

원자로 냉각재배관 엘보우 및 서포트 스킷트용 SA516-Gr.70 강판의 파괴저항특성

손종동[†] · 임만배

동명대학교 기계공학과

(2006. 4. 5. 접수 / 2006. 7. 11. 채택)

Fracture Resistance Characteristics of SA516-Gr.70 Steel Plate for RCS Piping Elbow and Support Skirt

Jong-Dong Son[†] · Man-Bae Lim

Department of Mechanical Engineering, Tong Myong University

(Received April 5, 2006 / Accepted July 11, 2006)

Abstract : The evaluation of elastic-plastic fracture characteristic was investigated in ferrite steel SA 516- Gr70 used for reactor coolant piping elbow and support skirt of pressure vessels. This paper describes the effect of temperature on J-R curve characteristic of this material. The elastic-plastic fracture mechanics parameter J is obtained with unloading compliance method. The test method were analyzed according to ASTM E 813-89 and E 1152-89. Unloading compliance J_{IC} tests were performed on 1 CT specimens at varied temperatures from 25°C to about 400°C using a high temperature extensometer. At all temperature, valid J_{IC} measurements could be made and J_{IC} decreased with increasing temperature. SEM fractography schematically illustrates microvoid initiation, growth and coalescence at the tip of a pre-existing crack.

Key Words : fracture resistance, elastic-plastic fracture RCS piping elbow, J-integral, fractured surface, crack length, single specimen unloading compliance method

1. 서 론

원자력발전소의 배관계통에 쓰이는 재료는 높은 파괴저항치가 요구되어지고 있다. 특히 원자로 가동 중에 중성자 조사를 받기 때문에 재료의 기계적 성질중 강도와 경도가 증가하여 파괴인성이 저하하는 특징을 가지고 있다. 파괴인성실험은 소재의 수명에 측에 매우 중요한 파라메타 일 뿐만 아니라 원자로 가동 수명에 필요한 물성치 중 하나이다. 또한 높은 에너지의 중성자에 조사된 시험편을 실험하는 데는 위험요소(hot cell 원격조정기 시험)와 경비가 많이 소요되기 때문에 조사전 시험을 통하여 신뢰성 있는 baseline data 및 평가기술을 확보하여 그 결과를 기준으로 가동환경(중성자조사, 온도)에 따른 재료의 취화화를 평가하는 것이 필요하다¹⁾. 특히 원자력발

전에 사용되는 냉각재배관 엘보우부품 및 서포트스킷트 부품은 고온의 환경에서 사용되어지고 있으며 이러한 부품에 결함이 발생하였을 때 설비의 건전성과 안전성을 고려하여 기계적성질중 연성과 인성이 우수한 소재를 선정하고 있다. 이러한 부재는 고온 고압상태의 분위기에서 장시간 사용에 의한 경년열화 및 중성자 조사취화 손상을 받게 되어 항복강도 및 파괴인성이 급격히 저하하는 경향이 있다. 특히 고 인성 재료는 균열선단에서 소성역이 커지므로 균열에 대한 손상해석을 탄소성 파괴역학적으로 규명할 필요가 있다. 이러한 규명인자로는 J적분에 근거한 해석이 요구되어진다. 따라서 탄소성 파괴역학에 기초한 J적분 이용하여 균열전파의 안정성평가를 위한 파단전 누설설계(LBB) 개념이 도입되어 불안정, 안정균열전파 및 잔여수명평가가 매우 중요하다. 본 실험의 목적은 냉각재배관 엘보우부품 및 서포트 스킷트부품의 파괴저항시험을 통하여 시험

[†] To whom correspondence should be addressed.
dish5@tu.ac.kr

온도에 따른 파괴저항 특성치 의존성과 정확한 정량적인 물성치 변화를 평가하여 LBB 설계개념에 적용할 수 있는 Data의 신뢰성 확보를 하고자 한다. 따라서 본 연구는 SA516-Gr.70강에 대하여 탄소성파괴 인성거동을 ASTM E813²⁾, E1152-89³⁾ 규정에 따라 상온, 200℃, 300℃ 및 400℃에서 J-R 곡선을 구하고 탄소성 파괴인성치를 평가하여 온도의존성을 고려한 안정균열성장점 J_{IC} 를 평가하여 그 유효성을 정량적으로 분석을 하였다.

