2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CCT시편을 이용한 Zr-2.5Nb 압력관의 파괴인성평가

Assessment of Fracture Toughness of a Zr-2.5Nb Pressure Tube Using Curved Compact Tension Specimens

부명환, 조충형, 김상재, 임경수, 김영석

한국원자력연구소
대전관역시 유성구 덕진동 150**번지**

요약

중수로압력관은 1차 계통의 압력경계 부품으로, 가동 중 고온, 고압등 가혹한 환경조건에서 사용되고 있으며 원자로의 가동 온도에 따라 기계적 특성이 변화하므로 각 온도에 따른 압력관의 파괴인성특성을 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 중수로 압력관의 온도에 따른 파괴인성특성을 평가하기 위하여 소형 CCT시편을 이용하여 상온에서 300℃까지의 온도영역에 대하여 인장 및 파괴인성실험을 행하였다. **항복강도와 인장강도는 온도가 증가함에 따라 유사한 경향을 보이며** 150~250℃에서 plateau현상이 나타났다. 인장시험의 결과를 기초로 하여 압력관의 온도에 따른 파괴인성특성을 평가하였다.

Abstract

The aim of this study is to investigate fracture toughness of a Zr-2.5Nb pressure tube with temperature. The tensile and fracture toughness tests were performed at temperatures ranging from room temperature to 300℃ on tensile and curved compact tension, CCT specimens. The CCT specimens were directly cut from the tube retaining original curvature using wire cutting machine. The Zr-2.5Nb tube had a decrease in yield and tensile strengths 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 150~250℃ determined the fracture toughness resistance, dJ/da of the Zr-2.5Nb tube with temperature, resulting in the maximum in the range of 100~150℃. The temperature dependence of the fracture toughness for the Zr-2.5Nb tube is discussed fracture in association with the formation of secondary crack on the fractured surfaces.

1. 서 론

가압 중수로형 발전로의 압력관은 핵연료 집합체 및 냉각재인 중수를 지지하는 부품으로, 중수로 원자력발전소의 안정성 및 가동률의 관점에서 1차 계통의 압력경계 부품 중 가장 핵심이 되는 부품이다. 압력관은 중수로 내의 핵연료와 칼란드리아 튜브(Calandria tube)사이에 설치되어 있고 핵연료에서 발생된 열을 전달하기 위한 중수(D_2O)가 흐르고 있다. 또한 약 10MPa의 압력, 250~310℃의 고온의 냉각수 및 최대 30×10^{25}n/m^2 (E>1MeV, E:중성자에너지)의 누적조사량을 받으며 설계수명 30년 동안 운전되도록 되어 있다. 이러한 가혹한 사용환경을 만족시키기 위하여 고온에서 기계적 특성과 내식성이 우수하고 중성자 흡수단면적이 작은 Zr-2.5Nb합금을 개발하여 사용하고 있다.

중수로 압력관의 건전성에 치명적인 영향을 미치는 요소로는 ①고온 ②고압 ③중수에 의한 수소침입 ④중성자 조사에 의한 미세조직의 변화등 여러 가지가 있으며 각 요소가 단독으로 영향을 미치는 것이 아니라 복합적으로 작용하고 있다. [1~4]. 이중 상온에서부터 정상가동상태에 대한 재료의 기계적 특성평가는 압력관의 운전 건전성평가에서 기본적인 요건이다.

압력관의 운전건전성을 평가하는 방법중 파괴인성은 표면균열로부터 성장한 관통균열의 크기가 임계균열길이에 이르면 불안정하게 성장하여 파손에 이른다는 파단전 누설(LBB, leak before break)의 개념에서 대단히 중요한 역할을 하게 된다. CANDU (CANada Deuterium Uranium) 압력관에서는 불안정 파괴가 일어나기 시작하는 길이인 CCL(critical crack length)[5]보다 짧은 관통균열이 발생하여 중수의 누출이 감지되고 적절한 조치가 취해질 때까지 균열의 성장이 CCL을 넘지 않을 경우에 파단전 누설 개념을 보장한다. 여기서 CCL은 파괴인성과 매우 밀접한 관계가 있다. 이 값은 압력관의 대형 Burst Test나 소형 CCT 시험편의 파괴인성 시험을 통하여 구할 수 있으며 압력관의 파괴거동에 대한 연구는 원자로의 경제성과 안전성에 매우 중요한 부분을 차지하게 된다.

