2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Zr-2.5Nb 압력관의 임계크랙길이 평가

Evaluation of Critical Crack Length on Zr-2.5Nb Pressure Tube

손선영, 김영석, 임경수, 안상복
한국원자력연구소

오동준
안동대학교

요 약

본 연구의 목적은 온도 변수에 대한 Zr-2.5Nb 압력관의 임계크랙 길이(CCL)를 평가하는 것이며, 이 CCL 은 인장실험과 파괴인성의 값들로부터 계산되었다. 인장 및 파괴인성실험은 상온, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C 에서 각각 행하여졌으며, 파괴인성 실험은 Zr-2.5Nb 압력관으로부터 직접 가공한 CCT 시험편을 사용하였다. 본 실험으로부터 항복강도와 인장강도는 온도가 증가함에 따라 감소하다, 약 150℃부근에서 완만하게 감소하였고 다시 250℃이후에는 급격히 감소는 경향을 나타내었으며 파괴인성실험에서의 dJ/da 값은 약 100℃ 부근에서 최대를 나타낸 후 300℃에서 감소하였다. 이들 값으로부터 계산된 CCT 역시 온도가 증가함에 따라 감소 하였으며, 이러한 경향은 인장강도와 관계가 있을 것으로 생각된다.

Abstract

The aim of this study is to investigate the critical crack length (CCL) of the Zr-2.5Nb pressure tube with various temperatures. The CCL was calculated the data from tensile and fracture toughness test. The tensile and fracture toughness tests were performed at temperatures ranging from room temperature to 300℃. Fracture toughness tests were conducted on the curved compact tension (CCT) specimens, which were directly cut from the tube retaining original curvature of Zr-2.5Nb tube. According to these results, The Zr-2.5Nb tube had decrease the tensile strengths and the dJ/da of the Zr-2.5Nb tube with increasing temperature. However, its elongation had a maximum at 150℃ followed by a decrease with increasing temperatures. The loss of ductility which was stricking in the temperature range of 200~250℃ determined the fracture toughness resistance, dJ/da of the Zr-2.5Nb tube with temperature, resulting in the maximum 100℃. The calculated CCL showed decrease in with increasing temperature. In present work, CCL of Zr-2.5Nb tube could be considered dependence of tensile strength.