2. 실험방법

2.1. 재료 및 시험편

실험재료는 원자로 냉각재배관 엘로우 및 서포트 스킷트용 재료로 SA516-Gr70 ferrite steel 열간 압연 강판이다. 시험편은 강판에서 채취하였으며 채취방향은 L-T 방향으로 하였다. Fig. 1은 원자로 서포트 스킷트의 위치와 시험편 채취를 나타내고 있다.

파괴인성시험편은 ASTM E399⁴⁾ 표준 시험편 규정에 따라 와이어 커터를 이용하여 IT-CT로 가공하여 사용하였다. 시험편의 초기균열길이가 시험편 폭의 60%가 되도록 피로예비균열을 생성한 후 시험편두께의 20%가 되는 측면 홈을 가공하였으며, 측면 홈은 root radius가 0.5mm, 각도는 90°로 가공하였다. 본 소재의 화학적성분과 실험온도에 따른 기계적 특성은 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 파괴인성시험편의 형상과 치수를 Fig. 2에 나타내었다.

2.2. 인장시험

Fig. 3은 본 연구에 사용된 인장시험편이며, 유압 피로시험기의 position mode에서 정적인장부하속도를 0.05mm/min로 하중부하방식을 채택하였고 각 분위기온도에 대하여 인장시험을 ASTM E8⁵⁾ 규정에 따라 수행하였다. Fig. 4는 파괴인성시험에서 가장 중요한 기계적물성치 중 항복강도와 연신율을 온도에 따라 평가하였다. 항복강도는 온도의 증가와 함께 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 연신율은 300℃에서 가장 낮게 평가되었으며 이러한 평가 원인은 이 온도구간에서 청열취성이 일어나는 구간 때문인 것으로 생각되며, 이 구간을 지난 400℃에서 재료내부 원자 활성화도가 증가함에 따라서 궁극적으로 소성변형의 증가로 인하여 연신율 값이 25.8%로 가장 높게 나타났다.

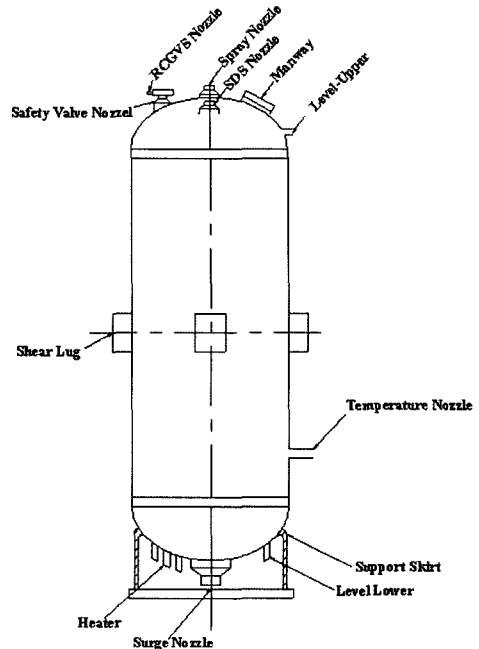


Fig. 1. Geometry of reactor pressure vessel.

Table 1. Chemical composition of SA 516-Gr70(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	V	Nb
0.14	0.43	1.32	0.001	0.001	0.20	0.36	0.03	0.1	0.031	0.028	0.016

Table 2. Mechanical properties of material

Temp. (°C)	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (GPa)
25	381	556	22.1	206.0
200	357	528	23.3	197.1
300	337	508	21.5	189.2
400	298	487	25.8	175.3

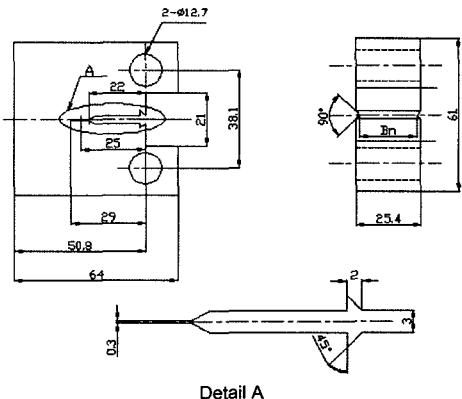


Fig. 2. Geometry and configuration of 1CT compact tension specimen.

