2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Zr-2.5wt.% Nb 합금의 임계응력확대계수(K_{IH})에 미치는 노치 효과
KIH behavior with the variation of the notch geometry in Zr-2.5Nb tubes

윤여범. 김영석. 임경수, 김성수, 정용무
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 Zr-2.5Nb 합금의 임계응력세기(K_{IH})에 미치는 notch geometry 영향을 고찰하였다. K_{IH} 시험은 60ppm 수소를 장입한 cantilever beam(CB) 시편에 대해서 다양한 외부응력을 가한 상태에서 상온부터 380 도 까지 반복적인 thermal cycle 을 가하여 행하였다. 이 때 사용된 CB 시편의 노치는 노치깊이를 0.5, 1, 1,44 로, 노치반경을 0.05, 0.15, 0.3, 0.6 으로 방전가공하였다.

동일한 외부응력하에서 반복적인 thermal cycle 을 가한 상태에서 사용된 노치 크기 변화에 따라 Zr-2.5Nb 합금은 다른 임계응력세기 거동을 보였다. 즉, 노치깊이가 0.5mm 에서 1.44mm 로 증가함에 따라 낮은 임계 응력세기를 나타내었으며, 또한 노치반경이 증가함에 따라 높은 임계 응력세기 거동을 보였다. 이는 notch geometry 변화에 따라 노치선단에서 받는 국부적인 인장응력이 다르게 작용하기 때문이다. K_{IH} 시험후 파단면에 대한 파면관찰 결과 파면은 전형적인 delayed hydride cracking(DHC) 거동을 나타냄을 관찰하였다.

Abstract

The objective of this study is to investigate the effect of notch geometry on the critical stress intensity factor when the delayed hydride cracking is initiated in a Zr-2.5Nb pressure tube during its thermal cycle treatment. Cantilever beam specimens with several types of notch geometry were subjected to electrolytic hydrogen charging to contain 60ppm, 150ppm and 280ppm H, and then to a thermal cycle involving heating from room temperature to the peak temperature of 380℃. The critical stress intensity factor on the delayed hydride cracking was decreased with the increase of notch depth and also increased with the increase of notch radius . The critical stress intensity factor on the delayed hydride cracking represented different characteristics with varying the initial hydrogen concentration contained in Zr-2.5Nb alloys.

1. 서　론

Zr 합금에서 DHC 균열을 유발하는 필요조건은 균열선단에서 수소화물 석출과 가해진 응력에 수직방향으로의 수소화물의 재배열이다[1]. 대부분의 basal pole이 압력관의 원주방향으로 배열되어 있는 강한 원주방향의 texture를 가진 Zr-2.5Nb 압력관의 경우 수소화물은 원주방향에 대응되는 가해진 인장방향으로 재배열되기가 용이하다. 이는 수소화물들이 {10-17} habit plane에 핵생성 되고 성장하기 때문이다[2]. 수소화물의 재배열이 수소화물의 핵생성 및 성장에 의해서 발생하기 때문에 재배열은 지르코늄 기지내에 존재하는 과포화된 수소농도, 가해진 응력세기, texture 및 석출된 수소화물의 크기에 의존한다[2-5]. 또한 지르코늄 합금에 존재하는 결함의 크기에 따라 지르코늄 합금은 다른 DHC 특성을 나타낸다. 지르코늄 합금에 함유되어 있는 초기 수소농도의 양도 결함크기와 마찬가지로 지르코늄 합금의 DHC 균열 생성에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 Zr-2.5Nb 압력관에 존재하는 결함크기나 함유된 초기 수소농도가 DHC 균열 발생에 미치는 영향을 알아보기 위해서 초기 수소농도를 각각 60, 150, 280ppm으로 장입하여 250℃의 시험온도에서 DHC 임계응력을 구하였고, 결함양상에 따른 DHC 임계응력을 알아보기 위해서 노치깊이를 0.5, 1, 1.44로 하고 노치반경을 0.05, 0.15, 0.3, 0.6으로 가공 후 지르코늄 합금의 DHC 임계응력에 미치는 notch geometry 효과를 연구하였다.

