

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.7.729>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

LBB 평가를 위한 J-R 파괴인성시험 결과에 미치는 시편 형상과 측면 홈의 영향

김진원*·최명락*·오영진**·박흥배**·김경수**

* 조선대학교 원자력공학과, ** 한국전력기술(주) 미래전력기술연구소

Effects of Specimen Size and Side-groove on the Results of J-R Fracture Toughness Test for LBB Evaluation

Jin Weon Kim^{*†}, Myung Rak Choi^{*}, Young Jin Oh^{**}, Heung Bae Park^{**} and Kyung Su Kim^{**}

^{*} Dept. of Nuclear Engineering, Chosun Univ.,

^{**} Electric Technology Research Institute, KEPCO E&C

(Received November 6, 2014 ; Revised April 11, 2015 ; Accepted May 1, 2015)

Key Words: J-R Fracture Toughness Test(J-R 파괴인성시험), Specimen Size(시편 크기), SA508 Gr.1a Piping Material(SA508 Gr.1a 배관재), LBB Evaluation(LBB 평가)

초록: 본 논문에서는 파단전누설 평가를 위한 J-R 파괴인성시험에 미치는 시편 크기와 측면 홈의 영향을 분석하였다. 이를 위해서 SA508 Gr.1a 배관재에서 채취된 측면 홈이 가공되거나 가공되지 않은 크기가 다른 3종류의 CT 시편(12.7mm 두께의 1T-CT, 25.4mm 두께의 1T-CT, 25.4mm 두께의 2T-CT)을 이용하여 상온과 316°C에서 J-R 시험을 수행하였다. 시험 결과, 시편 두께에 관계없이 측면 홈이 가공된 시편은 측면 홈이 없는 시편에 비해 낮은 J-R 곡선을 보였으며, 상온에 비해 316°C에서 측면 홈의 영향이 더욱 뚜렷하였다. 상온에서는 시편의 두께가 감소하고 폭이 증가함에 따라 J-R 곡선이 약간씩 감소하는 경향을 보였으나, 316°C에서는 시편의 두께가 감소하고 폭이 증가됨에 따라 J-R 곡선이 증가하였다. 그러나 SA508 Gr.1a 배관재에서 전체적으로 시편의 폭과 두께에 따른 J-R 곡선의 변화는 크지 않았다.

Abstract: In this study, the effects of specimen size and side-groove on the results of the J-R test for leak-before-break (LBB) evaluation were investigated. A series of J-R tests were conducted at both RT and 316°C, using three different sizes of compact tension (CT) specimens machined from SA508 Gr.1a piping material: 12.7 mm-thick 1T-CT, 25.4 mm-thick 1T-CT, and 25.4 mm-thick 2T-CT with and without side-groove. The results showed that side-grooving reduced the J-R curve for all specimens and the effect of side-grooving was more significant at 316°C than at RT. As the thickness of the specimens decreased and the width of the specimens increased, the J-R curve slightly decreased at RT but it increased at 316°C. However, the variation in the J-R curve of SA508 Gr.1a with the thickness and width of CT specimen was insignificant.

1. 서론

원자력발전소(이하, 원전)의 고에너지 배관 설계에는 파단전누설(Leak-Before-Break, LBB) 개념이 적용되고 있으며, LBB 개념의 적용은 설계시 배관의 양단파단 가정을 배제할 수 있다.⁽¹⁻³⁾ 고에

너지 배관 설계시 양단파단 가정의 배제는 원자로 노심과 주요 기기의 설계에서 유체 방출에 따른 동적 하중을 제거할 수 있기 때문에 원전의 건설과 운영 측면에서 많은 경제적 이득을 주는 것으로 알려져 있다.^(2,3)

배관 설계시 LBB 개념을 적용하기 위해서는 누설감시장치가 감지할 수 있는 충분한 양의 누설을 허용할 수 있는 크기의 관통균열이 배관에

† Corresponding Author, jwkim@chosun.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Chemical composition of SA508 Gr.1a piping material used in the experiment (w/o)

| C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo | V | Al | Cu |
|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.223 | 1.27 | 0.009 | 0.0047 | 0.225 | 0.242 | 0.118 | 0.026 | 0.003 | 0.024 | 0.200 |

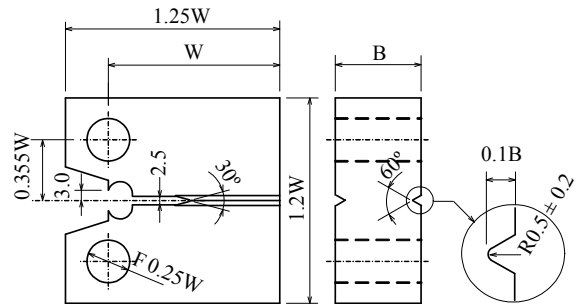
존재하는 것으로 가정하고, 이 관통균열이 정상 운전 뿐 아니라 지진하중 조건에서 불안정 파괴되지 않는다는 것을 파괴역학적으로 입증하여야 한다.⁽¹⁻³⁾ 이러한 LBB 평가를 위해서는 대상 배관 재료에 대한 응력-변형률 곡선과 J-R 곡선이 필요하며, 이들 재료물성치는 LBB 평가 결과에 직접적으로 영향을 미친다.^(2,3) LBB 평가 방법과 절차를 제시하고 있는 NUREG-1061 보고서⁽³⁾에서는 LBB 평가에 적용될 응력-변형률 곡선과 J-R 곡선을 얻기 위한 시험 조건과 방법을 상세하게 제시하고 있다. NUREG-1061에 의하면 배관과 동일한 두께를 갖는 측면 홈(side-groove)이 가공되지 않은 CT 시편을 이용하여 구한 J-R 곡선이 실제 배관에서 관통균열의 거동을 가장 잘 나타내는 것으로 보고하고 있다. 그러나, 실제 원전 배관 설계시 LBB 평가를 위한 J-R 파괴인성시험에는 결과의 보수성을 높이기 위해 배관 형상에 관계없이 측면 홈이 가공된 25.4 mm 두께의 1T-CT 시편이 사용되고 있다.^(4,5)