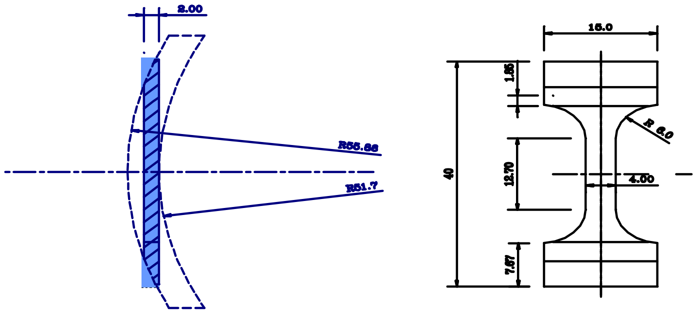
1. 서 론

가압 중수로용 발전로의 압력관 재료로 Zr-2.5%Nb 합금이 사용되고 있다. 이 중수로 압력관은 핵

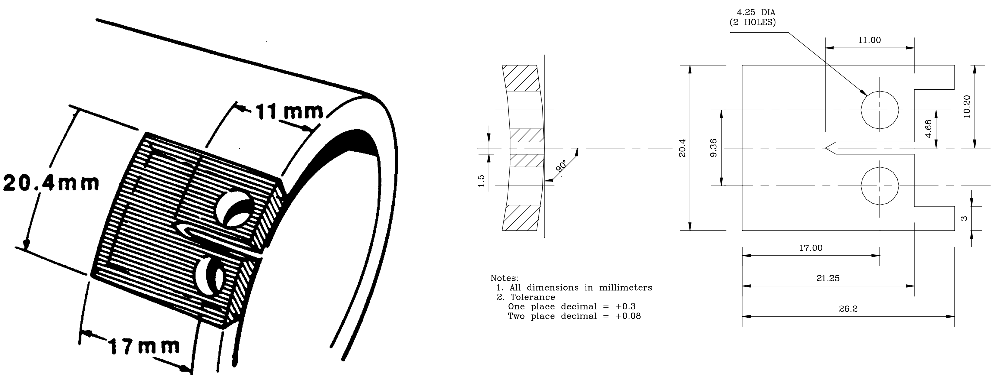
연료 집합체 및 냉각재인 중수를 지지하는 부품으로, 1 차 계통의 압력경계 부품 중 가장 핵심이 되는 부품으로 압력관은 중수로 내의 핵연료와 칼란드리아 튜브(Calandria tube)사이에 설치되어 있고 핵연료에서 발생된 열을 전달하기 위한 중수(D2O)가 흐르고 있으며, 또한 약 10MPa 의 압력과 250~310℃의 고온의 냉각수 및 최대 30×1025n/m^2 (E>1MeV, E:중성자에너지)의 누적조사량을 받으며 설계수명 동안 운전되도록 되어 있다. 이러한 가혹한 사용환경을 만족시키기 위하여 고온에서 기계적 특성과 내식성이 우수하고 중성자 흡수단면적이 작은 Zr-2.5Nb 합금을 개발하여 사용하고 있다. 중수로 압력관의 건전성 평가로 압력관의 임계크랙길이 (CCL: critical crack length)에 의한 안전 수명을 정확히 예측하기 위한 압력관의 파괴인성실험은 매우 중요하다. 한편, 압력관의 파괴인성 실험은 압력관의 제한된 제원 때문에 ASTM 에 제시된 시험편 규격을 따르는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 캐나다의 AECL 에서는 압력관의 곡면을 살린 Curved Compact Tension (CCT) 시험편을 이용하여 ASTM 에서 규정한 파괴인성 실험에 준한 파괴인성 실험법 [1. 2] 으로 상온에서부터 정상운전온도에 이르기까지 온도변화가 압력관에 미치는 영향을 알아보기 위하여 여러 온도구간을 설정하여 온도에 따른 중수로압력관의 강도, 파괴거동 및 CCL 을 평가하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 재료 및 시험편



(a) Geometry of transverse tensile specimen



(b) Geometry of CCT Specimen

Fig. 1 Transverse tensile specimen and CCT specimen for Fracture Toughness

본 연구에 사용된 재료는 중수로 Zr-2.5Nb 압력관으로 내부직경은 103 mm 이며, 두께는 4.2~4.4 mm 이다. 횡방향 인장실험을 위하여 Fig. 1(a)와 같은 gauge length 가 10mm, 폭 4mm, 두께 2mm 인

횡방향 인장시험편을, 그리고 J-R 곡선으로부터 dJ/da 를 얻기 위한 파괴인성 시험편은 Fig. 1(b)과 같은 위치에서 축방향의 노치를 갖는 CCT 시험편을 제작하여 사용하였다. CCT 시험편의 크랙 진전방향은 Axial 방향이다.

2.2 실험 장치 및 방법

인장 및 파괴인성 실험은 Instron 8501 으로 행하였으며, 횡방향 인장실험은 상온에서는 ASTM E 8 [3] , 고온에서는 ASTM E 21 [4]에 준하여 실행하였다. Instron 의 Series IX 프로그램이 사용되었으며, 인장실험의 결과는 또한 파괴인성치와 CCL 계산에 필수적인 기본 데이터로 쓰인다.

한편, 파괴인성은 ASTM E 1737-96 [5]에 준하여 Single-specimen method 에 의하여 수행하였으며, 파괴인성실험을 위해서 피로예비균열을 삽입하였다. 피로 예비균열을 얻기 위하여 1.5° 의 테이퍼 핀을 사용하여 피로크랙의 길이는 크랙비(a_i/W)가 약 0.5 정도가 되게끔 하였으며, 하중비 ($R=Pmax/Pmin$) 는 0.1 로 하였다. 피로크랙은 ΔK 감소법을 사용하였으며, 초기의 ΔK 는 약 14 MPa√m 였으며, 최종 크랙길이의 약 25%가 남았을때는 약 12MPa√m 가 되게끔 조절하였으며, Frequency 는 3Hz 로 하였다. 이때의 피로 크랙의 진전을 측정하기 위해 travelling microscope 를 사용하였다. 파괴인성실험안의 크랙 측정은 DCPD 방식에 의하여 추정하였으며, 실험이 끝난 후에는 Nine point average method 에 의하여 실제크랙 길이를 측정한 후에 DCPD 를 보정하였다.

