

Zr-2.5Nb의 인장 및 파괴인성 특성

Tensile and Fracture Toughness Characteristics of Zr-2.5Nb Pressure Tube

정현철, 김영석, 안상복, 김성수, 임경수
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 가압 중수로용 발전로의 압력관은 핵연료 집합체 및 냉각재인 중수를 지지하는 부품으로 사용되는 Zr-2.5Nb합금의 인장특성 및 파괴인성특성을 고찰하였다. 중수로 압력관은 10MPa의 압력과 250~310°C의 고온의 냉각수 및 최대 $30 \times 10^{25} n/m^2$ ($E > 1\text{MeV}$, E:중성자에너지)의 누적조사량을 받으며 설계수명 동안 운전되도록 되어 있으므로 고온에서 기계적 특성과 내식성이 우수하고 중성자 흡수단면적이 작은 Zr-2.5Nb합금을 개발하여 사용하고 있다. 압력관의 파괴인성실험은 중수로 압력관의 건전성 평가로 압력관의 안전 수명을 정확히 예측하기 위해서 매우 중요하다. 한편, 압력관의 파괴인성 실험은 압력관의 제한된 제원 때문에 ASTM에 제시된 시험편 규격을 따르는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 압력관의 곡면을 살린 Curved Compact Tension (CCT) 시험편을 이용하여 ASTM에서 규정한 파괴인성 실험에 준한 파괴인성 실험법을 이용하여 원주방향으로 인장시험편을 이용한 온도별 인장시험 및 소형 compact tension (CT)시험편을 이용한 파괴인성 시험을 상온에서 수행하였다. DCPD방법과 제하 컴플라이언스법으로 안정파괴개시점의 검출성과 파괴인성 저항치를 비교하였다.

Abstract

The object of this study is to evaluate the characteristics of tensile and fracture toughness of Zr-2.5Nb pressure tube. The transverse tensile tests were performed at various temperatures and the fracture toughness tests were carried out at room temperature using the CCT (curved compact tension) specimen. These specimens were directly machined from the pressure tube retaining original curvatures. Also, Th

fracture toughness of two sets of Zr-2.5Nb manufactured at different time was compared. The chemical analysis and the Vicker's hardness tests were performed at two sets of Zr-2.5Nb pressure tube. The Vicker's hardness value of SET-2 containing more oxygen and carbon relatively was higher about 11 than that of SET-1.

1. 서 론

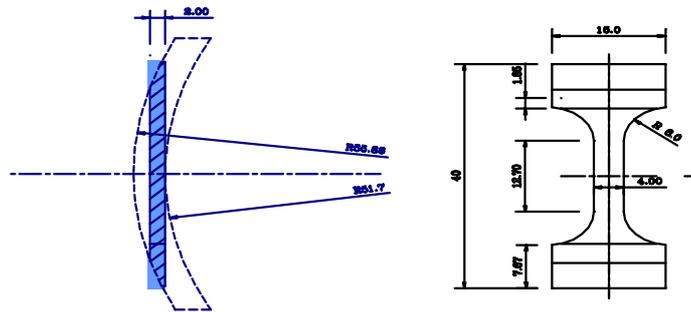
중수로 원자력 발전소 1차 계통의 압력경계부품 중 핵심 부품으로 핵연료 집합체와 냉각재 중수를 포함하는 CANDU 압력관은 일반적으로 길이 6.3m, 외경 103mm, 두께 4.2mm 정도의 Zr-2.5Nb 관을 사용한다. 압력관은 약 10MPa의 내압과 입구 250℃ 및 출구 315℃의 온도 조건에서 운전되므로 가압중수로에서 가장 높은 신뢰성이 요구되는 요소이다. 중수로 압력관의 건전성 평가로 압력관의 임계균열길이에 의한 안전수명을 정확히 예측하기 위한 압력관의 파괴인성실험은 매우 중요하다. 한편, 실제 파괴인성 시험조건이 이론적인 평면 변형률 조건과 상이하기 때문에 발생하는 파괴인성 측정값의 부정확성에 대해 연구해야 한다. CT시편 형상을 이용하여 파괴인성 시험을 수행하는 경우 압력관의 제한된 제원 때문에 ASTM 표준시험 절차에 제시된 시험편 규격을 따르는데 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 압력관의 곡면을 살린 Curved Compact Tension (CCT) 시험편을 이용하여 ASTM에서 규정한 파괴인성 실험에 준한 파괴인성 실험법을 이용하여 원주방향으로 인장시편을 이용한 온도별 인장시험 및 소형 compact tension (CT)시편을 이용한 파괴인성 시험을 상온에서 수행하였고, 제조시기가 다른 두 재료 SET에 대한 성분 및 경도를 측정하여 파괴인성값에 미치는 여러가지 인자를 고찰하였고, 파괴인성실험에서 DCPD방법과 제하 컴플라이언스법으로 안정파괴개시점결정과 파괴인성 저항치를 결정, 비교하였다.