2.실 험 방 법

2.1. 시편준비

본 연구에서는 사용된 Zr-2.5Nb 압력관의 임계응력확대계수(K_{IH})에 미치는 notch geometry 및 최대응력(peak stress) 효과를 알아 보기 위해서 Fig.1과 같은 너비 3.2 mm, 길이 38 mm의 cantilever beam (CB) 시편을 제작하였다. 임계응력확대계수에 대한 notch geometry 및 응력세기 효과를 고려하기 위해서 다양한 노치가공과 응력세기를 가하였으며 그 조건을 table.1에 나타내었다.

Cantilever beam 시편 내 수소장입은 전기분해 방식을 사용하여 충분한 두께의 수소화물 띠를 시편 표면에 형성시킨 후305 ^{o}C에서 30 시간 균질화처리를 통하여 이루어졌으며, 이론적으로 60 ppm 수소가 장입되도록 하였다. 보다 자세한 수소 장입 절차는 KAERI 절차서에 기술되어있다[6].

실제 시편 내 수소량은 LECO RH 404 수소분석장치로 최소 5번 측정치의 평균값으로 결정하였으며 모든 시편은 60±5 ppm의 수소를 함유하고 있었다. 균질화처리 후 모든 CB 시편은 400도에서 24시간 유지 후 급냉(water-quenching)을 통하여 Fig.2에 보여 주는 바와 같이 매우 미세한 수소화물(hydride)이 미세구조 내에 분포 되도록 하였다

Table 1. Various conditions for K_{IH} in Zr-2.5Nb pressure tube

Notch depth	Notch radius	Flank angle	Applied stress	Stress intensity
0.5	0.05	45°	150	4.6
			200	6.13
			250	7.66
			300	9.2
1	0.05	45°	150	5.27
			200	7
			250	8.79
			300	10.56
1.44	0.05	45°	150	5.26
			200	7
			250	8.8
			300	10.5

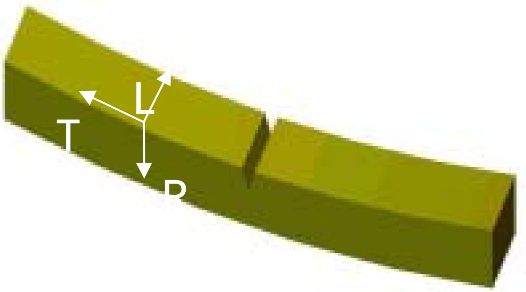


Fig.1. Schematic diagram of the cantilever beam specimens taken from a CANDU Zr-2.5Nb tube

