

SA508-3재의 제하컴플라이언스법과 하중비해석을 이용한 파괴저항곡선 평가

임 만 배* · 차 귀 준** · 윤 한 기*** · 안 원 기****
(97년 12월 17일 접수)

J-R Curve Characterization by Load Ratio Analysis and Unloading Compliance Method for SA508 C-3 steel

Man-Bae Lim* · Gee-Jun Cha** · Han-Ki Yoon*** · Won-Ki An****

Key Words : Unloading Compliance Method (제하컴플라이언스법), Load Ratio Analysis (하중비해석), J-R Curve (파괴저항곡선), Load-Displacement Curve(하중-변위선도), Temperature effect (온도영향)

Abstract

The fracture resistance curve is one of most important and design techniques employed in nuclear pressure vessel structures. This study is to evaluate the J-R curve characteristics for the SA508C-3 by the unloading compliance method and load ratio analysis. The effect of strain aging for the exponential correlation of the J-R curve in this metal are investigated at room temperature, 200°C and 300°C. The load ratio analysis method can evaluate the J-R curve by using the simple tension load-displacement curve only without the repeat of the unloading and loading. Therefore, the analysis by the proposed load ratio method has a merit, in comparison with the unloading compliance method, which can measure the crack length without the precision measurement equipment.

1. 서 론

최근 화력발전 설비나 원자력 발전 설비를 구성

하고 있는 재료들은 사용할 때 고온에 장시간 노출되며 노출시간에 따른 조직변화의 가속에 의하여 강도나 연성이 저하된다. 특히 원자로 용기는 고온

* 정회원, 동아대 생산기술연구소

** 종신회원, 동명전문대

*** 종신회원, 동의대학교

**** 동아대학원

에서 장시간 가동하기 때문에 재료의 손상을 검출하여 설비의 수명 및 안정성 확보나 경제적인 운용을 위해서 매우 중요하다. 원자로 압력용기는 노심으로부터 고속 중성자를 받아 취화되며 고온, 고압수를 담고 있기 때문에 교체가 매우 곤란하다. 재료의 안전성 평가로 파괴적인 방법의 하나인 파괴인성 평가는 ASTM E813에 복수시험편법과 제하컴플라이언스법이 규정되어 있다.¹⁾ 이러한 규정에는 여러 개의 시험편이 요구되며, 균열길이의 산출과정이 복잡하고 경제성 및 균열길이 측정 오차의 문제점이 있다. 이러한 방법의 문제점은 파괴인성값으로 생각되는 균열개시점과 균열진전후 균열성장률이 지속되어 균열개시점을 정확히 결정하지 못하기 때문에 신뢰성을 갖는 파괴저항 곡선의 평가로 파괴인성값을 얻는 것이 필수적이다. Kolednik²⁾ 등은 안정균열 성장개시점을 구하는데 균열길이가 너무 큰 데이터를 사용하는 것은 의미가 없고 균열길이의 한계를 1.5mm offset line 내의 데이터가 유용하다고 제안하였으며, Ernst³⁾는 Key-Curve 해석방법으로 하중변위 곡선만으로 J-R곡선평가방법을 제시하였다. Jung⁴⁾ 등은 컴퓨터를 이용하여 하중속도, 시험온도, 시험편형상 등의 영향을 상온에서 250℃까지 J-R곡선으로부터 J_{IC} 실험을 하였다. Joyce⁵⁾ 등은 극저온 -192℃까지 액체질소를 분사시켜 하중-변위곡선으로 J-R곡선을 평가하였으며, Davies⁶⁾ 등은 316스테인레스강을 이용하여 J적분 값을 COD의 양으로 해석하여 균열진전량을 추정하였다. 그러나 이와 같은 연구는 하중변위곡선과 균열선단에서 회전보정 및 소성변형을 고려한 균열길이의 산출로 물리적인 의미에 대한 배경이 부족하고 실제 적용절차가 단순하지 않는 문제점을 가지고 있다. 따라서 Shih⁷⁾ 등은 균열진전량의 문제를 해결하기 위하여 완전소성해석을 통해 치수형상에 미치는 소성변형효과를 고려한 시험편형상계수를 제시하였다. 윤⁸⁾ 등은 알루미늄 5083합금 용접 재를 하중비 해석방법에 의한 파괴저항곡선 평가시 하중의 증감에 따른 가공경화지수의 영향을 받는 것으로 보고하고 있다. 이와 같은 해석의 유용성 검토는 실온에서 실험되어 있으며 원자로 압력용기와 같이 운전시의 온도의 영향을 받는 부재의 경우 실제 사용분위기와 물리적 정량화가

용이한 파괴인성거동을 기초로 재료의 손상을 정확히 평가해야만 고온구조물의 파손 및 파괴를 안전하게 예방할 수 있다. 그러나 고온 파괴 인성시험은 균열개구변위 또는 재료의 손상이 소성변형 부분에서 온도변화에 따른 경화지수값의 차이와 J-R곡선의 기울기에 영향을 주기 때문에 설계시 필요한 최종적인 물성치인 J_{IC} 값이 변화하여 안전성문제를 고려한다면 정확한 해석이 필요하다. 특히 고온 파괴인성거동에서는 역학적 환경 및 재료 등의 변수에 매우 복잡하게 연관되어 있으므로 파괴인성의 J-R곡선 특성을 고려할 경우 상당한 오차를 포함하게 된다. 따라서 파괴역학 분야를 연구하는 많은 연구자들은 균열진전량에 미치는 영향인자와 지배파라미터를 구하는 실험적 방법에서 해석적 방법의 적용가능성에 대한 많은 관심을 기울이고 있다. 그중 제하컴플라이언스법에서 추천하는 해중법을 사용할 경우 균열성장량을 알려면 적당한 시기에 해중하여 그 기울기로부터 균열성장량을 계산해야 되므로 매우 번거롭고 균열길이에 대한 정보가 단속적이기 때문에 가공경화에 따른 물리적 현상을 완전히 파악하기에는 현재의 실험 및 해석수준으로서는 어렵다. 따라서 물리적 의미를 갖는 하중비 해석방법으로 이 문제점을 해결하기 위한 연구들이 최근 활발히 전개되고 있다.^{5,7,8)} 이러한 실험과 해석에 의한 결과를 볼 때 실온하의 재료강도 데이터에 비하여 실제사용 분위기 온도하의 실험결과와 해석결과는 현재 매우 부족한 실정이며 이에 관한 연구의 지속적인 보안이 요구되고 있다.