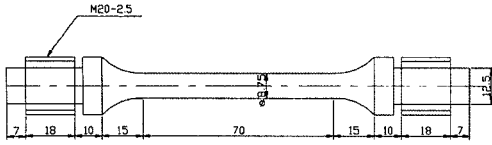


Fig. 3. Geometry and configuration of tensile specimen.

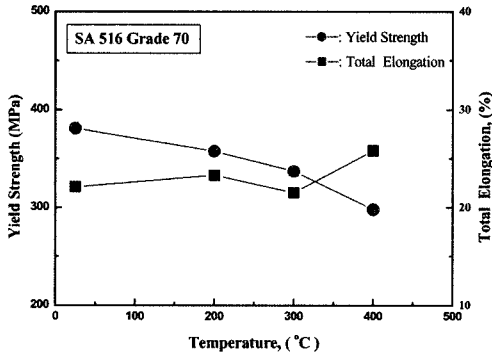


Fig. 4. Mechanical properties of SA 516-Gr70 steel.

2.3. J-R파괴인성시험

본 재료에 대한 J-R파괴인성시험은 ASTM E813-89 및 E-1152 표준시험 절차에 따라 단일시험편 해중법으로(single specimen unloading compliance method) 상온, 200°C, 300°C 및 400°C에서 수행하였다.

시험편의 무차원 균열길이(a/W)가 0.6이 되도록 피로예비균열을 약 3mm 삽입하여 균열선단을 동일하게 유지하였으며, 여기서 W는 시험편 폭이며 50.8mm이다. 균열길이 및 파괴인성치는 균열의 직선성과 평면변형률조건에 응력상태에 지배되기 때문에 측면 홈을 가공하여 시험을 실시하였다. 시험 후 300°C에서 가열착색을 위하여 30분유지 후 균열길이측정을 용이하게 하기 위하여 예 균열을 생성하였으며 시험하중의 60%로 부하하여 파단 시켰다. 파괴인성시험은 만능재료시험기(Instron 8501)를 사용하였으며 균열길이 측정에는 시험편에 고온변위계이지(Extensometer)를 장착한 후 컴플라이언스법으로 산출하였다. 고온의 경우 시험편의 온도를 자동으로 조정하여 시험편 온도가 실험온도에 도달될 수 있도록 1시간정도 유지한 후 열전대를 시험편 가까이 부착하고 시험편 온도편차를 ±1°C로 유지 후 본 실험을 수행하였다.

하중부하 방식은 position mode에서 수행하였으며, cross head speed는 0.05mm/min의 속도로 일정하게 유지하여 하중을 부하 하였다. Fig. 5는 상온에서 하중과 하중선 변위를 나타내고 있는 제하곡선을 이용하여 균열길이를 산출하는 컴플라이언스의 변화거동을 보여주고 있다.

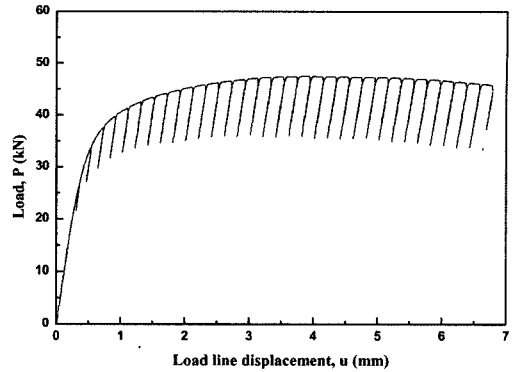


Fig. 5. Load versus Load line displacement curve at room temperature for SA 516-Gr70 steel.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 상온에서 파괴인성특성