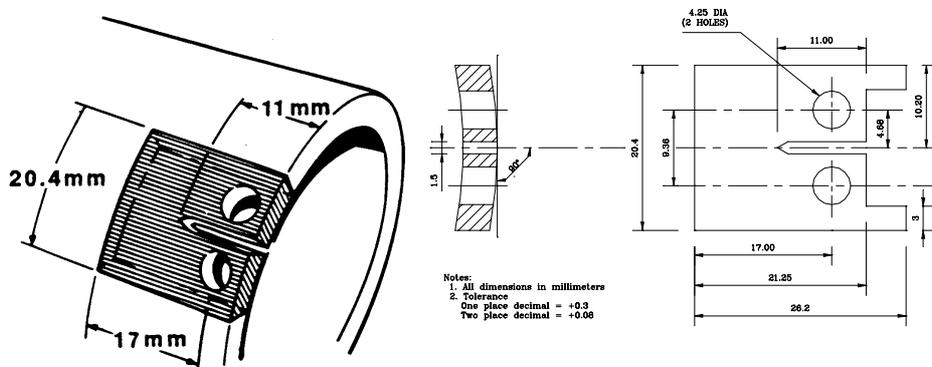
2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 중수로 Zr-2.5Nb 압력관으로 내부직경은 103 mm이며, 두께는 4.2~4.4mm이다. 횡방향 인장실험을 위하여 Fig. 1(a)와 같은 gaugelength가 10mm, 폭 4mm, 두께 2mm인 횡방향 인장시험편을, 그리고 J-R곡선으로부터 dJ/da 를 얻기 위한 파괴인성 시험편은 Fig. 1(b)과 같은 위치에서 축방향의 노치를 갖는 CCT 시험편을 제작하여 사용하였다. CCT시험편의 크랙 진전방향은 Axial방향이다.



(a) Geometry of transverse tensile specimen



(b) Geometry of CCT Specimen

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

Zr-2.5Nb의 상온에서의 기계적 특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of the Zr-2.5Nb alloy

Elastic Modulus [GPa]	Poisson's ratio, ν	Yield Strength [MPa]	Ultimate Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]
102	0.38	869	895	16~23

2.2 실험장치 및 방법

인장 및 파괴인성실험은 Instron 8501으로 행하였으며, 횡방향인장실험은 ASTM E 8, 고온에서는 ASTM E 21에 준하여 실행하였다. Instron의 Series IX 프로그램이 사용되었