본 연구는 원자로 구조용강 SA508C-3재의 제하컴플라이언스법과 하중비해석에 의한 균열길이 차이와 재료의 사용 분위기에 따른 하중과 변형률 곡선에서 소성변형에 따른 가공경화 영향을 고려한 하중비해석법에 의한 J-R곡선을 비교 평가하고, 실온, 200℃, 300℃의 온도영향을 고찰하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험편 및 실험장치

본 연구에 사용된 재료는 SA508-C3 단조재이

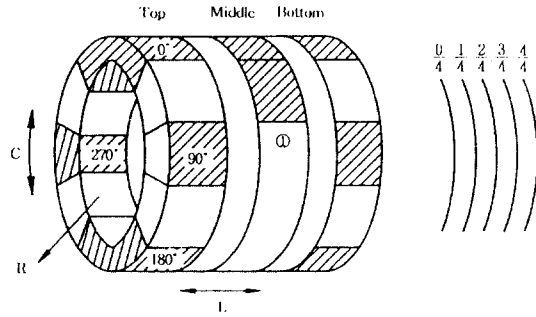
며 재료의 화학적 성분은 Table1과 같고 열처리과정은 Table2에 나타내었다. 단조과정을 거친 원통 Shell의 형태에서 파괴인성시험편과 인장시험편을 채취하였으며, 일차 압력경계면에 있는 압력용기들을 설계할 때는 가상하는 결합의 크기가 용기의 내면으로부터 두께의 1/4위치라는 점과 반경 방향으로 결합이나 과단면이 가장 취약할 것임을 고려하여 C-R방향으로 시험편을 채취하여 Fig. 1에 나타내었다. 인장시험편은 KS 가호 시험편을 사용하였으며, 인장시험은 ASTM E8⁹⁾ 규정에 따라 항복강도 연신율을 측정하여 실험결과를 Table3에 나타내었다. 파괴인성시험편의 형태는 CT형이고 두께가 25.4mm이며, 기계노치를 폭 3mm의 슬로터를 가공하고 균열의 발생을 용이하게 하기 위하여 electric wire machine을 이용하여 폭 0.3mm길이의 노치를 깊이 3mm로 가공하여 Fig. 2에 나타내었다. 인장시험 및 파괴인성시험은 전기 유압서어보 피로시험기 (Instron Model 1331 10tonf)를 사용하였으며, 고온 실험수행은 전기로 (Instron Model 3111)를 피로시험기에 부착하여 노자체의 온도조절장치를 이용하여 노내의 분위기 온도를 유지하기 위하여 약 1시간 이상 유지시켜 실험온도를 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지시켜 실험하였다.

Table. 1 Chemical composition of SA-508 class 3 steel(wt %)

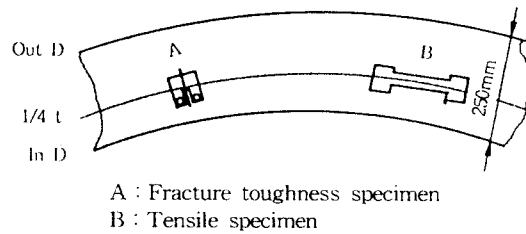
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0.17	1.42	0.004	0.003	0.04	0.98	0.22	0.58	0.003	0.045

Table. 2 Heat treatment of SA-508 class 3 steel

Normalizing	850/925°C × 7 hrs	air cool
Tempering	640/665°C × 6 hrs	20 min: air cool
Quenching	860/895°C × 5 hrs	38 min: water cool
Tempering	650/675°C × 4 hrs	53min: air cool
Stress relief	605/626°C × 45 hrs	56 min: furnace cool

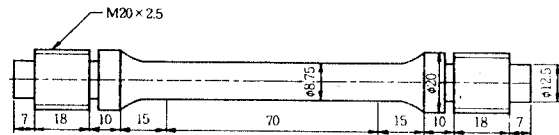


① Fracture toughness, Tensile test

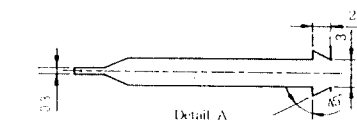
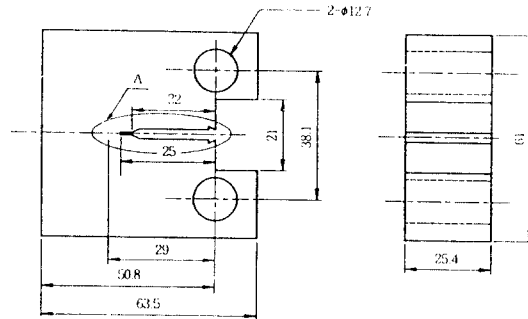


A : Fracture toughness specimen
B : Tensile specimen

Fig. 1 Position of fracture toughness and tensile test specimens from the forging shell



(a) Tensile test specimen



(b) Fracture toughness test specimen

Fig. 2 Geometry and configuration of tensile and fracture toughness test specimens for SA-508 class 3 steel

Table. 3 Mechanical properties of SA-508 class 3 steel

Temp (°C)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (MPa)
RT	587.52	446.45	27.8	205.32
200	549.56	405.45	25.6	194.43
300	570.28	415.23	31.2	190.21

2.2 실험방법

피로하중은 한계하중(Pmax)의 40%이하로 하였으며, 파괴인성시험과 정적부하는 스트로크제어로 적용하였고 부하속도는 0.1mm/min로 일정하게 유지하였다. 균열길이는 충분히 진전될 때까지 부하 후 정지하고 그후 시험편은 피로균열을 정적부하시 최대하중의 약 60%로 시험편을 파단시켰다. 이 파면으로부터 최종점에서 균열의 성장량을 측정하기 위해 시험편을 두께방향으로 8등분한 9점에서 균열길이를 측정하여 계산하였다. 측정된 최종 균열길이를 제하컴플라이언스법에 의한 최종균열길이와 하중비해석을 이용한 최종균열길이를 비교하여 고찰하였으며, J-R곡선평가는 ASTM E813 및 ASTM E1152¹⁰⁾ 시험법 규정에 따라서 상온, 200 °C, 300 °C에서 실험을 수행하였다.

