 회전보정하지 않은 E813-89의 C_3' 보다 SA533B-1재는 3.9% 적게 나타났으며 SA508C-3재는 2.4%적게 나타났다. 따라서 시험편의 회전보정효과도 있음을 알 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 알루미늄합금중 중강도 고연성재를 비교하기 위해서 Al6061과 Al5083재의 제하컴플라이언스법과 Load Ratio해석에 의한 J-R곡선을 나타내었다. 여기서도 Al6061재의 경우 E1152규정과 E813규정의 C_1' 와 C_3' 는 U.C.

원자로 압력용기강 및 Al 합금재의 J-R곡선평가시 Load Ratio 해석의 유효성 검토

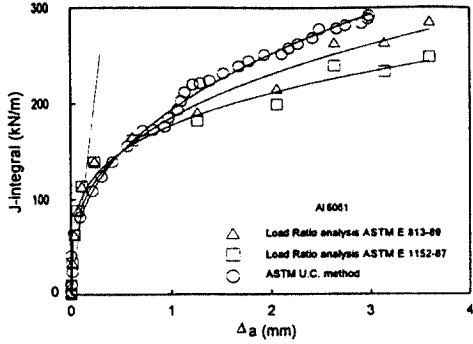


Fig. 13 J-R curves of the unloading compliance and load ratio method by ASTM E813-89, E1152-87 for Al6061

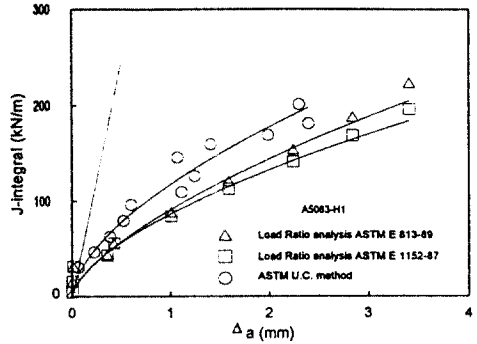


Fig. 14 J-R curves of the unloading compliance and load ratio method by ASTM E813-89, E1152-87 for Al5083

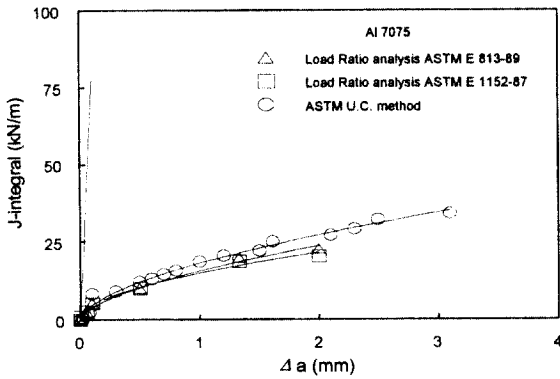


Fig. 15 J-R curves for the unloading compliance and load ratio method by ASTM E813-89, E1152-87 for Al7075

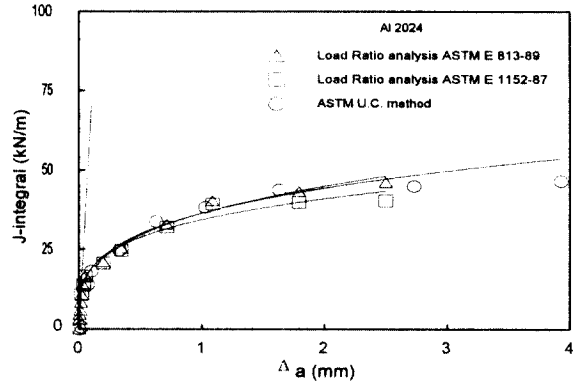


Fig. 16 J-R curves of the unloading compliance and load ratio method by ASTM E813-89, E1152-87 for Al2024

Table 5 The test results on J-R curve by using load ratio method, ASTM E813-89, E1152-87

Material	Modified offset unloading compliance J		Load ratio J				Variation (%)			
			E1152-87		E813-89		E1152-87		E813-89	
	C ₁	C ₂	C ₁ '	C ₂ '	C ₃ '	C ₄ '	ΔC ₁	ΔC ₂	ΔC ₃	ΔC ₄
SA533B-1	553.09	0.59	398.29	0.55	414.66	0.56	-38.87%	-7.27%	-33.38%	-5.36%
SA508C-3	650.61	0.87	429.85	0.63	440.42	0.69	-51.36%	-38.09%	-47.72%	-26.09%
Al6061	119.72	0.67	105.70	0.52	110.20	0.58	-13.26%	-28.85%	-8.64%	-15.52%
Al5083	117.24	0.60	86.22	0.62	90.81	0.66	-35.98%	3.23%	-29.10%	9.09%
Al7075	17.48	0.50	14.76	0.53	15.48	0.60	-18.43%	5.66%	-12.92%	16.67%
Al2024	37.50	0.30	34.00	0.35	36.31	0.39	-10.29%	14.29%	-3.28%	23.08%

법의 값에 비해 13.26%, 8.63% 적게 나타나며 C_2' 와 C_1' 는 28.85%, 15.52% 적게 나타났다. 그리고 A15083재의 경우 C_1' 와 C_3' 는 35.98%, 29.10% 적고, C_2' 와 C_4' 는 3.23%, 19.09% 정도 크게 나타났다. 여기서 알루미늄합금 A16061과 A15083재는 원자로 구조용합금강에 비해 지수곡선의 지수 변화폭이 크게 나타났다.