따라서, 본 논문에서는 LBB 개념이 적용되고 있는 국내 원전 배관의 J-R 파괴인성시험 결과에 미치는 시편 폭과 두께 그리고 측면 홈의 영향이 어느 정도인지 측면 홈이 가공된 25.4 mm 두께의 1T-CT 시편을 기준으로 살펴보고자 한다. 이를 위해서 국내 원전의 배관에 사용되는 SA508 Gr.1a 배관재를 대상으로 다양한 형상의 시편을 가공하여 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 J-R 파괴인성시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 J-R 곡선에 미치는 시편 크기와 측면 홈의 영향을 살펴보고, LBB 평가에 미치는 영향을 분석하였다.

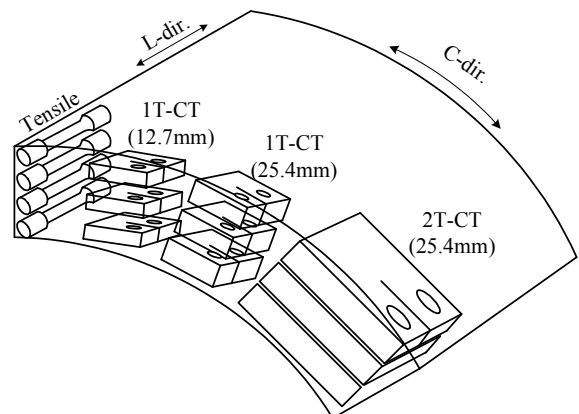
2. 시편 및 시험절차

2.1 시험 재료

시편 가공에는 한국표준형 원전의 주냉각재 배관으로 사용되고 있는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재가 사용되었다. SA508 Gr.1a 배관재는 단조를 통해 외경이 1075.4 mm, 두께가 102.6 mm인 배관으로 제작되어 퀴칭후 템퍼링 열처리된 것으로 화학조성은 Table 1에 나타난 것과 같다.



(a) Dimension of CT specimen



(b) Location and direction of specimens

Fig. 1 Specimens used in the experiment

2.2 시편

J-R 파괴인성시험에는 두께(B)와 폭(W)이 각각 25.4 mm와 50.8 mm인 1T-CT 시편, 12.7 mm와 50.8 mm인 1T-CT 시편, 그리고 25.4 mm와 101.6 mm인 2T-CT 시편이 사용되었다. 대부분의 시편은 양쪽 측면에 두께의 10% 깊이를 갖는 V-형 홈(60°)이 가공되었으며(Fig. 1(a) 참조), 일부 시편은 측면 홈이 가공되지 않은 상태로 시험되었다. 모든 시편은 ASTM E1820-09⁽⁶⁾의 기준에 따라 예비피로균열을 생성하였으며, 시편의 두께와 폭에 관계없이 예비피로균열 생성 후 균열의 초기길이는 $a_0/W = 0.59$ 가 되도록 하였다. 한편, J-R 파괴인성시험에 앞서 배관 재료의 기계적물성치를 파악하고 J-R 시험 결과를 분석하기 위해서, 동일한 배관에서 시편을 채취하여 인장시험을 수행하였다. 시험에는 ASTM E8-09⁽⁷⁾의 기준에 따라 설계

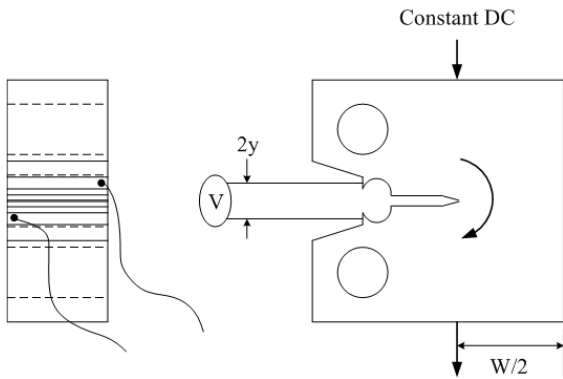


Fig. 2 Concept of crack measurement using d-c PD method

된 직경이 5.0 mm이고 게이지 길이가 25.0 mm인 봉상시편이 사용되었다.

Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 인장시편은 인장 방향이 배관의 길이방향과 일치(L-dir)하도록 채취되었으며, CT 시편은 균열 방향이 배관의 원주 방향과 일치(L-C dir)하도록 가공되었다.

2.3 시험 절차

2.3.1. 인장시험

인장시험은 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 준정적 하중속도($\dot{\epsilon}=3.947 \times 10^{-4} s^{-1}$)로 수행되었다. 인장시험에는 전기로와 50 kN의 로드셀이 부착된 모터구동형 기계식 만능시험기가 사용되었으며, 변형률은 게이지 길이가 25 mm인 고온용 신률계를 이용하여 측정하였다.