3. 제하컴플라이언스법과 하중비해석방법

3.1 제하컴플라이언스법

제하컴플라이언스법은 ASTM E813 규정에 따라서 Fig. 3과 같이 하중-하중선 변위곡선을 구하기 위하여 부하후 10%제하 하중을 반복기록하여 기울기 변화에 따른 균열길이를 다음과 같이 산출하였다.

$$a/W = 1.00196 - 4.06319u_{LL} - 11.242u_{LL}^2 - 106.43u_{LL}^3 + 464.335u_{LL}^4 - 650.677u_{LL}^5 \quad (1)$$

$$f(a_0/W) = \frac{(2 + a_0/W)0.886 + 4.64(a_0/W) - 13.32(a_0/W)^2 + 14.72(a_0/W)^3 - 5.6(a_0/W)}{(1 - a_0/W)^{3/2}} \quad (6)$$

$$u_{LL} = 1/[(BEC_C)^{1/2} + 1] \quad (2)$$

CT시험편에서 큰 변형이 일어날 때에는 회전보정을 하여 정확한 균열길이를 평가할 필요가 있으며, 다음과 같이 컴플라이언스를 보정하였다.

$$C_C = C_m / [((H/R) \sin \theta - \cos \theta) ((D/H) \sin \theta - \cos \theta)] \quad (3)$$

C_m 은 측정된 시험편의 탄성컴플라이언스, H 은 하중점의 초기 스패 1/2, R 은 균열중심선의 회전반경 $(W/a)/2$, D 는 변위 측정 점간의 초기 거리의 1/2 θ 는 회전각 $\sin^{-1}[(d_m/2 + D)/(D^2 + R^2)] \tan^{-1}(D/R)$, d_m 은 전체 측정된 하중선의 변위이다.

이와 같이 보정한 컴플라이언스를 식(2)에 대입하여 수정된 U_{LL} 값으로 식(1)에 대입하여 균열길이를 평가하였다.

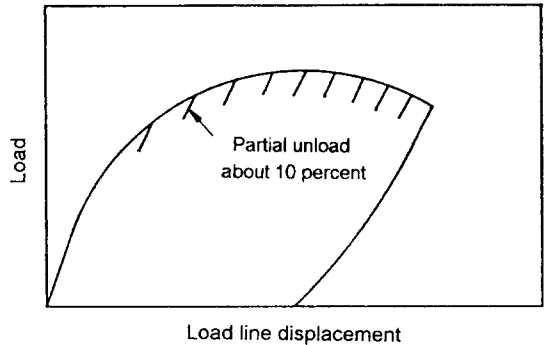


Fig. 3 Load-load line displacement curve

J적분계산은 탄성과 소성성분으로 구분하여 탄성성분은

$$J_{el} = \frac{[K^2](1 - \nu^2)}{E} \quad (4)$$

$$K = [P/(BB_N W)^{1/2}] f(a_0/W) \quad (5)$$

식(4)에서 대입하여 구한다.

J 적분의 소성성분 J_{Pl} 은

$$J_{Pl} = \frac{\eta A_{Pl}}{B_N b_0} \quad (7)$$

A_{Pl} 은 면적, B_N 은 시험편의 실제 두께, η 는 $2 + 0.522b_0/W$, b_0 는 시험편의 리가멘트 ($W - a_0$) 이며, 탄성성분과 소성성분의 J적분 값은 다음과 같이 결정한다.

$$J = J_{el} + J_p \quad (8)$$

3.2 하중비 해석방법

인성과 연성을 가진 재료의 파괴인성시험시 하중과 변위곡선은 탄성변형과 소성변형을 수반하게 되며 소성변형을 갖는 영역은 가공경화 현상을 보이게 된다. 가공경화를 보이는 재료에서 균열진전은 탄성변형을 갖는 구간과 최대하중점사이의 임의의 점에서 시작됨을 알 수 있다. 최대하중점을 지나면 균열의 진전으로 인하여 부하하중에 대한 단면적의 감소를 가지기 때문에 실제 시험편에 부하 되는 총하중이 감소하며, 하중을 받는 부분에서 단위면적당 부하 되는 하중은 계속 증가됨을 알 수 있다. 파괴인성시험편의 경우 리가멘트부분에서 지탱되는 하중은 일반적으로 급함하중을 받는다. 이 부분에 대하여 Shih⁷⁾ 등은 탄성-완전소성해석 결과를 기초로 한 임계하중식을 해석하였으며, Kaiser¹¹⁾ 등은 이와 같은 임계하중식을 이용하여 소성성분 (J_{pl})을 산출함에 있어서 J-R곡선 데이터가 유효한 한계를 가지는 최대균열길이를 나타내어 찢김계수 T_{max} 를 결정하였으며, Ingham¹²⁾ 등은 연성균열진전에 따른 소성변형의 시간의존성에 대한 보고가 있다. 따라서 임계하중식으로 균열길이에 따른 하중 변화를 보정할 수 있다. 특히 CT시험편의 경우 평면변형률 조건하에서 임계하중 P_0 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_0 = 1.455\sigma_{ys}B\beta b \quad (9)$$

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

여기서 σ_{ys} 는 항복응력, B는 시험편두께, a는 균

열길이, b는 리가멘트길이이다.