2. 3 J-Resistance Curve

J-R 곡선은 ASTM E-1152 [6]의 J 계산식에 의해 구할 수 있다. *J* 값은 식(1)을 이용하여 하중, 하중변위 값, 그리고 그 시점에서의 크랙 길이에 의해 구할 수 있다.

$$J = Jel + Jpl \tag{1}$$

여기서 J_{el} 과 J_{pl} 은 각각 J 의 탄성 및 소성에 의한 해당되는 값으로 J_{el} 값은 작용하중, P_i,와 크랙 길이, a_i,의 함수이며, 식(2)에 의해 구해진다.

$$J_{el} = \frac{P_i(1-n)}{EB\sqrt{W}} f(\frac{a_i}{W}) \tag{2}$$

B 는 시편의 두께이며, n는 Poisson's ratio, W 는 시편의 폭, 그리고 E 는 Young's Modulus 이다. 그리고

$$f(\frac{a_i}{W}) = \frac{2+a_i/W}{(1-a_i/W)^{3/2}}(0.866+4.64\frac{a_i}{W}-13.32(\frac{a_i}{W})^2+14.72(\frac{a_i}{W})^3-5.6(\frac{a_i}{W})^4) \tag{3}$$

Jpl 은 하중점 변위에 의해 구해진다.

$$J_{pl} = [J_{pl(i-1)} + (\frac{h}{b})\frac{A_{pl(i)}-A_{pl(i-1)}}{B}][1-g_i\frac{(a_i-a_{i-1})}{b}] \tag{4}$$

여기서

$$h_i = 2.0+0.522\frac{b}{W}, \quad g_i = 1.0+0.76\frac{b}{W} \tag{5}$$

이때, $A_{pl(i)}$ - $A_{pl(i-1)}$은 하중과 하중점 변위 곡선상의 소성역 부분의 면적 증가분으로 식(6)에 의해 구할 수 있다.

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + [P_i + P_{i-1}][d_{pl(i)} - d_{pl(i-1)}]/2 \tag{6}$$

$d_{pl(i)}$는 전체 하중점 변위, d,의 소성영역에 해당되는 부분이며, 현재 크랙에 대한 탄성 컴플라이언스로부터 구할 수 있다.

$$d_{pl(i)} = d_i - P_i C_i \tag{7}$$

또한, C_i는 시편의 컴플라이언스로 식(8)에 의해 계산된다.

$$C_i = \frac{1}{E^* B}\left(\frac{w+a_i}{w-a_i}\right)^2 \left[2.1630 + 12.219\frac{a_i}{w} - 20.065\left(\frac{a_i}{w}\right)^2 - 0.9925\left(\frac{a_i}{w}\right)^3 + 20.609\left(\frac{a_i}{w}\right)^4 - 9.9314\left(\frac{a_i}{w}\right)^5\right] \tag{8}$$

식(8)의 E^*은 시험방법의 불확실성을 고려한 Effective Young's Modulus 이다. 이 값은 초기 시험편의 컴플라이언스의 값, C_0,와 원래 크랙길이 a_0에 의해 구해진다.

$$E^* = \frac{1}{C_0 B}\left(\frac{w+a_0}{w-a_0}\right)^2 \left[2.1630 + 12.219\frac{a_0}{w} - 20.065\left(\frac{a_0}{w}\right)^2 - 0.9925\left(\frac{a_0}{w}\right)^3 + 20.609\left(\frac{a_0}{w}\right)^4 - 9.9314\left(\frac{a_0}{w}\right)^5\right] \tag{9}$$

2.4 CCL 계산

균열 구동력 (Crack Driving Force: CDF)의 평가는 실험적으로 측정되는 균열진전 저항력 (J-R) 값과 역학적으로 계산되는 균열 구동력 J 값을 비교함으로써 균열의 성장 및 파괴과정을 평가하는 방법으로 CDF 에서 하중이 고정되어 있는 경우, 균열의 불안정 성장조건은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial J}{\partial a}\right)_P \geq \frac{\partial J_R}{\partial a} \tag{10}$$