본 연구에서는 상온에서부터 정상운전온도에 이르기까지 온도변화가 압력관의 인장 및 파괴인성특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 여러 온도구간을 설정하여 온도에 따른 중수로압력관의 강도 및 파괴거동을 비교 검토하였다.

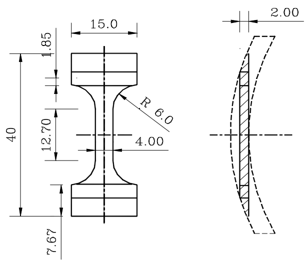
2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

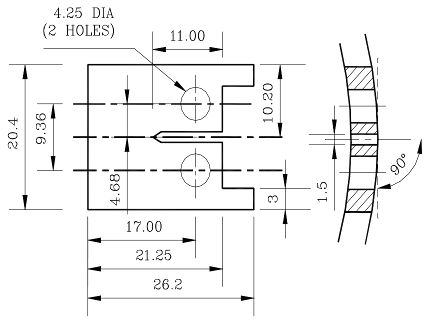
본 연구에 사용한 재료는 중수로 Zr-2.5Nb 압력관재료이다. 횡방향 인장실험을 위하여 Fig. 1(a)와 같은 gauge length가 10mm, 폭 4mm, 두께 2mm인 횡방향 인장시험편을, 그리고 *J-R* 곡선을 얻기 위한 파괴인성 시험편은 Fig. 1(b)과 같은 위치에서 축방향의 노치를 갖는 CCT (Curved Compact Tension)시험편을 제작하여 사용하였다. CCT시험편의 크랙 진전방향은 Axial방향이며, W는 17mm, 크랙비 (a_i/W)는 0.5이다.

2.2 인장실험 및 파괴인성 시험

인장실험과 파괴인성실험을 위해 사용한 시험기는 Instron 8501이며, 횡방향 인장실험을 위한 Shoulder type의 그립을 자체 제작하여 사용하였으며, 파괴인성 실험을 위한 그립은 Zr-2.5Nb합금을 사용하여 가공하였으며 직류전위차 (DCPD, Direct Current Potential Drop)장치의 전류의 절연을 위하여 800℃에서 3시간 열처리 후에 공랭 하여 산화막 처리를 하였다. 파괴인성은 ASTM E 1737-96[6]에 준하여 Single-specimen method에 의하여 수행하였다. 파괴인성실험을 위해서 피로예비균열을 삽입하였다. 예비균열은 ΔK=12~10MPa$\sqrt{m}$로 ΔK를 감소시키면서 하중비($R=P_{max}/P_{min}$)를 0.1로 하여 3Hz의 주기로 삽입하였다. 또한 균일한 피로 예비균열을 얻기 위하여 1.5^o 의 테이퍼 핀을



(a) Geometry of transverse tensile specimen



(b) Geometry of CCT Specimen

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

사용하였다. 이때의 피로 크랙의 진전을 측정하기 위해서 2대의 travelling microscope를 사용하였으며, 파괴인성 실험 중에는 크랙 진전을 DCPD장치를 이용하여 측정하였으며 실험이 끝난 후에는 9점 평균 균열길이 측정 방식에 의해 실제 균열길이를 측정하여 DCPD값을 보정하였다.

2.3 파괴인성 평가

파괴인성시험은 0.05mm/min의 하중선변위(Load Line Displacement, LLD)속도로 변위량을 0.025~0.01mm의 간격으로 조절하여 실시하였다. LLD의 측정은 지그에 부착된 2개의 선형변위측정장치(LVDT)를 이용하였으며, 안전균열 성장량은 DCPD장치를 이용하였다. 실험이 끝난 후에는 약 300℃에서 10분간 heat-tinting작업을 하였으며, 시편의 추가적인 변형을 방지하기 위하여 하중비, 0.7에서 피로크랙 작업을 하여 시험편을 파단시켰다. 파단된 시험편의 최종 크랙길이를 9-point average method에 의해 측정하였다.