실제 시험편에 작용하는 하중을 임계하중 P_0 로 나타낼 수 있는 (9)식으로 보정하면 순수하게 하중 지탱부위에서 발생하는 가공경화 정도를 유추할 수 있다. 제하컴플라이언스법으로 측정된 균열길이는 (9)식에 대입하여 그 임계하중값으로 실제하중을 보정할 수 있으며, Fig. 4는 실제하중을 이용하여 하중-변위곡선을 나타내었다. 가공경화효과를 고려하여 하중-변위-균열길이 사이의 관계를 고찰하여 보면 초기의 균열길이가 a_0 이고 균열진전을 구속한 가상재료는 변위에 따라 가공경화의 하중이 OA선을 따라 증가하며 균열진전이 일어나는 실제재료는 초기에 OA를 따라 진전을 하다가 균열진전이 시작되는 점S에서 하중-변위곡선 OA'로 분리된다. OP'까지의 물리적 의미를 다음과 같이 분리할 수 있다고 가정한다. 우선 균열을 정리시킨 상태에서 변위를 증가시키면 P' 점은 P점에 이르고 이후 변위를 고정시키고 균열을 Δa 만큼 증가시키면 탄성하중이 발생하여 시험편에 걸리는 하중은 P'로 줄어든다. 그러나 P와 P'에서 소성변형량은 동일하므로 P'에서의 탄성컴플라이언스는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C = C_0 \times \frac{P}{P'} \quad (10)$$

윗 식에서 구한 탄성컴플라이언스는 균열길이와 직접적인 상관관계를 가지기 때문에 균열길이 ASTM E813 규정에 따른 (1)식과 (2)식에 대입하여 산출하였다.

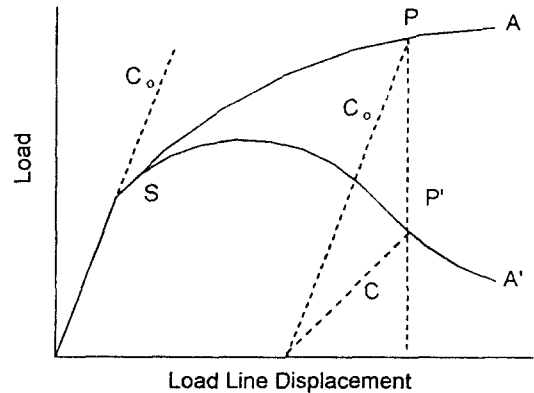


Fig. 4 Concept of load ratio method for direct determination of the elastic compliance

4. 실험결과 고찰

4.1 균열길이 비교

4.1.1 제하컴플라이언스법 균열길이와 실측균열 길이 비교

제하컴플라이언스법의 해중선의 기울기로 계산된 최종균열길이와 탄소성과파괴인성시험후 파단면에서 나타나는 균열진전량을 비교하였다. 파단면에서 실측한 균열길이의 산출은 ASTM E813-89법에서 규정된 9점측정후 8점 평균 균열길이이다.

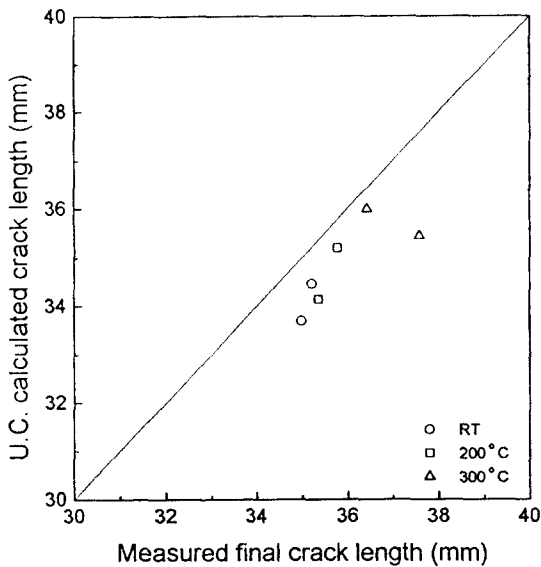


Fig. 5 Comparison of calculated crack lengths with measured ones for final crack after fracture toughness tests (UC)

Fig. 5는 두방법에 의한 균열길이 검정을 위하여 비교하였다. 제하컴플라이언스법에 의한 균열길이는 실측한 균열길이 보다 적게 나타났으며, 온도변화에 따른 균열길이의 차이는 있지만 제하컴플라이언스법이 약간 적게 나타났다. 이러한 원인은 균열길이측정시 하중을 제거할 때에 하중과 변위곡선의 초기 부분에서 일어나는 하중의 영향을 받아 균열전단에 소성역에 압축응력이 발생하여 이 응력에 의하여 균열단형현상이 발생하고 결과적으로 균열길이를 감소시키는 원인으로 생각된다. 따라서

제하컴플라이언스법에 의한 균열길이량은 이 균열단형의 양만큼 균열길이를 보정할 필요가 있다고 생각된다. 또한 각 온도에서 실험된 데이터도 실측 균열길이가 약간 크게 나타났음을 알 수 있다.

4.1.2 하중비해석 균열길이와 실측균열길이 비교

하중비 해석에 의한 균열길이는 앞서 기술한 바와 같이 해석의 개념을 재료가 가지는 물성치중 하나인 가공경화지수를 이용하여 실제 하중을 보정할 수 있다는 관점에서 보다 더 정확한 균열길이를 유추할 수 있을 것으로 생각되며 실측균열길이와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 각 온도에 대한 이 두방법을 비교한 결과 하중비해석에 의한 균열길이는 실측균열길이와 유사한 값을 얻을 수 있었다. 따라서 실측균열길이를 비교할 때 제하컴플라이언스법에 의한 균열길이 산출보다 하중비해석에 의한 균열길이 산출이 정확한 것으로 사료된다. 그 이유는 가공경화의 효과를 나타내는 물리적 이해를 완전소성해석개념으로 반복제하없이 단순한 하중변위곡선만을 이용하여 실험후 구하여진 하중변위곡선상의 임의의 위치에서 탄성컴플라이언스는 리가멘트에 걸리는 임계하중과 실제하중의 비율로서 계산되어 균열길이를 산출하였기 때문으로 생각된다.