따라서 *J-R curve* 가 CDF 곡선과 접하는 위치에서의 초기 균열 길이를 CCL 로 규정한다. 이때 축방향의 관통결함을 갖는 압력관의 CDF 는 식 (11)에 의해 구할 수 있다[8].

$$J = \frac{K_I^2}{E} = \frac{8}{p}\frac{s_f^2}{E} a \cdot \ln\left[\sec\left(\frac{p}{2}\frac{M \cdot s_h}{s_f}\right)\right]$$
$$M = \sqrt{[1 + 1.255(a^2/(r_m \cdot t)) - 0.0135(a^4/(r_m \cdot t)^2]} \tag{11}$$

여기에서, s_h는 applied hoop stress in the pressure tube, σ_f는 재료의 flow stress, $2a$는 크랙 길이, M은 압력관 곡률에 대한 correction factor 를 E는 탄성 modulus, r_m =는 압력관의 반경 그리고 t는 압력관의 두께를 나타낸다. CCL 을 결정하기 위한 사용압력은 실제 발전소의 outlet 조건인 310°C 에서의 150 MPa 원주응력을 사용하였으며, CCL 은 J-R curve 와 CDF 선도의 접점에 의해 결정되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 횡방향 인장거동

Fig. 2 에 각각의 온도에서 구한 항복강도, 인장강도 및 연신율을 나타내었다. 그림에서 항복강도와 인장강도는 온도가 증가함에 따라 모두 감소하는데, 특히 150℃ 부근을 기점으로 그 이전의 온도 구간에서는 급격한 감소를 보이다가 250℃ 이후에서는 완만한 감소를 나타내었다. 온도 상승에 의해 감소하는 항복 및 인장 강도와는 달리 연신율은 온도가 150℃정도에서는 최대의 값을 나타냈으나, 거의 모든 온도에 대하여 큰 변동은 보이지 않았다. 이와 같은 현상은 용질원자와 전위와의 고착관계에서 비롯한 동적변형시효의 효과 [7]로 설명된다.

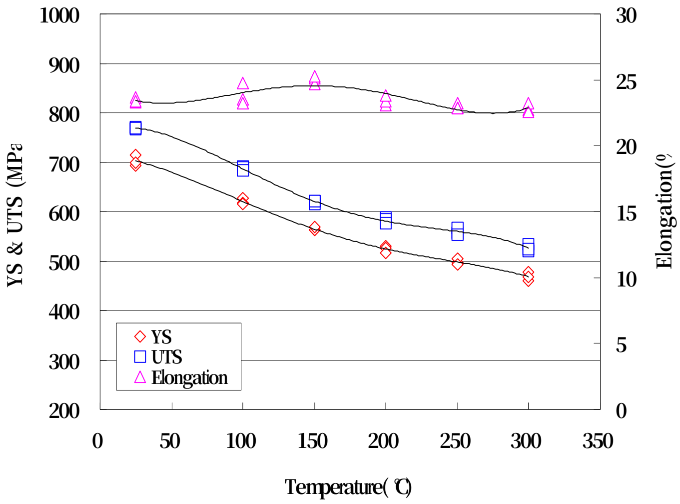


Fig. 2 Results of tensile test
Yield stress, tensile stress and elongation with various temperatures

3.2 균열진전 저항거동특성

Fig. 3 에 상온에서의 J-R 선도의 대표적인 예를 나타내었다. 연성적인 파괴양상의 안정적 균열진전을 보였으며, 각각의 온도에 대해서 온도가 증가할수록 전반적으로 J 의 값은 감소하였다.
J-R 곡선에서 0.15mm 와 1.5mm 의 균열성장점에서 직선을 그린 후, 두 직선사이의 J-R 곡선의 기울기(regression line)로 dJ/da 를 구하였다. 각 온도별 dJ/da 를 Fig. 4 에 나타내었다. 본 실험에서의 dJ/da 값은 250~350MPa 정도였으며, 약 100℃ 부근에서 최대값을 보인 후, 온도가 증가 할수록 감소하였다. 각 온도별 초기균열진전 (피로균열 선단으로부터 0.5~1mm)의 SEM 사진을 Fig. 5 에 나타내었다. 파면에는 수많은 공공(void)이 핵이 되어 균열진전 방향으로 성장하는 신장형 딤플(elongated dimple)이 관찰되었다. 이와 같은 딤플은 온도가 상승함에 따라 크게 성장하였으며 250℃까지의 파면에서는 횡방향의 이차균열 (secondary crack)이 관찰되지만 300℃에서는 관찰되지 않았다. 균열진전방향에 대해 깊이 방향으로 생기는 이차균열은 균열 선단에 작용하는 응력을 분산 또는 완화 시킴으로써 파괴인성값을 높이는데 기여하지만 이차균열이 존재하지 않는 300℃의 경우는 균열 선단에 작용하는 응력을 완화 시키지 못해 파괴인성값의 저하로 나타난 것으로 생각되어