J-R 곡선은 ASTM E-1152[7] 의 J계산식에 의해 구할 수 있다. *J*값은 식(1)을 이용하여 하중, 하중변위값, 그리고 그 시점에서의 크랙길이에 의해 구할 수 있다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \tag{1}$$

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

$$J_{el} = \frac{P_i^2(1-\nu^2)}{EB^2W} f^2\left(\frac{a_i}{W}\right) \tag{2}$$

B는 시편의 두께이며, ν는 Poisson s ratio, W는 시편의 폭, 그리고 E는 Young's Modulus이다. 그리고

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

J_{pl}은 하중점 변위에 의해 구해진다.

$$J_{pl} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta}{b}\right)\frac{A_{pl(i)}-A_{pl(i-1)}}{B}\right]\left[1-\gamma_i\frac{a_i-a_{(i-1)}}{b}\right] \tag{4}$$

여기서

$$\eta_i = 2.0 + 0.522\frac{b}{W}, \gamma_i = 1.0 + 0.76\frac{b}{W} \quad (5)$$

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

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

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

$$\delta_{pl(i)} = \delta_i - P_i C_i \quad (7)$$

또한, C_i는 시편의 컴플라이언스로 식(8)에 의해 계산된다.

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

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

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 횡방향 인장거동

횡방향 인강시험에 의해 얻은 하중-변위선도의 대표적인 예를 Fig. 2에 나타내었다. 하중-변위선도에서 온도가 증가할수록 항복강도와 인장강도가 감소함을 알 수 있다. 탄성영역의 기울기 또한 온도가 증가함에 따라 점점 감소하고 있으며, 소성영역 이후에는 strain hardening이 감소하는 경향

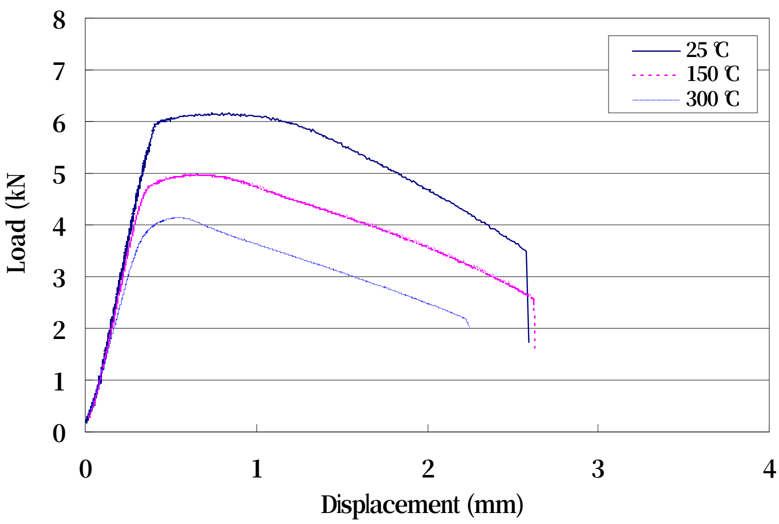


Fig. 2 Typical tensile load and displacement curves at each temperature.

을 보이고 있다. Fig.3에 각 온도구간에 대한 항복강도 및 인장강도를 나타내었다. 그림에서 항복강도와 인장강도는 온도가 증가함에 따라 감소하지만 약 150℃부근에서 완만하게 감소하였고 다시 250℃이후에는 급격히 감소는 경향을 나타내었다. Fig.4는 각 온도구간에 대한 연신율을 나타낸 것이다. 연신율의 경우 온도가 약 150℃에서는 최대의 값을 나타내고 있으며 이후 감소하여 일정한 경향을 나타내었다. 이와 같은 현상은 Zircaloy-4의 판재에서도 관찰되고 있으며, 홍순익등[8]은 이 현상을 용질원자와 전위와의 고착관계에서 비롯한 동적변형시효의 효과라고 설명하였다.