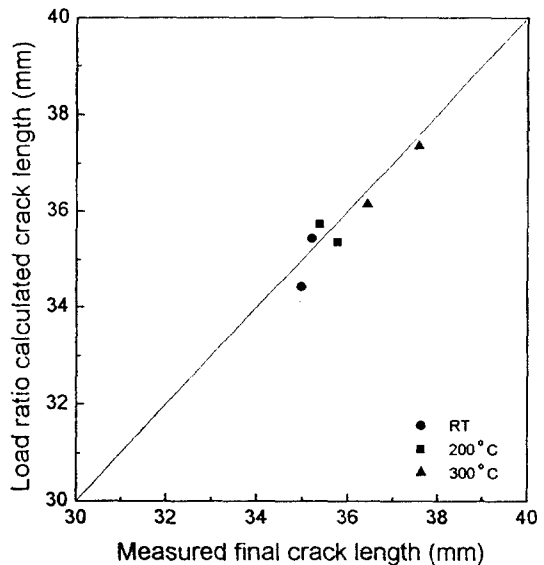


Fig. 6 Comparison of calculated crack lengths with measured ones for final crack after fracture toughness tests (LR)

4.2 제하컴플라이언스법에 의한 J-R곡선 평가

Fig. 7은 제하컴플라이언스법을 사용하여 온도변화에 따른 $J-\Delta a$ 를 나타내었으며, 온도변화에 관계없이 균열길이 감소현상이 나타남을 볼 수가 있고, 감소현상의 양은 온도에 따라 약간 다르게 나타났다. 상온의 경우 균열감소길이가 $\Delta a_{err}=0.1274\text{mm}$, 200°C 의 경우 $\Delta a_{err}=0.140\text{mm}$, 300°C 의 경우 $\Delta a_{err}=0.1319\text{mm}$ 로 균열길이가 감소하였다. 특히 연성 및 인성이 큰 재료는 제하컴플라이언스법에 의한 J_{IC} 평가 및 J-R곡선 해석을 할 때 균열길이 감소 현상이 존재함을 볼 수 있는데 Voss¹³⁾ 등은 균열길이 감소현상을 클레비스(clevis)와 핀(pin)에 의한 실험상의 문제점으로 보았으며, 최¹⁴⁾ 등은 하중을 제하할 때 균열선단에 압축응력이 작용되어 균열단합현상이 일어나 실제로 제거한 하중보다 적은 양의 하중변위가 발생한다고 보고하였다. Purtscher¹⁵⁾ 등은 하중초기에 발생하는 균열길이는 둔화에 의한 균열성장의 효과를 무시하고 있다는 점과 균열길이 감소현상이 둔화거동의 영향으로 인하여 발생한다고 보고 있다. 따라서 이러한 현상을 보정하기 위하여 본 연구에서는 균열선단에 집중되는 소성변형으로 인하여 하중을 가한 초기에 균열선단에서 둔화현상이 발생한다는데 착안하여 둔화에 의한 균열성장의 효과는 CTOD의 약 반으로 생각하고 굽힘하중을 받은 시험편의 경우 Saxena¹⁶⁾ 등의 해석에 의한 회전힌지를 고려하여 균열길이를 산출하였다. Hutchinson과 Paris¹⁷⁾ 등이 주장한 J지배균열성장이 만족하는 경우 균열이 성장할 때 J값의 평가는 ASTM E813에서 제안한 식을 사용하면 하중-변위 곡선하의 면적이 과대평가되어 J값을 과대평가하게 된다는 이론을 고려할 때 제하컴플라이언스법의 J-R곡선이 약간 과대평가됨을 지적하였다. J_{IC} 결정은 J- Δa 곡선을 외삽하여 균열의 시작점을 찾는데 목적이 있기 때문에 과대평가량을 수정하지 않아도 무관하지만 J-R곡선을 평가하기 위해서는 균열의 진전에 따른 J의 과대평가량을 수정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 이를 수정하여 제안된 ASTM E1152¹⁰⁾의 방법과 비교하였다. 균열감소현상의 처리법은 최대균열감소량 지점에서 둔화직선까지의 균열길이를 보정함으로써 처리할 수 있다. 따라서 균열감소현상을 처

리하지 않으면 J-R곡선 평가에 문제점이 있음을 알 수 있었다.

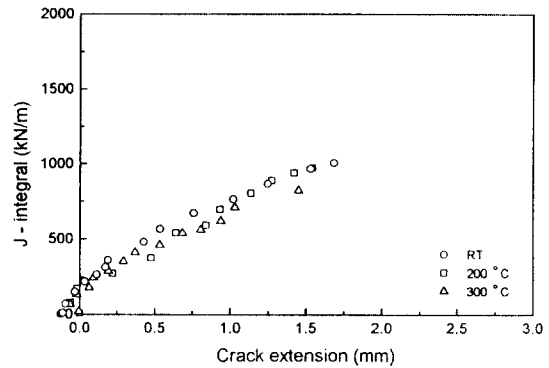


Fig. 7 J-R curve of unoffset data by unloading compliance method

Fig. 8은 균열감소현상처리법 즉 Voss가 제안한 윗셋법을 이용하여 균열길이를 보정한후 지수근사식으로 J-R곡선을 나타내었다. 일반적으로 지수근사식은 $J = C_1 \Delta a^{C_2}$ 로 표현되며, 본 연구에서는 온도가 증가함에 따라 C_1 , C_2 의 정량적인 값을 비교하였으며 C_1 , C_2 의 의미는 J-R곡선 평가에서 곡선의 기울기를 나타내며, 궁극적으로 J_{IC} 의 평가에 밀접한 관계를 가지고 있다. 이와 같이 평가한 C_1 , C_2 값은 상온의 경우 710.874, 0.6069이며 200°C 의 경우 667.955, 0.7586이고 실제 사용온도범위를 갖는 300°C 의 경우 600.307, 0.7241로 나타났다. 특히 J-R곡선의 기울기 경향을 살펴보면 상온과 200°C 의 경우는 유사함을 나타내며, 300°C 의 경우 균열길이 증가와 더불어 많은 차이점을 보였다. 이러한 차이점은 실험온도의 영향 때문에 기인한 것으로 생각되며, 200°C 와 300°C 의 경우 하중제하시 재료의 연성이 증가하여 하중-하중변위곡선에서 하중제하를 반복하면 하중은 증가하지 않고 변위량이 증가하여 변형시효¹⁸⁾의 현상이 일어났으며 온도가 증가함에 따라 더욱더 뚜렷하게 나타났다. 이와 같이 하중-변위곡선은 온도에 영향을 받아 가공경화지수와 변형시효에 의한 실험적인 오차가 발생하기 때문에 설계자료의 기초가 되는 J-R곡선 평가시 사용분위기에 대한 집중적인 연구가 필요하고 생각된다.