으며, 인장시험의 결과는 또한 파괴인성치 계산에 필수적인 기본데이터로 쓰인다. 한편, 파괴인성은 [ASTM E 1820-01](#)에 준하여 Single-specimen method에 의하여 수행하였으며, 파괴인성시험을 위해서 피로예비균열을 삽입하였다. 피로예비균열을 얻기 위하여 0.5°의 테이퍼핀을 사용하여 피로크랙의 길이는 크랙비(a_i/W)가 약 0.5정도가 되게 하였으며, 하중비($R=P_{max}/P_{min}$)는 0.1로 하였다. 피로크랙은 Decreasing ΔK 법을 사용하였으며, 초기의 ΔK 는 약 $14 \text{ MPa m}^{1/2}$ 였으며, 최종크랙길이의 약25%가 남았을 때는 약 $12 \text{ MPa m}^{1/2}$ 가 되게 조절하였으며, Frequency는 3 Hz 로 하였다. 이때의 피로균열진전을 측정하기 위해 travelling microscope를 사용하였다. 파괴인성시험중의 균열길이측정은 DCPD법과 COD 게이지에 의해 추정 비교하였으며, 시험이 끝난후에는 Nine point average method에 의하여 실제크랙길이를 측정한 후에 DCPD를 보정하였다.

또한 파괴인성시험에서 두 가지 재료 SET에 대한 결과가 차이를 보임으로써 각 SET의 성분분석과 경도측정을 수행하였다. Vicker's Hardness는 SHIMADZU HMV-2000을 이용하여 하중 100 kg , 시간 10 S 의 조건으로 각 SET에 대해 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장특성

Fig. 2에 각각의 온도에서 구한 항복강도와 인장강도를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 온도가 증가함에 따라 인장강도와 항복강도가 모두 감소하는 경향이 있음을 알 수 있는데, 온도가 올라갈수록 그 감소율은 완만함을 보였다.