연성이 큰 재료의 정량적인 파괴인성측정값은 응력상태의 변화거동 때문에 어려움이 있지만 측면 홈을 가공함으로써 시험편 표면의 응력조건이 평면변형률이 지배적인 상태로 되기 때문에 유용한 결과를 얻을 수 있다^{6-8,10}. 특히 균열의 진전 구동력은 시험편 두께의 전면에 작용하기 때문에 표면균열크기와 내부균열크기가 많은 차이를 유발하지 않고 변형된 만곡현상(opposite crack tunneling effect)이 거의 나타나지 않고 인장부하에 의한 균열길이가 중앙부에 집중되는 현상이 일어나지 않는다. 변형된 균열의 만곡형태는 고인성, 연성재의 평활 시험편에서 많이 나타나는 현상이며 이러한 균열이 진전된 전파면에 대하여 균열진전량을 단순 평균하면 시험편 양 표면에 나타난 응력상태 때문에 균열길이가 과소평가되어 탄소성 파괴인성치가 과대평가 될 수도 있고 평가 시 구속조건에 부합하지 못하여 평가에 어려움을 가져올 수 있다^{11,12}.

Fig. 6은 측면 홈을 가공하여 상온에서 제하컴플라이언스법에 의한 탄소성 파괴인성 거동을 나타내었다. 그러나 제하반복에 따른 압축응력과 지그와 시험편간의 마찰 때문에 초기에 균열길이 감소현상이 나타났으며, 균열길이 감소현상처리는 읍셋 방법에 따라 부균열 만큼 읍셋하여 R곡선을 구하였다. ASTM E813-97에 의한 둔화직선식 ($J = 2\sigma_y \Delta a$)을 이용하여 ASTM 규정에 따른 데이터를 사용하여 R곡선을 구하고 주어진 R곡선과 0.2mm 읍셋선과 교점에서 J_Q 를 구한 후 구한 J_Q 는 375 kJ/m^2 로서 J_{IC} 로 규정하기 위한 ASTM 유효조건을 만족하여 J_{IC} 로 평가되었다.

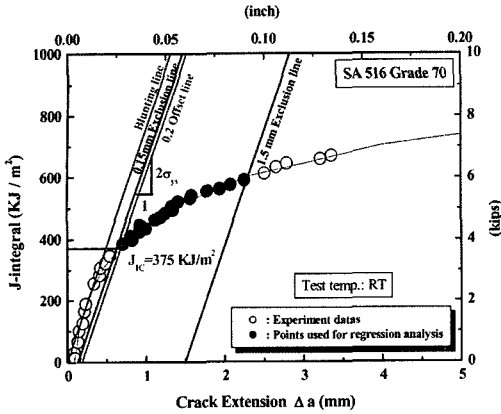


Fig. 6. Relations between J-integral and Crack extension at room temperature for SA 516-Gr70 steel.

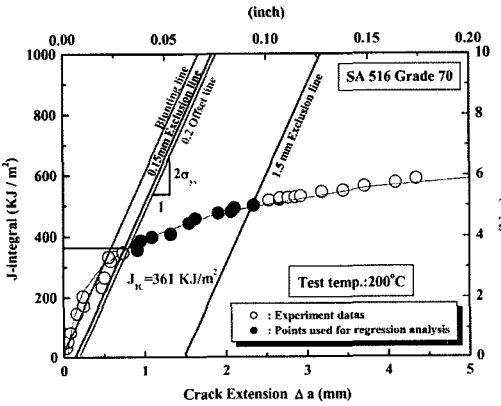


Fig. 7. Relations between J-integral and Crack extension at 200°C for SA 516-Gr70 steel.

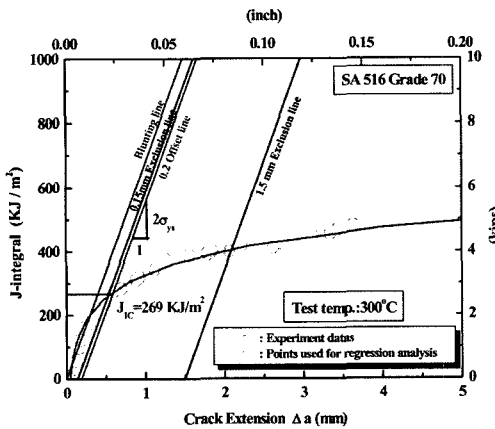


Fig. 8. Relations between J-integral and Crack extension at 300°C for SA 516-Gr70 steel.

