

< 논문 >

제하 컴플라이언스법 및 직류전위차법을 이용한 Zr-2.5Nb 압력관 휘어진 CT 시편의 균열시작 평가

김영석[†] · 정현철* · 안상복**

(2005년 3월 25일 접수, 2005년 7월 8일 심사완료)

Evaluation of the Crack Initiation of Curved Compact Tension Specimens of a Zr-2.5Nb Pressure Tube Using the Unloading Compliance and Direct Current Potential Drop Methods

Young Suk Kim, Hyeon Cheol Jeong and Sang Bok Ahn

Key Words : PHWR(중수로), Pressure Tube(압력관), Curved Compact Tension Specimen(곡선형 소형 인장시편), Fracture Toughness(파괴인성), Unloading Compliance Method(제하 컴플라이언스법), Direct Current Potential Drop Method(직류전위차법)

Abstract

The direct current potential drop (DCPD) method and the unloading compliance (UC) method with a crack opening displacement gauge were applied simultaneously to the Zr-2.5Nb curved compact tension (CCT) specimens to determine which of the two methods can precisely determine the crack initiation point and hence the crack length for evaluation of their fracture toughness. The DCPD method detected the crack initiation at a smaller load-line displacement compared to the UC method. As a verification, a direct observation of the fracture surfaces on the curved compact tension specimens was made on the CCT specimens experiencing either 0.8 to 1.0 mm load line displacement or various loads from 50% to 80 % of the maximum peak load, or P_{max} . The DCPD method is concluded to be more precise in determining the crack initiation and fracture toughness, J in Zr-2.5Nb CCT specimens than the UC method.

1. 서론

중수로 원자력 발전소(중수로원전) 1 차 계통의 압력경계 부품 중 Zr-2.5Nb 압력관은 핵연료 집합체와 냉각재인 중수를 지지하는 구조물로서 가동 중 중성자 조사손상 및 수소취성으로 취화된다. 중수로원전의 안전성 차원에서 만족해야 할 안전기준은 가동 압력관의 파단전 누설 요건이며, 파단전누설 요건 평가시 가장 중요한 재료인자는 압력관의 파괴인성과 지연수소화물균열속도(delayed hydride crack velocity)이다. 이들 재료인자는 가동조건에 따라 열화되기에 가동시간에 따른

재료인자 변화를 지속적으로 평가해야 한다. 압력관 파괴인성치를 정확하게 평가하는 것은 압력관의 파단전누설 안전요건 평가의 신뢰성을 높이므로 매우 중요하다.

압력관의 파괴인성치 J 값은 균열길이에 의하여 결정되므로, 균열길이의 정확한 평가가 파괴인성치 J 값의 신뢰도를 결정한다. 지금까지 균열길이는 crack opening displacement (COD) 게이지를 이용한 하중제하 컴플라이언스 방법⁽¹⁾, 직류전위차법⁽²⁾ 또는 하중비 제어방법(modified load ratio method)⁽³⁾을 이용하여 측정하였으나, 균열시작 전에 발생하는 소성변형으로 균열시작을 명확하게 측정하기 어려워 균열시작 및 이로 인한 균열길이 평가는 어느 정도의 불확실성을 내포하고 있었다.

따라서 본 연구의 목적은 Zr-2.5Nb 압력관의 파괴인성치 평가시 균열시작점 및 균열길이를, COD 게이지로부터 결정되는, 하중제하 컴플라이언스법 및 직류전위차법으로 평가 및 비교하여 두

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구소

E-mail : yskim1@keari.re.kr

TEL : (042)868-2359 FAX : (042)868-8346

* 한국원자력연구소

** 회원, 한국원자력연구소

개의 방법 중 어느 방법이 보다 정확한 균열시작점 및 균열길이를 결정하는지를 조사하는 것이다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 중수로 Zr-2.5Nb 압력관으로 내부직경은 103 mm 이며, 두께는 4.2-4.4mm 이다. 파괴인성 시험편은 축방향의 노치를 갖는 폭 17mm, 두께 4.3mm 인 curved compact tension (CCT) 시험편을 제작하여 사용하였다. CCT 시험편의 균열 진전방향은 판의 축 방향이다. Zr-2.5Nb 의 상온에서의 기계적 특성을 Table 1 에 나타내었고, 실험에 사용된 CCT 시험편의 형상을 Fig. 1 에 나타냈다.