진다. 이러한 현상은 연신율 및 파괴인성의 결과와도 관계가 있는 것으로 생각되어진다.

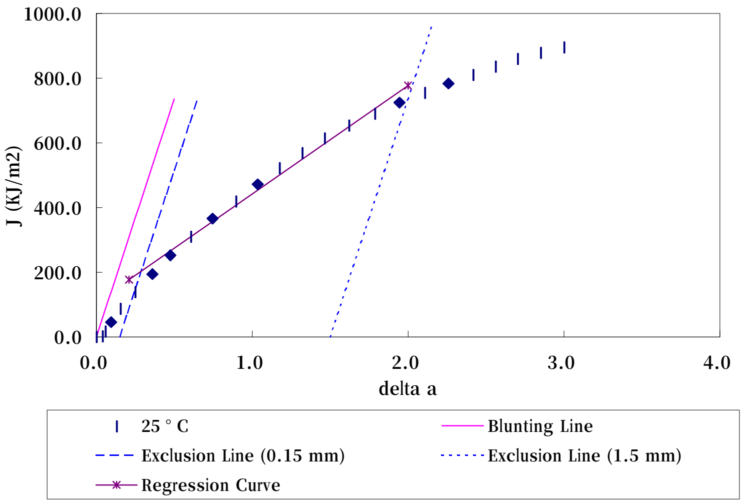


Fig.3 Typical crack resistance curve at room temperature

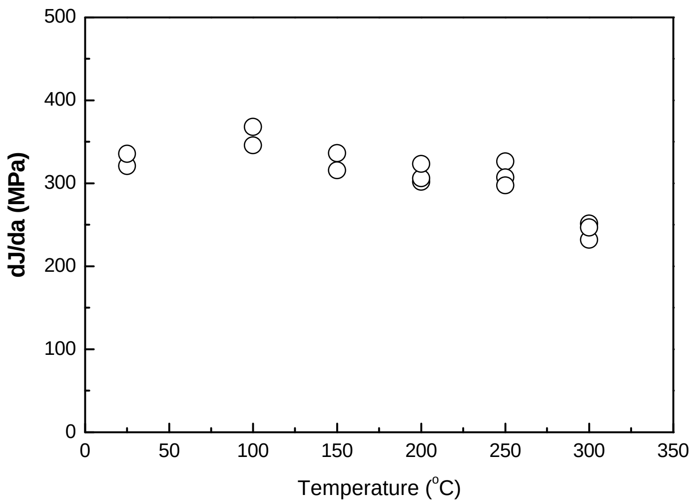
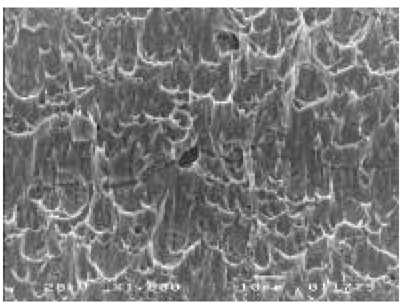
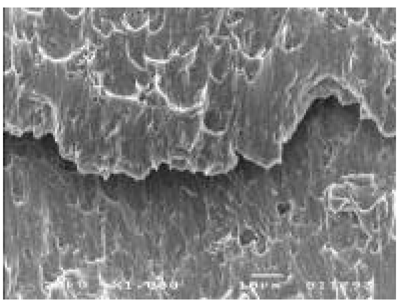