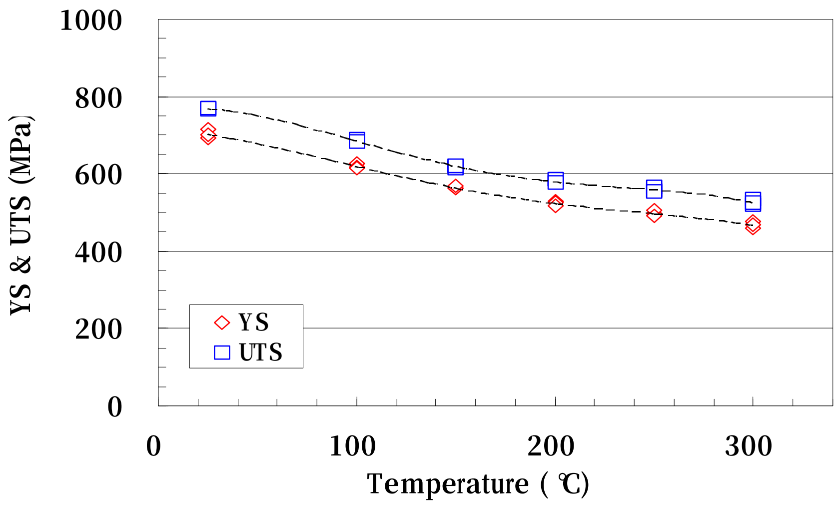


Fig. 3 Yield stress, tensile stress variations with temperature

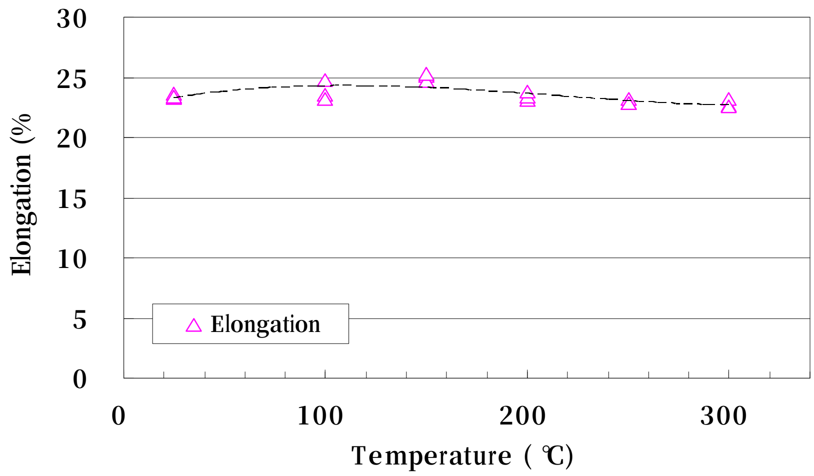


Fig. 4 Elongation variations with temperature

3.2 균열진전 저항거동특성

Fig. 5는 상온, 150 및 300℃의 파괴인성시험으로 얻은 하중-하중선 변위선도의 대표적인 예이다. 안정적인 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 변위에 대한 최대하중은 온도가 증가함에 따라 감소하고 있으며, 300℃의 경우 최대하중은 급격히 감소하고 있다.

Fig. 6에 상온에서의 J-R 선도의 대표적인 예를 나타내었다. 연성적인 파괴의 양상을 나타내는 안정적인 균열진전을 나타내고 있으며 다른 온도조건에 대해서도 온도의 증가에 따른 J의 값은 감소하지만 전반적으로 같은 양상을 나타낸다.

그림에서와 같이 0.15mm와 1.5mm의 균열성장점에서 둔화직선(exclusion line)과 같은 기울기의 직선을 그린 후, 두 직선사이의 J-R 곡선의 기울기(regression line)를 dJ/da로 정의하였으며 각 온도에 대한 dJ/da의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. dJ/da값은 온도에 따라 약 250~350MPa 정도였으며, dJ/da값의 변화는 약 100~150℃근처에서 최대를 나타낸 후 감소하여 150~250℃에서 일정한 경향을 나타내고 있으며 이후 다시 감소하고 있다. Fig. 6의 결과는 Fig. 2의 연신율과 같은 경향을 나타내고 있으며 이후 파면의 관찰에서도 확인할 수 있다.