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

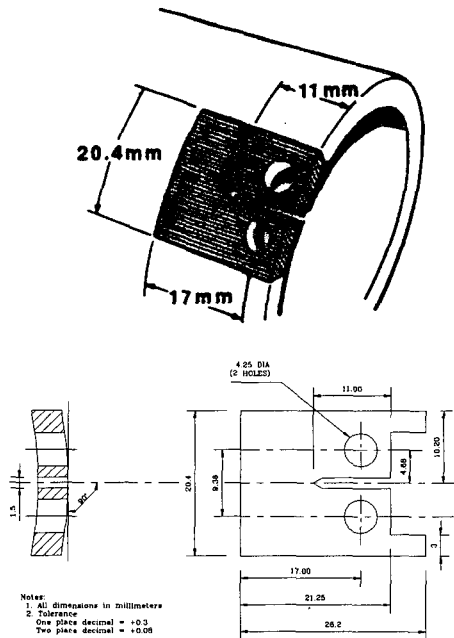


Fig. 1 Geometry of CCT specimens for Fracture Toughness

2.2 파괴인성 결정 방법

파괴인성 시험은 인스트론 8501 을 사용하여 ASTM E1820-01⁽⁴⁾ 절차에 맞게 단일시편방법 (single-specimen method)으로 수행하였다. 피로예비균열을 시편에 삽입하기 위하여 0.5°의 테이퍼 핀을 사용하였으며, 피로균열의 길이는 0.1 의 하중비($R=P_{min}/P_{max}$)에서 균열길이비(a_i/W)가 약 0.5 정도가 되도록 조절하였다. 피로균열은 하중감소법으로, ΔK 는 초기에는 약 $12 \text{ MPa } m^{1/2}$ 이었지만 최종균열길이의 약 25%가 남았을 때는 약 $10 \text{ MPa } m^{1/2}$ 로 감소시켜 형성되었으며, 이때 주파수는 3Hz 이었다. 보다 자세한 파괴인성시험절차는 참고문헌⁽⁵⁾에 이미 기술되어 있다. 파괴인성시험 시 하중선 변위 (load line displacement) 속도를 0.1 mm/min 로 제어하였으며, 최대 하중선변위량은 약 4 mm 정도 되도록 조절하였다. Fig. 2 는 파괴인성 시험 시 Zr-2.5Nb CCT 시편에 부착된 COD 게이지 및 균열입구에 설치된 전압선의 위치를 보여주는 개괄적인 그림이다. 균열성장에 따른 전압의 변화는 매 하중 최고점에서 멀티미터로 측정된 전압 값으로부터 측정하였다. 동시에 COD 게이지를 사용하여 균열성장에 따른 균열개구변위를 측정하여, 15%의 제하율 (unloading rate) 일 때 얻어진 하중 vs. 균열개구변위 곡선 (Fig. 3)을 토대로 각 하중제하 시의 하중 곡선 기울기로부터 킴플라이언스를 결정하였다. 제하율을 15%로 조절한 것은, 파괴인성치 J 값에 미치는 제하율 영향이 매우 미미하고⁽⁶⁾ 동시에 실험상 하중제어의 편리함 때문이다. 실험이 끝난 후에는 구점법(nine point method)으로 실제 균열길이를 측정한 후에, 직류전위차 및 킴플라이언스 값으로부터 계산된 균열길이 값을 보정하였다. 킴플라이언스 및 직류전위차 법으로 결정한 균열시작점의 정확성을 검증하고자, 0.7-1.0 mm 하중선변위량까지 파괴인성 시험을 한 후 종료하여, 파단면을 관찰하여 하중변위량에 따른 균열시작을 조사하였다. 파괴인성 저항 곡선은 ASTM E-1820 절차에 따라 J 를 계산하여 구하였다.^(7, 8)

3. 결과 및 고찰

3.1 직류전위차법 및 COD 법에 의한 균열길이 평가

Fig. 4 는 상온 파괴인성 시험시 피로균열을 갖는 Zr-2.5Nb CCT 시편에서 측정된 하중-하중선변위, 균열성장에 따른 직류전위차 값과 킴플라이언스 값을 보여준다. 여기서 주목할 것은 균열성장에 따른 직류전위 값과 COD 게이지로 측정된 킴플라이언스를 동시에 측정