3.2. 고온에서 파괴인성특성

Fig. 7은 축면홈을 가공하여 200°C에서 제하컴플

라이언스법에 의한 탄소성 파괴인성 거동을 나타내었다. 유효 데이터를 이용한 R곡선과 0.2mm 오프셋선과 교점에서 J_Q 를 구한 후 구한 J_Q 는 361kJ/m^2 로서 J_{IC} 로 규정하기 위한 ASTM 유효판정 조건을 만족하여 J_{IC} 로 평가 될 수 있었다. 상온에 비하여 J-R 곡선의 기울기와 파괴인성 값은 감소하였으며 균열길이는 약간 증가를 하였다. 이러한 경향은 실험온도에서 재료의 기계적성질의 저하와 밀접한 관계를 가지고 있으며 기계적 성질이 저하됨으로서 부하하중에 의한 균열의 구동력이 강화됨으로서 파괴인성값이 저하됨을 알 수 있다. Fig. 8은 300°C에서 제하컴플라이언스법에 의한 탄소성 파괴인성 거동을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 300°C에서는 제하를 반복함에 따라서 변형시효 영향을 받아 J적분값에 비하여 균열길이가 증가되는 현상을 알 수 있으며 J-R 곡선의 기울기도 저하됨을 확인할 수 있다. 이러한 경향을 가지는 유효 데이터를 이용한 R곡선과 0.2mm 오프셋선과 교점에서 J_Q 를 구한 후 구한 J_Q 는 215kJ/m^2 로서 J_{IC} 로 평가 될 수 있었다. Fig. 9는 고온 400°C에서 제하컴플라이언스법에 의한 R곡선의 구배가 급격히 감소됨을 알 수 있고, 300°C보다 변형시효가 많이 일어나는 원인에 의하여 궁극적으로 탄소성 파괴인성치가 급격히 저하됨을 알 수 있다. 따라서 ASTM 규정에 의한 유효 데이터를 이용한 R곡선과 0.2mm 오프셋선과 교점에서 J_Q 를 구한 후 구한 J_Q 는 215kJ/m^2 로서 J_{IC} 로 평가 될 수 있었다.

3.3. 탄소성파괴인성치 및 J-R 곡선 비교평가

Fig. 10은 각 온도에 평가된 탄소성 파괴인성값을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 상온에서 200°C까지는 인성 값이 거의 일정한 값을 가지지만 200°C

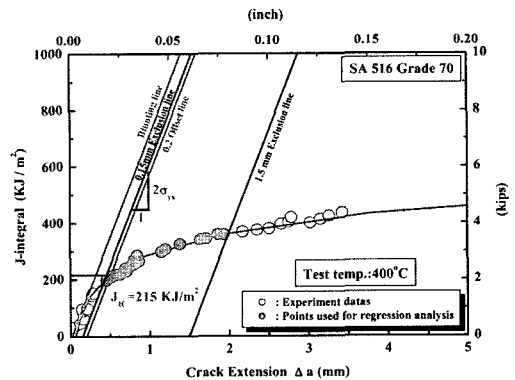


Fig. 9. Relations between J-integral and Crack extension at 400°C for SA 516-Gr70 steel.

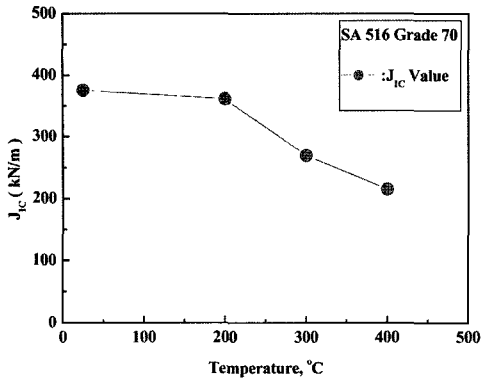


Fig. 10. Relations between J_{IC} and Temperature variation for SA 516-Gr70 steel.