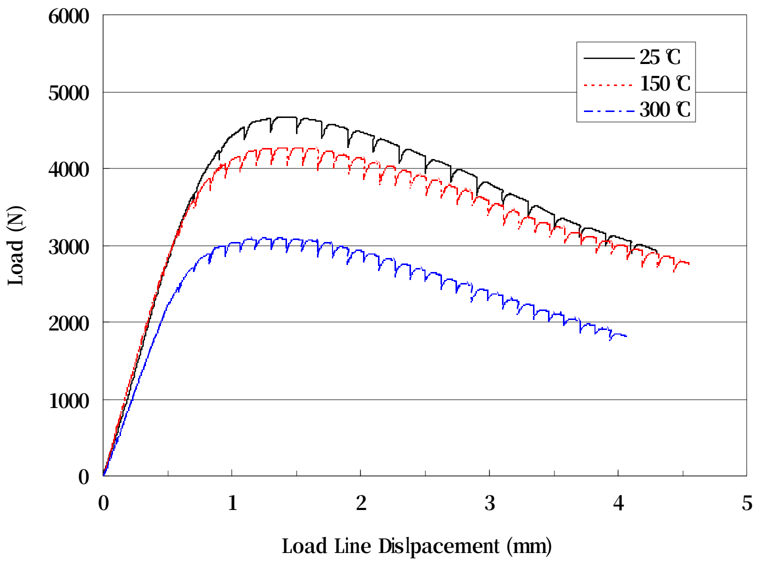


Fig. 5 Typical behaviors of load and LLD

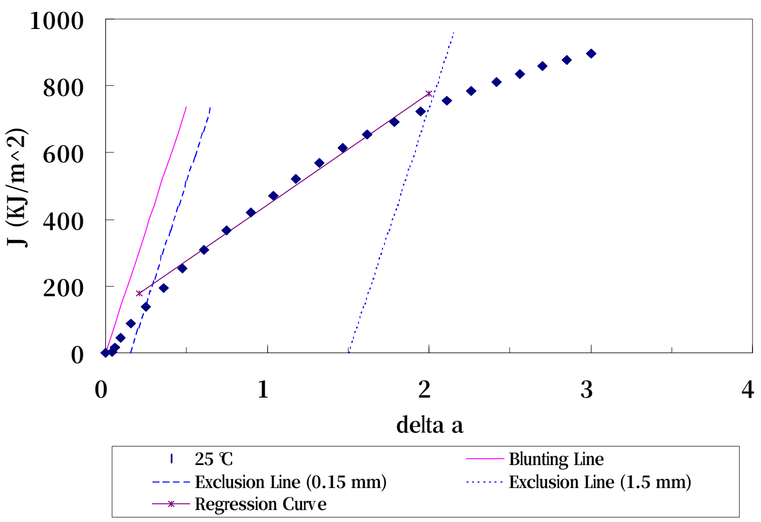


Fig.6 Typical crack resistance curve at room temperature

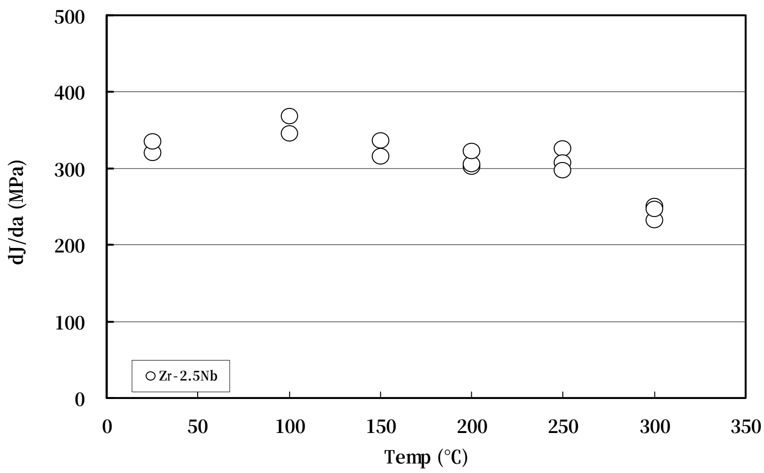
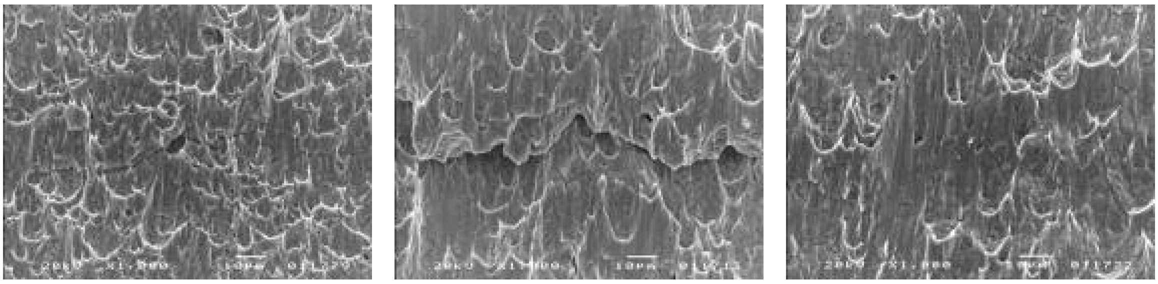