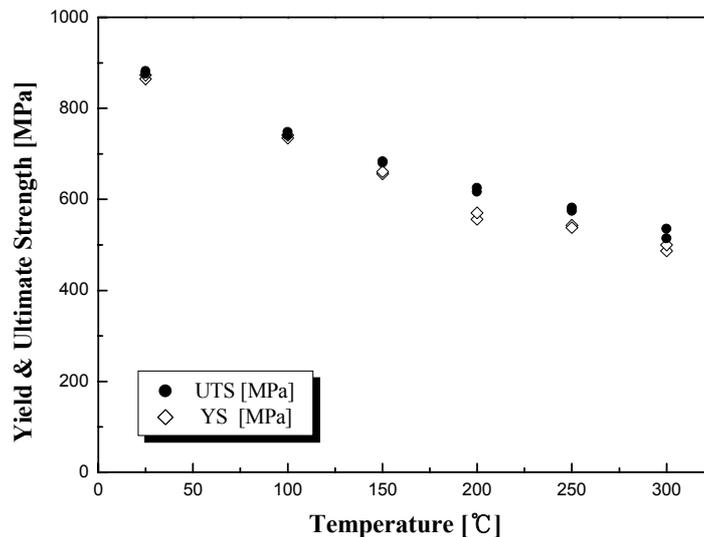


Fig. 2 Yield strength and ultimate strength with temperature

3.2 파괴인성특성

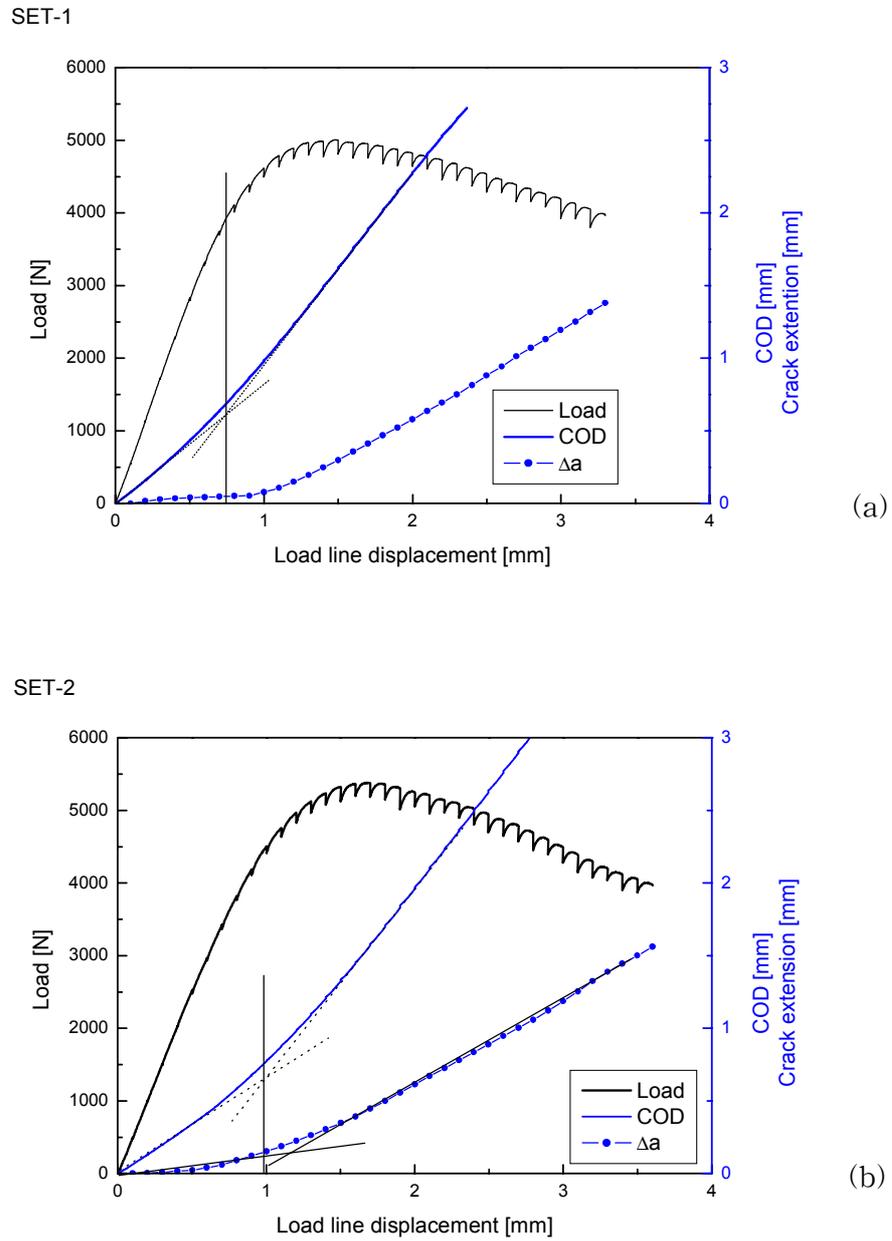


Fig. 3 Load and crack extension versus Load line displacement at SET-1 and SET-2

Fig. 3에 파괴인성시험으로부터 얻은 데이터를 상온에서의 하중, COD 측정값 및 균열진전량을 하중선변위에 대해서 나타내었다.

예비균열길이에 의한 영향 등을 고려한 추가실험이 필요하겠지만 SET-1 파괴인성치가 $370.34kJ/m^2$ 로 SET-2 파괴인성치 $345.65kJ/m^2$ 보다 약간 높은 값을 나타내었다.

안정파괴개시점 검출성은 Fig. 3에서 보이듯이 DCPD로 측정된 균열길이는 좀더 과소 평가된 것으로 나타났으며 추가적인 실험과 해석이 요구된다.

3.3 성분분석 결과 및 정도

제조시기가 다른 두 종류의 시험편의 파괴인성값이 차이를 보임에 따라 그 영향을 고찰하기 위해 각각의 시험편에 대한 성분분석과 정도 측정을 수행하였다.