2.3.2. J-R 파괴인성시험

J-R 파괴인성시험 역시 상온과 316°C에서 준정적 하중속도(하중선변위 속도(V_{LL}) = 0.9 mm/min)로 수행되었다. J-R 시험에는 전기로와 100 kN의 동적 로드셀이 부착된 유압식 만능시험기가 사용되었으며, 시편의 하중선 변위는 게이지 길이가 6.0 mm인 고온용 COD 게이지를 이용하여 측정하였다. 본 시험에서는 직류전위차(d-c potential drop, d-c PD)법을 적용하여 균열진전길이를 측정하였다. d-c PD 방법은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 CT 시편의 상·하단에 일정한 직류를 흘려주고 균열개구부에서 균열진전에 따른 전위차를 측정함으로써 균열진전길이를 얻는 방법이다. Fig. 3은 J-R 파괴인성시험에 사용된 시험장치의 개략도를

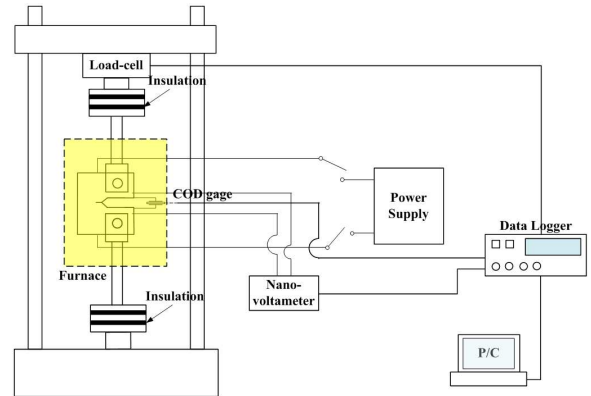


Fig. 3 Schematic diagram of apparatus for J-R test

나타낸 것으로, 기본적인 시험기와 게이지 이외에 d-c PD 방법을 적용하여 균열길이를 측정하기 위해 직류전류공급기, 전압측정기, 그리고 데이터 취득 장치 등으로 구성되어 있다.

측정된 d-c PD 데이터로부터 균열진전길이를 구하기 위해 다양한 방법이 적용될 수 있는데,^(8~10) 여기서는 식 (1)의 Johnson식⁽¹⁰⁾을 적용하여 균열길이를 계산하였다. 최종적으로 시편을 파단하여 측정된 초기 균열길이(a_o)와 최종 균열길이(a_f)를 이용하여 균열길이를 보정하였다.

$$a/W = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cosh\left\{\left(\frac{V}{V_{ini}}\right) \cosh^{-1} \left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a_{ini}}{2W}\right)} \right] \right\}} \right] \quad (1)$$

여기서, a 는 균열길이, W 는 시편의 폭, V 는 측정된 전위차, y 는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 전위차를 측정하기 위한 출력단자의 상·하 간격이다. V_{ini} 와 a_{ini} 는 시편에서 균열이 실제 진전하기 시작하는 시점의 전위차와 균열길이이다.

3. 시험 결과 및 토의

3.1 인장시험

J-R 파괴인성시험에 앞서 SA508 Gr.1a 배관재에 대한 기본적인 기계적물성치를 파악하기 위해 상온과 316°C에서 인장시험을 수행하였다. Fig. 4는 인장시험에서 구한 SA508 Gr.1a 배관재의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 나타낸 것이다. 동일한 시험 조건에서 시편 사이에 연신률의 편차는 있었으나, 항복응력(Yield stress, YS)과 인장응력(Ultimate tensile

Table 2 Average tensile properties of SA508 Gr.1a pipe material

| Temp.[°C] | YS [MPa] | UTS [MPa] | UE [%] | TE [%] | RA [%] |
|-----------|----------|-----------|--------|--------|--------|
| RT | 361.3 | 543.6 | 18.5 | 35.9 | 74.9 |
| 316 | 232.4 | 537.5 | 17.5 | 32.5 | 71.9 |

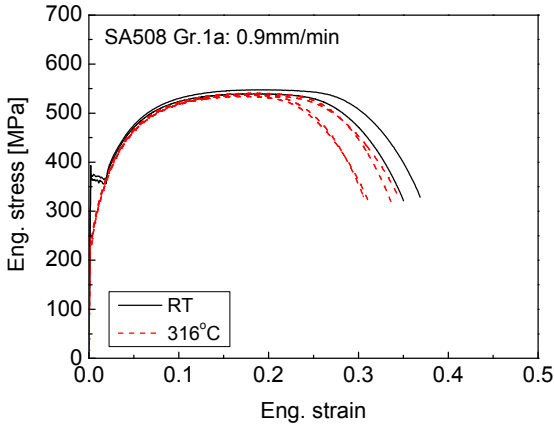
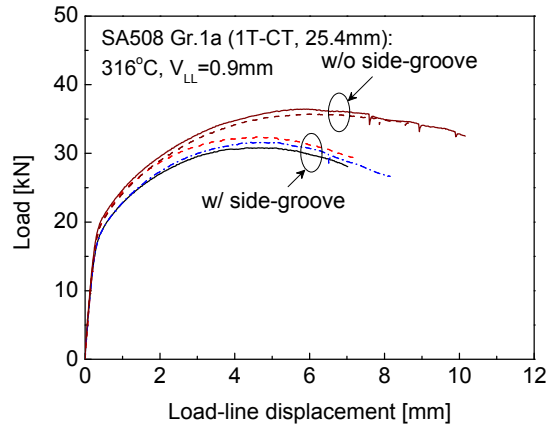


Fig. 4 Engineering stress vs. strain curves of SA508 Gr.1a pipe material at RT and 316°C