에서 급격하게 저하됨을 알 수 있으며, 기계적성질의 저하와 제하가 반복됨에 따라 발생하는 시효현상이 원인으로 사료된다. 즉 부하속도가 준 정적인 상태를 유지함으로써 재료의 미시적 거동이 변화되어 역학적인 관계로 이어진 결과로 사료된다.

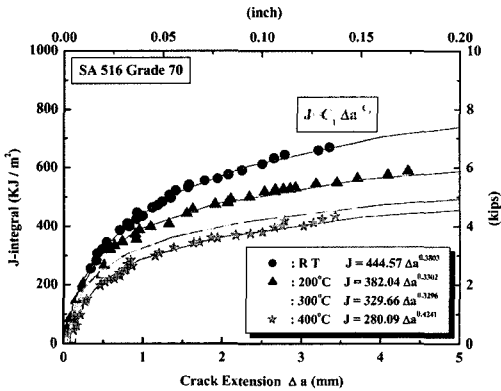


Fig. 11. Relations between J-integral and Crack extension at test temperatures for SA 516-Gr70 steel.

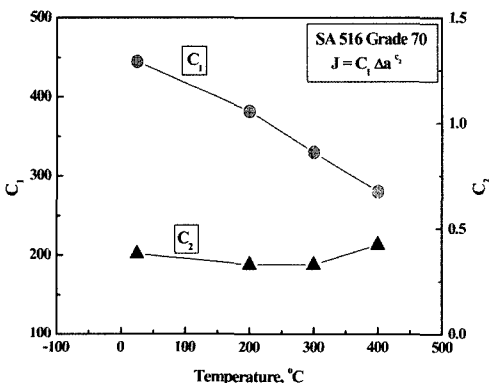
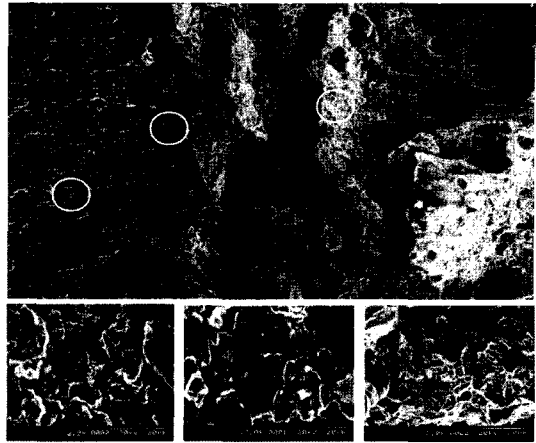


Fig. 12. Effect of test temperatures on C_1 and C_2 .



(a) Pre-crack zone (b) Stretch zone (c) Dimple zone
Fig. 13. SEM fractograph showing fracture surface.

Fig. 11은 각 온도에 대한 J-R 곡선을 비교하여 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 R 곡선의 기울기가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 12는 회귀선의 값 C_1 , C_2 의 변화를 볼 수 있으며 C_1 의 값은 온도가 증가함에 따라 감소하는 온도의존성을 나타내고 있으나 C_2 는 200°C를 기준으로 증가되는 현상을 알 수 있다.

4. 파단면 관찰

Fig. 13은 탄소성파괴인성시험을 400°C에서 수행한 후 파단된 파면을 보여주고 있다. 파단면 형태를 살펴보면 좌측에는 피로균열 삽입부분이며 중간부분이 파괴인성시험시 재료의 인열을 나타내는 스트레치존이며, 우측은 균열이 진전된 부분을 나타내는 딴플 부분이다.