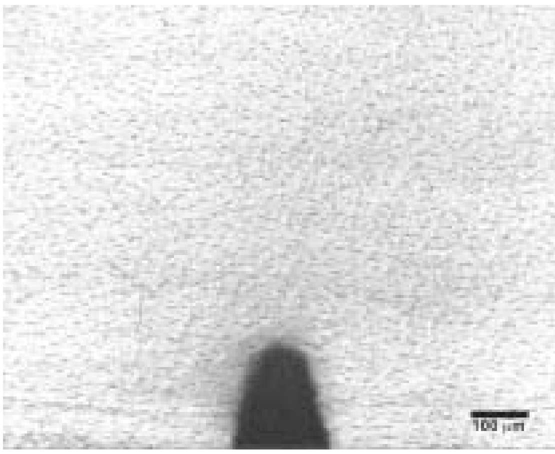


Fig.2. Fine Hydrides precipitated in the Water-Quenched CB Specimens

2.2. K_{IH} 시험

KIH 시험은 60 ppm의 수소를 장입한 CB 시편을 이용하여 table.1에 나타낸 notch geometry와 일정한 외부응력을 가한 상태에서 Fig.3.에 나타낸 thermal cycle을 반복적으로 가한 상태에서 DHC 발생을 관찰함으로써 최종적으로 60ppm 수소를 장입한 Zr-2.5Nb 합금의 K_{IH}를 구하였다. 또한 각각 60ppm, 150ppm, 280ppm의 수소를 장입한 후 Fig.3.의 thermal cycle하에서 250도의 시험온도에서 외부응력을 가한 상태에서 300시간의 장시간 유지를 행한 후 시편의 DHC 발생유무를 확인하고 이 결과를 반복적인 thermal cycle하에서의 KIH 결과와 비교 분석하였다. 시편 내에 존재하는 수소화물의 분포 및 DHC 발생 유무는 abrasive paper(#2000)를 사용하여 시편을 연마한 후 swap etching을 행 한 후 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 이 때 사용된 부식액은 10%HF - 30%HNO_3 – 30%H_2SO_4 - 30%H_2O을 사용하였다.

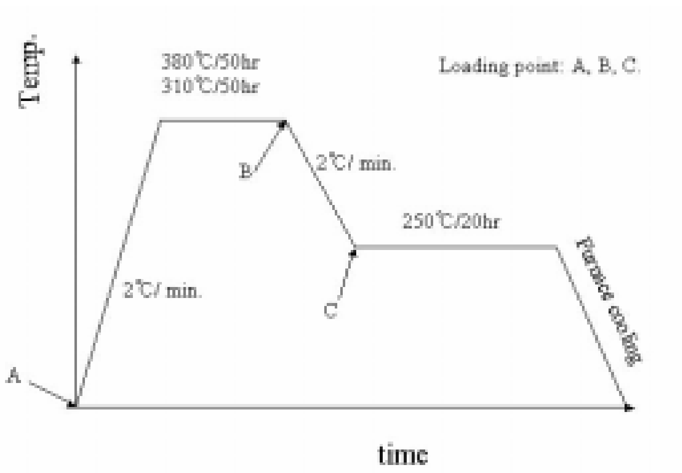
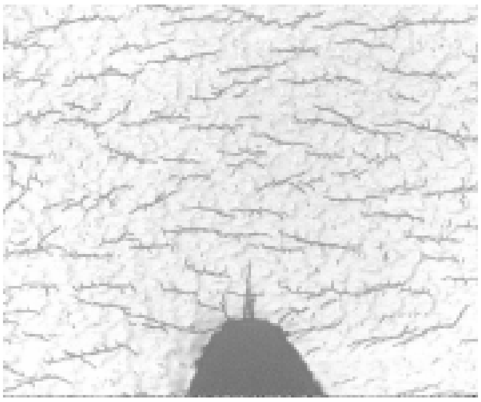


Fig.3. Thermal cycle treatment applied on the CB specimens taken from the Zr-2.5Nb tube.