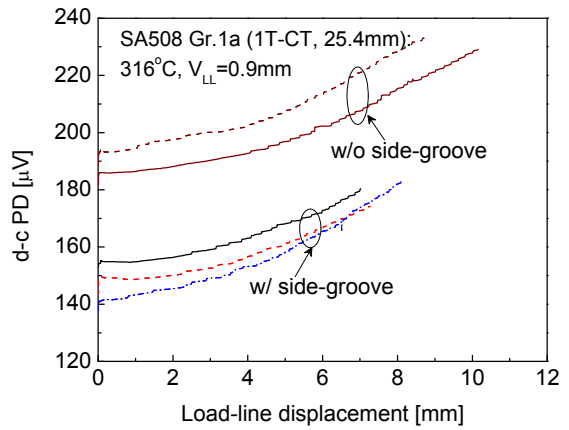
stress, UTS)은 거의 편차를 보이지 않았다. Fig. 4에서 시험 온도에 따른 인장물성치를 개략적으로 살펴보면, 상온에 비해 316°C에서 항복응력은 크게 감소하였으나 인장응력은 거의 유사한 값을 보였다. 또한, 네킹 발생까지의 균일연신률(Uniform elongation, UE)은 온도에 관계없이 거의 유사한 값을 보였으나, 총연신률(Total elongation, TE)과 단면수축률(Reduction of area, RA)은 상온에 비해 316°C에서 뚜렷이 낮은 값을 보였다. Table 2는 인장시험에서 구한 항복응력, 인장응력, 균일연신률, 총연신률, 그리고 단면수축률의 평균값을 정리한 것이다.

3.2 J-R 파괴인성시험

본 연구에서는 측면 홈이 가공된 25.4 mm 두께의 1T-CT 시편과 12.7 mm 두께의 1T-CT 시편, 25.4 mm 두께의 2T-CT 시편, 그리고 측면 홈이 가공되지 않은 25.4 mm와 12.7 mm 두께의 1T-CT 시편에 대한 J-R 파괴인성시험을 상온과 316°C에서 수행하였다. 시험 결과로부터 각 시편에 대한 하중-하중선변위 데이터와 d-c PD 데이터를 얻고 이를 이용하여 J-R 곡선을 구했다. Fig. 5는 316°C에서 수행된 25.4 mm 두께의 1T-CT 시편에 대한 하중선변위(load-line displacement)에 따른 하중과 d-c PD 데이터를 나타낸 것으로, 동일한 조건에



(a) Load vs. load-line displacement



(b) d-c PD vs. load-line displacement

Fig. 5 Load and d-c PD data tested from 25.4mm-thick 1T-CT specimens at 316°C

서 시험 결과의 재현성이 비교적 우수한 것을 알 수 있다.

3.2.1 측면 홈의 유·무에 따른 J-R 곡선 비교

Fig. 6은 두께가 25.4 mm와 12.7 mm인 1T-CT 시편에서 측면 홈이 가공된 경우(w/ SG)와 가공되지 않은 경우(w/o SG)의 J-R 곡선을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험온도와 시편의 두께에 관계없이 측면 홈을 가공하지 않은 시편이 측면 홈을 가공한 시편에 비해 항상 높은 J-R 곡선을 보였다. 측면 홈의 가공에 따른 J-R 곡선에서 이러한 차이는 상온에 비해 316°C에서 더욱 뚜렷했다.

측면 홈의 가공 여부에 따른 J-R 파괴인성의 차이는 이미 잘 알려진 사실로 측면 홈을 가공하지 않은 시편은 표면 부근에서 소성영역이 크게 형성되어 균열진전이 어렵기 때문에 파괴인성이 높게 평가된다.^(11,12) 실제 시편의 파면을 관찰해