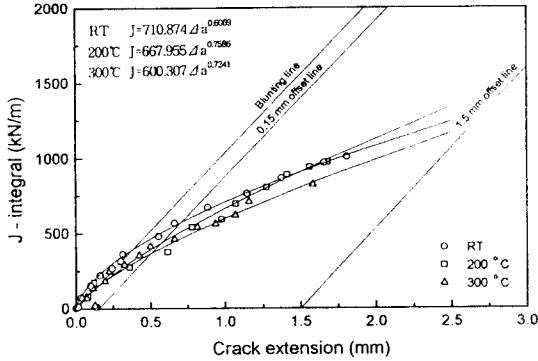


Fig. 8 J-R curve of modified offset technique by unloading compliance method

4-3 하중비 해석에 의한 J-R곡선

Fig. 9는 하중비 해석에 의해 구하여진 J값과 균열길이의 관계를 나타내었으며, 하중비해석은 균열길이 감소현상이 나타나지 않았다. 따라서 균열길이 보정이 필요없이 평가할 수 있으며, 실험온도에 따른 J-R곡선의 계수값 C_1 , C_2 는 상온일 때 620.689, 0.5308 이며, 200 °C의 경우 540.33, 0.6690, 300 °C의 경우 488.68, 0.6454이었다. 온도 증가에 따른 J-R곡선의 계수를 비교하면 상온을 기준 하여 200 °C일 때 12.95% 감소, 26.04% 증가 하였으며, 300 °C 일 때 21.27%감소, 21.59% 증가 하였다. 따라서 J-R곡선의 지수 식은 $J=620.689\Delta a^{0.5308}$, $J=540.33\Delta a^{0.6690}$, $J=488.68\Delta a^{0.6454}$ 로 나타났다. 이러한 기울기 변화는 하중과 변위곡선상에서 온도의 증가에 따라 가공경화지수가 다르게 나타

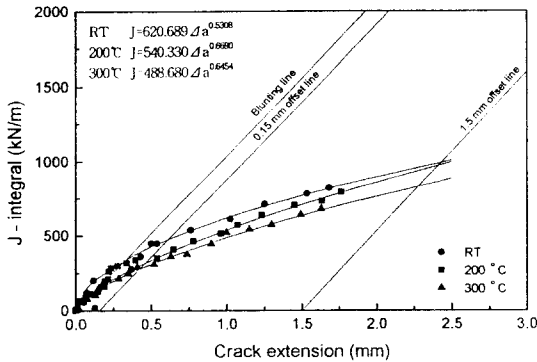


Fig. 9 J-R curve by load ratio analysis

남을 반증할 수 있다. 즉 하중비 해석에 의한 정량적인 파괴인성치를 결정하는데 시험편의 형상, 용접조건 등을 고려하여 신뢰성을 부여한다면 실험을 위한 많은 장비 및 실험적 경험을 줄여 근사적인 방법으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 방사선시험편의 실험과 같이 시험편의 채취에 한정된 경우 많은 잇점이 있을 것으로 생각된다.

4-4 제하컴플라이언스법과 하중비 해석의 J-R곡선비교

Fig. 10은 상온에 대한 제하컴플라이언스법과 하중비해석의 J-R곡선을 비교하여 나타내었다. 제하컴플라이언스법은 ASTM E813규정에 따라 균열길이가 J적분값을 계산하였으며, 유효 데이터를 이용하여 지수근사식으로 나타낸 J-R곡선이다. 하중비해석은 하중-변위선상에서 적당한 간격의 기준점들을 선택하여 초기균열길이에 대한 이론적 컴플라이언스와 (10)식을 사용하여 점진적인 컴플라이언스변화를 계산한 균열길이가 J적분량을 계산하여 J-R곡선을 나타내었다. 특히 초기균열계산시 하중초기에 발생하는 균열선단에는 집중되는 소성 변형으로 인하여 하중을 가한 초기에 균열선단에 둔화현상이 발생된다. 이때 둔화각도는 재료의 특징에 따라 약간의 차이를 보이나 약 45° 로 생각하는 것이 일반적이며, 둔화에 의한 균열성장의 효과

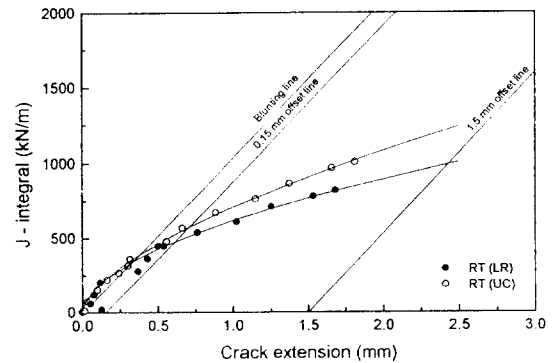


Fig. 10 Relation of J-R curve on the unloading compliance method and load ratio analysis at room temperature

는 CTOD의 약 반으로 생각할 수 있다. 굽힘하중이 지배적인 파괴인성 시험편의 경우 이론적인 CTOD는 Saxena¹⁵⁾의 해석에 의한 회전보정을 고려함으로써 하중변위로부터 계산될 수 있다.