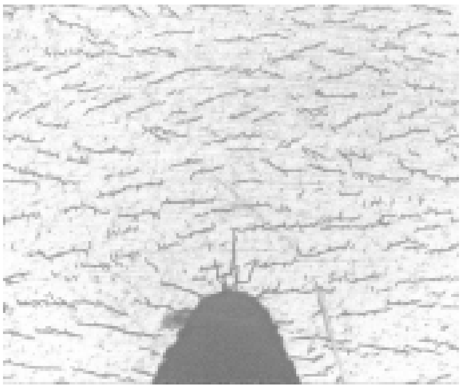
3. 실험결과 및 토의

3.1. Zr-2.5Nb 합금의 DHC 발생에 대한 임계응력 및 수소농도 효과

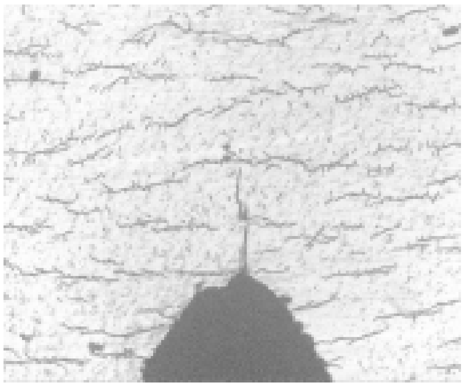
60ppm 수소를 장입 후 노치깊이0.5mm, 노치반경 0.05mm인 Zr-2.5Nb 합금의 DHC(delayed hydride cracking) 발생에 대한 임계응력을 결정하기 위해서 Fig.3.의 thermal cycle 동안 250도의 시험온도에서 300시간 유지한 후 미세구조 관찰한 결과를 Fig.4.에 나타내었다. Fig.4.에서 보듯이 250도의 시험온도에서 외부응력을 가할 시 노치선단에서 반경방향으로 분포된 hydride가 관찰되고 이 재배열된 hydride의 파괴에 의해서 DHC 가 발생되며 60ppm의 수소를 장입한 경우 250도의 시험온도에서 300MPa(K_{IC}=9.2MPa√m)의 가해진 외부응력이 DHC 발생 임계 응력임을 알 수 있다.



(a) 270MPa



(b) 290MPa



(c) 300MPa

Fig.4.Photomicrographs showing hydrides reorientations and DHC crack in the Zr-2.5Nb tube with 60ppm hydrogen

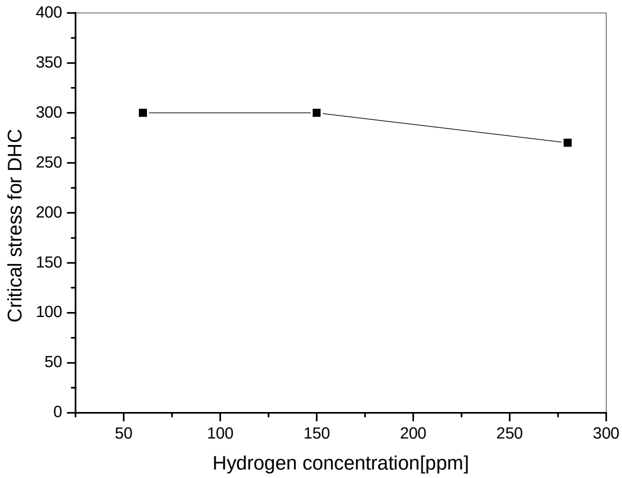
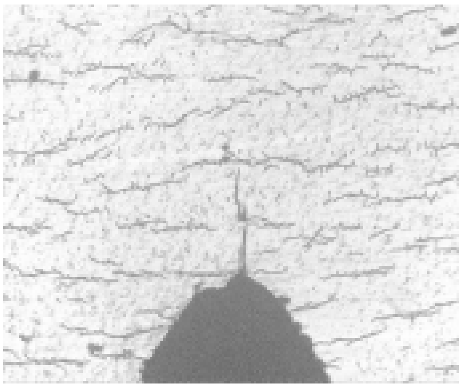
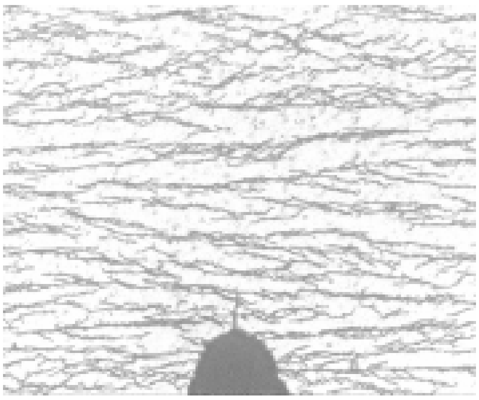


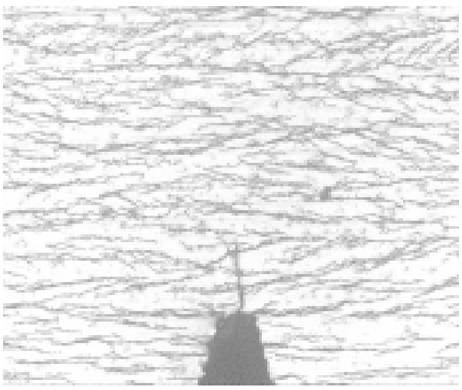
Fig.5. The effect of hydrogen concentration on DHC initiation in Zr-2.5Nb tubes