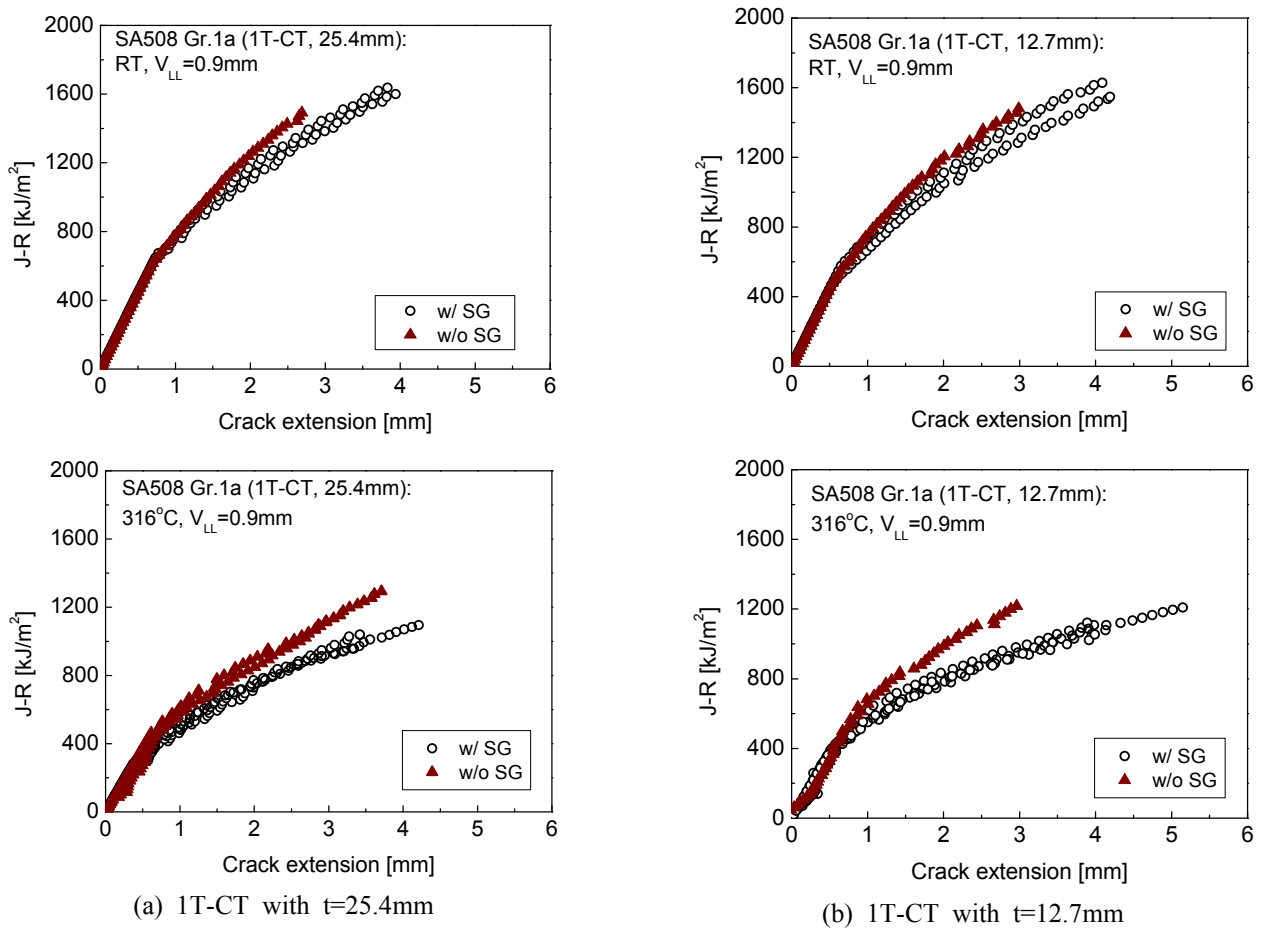


Fig. 6 Effect of side-groove on J-R curves tested from 1T-CT specimens with thicknesses of 25.4mm and 12.7mm

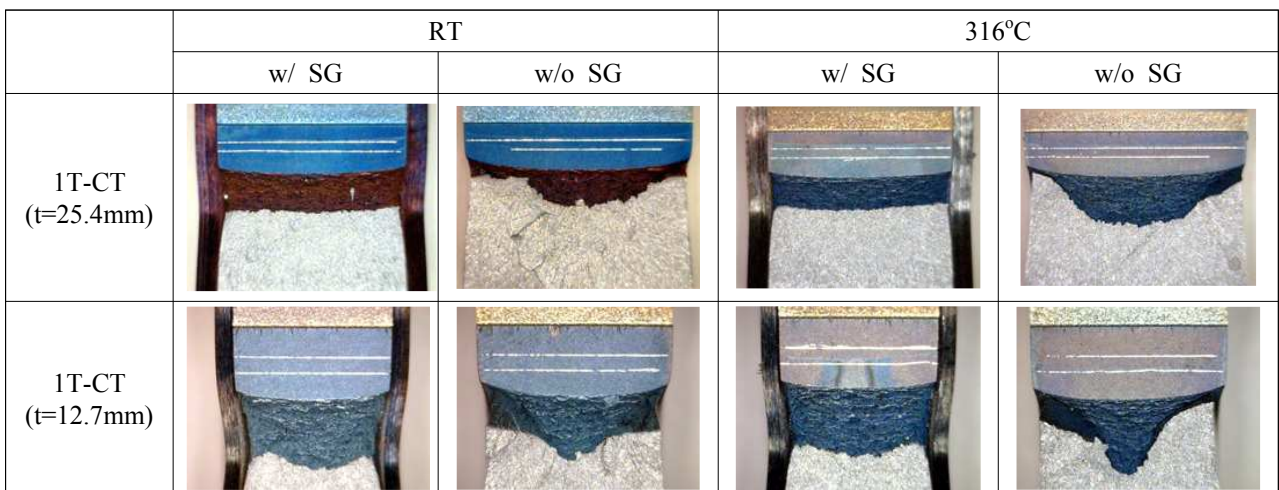


Fig. 7 Fracture surfaces of 1T-CT specimens with thickness of 25.4mm and 12.7mm

보면(Fig. 7), 측면 홈이 가공된 경우에는 시편의 전체 두께에 걸쳐 균열선단이 비교적 균일하며 파면이 평탄하다. 반면, 측면 홈이 가공되지 않은 경우에는 시편 중심에 비해 표면에서 균열진전이

현저히 작고 균열이 분기되어 45° 방향으로 진전하는 전단파면(shear lip)이 형성되었다.