제하컴플라이언스법의 J-R곡선과 하중비 해석에 의한 J-R곡선의 지수근사식은 $J=710.874 \Delta a^{0.6069}$, $J=620.689 \Delta a^{0.5308}$ 정리되며, J-R곡선 파라메타들을 정량적으로 분석하여 J-R곡선의 계수 C_1 과 C_2 를 비교하면 하중비해석에의 경우 제하컴플라이언스법보다 12.69%, 12.54% 감소하였다. Fig. 11은 200 °C의 J-R곡선을 나타내었으며 J-R곡선의 지수근사식은 $J=667.955 \Delta a^{0.7586}$, $J=540.33 \Delta a^{0.6690}$ 로 정리되었다. 계수 C_1 과 C_2 를 정리하면 하중비 해석의 경우가 제하컴플라이언스법 보다 19.11% 감소, 11.81% 감소됨을 알 수 있었다.

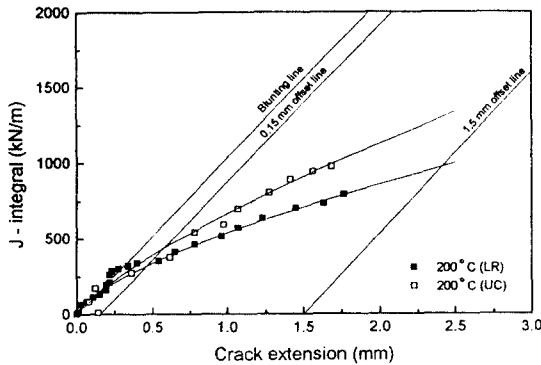


Fig. 11 Relation of J-R curve on the unloading compliance method and load ratio analysis at 200°C

Fig. 12는 300°C의 J-R곡선이며 지수근사식은 $J=600.307 \Delta a^{0.7241}$, $J=488.68 \Delta a^{0.6454}$ 로 표시되고 하중비해석의 경우 계수 C_1 과 C_2 값은 18.6% 감소, 10.87% 감소하였다. 각 온도에 대한 J-R곡선의 계수 C_1 , C_2 를 비교한 결과 하중비해석에 의한 J-R곡선의 정량적인 값이 다르게 나타났다. 이러한 원인은 전술된 바와 같이 균열길이 계산의 차이점이라고 생각되며, 제하컴플라이언스법인 경우 하중비해석보다 다르게 평가되는 원인은 부하 및 제하시 압축응력, 핀 정렬불량등에 의한 균열길이 감소현상이 일어나기 때문에 정확한 균열길이 측정이 어렵

다. 따라서 균열길이 감소현상은 오프셋법을 이용하여 균열길이를 보정할 수 있지만 초기균열부분의 문제를 탄소성영역에 대한 전체적인 보정이기 때문에 정확한 보정은 제공될 수 없기 때문에 생각된다. 그러나 하중비 해석은 부하 및 제하가 필요치 않는 하중-변위곡선상의 임의의 위치에서 탄성컴플라이언스는 리가멘트에 걸리는 하중비 (실제하중/임계하중)로부터 계산되며 현재의 균열길이를 예측할 수 있고 하중-변위곡선을 완전 소성 해석의 개념을 바탕으로 재료의 경화지수를 고려하여 균열길이를 산출하였다. 따라서 균열길이가 J-R곡선평가에 지배적인 영향인자임을 알 수 있으며, 제하컴플라이언스법에 비하여 하중비 해석이 근사적 해석방법으로써 물리적인 의미를 갖는다고 할 수 있다.

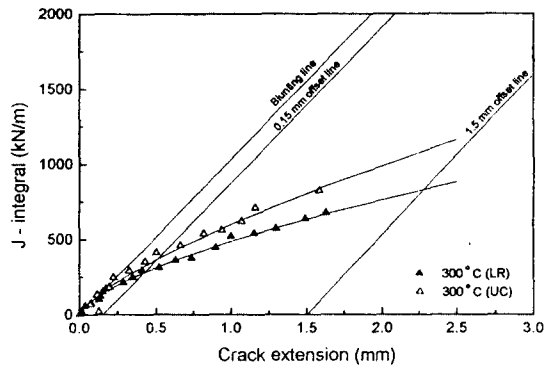


Fig. 12 Relation of J-R curve on the unloading compliance method and load ratio analysis at 300°C

Table. 4 Comparison of the J-R Curve test results by the unloading compliance method and load ratio analyzed

Temp (°C)	Analysis method	$J = C_1 (\Delta a)^{C_2}$		Error of C_1	Error of C_2
		C_1 (kN/m)	C_2		
RT	ASTM(UC)	710.874	0.6069	12.69%	12.54%
	Load ratio	620.689	0.5308		
200	ASTM(UC)	667.955	0.7586	19.11%	11.81%
	Load ratio	540.33	0.6690		
300	ASTM(UC)	600.307	0.7241	18.60%	10.87%
	Load ratio	488.68	0.6454		

Fig. 13은 각 온도에 대한 제하컴플라이언스법과 하중비 해석에 관한 J-R곡선 결과를 비교하였다. 각각의 J-R곡선이 제하컴플라이언스법의 결과와 비교할 때 만족할 만한 정밀도를 가짐을 보여주고 있으며, 균열진전에 관한 임계 J_{IC} 또는 J_Q 값에서 각 온도에 대한 시험편에서 비교적 큰 오차는 나타나지 않았다. Table3은 제하컴플라이언스법과 하중비해석에 의한 J-R곡선의 파라메타들을 정량적으로 분석하여 비교하였고, 온도의 증가와 함께 J-R곡선의 계수 값이 감소되었으며, 상온과 200℃는 온도의 영향이 약간 있지만 300℃에서는 가공경화와 변형시효에 대한 영향 때문에 균열길이와 J적분값이 차이가 났으며, 온도의 증가는 인장시소성변형량을 증가시키고 하중 값에 대한 변형량이 상대적으로 크게 일어나기 때문에 J_{IC} 및 J_Q 값에 결정적인 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 ASTM의 파괴인성시험법의 채택을 위한 round robin test¹⁹⁾의 오차범위가 $\pm 13\%$ 이었음을 고려할 때 제안된 해석방법의 결과는 유용성을 갖는 것으로 볼 수 있다. 따라서 최근 대형 구조물의 탄소성 파괴역학 해석법에서는 J_{IC} 값보다 J-R곡선 자체를 이용하는 경향이 있다. 연성파괴거동을 근사적으로 모사 하는 경우 하중비해석에 의한 J-R곡선 평가가 유용하게 적용시킬 수 있을 것이라 생각된다.