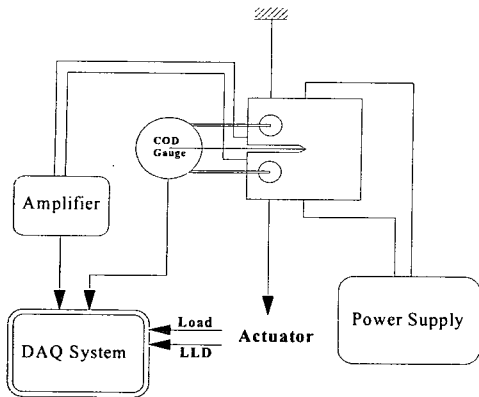


Fig. 2 Schematic diagram of test set-up

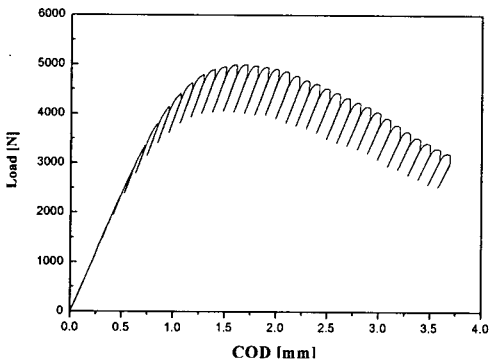


Fig. 3 Change of load with the crack opening displacement for a Zr-2.5Nb CCT specimen determined by a COD gauge

하여 하중선 변위의 함수로만 나타났다는 것이다. 세 시편 모두에서 하중선변위에 따른 직류전위차 값의 변화는 1mm 미만의 하중선변위에서 일어났지만, 컴플라이언스 값의 최저점은 1mm~1.4mm 정도의 하중선변위와 일치하였다. 이것은 다시 말해, 직류전위차법은 균열시작점을 1mm 미만으로 결정하므로 보수적인 균열길이를 예측하지만 이에 반하여 컴플라이언스 법은 직류전위차법에 비하여 1mm 보다 큰 하중선변위를 균열시작점으로 평가하므로, 비 보수적인 균열길이를 예측한다.

Fig. 5는 이들 세 시편의 파단면을 보여준다. 상온에서도 균열이 성장하면서 두께 방향으로의 항복변형으로 두께가 얇아졌다. COD-2 시편은 다른 2 개의 시편에 비하여 보다 균열의 불균일 성장으로 인한 매우 울퉁불퉁한 즉 평탄하지 않은 파단면을 보였으며, 이것은 균열성장이 균일하게 일어난 것이 아니고 균열진행 중 시편의 일부가 떨어지면서 불연속적인 균열성장이 일어났다는 것을

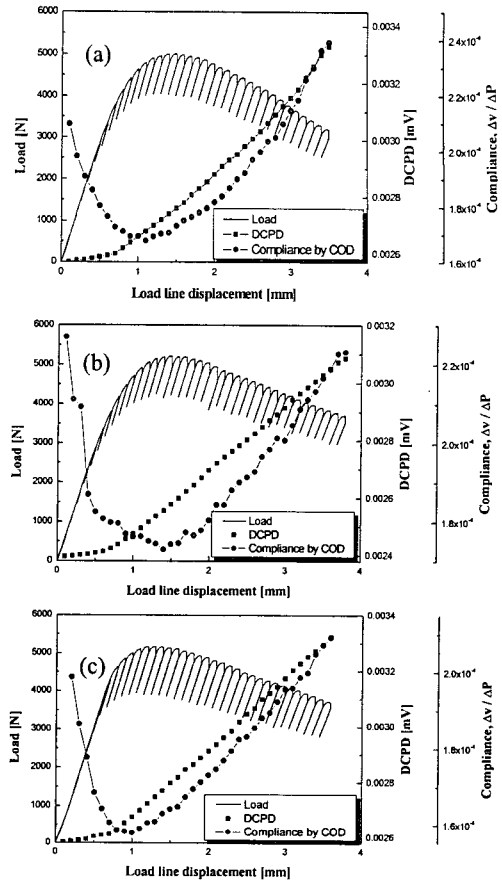


Fig. 4 Change of loads, direct current potential drops and compliances determined by the COD gauge with the load line displacements for three Zr-2.5Nb curved compact tension specimens at RT: (a) COD-1, (b) COD-2 and (c) COD-3

시사한다.⁽⁷⁾ 이것이 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 하중선변위에 따른 보다 불규칙적인 컴플라이언스 값의 변화를 나타낸 것으로 보인다.