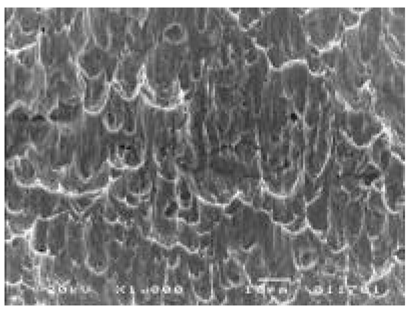
Fig. 4 The *dJ/da* values with various temperature



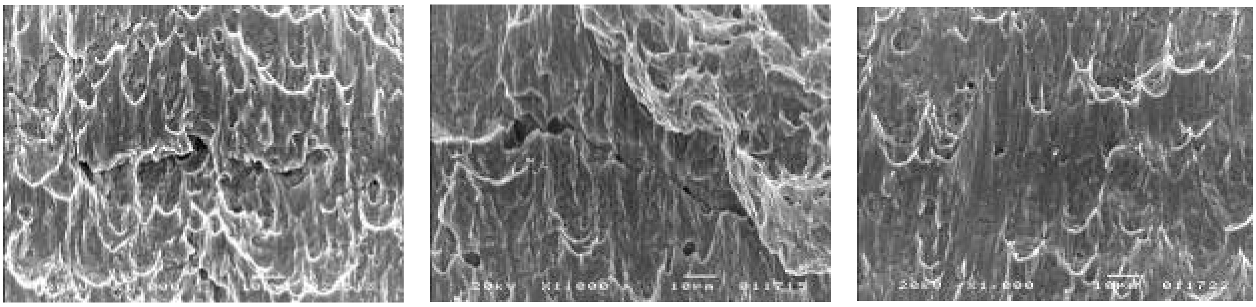
(a) 25℃



(b) 100℃



(c) 150℃



(d) 200℃ (e) 250℃ (f) 300℃

Fig. 5 Fracture surface of Zr-2.5Nb pressure tubes by SEM

3.3 온도 변화에 따른 CCL 평가

Fig. 6 는 상온조건의 Zr-03 에 대한 CCL 을 결정하는 것을 보여주는 일례를 나타내었다. 각 온도별 CCL 은 파괴인성 실험으로부터 얻어지는 *J-R* 곡선과 JCD 곡선이 만나는 지점의 초기 균열길이의 2 배로 결정된다. 이런 과정으로 구해진 CCL 과 항복강도의 값을 함께 Fig. 7 에 나타내었다. 본 실험에서 CCL 은 온도가 상승함에 따라 완만하게 감소하는 경향을 나타내었으며 이러한 현상은 온도의 상승에 따른 인장강도 및 파괴인성 거동과 일치 하고 있다. 또한 본 실험에서의 온도별 감소 비는 –0.971 로, 항복응력의 감소 비 -0.985 과 거의 유사하였다. 앞으로 더욱 많은 데이터 분석을 통하여 CCL 과 항복강도의 관계를 규명하는 것이 필요하겠지만, *J-R* 곡선과 JCD 곡선에 의해 CCL 이 결정되어진다고 볼 때, 이 두 곡선은 항복응력의 값에 의해 많이 변화되는 것을 알 수 있었다. 이것으로 미루어 보아 항복응력의 값이 CCL 의 값에 많은 영향을 미친다고 생각되어진다.