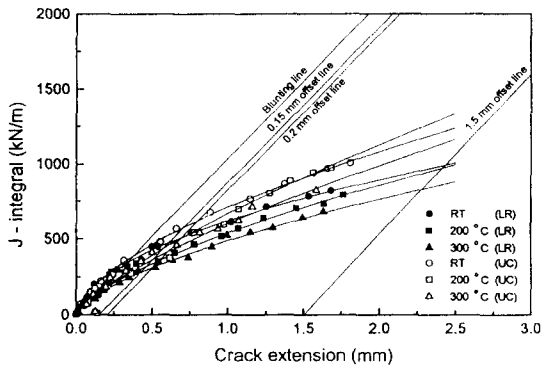


Fig. 13 Relation of J-R curve on the unloading compliance method and load ratio analysis at room temperature, 200°C, 300°C

5. 결론

원자로 압력용기 강을 사용하여 상온, 200℃,

300℃ 온도 분위기에서 제하컴플라이언스법과 하중비해석에 의한 J-R곡선을 비교평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실측 균열길이에 대한 제하컴플라이언스법의 균열길이는 약간 적게 나타났으며, 하중비 해석에 의한 균열길이는 거의 유사하였다. 제하컴플라이언스법의 균열길이 감소량은 상온의 경우 0.1274mm, 200℃의 경우 0.140mm, 300℃의 경우 0.1319mm 이었다.
2. 변위에 따른 하중의 변화가 균열의 성장 및 재료의 소성변형에 의한 가공경화효과를 나타내는 물리적인 이해를 바탕으로 할 때 200℃, 300℃에서 하중비 해석에 의한 J-R곡선은 제하컴플라이언스법의 실험결과에 비해 과소평가 되었다.
3. 하중비해석에 의한 SA508C-3재의 J-R곡선 평가시 200℃, 300℃에서 균열측정 장비없이 한개 시험편의 하중-변위곡선 시험으로 하중비해석에 의해 균열길이를 예측할 수 있었다.
4. 각 온도에서 제하컴플라이언스법과 하중비 해석에 대한 지수근사식의 계수값을 비교하면 하중비 해석에 의한 지수근사식 C_1 , C_2 는 실온에서 12.69%, 12.54% 감소 하였고 200℃에서 19.11%, 11.81% 감소 하였으며, 300℃의 경우 18.6%, 10.87% 감소하였다.

후 기

본 연구중 실험적 연구에 도움을 주신 오세욱 교수님께 감사드리며, 하중비해석 프로그램에 도움을 준 한국에너지 연구소 이봉상 선임연구원께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of fracture Toughness, ASTM E 813-89, 1994
- 2) O.Kolednik and H.P.Stuwe, "A proposal for Estimating the Slop of the Blunting Curve", International Journal of Fracture, Vol.33, pp. 63-66, 1986
- 3) H.Ernst, P.C.Paris, M.Rossow and J.W.

- Hutchinson, "Analysis of Load-Displacement Relationship to Determine J-R Curve and Tearing Instability Material properties", ASTM STP 677, pp. 581-599, 1979
- 4) Y.H.Jung, K.R.Narendrnath, P.S.Godavarti and K.L.Murty, "A personal Computer Based System to Evaluate J-Integral by a single Specimen unloading Compliance Method-I Methodology", Engineering Fracture Mechanics Vol.29, No.1, pp. 1-18, 1988
 - 5) J.A.Joyce, H.Ernst and P.C.Paris, "Direct Evaluation of J-Resistance Curves from Load Displacement Record", ASTM STP 700, pp. 222-226, 1980
 - 6) Pauline H.Davies, "An Elastic-Plastic Fracture Mechanics Study of Crack Initiation in 316 Stainless Steel", ASTM STP 803, pp. 611-631, 1983
 - 7) C.F.Shih, Virendra Kumar, and Marjorie D.German, "Studies on the Failure Assessment Diagram using the Estimation Method and J-Controlled Crak Growth Approach",ASTM STP 803,pp. 239-261, 1983
 - 8) 윤환기, 김연겸, "Load Ratio 해석에 의한 알루미늄 5083합금 용접부의 J-R 곡선평가", 대한용접학회지, 제15권, 제4호, 1997
 - 9) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ASTM E 8, 1994
 - 10) Standard Test Method for Determining J-R curves ASTM E 1152-87, 1994
 - 11) Sten Kaiser and A.Janne Carlsson, "Studies of Different Criteria for Crack growth Instability Ductile Materials", ASTM STP 803, pp. 158-79
 - 12) Thrence Ingham and Edward Morland, "Influence of Time-Dependent Plasticity on Elastic-Plastic Fracture Toughness", ASTM STP 803, pp. 721-746, 1983
 - 13) 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
 - 14) 최용식,석창성, "J-R곡선에 의한 균열길이 감소현상에 관한 연구(1)", 대한 기계학회논문집,제16권,제6호, pp1115-1120, 1992
 - 15) P.T.Purtscher, "Absence of stretch Zone in Austenite Stainless Steels Fracture at Cryogenic Temperature", JTEVA, Vol.15, No.5, pp. 296-298, 1987
 - 16) A. Saxena and S.I.Hudak, Int. Journal of Fracture, Vol.14, No.5, pp. 453-467, 1978
 - 17) J.W.Hutchinsom and P.C.Paris, "Stability Analysis of J-controlled Crack Growth", Elastic-Plastic Fracture, ASTM STP 668, pp. 37-64, 1979
 - 18) Marie T. Miglin, W. Alan Van Der Sluys, Robert J. Futato, and Henry A. Domian, "Effect of Strain Aging in the Unloading Compliance J Test", ASTM STP 856, pp. 150-165, 1985
 - 19) Hiser. A. L. and Loss. F. J., "Alternative Displacement Procedures for J-R Curve Determination", ASTM STP 856, pp. 263-277, 1985