한편, Fig. 6의 결과에서 상온에 비해 원전 운전 온도인 316°C에서는 측면 홈의 유무에 따른

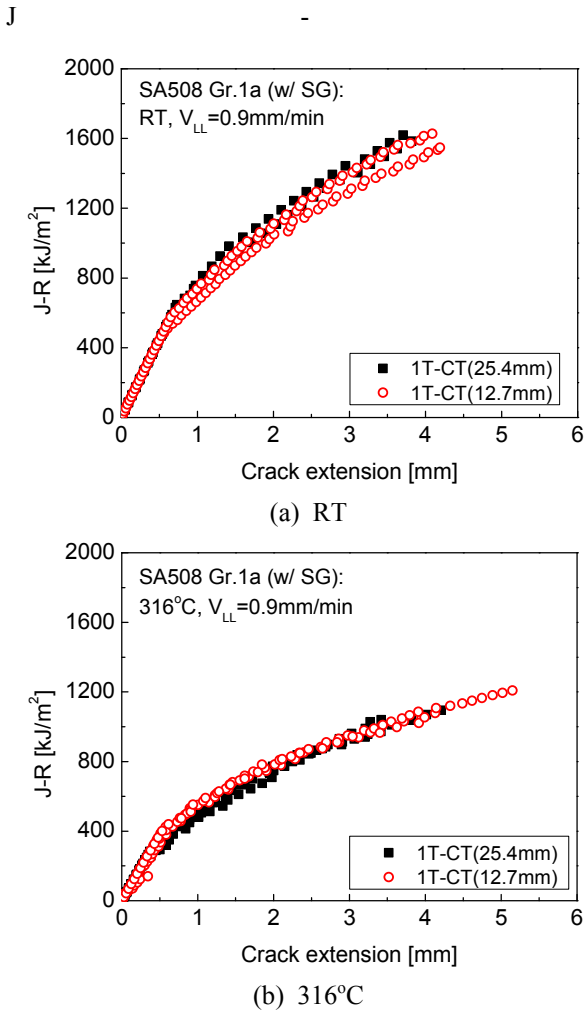


Fig. 8 Effect of thickness in side-grooved specimens on J-R curves

곡선의 차이가 더 크게 나타났다. 이것은 연성과 파괴인성이 높은 상온에 비해 316°C에서 파괴거동이 응력상태에 더 민감하기 때문으로 판단된다. 즉, 상온에 비해 316°C에서는 균열전진에서 3축 응력 정도의 차이가 균열전진에 미치는 영향이 더 크기 때문이다. 이러한 현상은 인장시험 결과에서 균일연신률이 상온과 316°C에서 비슷하지만 3축 응력의 영향을 받는 총연신률은 상온에 비해 316°C에서 뚜렷이 작은 것과 잘 일치한다. Fig. 7의 파면사진에서도 두께에 관계없이 측면 홈이 가공되지 않은 시편의 경우, 상온에 비해 316°C에서는 시편의 표면과 중심에서 균열전진길이 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

3.2.2 시편 두께와 폭에 따른 J-R 곡선 비교

SA508 Gr.1a 배관재의 J-R 파괴인성에 미치는 시편 두께의 영향을 살펴보기 위해서, 두께가

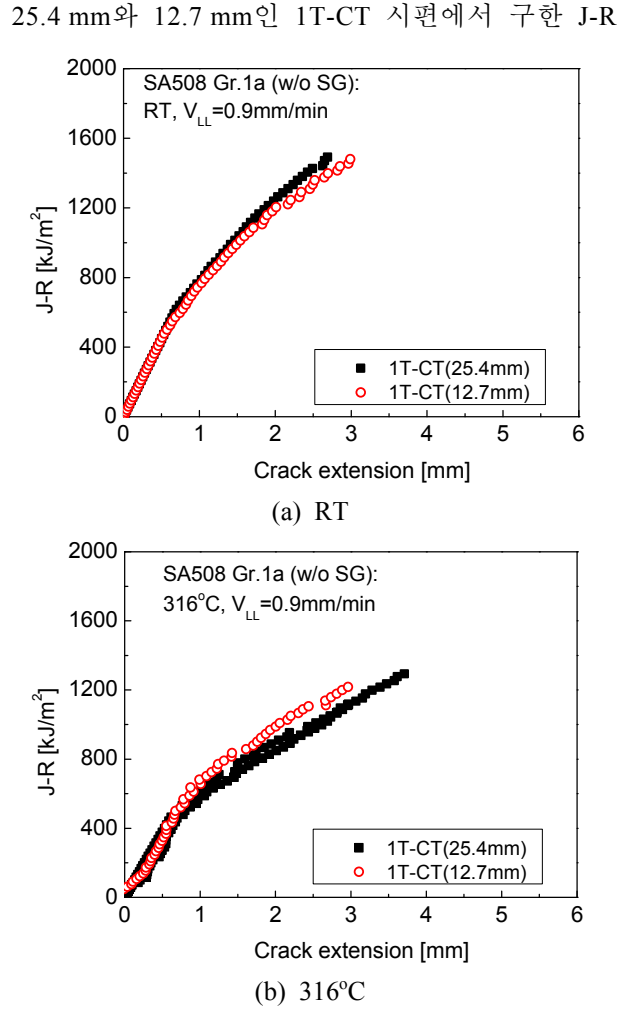


Fig. 9 Effect of thickness in non side-grooved specimens on J-R curves

곡선을 비교하였다. Figs. 8과 9에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 시편의 두께에 따른 J-R 곡선의 차이가 크지 않았다. 측면 홈이 가공된 경우(Fig. 9), 상온에서는 두께가 25.4 mm인 시편에 비해 두께가 12.7 mm인 시편이 유사하거나 약간 낮은 J-R 곡선을 보였다. 반면, 316°C에서는 차이가 미미하지만 두께가 25.4 mm인 시편에 비해 12.7 mm 두께의 1T-CT 시편이 높은 J-R 곡선을 보였다. 측면 홈이 가공되지 않은 경우(Fig. 10)에도 상온에서는 두께가 12.7 mm인 시편이 25.4 mm인 시편에 비해 약간 낮은 J-R 곡선을 보인 반면, 316°C에서는 두께가 12.7 mm인 시편이 25.4 mm 시편보다 높은 J-R 곡선을 보였다. 한편, 동일한 두께를 갖는 시편에서 시편 폭에 따른 파괴인성의 차이를 보기 위해서, 측면 홈이 가공된 두께가 25.4mm인 1T-CT(W=50.8 mm) 시편과 2T-CT(W=101.6 mm) 시편의 J-R 곡선을 비교하였다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 상온에서는