Table 2에 두 종류의 재료 SET-1과 SET-2의 성분분석 결과와 CANDU 압력관의 일반적인 화학적 조성을 나타내었다. Table 2에 나타낸 것처럼 SET1의 탄소와 산소함량이 상대적으로 높음을 알 수 있다.

Table 2 Chemical Composition of two Zr-2.5Nb SETs

	H	O	N	C	Nb	Fe	Hf	P	Si
SET1	4~9	910	22	<10	2.6	0.04	<100	<100	<100
SET2	5~10	2230	38	890	2.6	0.05	<100	<100	<100
Permitted impurities		1000~1300	65	125	2.7~2.8	0.086	<25	10	100

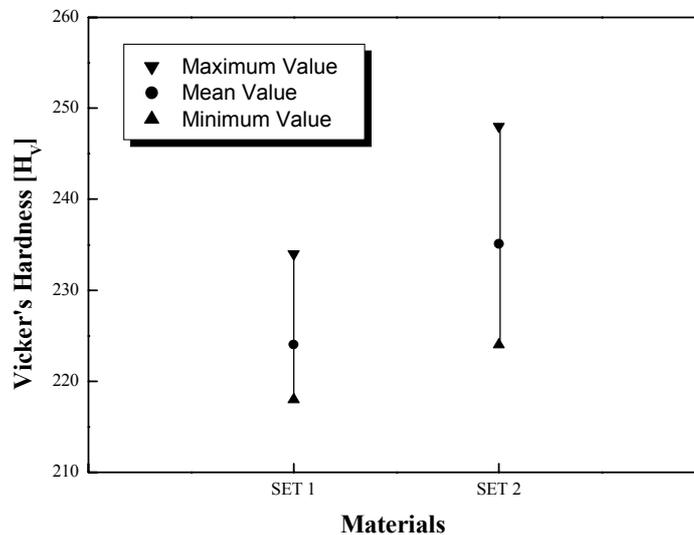


Fig. 4 Vicker's Hardness of Zr-2.5Nb

한편 SET-1과 SET-2의 파괴인성 시험편을 이용하여 파괴인성시험의 영향을 받지 않은 부분에서 시료를 채취하여 경도를 측정하였다. Fig. 4에 SET-1과 SET-2의 정도측정값

을 최대, 최소 및 평균값으로 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 상대적으로 탄소와 산소함량이 높았던 SET-2의 경도평균값이 약 11정도 높게 나타났다.

이는 as-received 중수로압력관의 화학조성에 따라 경도와 같은 기계적 성질에 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다. 이 문제에 대해서는 좀더 고찰이 필요할 것으로 생각되어 좀더 정밀한 분석과 다른 화학성분에 대한 연구도 수행해야 할 것이다.

4. 결 론

중수로 압력관에 사용되는 Zr-2.5Nb 합금에 대한 인장 특성 및 파괴인성특성을 고찰하고 파괴인성에 미치는 여러 가지 인자를 고찰하기 위해서 원주방향으로 인장시편을 이용한 온도별 인장시험 및 소형 compact tension (CT)시편을 이용한 상온에서의 파괴인성 시험과 제조시기가 다른 두 재료 SET에 대한 성분 및 경도를 측정하여 파괴인성값에 미치는 여러가지 인자를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 온도별 횡방향 인장시험 결과 온도가 증가함에 따라 인장강도와 항복강도가 일정하게 온도에 비례하여 감소하는 경향이 있음을 알 수 있었다.
- (2) Zr-2.5Nb합금의 파괴인성은 화학조성에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다.
- (3) 중수로압력관의 경도측정결과 산소 및 탄소의 함량이 높은 SET2의 경도값이 상대적으로 높게 나타났다. SET1과 SET2의 Vicker's 경도값의 평균은 각각 224, 235로 측정되었다.
- (4) As-received 상태의 중수로압력관의 파괴인성 및 기계적 성질에 영향을 미치는 요인에 대한 연구가 더 요망된다.

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 1820-01, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Thoghness"
- [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