3.2 균열시작점 관찰

직류전위차법 또는 컴플라이언스법으로 측정된 균열시작점 중 어느 것이 실제 균열시작점을 가장 잘 묘사하는 지를 검증하고자 Fig. 6에 나타난 바와 같이 하중선변위 0.8mm 및 1mm 에서 각각 파괴인성 시험을 중단하고 Zr-2.5Nb CCT 시편을 피로시험으로 파단시켜 균열생성 여부를 관찰하였다. Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이, 하중선변위 0.8 mm에서는 균열은 관찰되지 않았으나, 하중선변위 1mm에서는 생성된 균열을 관찰하였다. 이러한 결과는 0.8-1.0mm의 하중선변위에서 균열이 시작된다는 직류전위차법의 결과와 잘 일치하는 것이

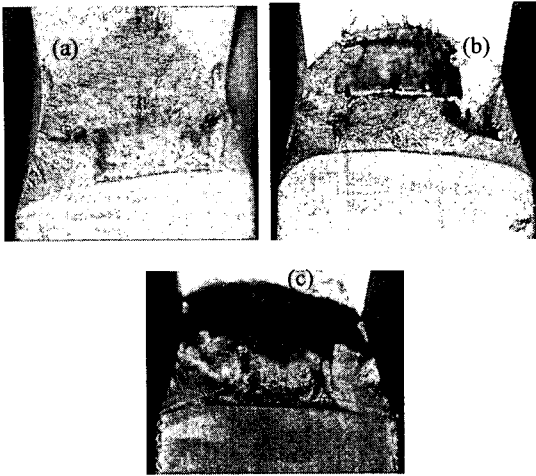


Fig. 5 Fracture surfaces of three Zr-2.5Nb CCT specimens: (a) COD-1, (b) COD-2 and (c) COD-3

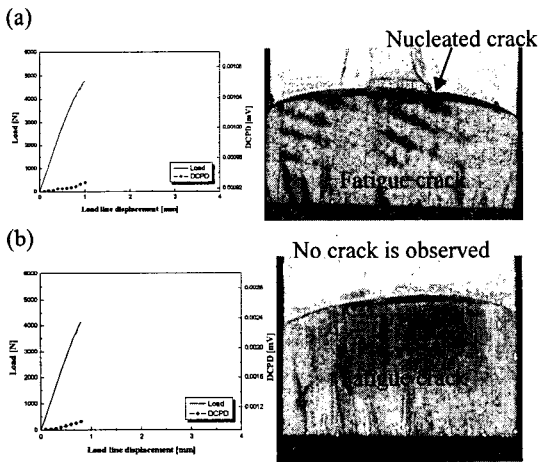


Fig. 6 (a) Direct observation of the crack grown on the fractured surfaces when Zr-2.5Nb compact tension specimen was loaded to the load line displacement of 1.0 mm. (b) No crack appeared on the Zr-2.5Nb CT specimens at the load line displacement of 0.8 mm

다. 다시 말하면 검증 결과에서 관측된 균열시작점은 직류전위차법으로 예측한 균열시작점과 잘 일치하고, 컴플라이언스법으로 측정된 균열시작점과는 차이가 있다.

4. 토론

Fig. 4-6에 나타낸 결과에 따르면 Zr-2.5Nb 압력관에서 채취한 CCT 시편을 대상으로 파괴인성

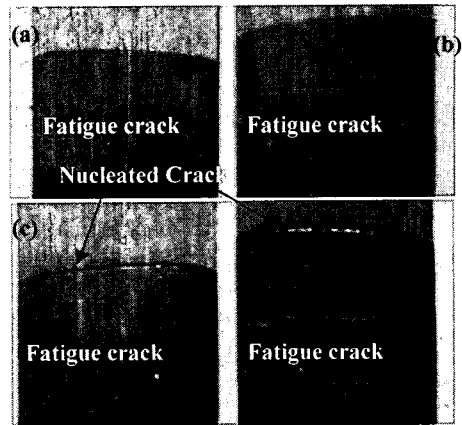


Fig. 7 Fracture surfaces of a Zr-2.5Nb CCT specimen subjected to various applied loads: (a) 50% P_{max} , (b) 60% P_{max} , (c) 70% P_{max} and (d) 80% P_{max}