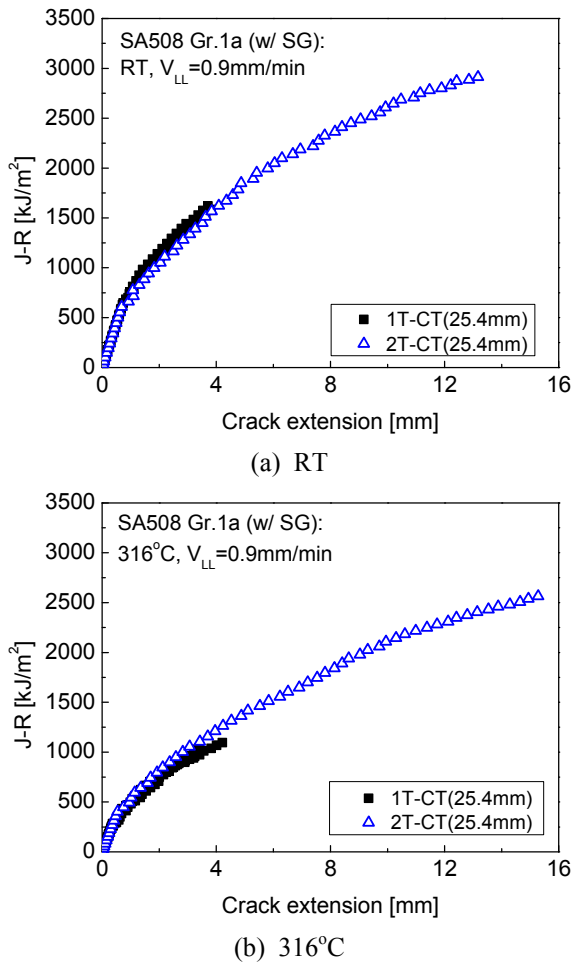


Fig. 10 Effect of width in side-grooved specimens on J-R curves

차이가 거의 없지만 1T-CT 시편에 비해 2T-CT 시편이 낮은 J-R 곡선을 보인 반면, 316°C에서는 1T-CT 시편에 비해 2T-CT 시편이 높은 J-R 곡선을 보였다.

일반적으로 J-R 파괴인성시험에서 시편의 두께가 감소하거나 동일한 두께를 갖는 시편의 폭이 증가하면 구속효과의 감소로 인해 J-R 파괴인성이 높게 평가되는 것으로 알려져 있다.^(13,14) 그러나, 본 시험 결과에 의하면 SA508 Gr.1a 배관재에서는 전체적으로 시편의 두께와 폭에 따라 J-R 곡선이 큰 차이를 보이지 않았다. 316°C에서는 시편의 두께가 감소하고 폭이 증가함에 따라 J-R 곡선이 약간씩 증가하는 일반적인 경향을 보였지만, 상온에서는 시편의 두께가 감소하고 폭이 증가함에 따라 J-R 곡선이 유사하거나 약간씩 감소하는 경향을 보였다. 이러한 거동은 SA508 Gr.1a 배관재의 높은 연성과 파괴인성과 관련이 있는

것으로 판단된다. Seok 등⁽¹⁵⁾의 시험 결과에 의하면 J-R 파괴인성에 미치는 시편 형상에 따른 구속효과는 재료에 따라 다른 것을 알 수 있다. SA515 Gr.60 강은 두께가 25.4 mm와 50.8 mm인 측면 홈이 가공된 2T-CT 시편에 비해 두께가 12.7 mm인 측면 홈이 가공된 2T-CT 시편이 더 낮은 J-R 곡선을 보였으며, 연성과 파괴인성이 높은 TP304 스테인리스강은 측면 홈의 가공 유무에도 관계없이 거의 유사한 J-R 곡선을 보였다.⁽¹⁵⁾

따라서, 본 시험 결과에서 전체적으로 시편의 폭과 두께에 따른 J-R 곡선의 변화가 크지 않은 것은 SA508 Gr.1a 배관재의 높은 연성과 파괴인성에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, Seok 등⁽¹⁵⁾의 시험 결과에서 알 수 있듯이 연성과 파괴인성이 큰 재료에서는 균열진전에 앞서 시편에서 변형이 크게 발생하므로, 시편의 두께와 폭에 따른 구속효과의 차이가 파괴거동에 영향을 크게 미치지 못하는 것으로 판단된다. 본 시험 결과에서도 상온에 비해 연성과 파괴인성이 낮은 316°C에서 J-R 곡선에 미치는 시편 형상의 영향이 더 뚜렷한 것은 이러한 설명을 뒷받침해주고 있다. 그러나, 상온에서 시편의 폭이 증가하고 두께가 감소함에 따라 J-R 곡선이 약간씩 감소하는 것은 현재 명확히 설명하기 어려우며 이를 위한 추가적인 분석이 필요하다.