Fig. 15와 Fig. 16은 고강도 알루미늄합금 A17075와 A12024재의 실험결과와 해석결과를 나타내었다. A17075와 A12024재의 경우, A16061과 A15083재에 비해 Load Ratio 해석의 J값은 U.C. 법 값보다 적게 나타났으며, 회전보정의 영향도 적게 나타났다.

이들 결과를 종합하면 Table 5와 같다. Load Ratio 해석의 경우 시험편의 회전보정을 고려한 E1152-87 법의 R곡선의 계수 C_1' 는 회전보정을 하지 않은 E813-89법의 C_3' 보다 약간 적게 나타나고 재료의 종류에 따라 C_1' 와 C_2' 의 값이 차이가 나므로 재료의 가공경화에 따라 지수곡선의 계수가 변함을 알 수 있다. U.C.법은 단일시험편에서 하중변위곡선의 부하 제하시 컴플라이언스량으로 균열길이를 계산하기 때문에 탄소성영역에 대한 균열길이 보정을 정확하게 할 수 없는 반면 Load Ratio해석은 단일시험편의 하중-변위곡선에서 부하 제하없이 완전소성해석의 개념으로 경화지수를 고려한 균열길이 계산과 실측균열길이를 보정하여 구한 것이므로 Load Ratio해석법은 재료의 경화지수의 변화에 관계없이 사용할 수 있는 반면, U.C.법은 재료연성과 경화지수에 따라 실험결과와 오차가 크며, 실험장비도 매우 복잡하기 때문에 실험상의 오차가 있으므로 신중을 기해야 한다고 사료된다.

5. 결 론

단순 인장하중-변위곡선을 사용한 Load Ratio 방법의 J-R곡선평가시 유효성을 검토하기 위해서 구조용 원자력 압력용기강 SA533B-1, SA508C-3과 알루미늄 합금 A16061, A15083, A17075, A12024재를 사용하여 제하컴플라이언스법의 실험

결과와 Load Ratio해석의 결과를 비교 평가하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) Load Ratio 해석에 의해 계산된 균열길이는 실험후 파단면의 ASTM 9점법에 의해 실측한 평균균열길이와 경화지수가 다른 재료의 종류에 관계없이 거의 유사하였다. 그러나 U.C.법의 균열길이는 실측균열길이에 비해 재료의 종류에 따라 오차가 있음을 알았다.
- 2) 제하컴플라이언스의 초기균열감소현상은 연성재료인 원자로구조용 합금강과 알루미늄합금 A16061과 A15083에서 현저히 나타났으며, 고강도 취성재인 A12024와 A17075에서는 거의 나타나지 않으므로 U.C.법은 재료종류에 따라 옵션법으로 수정하여야 한다.
- 3) Load Ratio해석에 의한 J-R곡선 평가시 CT 시험편의 회전보정을 고려한 E1152-87법의 R곡선의 계수 C_1' 와 지수 C_2' 는 회전보정을 하지 않은 E813-89의 값에 비해 약간 적게 나타나므로 회전보정의 영향이 있음을 알았다.
- 4) Load Ratio 해석에 의한 J-R곡선의 지수곡선의 계수 C_1' 와 C_2' 는 옵션수정한 U.C.법의 값에 비해 고연성재료의 경우는 적으며, 고강도 취성재인 A17075와 A12024재에서는 거의 같았다. U.C.법은 재료의 종류와 장비의 정밀도에 따라 J-R곡선의 계수와 지수의 차이가 크게 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) G.A. Clarke, W.R. Andrews, P.C. Paris and D.W. Schmidt, "Single Specimen Tests for J_{IC} Determination", ASTM STP 601, pp. 27~42, 1976
- 2) Standard Test Method for J_{IC} , ASTM E813-81, 1981, ASTM E813-89, 1989
- 3) 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
- 4) I. Miline and G.G. Chell, "Effect of size

- on the Fracture Criterion", ASTM STP. 668, pp. 358~377, 1979
- 5) 최용식, 석창성, "J-R 곡선에의 균열길이 감소현상에 관한 연구(I)", 대한기계학회논문집, 제16권, 제6호, pp. 1115~1120, 1992
 - 6) V. Kumar, M. D. German and C. F. Shih, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis", EPRI NP-1931, Research Project 1237-1, 1981
 - 7) 윤한기, 차귀준, "Load-Ratio 법에 의한 SA508C-3 및 Al 6061재의 탄소성 파괴저항 곡선 평가", 한국해양공학회지, 제10권, 제2호, pp. 107~112, 1996
 - 8) 차귀준, "Load-Ratio방법에 의한 원자력압력 용기강의 파괴저항곡선 및 탄소성 파괴특성 평가", 동의대학교 대학원 공학박사학위논문, 1996
 - 9) A. Saxena and S. I. Hudak, "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens", Int. Journal of Fracture, Vol. 14, No. 5, pp. 453~467, 1978
 - 10) Standard Test Method for Determining J-R Curve, ASTM E1152-87, 1987