시험시 균열 시작점은 직류전위차법으로 평가하는 것이 보다 정확하며, 균열개구변위를 이용한 컴플라이언스법은 직류전위차법에 비하여 비보수적으로 균열시작점을 평가하였다. 즉, 직류전위차법에 의한 균열길이 평가가 보다 신뢰할 만하며, 동시에 최대하중점보다 낮은 시점에서 균열이 발생한다는 것을 보여준다. Fig. 4에 나타낸 결과에 따르면, 직류전위차법으로 예측되는 균열시작점은 최대 하중의 75% - 82% 정도이다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같은 Zr-2.5Nb CCT 시편의 하중-하중선변위 곡선에서 최대 하중의 50%-80%에 해당하는 낮은 하중을 별도의 시편에 부가한 후 하중을 제거하고 피로균열로 시편을 파단시켜, 그 파단면을 광학현미경으로 조사하였다. 최대 하중 P_{max} 의 70% 이상의 하중에서 Fig.7에 나타낸 바와 같이 균열이 생성되었으나, P_{max} 의 60% 보다 낮은 하중에서는 균열은 발생하지 않았다.⁽⁸⁾ 결론적으로 말하면, 하중-하중선변위 곡선에서 얻어지는 최대하중점 이전, 즉 최대 하중의 70-80% 정도의 하중에서 균열이 생성된다. 아울러 이처럼 최대 하중점에 도달하기 전에 균열이 생성된다는 검증결과는 직류전위차법으로 예측한 균열시작점 및 아울러 균열길이가 실험 오차범위 내에서 비교적 정확하다는 것을 보여준다.

5. 결론

Zr-2.5Nb 압력관의 파괴인성 평가 시 균열길이 예측의 불확실성을 가능한 줄이고자 균열시작점을 직류전위차법, 균열개구변위를 이용한 컴플라이언스

스법 및 광학현미경을 이용한 파단면 관찰로 평가한 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 직류전위차 값은 1mm 보다 작은 하중선변위를 균열시작점으로 평가하였으나, 컴플라이언스 값은 1mm 근처의 즉 상대적으로 큰 하중선변위를 균열시작점으로 평가하였다.

(2) 하중선변위를 0.8-1.0mm 로 변화시켜 파단면을 관찰한 결과, 1.0 mm 보다 작은 하중선변위에서 균열이 시작되었다. 결론적으로, 직류전위차법이 Zr-2.5Nb 압력관에서 보다 정확한 균열길이를 예측하였다.

(3) 직류전위차법으로 예측되는, 균열시작점에 해당하는 최대 하중점은 최대 하중점 P_{max} 의 75% 이상이었으며, 이 값을 하중을 P_{max} 의 50-80%로 변화시켜 조사된 파단면 관찰 결과와도 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 증강기 사업 중 중수로압력관건전성평가기술개발 과제의 일환으로 수행되었습니다. 아울러 Fig. 7 의 결과를 제공한 오승진 박사과정에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- (1) Simpson, L.A., Chow, C.K. and Davies, P.H., 1989, "Standard Test Method for Fracture Toughness of CANDU Pressure Tubes," AECL Report COG-89-110-I.
- (2) Himbeault, D.D. and Davies, P.H., 1999, "Second International Round Robin on Fracture Toughness Testing of Pressure Tube Materials Using 17 mm Curved Compact (Toughness) Specimens," AECL, RC-2069, COG-98-161-I.
- (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 1820-01, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness."
- (5) Kim, Y.S., Cheong, Y.M., Kwon, S.C., Kim, S.S. and Ahn, S.B., 1999, "Procedures for Characterization Tests of Zr-2.5Nb Tubes," KAERI Technical Report, KAERI/TR-1329/99.
- (6) Sutton, G.E. and Vassilaros, M.G., 1986, "Influence of Partial Unloadings Range on the J-R Curves of ASTM106 and 3-Ni Steels," ASTM STP 905, pp. 364~378.
- (7) Ahn, S.B., Kim, Y.S. and Kim, J.K., 2001, "The Strength and Fracture Behavior Characterization of Irradiated Zr-2.5Nb CANDU Pressure Tube Materials," *KSME 25A*, pp. 510~519.
- (8) Oh, S.J., Kim, I.S., Kim, Y.S. and Ahn, S.B., 2004, "Evaluation of Fracture Toughness of CANDU Pressure Tubes using a Load Ratio Method," *Proceedings of Kor. Inst. Met. & Mater. 2004 Spring Meeting*, p. 47.

(1) Simpson, L.A., Chow, C.K. and Davies, P.H., 1989,