3.3 LBB 평가에 미치는 영향 분석

여기서는 원전 운전온도인 316°C에서 시험된 J-R 곡선을 기초로 LBB 평가에 미치는 시편 형상과 측면 홈의 가공 여부에 따른 영향을 간단히 검토하였다. 앞서 시편의 두께에 관계없이 측면 홈을 가공한 시편이 측면 홈을 가공하지 않은 시편에 비해 뚜렷이 낮은 J-R 곡선을 보였다. 실제 배관 관통균열의 파괴거동은 측면 홈을 가공하지 않은 시편의 파괴거동과 유사한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 따라서, SA508 Gr.1a 배관재의 LBB 평가에서 측면 홈이 가공된 시편의 J-R 곡선을 적용하는 것은 관통균열의 안정성 평가의 보수성을 뚜렷이 증가시킨다는 것을 확인할 수 있다. 한편, 316°C에서 25.4 mm 두께의 1T-CT 시편에 비해 12.7 mm 두께의 1T-CT와 25.4 mm 두께의 2T-CT 시편이 높은 J-R 파괴인성을 보였다. 그러나 차이는 크지 않았다. 따라서, SA508 Gr.1a 배관재의 경우에 12.7 mm, 1T-CT 시편이나 25.4 mm, 2T-CT 시편에 비해 25.4 mm, 1T-CT 시편에서 주어진 J-R

곡선을 LBB 평가에 적용하는 것이 보수적인 LBB 평가 결과를 줄 것으로 판단된다. 그러나, 그 영향은 매우 미미할 것으로 분석된다.

4. 결 론

본 논문에서는 LBB 개념이 적용되고 있는 국내 원전 배관의 J-R 파괴인성시험에 미치는 시편 크기와 측면 홈의 영향을 파악하기 위해서, 국내 원전에 사용되는 SA508 Gr.1a 배관재를 대상으로 다양한 형상의 시편을 가공하여 상온과 316°C에서 J-R 파괴인성시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) SA508 Gr.1a 배관재의 경우, 시험온도와 시편 두께에 관계없이 측면 홈을 가공하지 않은 CT 시편이 측면 홈을 가공한 CT 시편에 비해 항상 높은 J-R 곡선을 보였다. 측면 홈의 가공 여부에 따른 J-R 곡선의 차이는 상온에 비해 316°C에서 더욱 뚜렷하였다.

(2) 상온에서는 시편의 두께가 감소하고 폭이 증가함에 따라 J-R 곡선이 유사하거나 약간씩 감소하는 경향을 보였으나, 316°C에서는 시편의 두께가 감소하고 폭이 증가됨에 따라 J-R 곡선이 증가하였다. 그러나 SA508 Gr.1a 배관재의 경우 전체적으로 시편의 폭과 두께에 따른 J-R 곡선의 차이는 미미하였다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고문헌 (References)

- (1) USNRC, Standard Review Plan 3.6.3 Leak-Before-Break Evaluation Procedures, *NUREG-0800*.
- (2) EPRI, 1989, Lead Plant Application of Leak-Before-Break to High Energy Piping, *NSAC-141*.
- (3) USNRC, 1984, Evaluation of Potential for Pipe Breaks, *NUREG-1061*, Vol.3.
- (4) Lee, B.S., Oh, Y.J., Yoon, J.H., Kuk, I.H. and Hong, J.H., 2000, "J-R Fracture Properties of SA508-1a Ferritic Steels and SA312-TP347 Austenitic Steels for Pressurized Water Reactor's (PWR) Primary Coolant Piping," *Nucl. Eng. & Design*, Vol.199, pp.113~123.
- (5) Kim, K.C., Kim, J.T., Suk, J.I., Sung, U.H. and Kwon, H.K., 2004, "Influences of the Dynamic Strain Aging on the J-R Fracture Characteristics of the Ferritic Steels for Reactor Coolant Piping System," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 228, pp. 151~159.
- (6) ASTM, 2009, "Standard Test for Measurement of Fracture Toughness," ASTM E1820-09.
- (7) ASTM, 2009, "Standard Test Methods for Tension Testing on Metallic Materials," ASTM E8/E8M-09.
- (8) Dietzel, W. and Schwalbe, K.H., 1986, "Monitoring Stable Crack Growth Using a Combined a.c./d.c. Potential Drop Technique," *Materialprüfung*, Vol. 28, pp. 368~372.
- (9) ISO, 2002, "Metallic Materials-Unified Method of Test for the Determination of Quasi-static Fracture Toughness," ISO-12135.
- (10) Johnson, H.H., 1965, "Calibrating the Electric Potential Method for the Studying Slow Crack Growth," *Mater. Res. & Stand.*, Vol. 5, pp. 442~445.
- (11) Yasufumi, I. and Tomokazu, M., 1982, "Effect of Side Grooves on the Elastic-plastic Stress State of Fracture Toughness Specimens - Three-dimensional Finite Element Analysis," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 16, pp. 659~668.
- (12) USNRC, 1986, Prediction of J-R Curves With Large Crack Growth From Small Specimen Data, *NUREG/CR-4575*, BMI-2137.
- (13) Ono, H., Kasada, R. and Kimura, A., 2004, "Specimen Size Effects on Fracture Toughness of JLF-1 Reduced-activation Ferrite Steel," *J. Nucl. Mater.*, Vol. 329-333, pp. 1117~1121.
- (14) Schwalbe, K.H., Newman J.C. Jr, and Shannon J.L, Jr, 2005, "Fracture Mechanics Testing on Specimens with Low Constraint - Standardization Activities Within ISO and ASTM," *Eng. Frac. Mech.*, Vol.72, pp. 557~576.
- (15) Seok, C.S. and Kim, S.Y., 2002, "Effect of Specimen Configurations on the Fracture Resistance Curve," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 214, pp. 47~56.