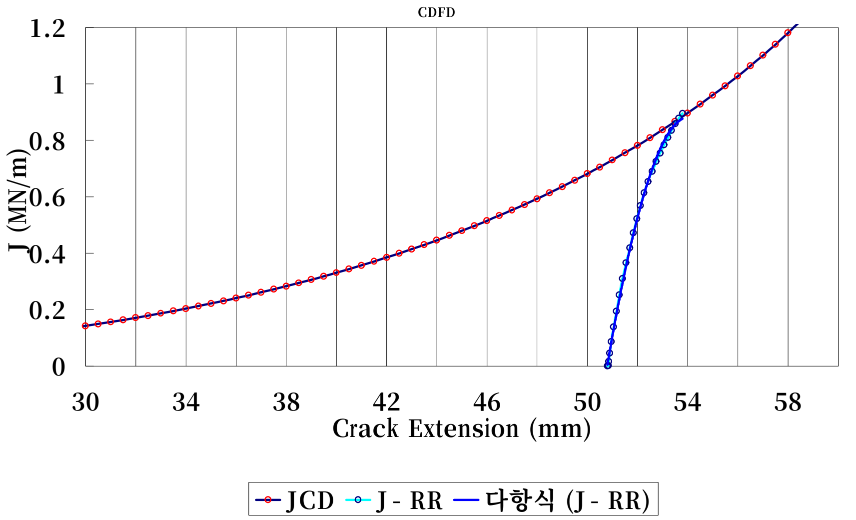


Fig. 6 Determination of CCL (Zr-03/25℃) using JCDF

enter text here

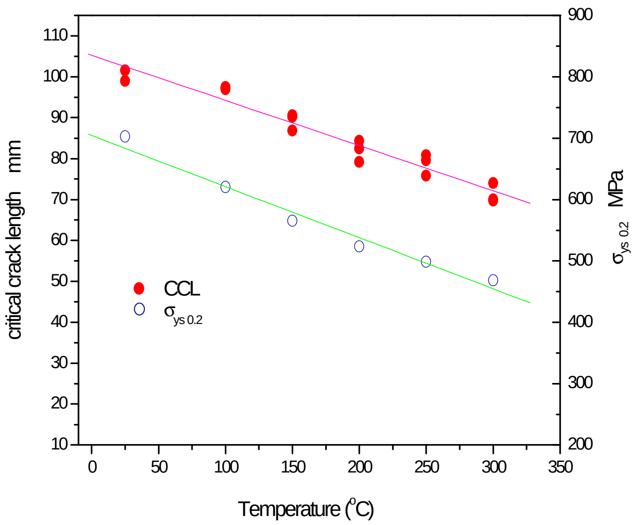


Fig. 7 CCL and yielding strength ($\sigma_{ys\ 0.2}$) comparison with various temperature

4. 결 론

인장 및 CCT 시험편을 사용하여 중 온도 변화에 대한 중수로 압력관의 인장강도 및 파괴인성특성 그리고 이들 데이터로부터 얻어지는 CCL 에 대하여 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 횡방향 인장실험결과, 항복강도와 인장강도는 온도가 증가함에 따라 감소하였으며, 150℃ 이상의 온도에서는 그 감소 비가 완만하게 나타났다. 연신율은 항복응력 및 인장강도와는 다른 경향을 보였으며 이러한 현상은 동적변형시효로 설명된다.

(2) 파괴인성실험에서 dJ/da 값은 약 100℃ 부근에서 최대값을 나타내었으며 250℃까지는 값의 일정한 값을 유지하다가 300℃에서는 감소하였다.

(3) 파괴인성파면의 SEM 관찰결과 모든 파면에서는 미소공공이 관찰되었으며 250℃이하의 파면에서는 이차균열이 관찰되었으며, 이 이차균열은 파괴인성 값에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

(4) CCL 은 온도가 상승함에 따라 완만하게 감소하는 경향을 나타내었으며 이러한 현상은 온도의 상승에 따른 인장강도 및 파괴인성 거동과 일치 하였다. 온도 상승에 따른 CCL 의 감소 비는 항복응력의 감소 비와 매우 유사하였다.

5. 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 사업의 중수로 압력관 기술개발 과제의 일환으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] L.A. Simpson, C.K. Chow, and P.H. Davies, “Standard Test Method for Fracture Toughness of CANDU Pressure Tubes”, AECL Report COG-89-110-I, September 1989

[2] D.D. Himbeault and P.H. Davies, “Second International Round Robin on Fracture Toughness Testing of Pressure Tube Materials Using 17 mm Curved Compact (Toughness) Specimens,” RC-2069, COG-98-161-I, Jan. 1999, AECL

[3] American Society for Testing and Materials, ASTM E 8, “Standard Test Method of Tension Testing of Metallic Materials”

[4] American Society for Testing and Materials, ASTM E 21, “Standard Recommended Practice for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials”

[5] American Society for Testing and Materials, ASTM E 1737-96, “Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness”

[6] American Society for Testing and Materials, ASTM E 1152-87, “Standard Test Method for Determining J-R Curves”

[7] S.I. Hong, W.S.Ryu and C.S.Rim, "Elongation minimum and strain rate sensitivity minimum of zircaloy-4", J. Nucl. Mater., 116, 1983, pp.314~316