Fig. 7 The *dJ/da* values with various temperature

Fig. 8은 각 온도에서의 파괴인성시험후의 단면을 거시적으로 관찰한 사진이다. 피로예균열은 비교적 균일하게 삽입이 되었으며, 균열초기에 형성된 평면파면이 두께방향의 변형을 수반하면 안정적으로 성장하였다. 또한 시험편 중앙에 터널링(tunneling)이 형성되는 특성을 나타내고 있다. Fig. 9은 균열진전의 초기단계에 대한 SEM사진으로 피로균열선단으로부터 균열이 약 0.5~ 1mm정도 진전한 위치에서 시험편의 중앙부에서 관찰한 결과이다. 파면에는 수많은 공공(void)이 확인되고 있으며 이 공공이 핵이 되어 균열진전 방향으로 성장하는 신장형 딤플(elongated dimple)이 관찰되고 있다. 이외 같은 딤플은 정성적이기는 하지만 온도가 올라감에 따라 크게 성장하였다. 또한 25~250℃까지의 파면에서는 횡방향으로 100㎛이상의 이차균열(secondary crack)이 관찰되지만 300℃에서는 거의 관찰되지 않고 있다. 이러한 현상은 Fig. 2의 연신율과 Fig. 6의 파괴인성과도 관계가 있는 것으로 생각되어지며, 균열진전방향에 대해 깊이 방향으로 생기는 이차균열은 균열선단에 작용하는 응력을 완화 또는 분산시켜 파괴인성값을 높이는 역할을 하지만 이차균열이 존재하지 않는 300℃의 경우는 균열선단에 작용하는 응력을 완화시키지 못하기 때문에 파괴인성값의 급격한 저하로 나타난 것 같다.

(a) 25℃ (b) 150℃ (c) 300℃

Fig. 8 Macroscopic fractured surface images



(a) 25℃ (b) 250℃ (c) 300℃

Fig. 9 Fracture Surface of Zr-2.5Nb Pressure Tubes by SEM

4. 결 론

CCT시험편을 사용하여 온도가 중소로 압력관의 인장강도 및 파괴인성특성에 미치는 영향에 대하여 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 횡방향의 인장실험결과, 항복강도와 인장강도는 온도가 증가함에 따라 감소하다 약 150℃부근에서 완만하게 감소하였고 다시 250℃이후에는 급격히 감소는 경향을 나타내었다. 연신율은 인장강도와 반대의 경향이 보이며 이러한 현상은 동적변형시효로 설명된다.

(2) 파괴인성실험에서 dJ/da값의 변화는 약 100℃근처에서 최대를 나타낸 후 감소하여 150~250℃에서 일정한 경향을 나타내고 있으며 이후 다시 감소하고 있다.

(3) 파괴인성파면의 SEM사진을 보면 모든 시험편에 대하여 미소공공이 관찰되고 있으며 250℃이하에서 관찰되는 이차균열은 파괴인성값에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

5. 후 기

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

참고문헌

(1) Ells. C.E., "The Pressure Tubes in CANDU Reactors", *AECL-Report*, AECL-7344.

(2) Pulse, M.P., "Assessment of Aging of Zr-2.5Nb Pressure Tube in CANDU Reactors", Nuclear Engineering and Design, Vol. 71, 1977, pp.137~148.

(3) Kim, Y. S., Seon,S. M., Kim, S. S. and Kwon, S. C., *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 38, 2000, pp. 35.

(4) 안상복, 김영석, 김정규, “Zr-2.5Nb 중수로 압력관의 조사후 강도 및 파괴거동 특성”, 대한기계학회논문집 A권, 제25권, 제3호, pp.510~519, 2001.

(5) Simpson L. A. and Clarke, C. F., "An elastic -plastic R-curve description of fracture in Zr-2.5%Nb pressure tube alloy," Elastic Plastic Fracture, ASTM STP 668, Landes, J. D., Begley, J. A. and Clarke, G. A. Eds., American society for Testing and Materials, Philadelphia,, 1979, pp. 643-662.

(6) American Society for Testing and Materials, ASTM E 1737-96, “Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness”.
(7) American Society for Testing and Materials, ASTM E 1152-87, “Standard Test Method for Determining J-R Curves”.
(8) 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.