Fig.5.는 노치깊이 0.5mm, 노치반경 0.05mm인 시편에 대해 장입된 수소농도를 각각 60ppm, 150ppm, 280ppm 으로 변화 시킴에 따른 Zr-2.5Nb 합금의 DHC 발생 임계응력 변화를 나타낸 것으로써 Fig.4에서 설명하였듯이 60ppm과 150ppm의 수소를 장입한 경우는 300MPa(K_{IC}=9.2MPa$\sqrt{m}$)의 외부응력하에서 DHC 균열이 발생하였으나, 수소 농도를 280ppm으로 증가시킨 경우 동일한 thermal cycle하에서 270MPa(K_{IC}=8.3MPa$\sqrt{m}$)의 외부응력을 가한 경우 DHC에 의한 균열파괴가 발생하였다. Fig.6은 Fig.5에서 관찰되는 DHC 균열에 대한 현미경 사진을 나타낸 것으로서 노치선단에 hydride의 반경방향으로의 재배열이 관찰되고 노치선단에 재배열된 수소화물의 파괴에 의해서 DHC 균열이 발생됨 을 알 수 있다. 위 결과로부터 60ppm의 수소와 150ppm의 수소를 장입한 경우의 DHC 임계응력은 300MPa(K_{IC}=9.2MPa$\sqrt{m}$) 으로 동일하였으며 280ppm의 수소를 장입한 경우는 270MPa(K_{IC}=8.3MPa$\sqrt{m}$)로 DHC 임계응력이 약간 감소함을 알 수 있다. 이로 부터 합금에 장입되는 수소농도에 따라 재료의 DHC 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다.



(a)





(b) (c)

Fig.6. Photomicrographs showing DHC initiation with varying hydrogen concentration in the Zr-2.5Nb tubes.

(a) 60ppm, 300MPa (b) 150ppm, 300MPa (c) 280ppm, 270MPa

3.2. Zr-2.5Nb 합금의 K_{IH}에 대한 notch geometry 효과

Fig.7.은 Zr-2.5Nb 합금의 DHC 파괴가 일어나지 않는 임계 응력 확대계수(K_{IH})에 대한 노치 geometry 효과 알아 보기 위해서 노치반경을 0.05mm로 일정하게 하고 노치깊이를 각각 0.5, 1, 1.44mm로 달리 가공하여 실험한 결과를 나타내었다. 0.05mm의 동일한 노치반경하에서 노치깊이를 0.5, 1, 1.44mm로 증가시킴에 따라 임계응력확대계수는 각각 9.2, 8.8, 8,8MPa√m 으로 동일한 노치반경에서 노치깊이 만을 달리 한 경우 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 0.5mm의 동일한 노치깊이에서 노치반경만을 0.05, 0.15, 0.3, 0.6mm로 증가시킴에 따라 Fig.8에서 보 듯이 노치반경 변화에 따라 임계 응력 확대계수의 변화가 발생함을 알 수 있다.

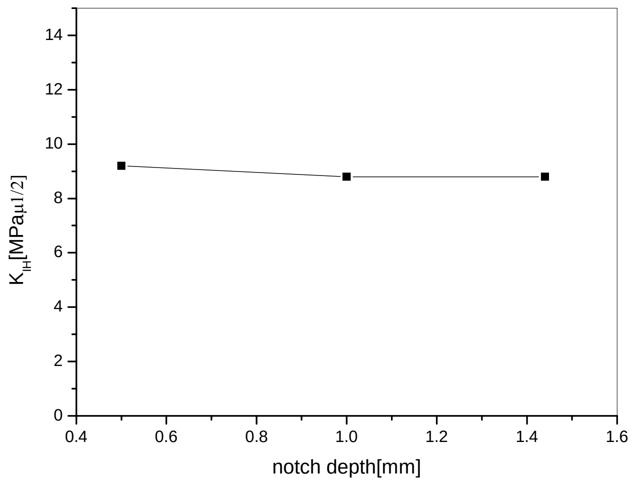


Fig.7. Relationships between K_{IH} and notch depth under same notch radius of 0.05mm.