(a)는 예비피로균열을 나타내고 있으며 스트라이에이션이 관찰됨을 알 수 있다. 이것은 프래투우 (plateau) 또는 패치(patch)와 같은 띠 형상이 균열진행방향에 직각으로 존재하고 있다. 프래투우에는 개재물에 의해 균열에 단이 붙어 파면이 계단 형태를 이루고 있다. 즉 스트라이에이션은 균열전파방향을 알 수 있을 뿐만 아니라 균열선단이 둔화하여 전파가 늦어지는 원인이다.

(b)는 파괴인성시험시 재료의 저항치를 나타내는 스트레치존을 보여주고 있다.

(c)는 전형적인 연성파괴에서 나타나는 딴플이 관찰되어졌다. 딴플내부에는 개재물로 추정되는 입자들이 관찰되어지고 몇 개의 딴플이 합체를 이루어 큰 보이드(void)로 관찰됨을 알 수 있다. 인성시험에 의

한 인장하중을 부가하면 이러한 덩플은 초기에는 등축덩플 형태를 가지고 있지만 균열이 진행됨에 따라 신장형 덩플로 파단 형태가 변화됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 원자력발전에서 사용되는 냉각재배관 엘보우부품 및 서포트 스커트부품에 이용되는 SA516 Gr70강을 이용하여 상온, 200℃, 300℃ 및 400℃에서 탄소성 파괴인성시험을 실시하여 파괴저항특성과 온도 의존성을 정량적으로 평가한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 파괴인성 J-R data를 비교하여 보면 온도의 증가에 따라 파괴인성 값이 낮아지는 것으로 확인되었으며, 온도의 증가에 따른 기계적성질의 저하와 시효변형으로 인한 균열진전 구동력이 증가되기 때문이다.

2) 본 소재의 경우 측면홈의 깊이를 20%로 하였을 때 평면변형률이 재배적인 상태이며, 파괴인성평가에 유효한 부대조건을 만족하는 최적조건으로 사료된다.

3) J-R곡선에서 회귀선 C1은 온도가 증가함에 따라 감소하는 온도 의존성을 나타내고 있으나, C2는 200℃를 기준으로 증가되었다.

4) 파단면은 표면거칠기가 크고 온도가 증가함에 따라 전형적인 등축덩플형태에서 신장형덩플로 관찰되었으며, 덩플 내부에서 개재물로 추정되는 입자들이 관찰되었다.

참고문헌

1) 홍준화, 이봉상, 지세환, “국산원자로 압력용기재의 중성자 조사취화 특성 평가 보고서”, KAERI/CR-116 한국원자력연구소, 2001.

2) ASTM E813, “Standard test method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness”, pp. 646~660, 1997.

3) ASTM E1152, “Standard test method for Determining Fracture Resistance Curve”, pp. 763~773, 1997.

4) ASTM E399, “Standard test method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”, pp. 412~442, 1997.

5) ASTM E8, “Standard test method of Tension Testing of Metallic Materials”, pp. 56~76, 1997.

6) M. Kikuchi, S. N. Atluri and H. Miyamoto, “Studies on Size Effects and Crack Growth of Side-Grooved CT Specimen”, ASTM STP, 868, pp. 251~278, 1985.

7) M. I. de Vries and B. Sohaap, “Experimental of Ductile Crack Growth in type 304 Stainless Steel”, ASTM STP, 856, pp. 183~195, 1985.

8) N.P.O’ Dowd, “Family of Crack Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter-II”, Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 40, No. 5, pp. 939~963, 1992.

9) M. O. Lai, “Effect of Specimen Thickness on Fracture Toughness”, Engineering Fracture Vol. 45, pp. 183~188, 1986.

10) 임만배, 부명환, 공유식, 윤한기, “X-선 회절을 이용한 피로균열진전거동과 응력확대계수예측에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집 A권, 제27권, 제5호, pp. 673~680, 2003.

11) 임만배, 윤한기, “SG 365강의 파괴저항 특성과 찢어짐계수에 관한 연구”, 한국해양공학회지Vol. 15, No. 3, pp. 75~80, 2001.

12) C. S. Seok, and S. Y. Kim, “A Study on the Characteristics of Fracture Resistance Curve of Ferritic Steels”, KSME International Journal Vol. 13, No. 11, pp. 827~835, 1999.