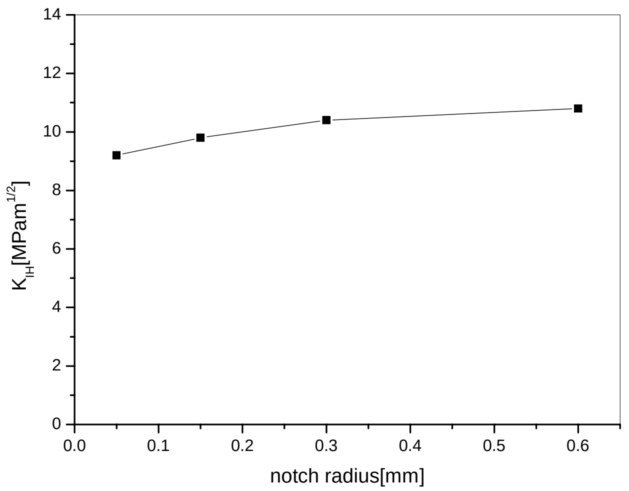


Fig.8. Relationships between K_{IH} and notch radius under same notch depth of 0.5mm

Fig.7과 Fig.8의 결과로부터 Zr-2.5Nb 합금의 임계응력확계수에 대한 노치효과를 보면 사용된 notch geometry 에서 노치반경이 임계응력확대계수에 영향을 미침을 알 수 있으며 노치깊이는 음계응력확대계수에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4. 결　론

Zr-2.5Nb 합금의 DHC 균열 발생에 대한 임계응력 확대 계수에 미치는 수소농도의 영향과 notch geometry 변화에 따른 임계응력확대계수 변화를 관찰한 결과 초기 장입되는 수소의 농도를 각각 60ppm, 150ppm, 280ppm으로 증가 시킴에 DHC 발생 임계응력이 감소함을 알 수 있다. 또한 DHC 발생에 대한 notch geometry 효과를 알아본 결과 notch geometry에서 노치깊이 변화에 따른 DHC 발생 임계응력 계수는 큰 차이를 나타내지 않았으며, 노치반경을 증가시킴에 따라 DHC 발생 임계응력확계수가 증가됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 개발 사업 중수로 압력관 기술개발 과제의 일환으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C.E. Coleman, “Effect of Texture on Hydride Reorientation and Delayed Hydride Cracking in Cold Worked Zr-2.5Nb”, Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP 754, p. 393, ASTM (1982).
2. Y.S. Kim, S.C. Kwon and S.S. Kim, “Crack Growth Pattern and Threshold Stress Intensity Factor, KIH, of Zr-2.5Nb Alloy with the Notch Direction”, Nucl. Mater., 280, 304 (2001).
3. S.J. Kim, Y.S. Kim, K.S. Im, S.S. Kim and Y.M. Cheong, “Delayed Hydride Cracking of Zr-2.5Nb tubes with the Notch Tip Shape and Cooling Rate”, J. Kor. Inst. Met. & Mater., 41, 21(2003).
4. Y.S. Kim, Y. Perlovich, M. Isaenkova, S.S. Kim and Y.M. Cheong, “Precipitation of Reoriented Hydrides and Textural Change of α-Zirconium Grains during Delayed Hydride Cracking of Zr-2.5%Nb Pressure Tube”, J. Nucl. Mater., 297, 292 (2001).
5. Y.S. Kim et al., “DHC Velocity and K_{IH} of Zr-2.5Nb Tubes with Hydrogen”, Journal of Metals, 55 (2), 383 (2003).
6. Y.S. Kim et al., “A Manual for Characterization Tests for Zr-2.5Nb Pressure Tubes”, KAERI Technical Report, KAERI/TR-1329/99 (1999).