2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

노치 형상에 따른 Zr-2.5Nb 압력관의 DHC 거동

Delayed Hydride Cracking of Zr-2.5Nb Tubes with the Notch Tip Shape

김상재*, 김영석, 임경수, 김성수, 정용무

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

Zr-2.5Nb 압력관에서 냉각속도와 노치 형상에 따른 DHCV(Delayed Hydride Cracking Velocity)와 잠복시간(incubation Time)을 조사하였다. 압력관에 전기화학적인 방법으로 57~72 ppm 수소를 장입한 후 노냉 및 수냉한 CB(Cantilever Beam)시험편을 제작하였다. DHC 실험은 250 °C 에서 20 MPa√m 의 일정한 K_I 으로 수행하였다. 노치 형상은 피로균열에서 0.15 mm 까지 변화 시켰다. 잠복시간을 측정하기 위해 AE 센스를 사용하였다. DHC 잠복시간은 노치 반경이 증가할수록 급격하게 증가했고, 수냉한 CB 시편에서 보다 노냉한 CB 시편에서 더 잘 나타났다. 그러나 노냉된 시편과 수냉된 CB 시편 모두 노치팁 형상에 대한 DHC 속도 차이는 거의 없었다. 이러한 결과는 노치 팁에서의 수소화물의 핵생성이 kim 의 DHC 모델에서 설명한 바와같이 DHC 가 얼마나 빨리 시작되고, 한번 날카로운 DHC 크랙이 형성되면 일정하게 되는 것에 잘 일치한다. 노냉과 수냉한 시편사이에서 incubation time 과 DHCV 의 차이는 노치팁에서의 수소화물 핵생성 속도와 수소화물 석출과 용해시의 수소의 고용도로 설명하였다.

Abstract

The objective of this study is to investigate the delayed hydride cracking velocity and the incubation time for the water-quenched and furnace-cooled Zr-2.5Nb tube with the notch tip shape. DHC tests were carried out at constant K_I of 20 MPa√m and 250 °C on the cantilever beam (CB) specimens that were subjected to furnace cooling or water quenching after electrolytical charging of hydrogen of 57 or 72 ppm H, respectively. The notch tip shape changed from the fatigue crack to the dull crack with the notch tip radius varying from 0.1 to 0.15 mm. An acoustic emission sensor was attached to the CB specimens to detect the incubation time before the start of DHC. The DHC incubation time increased drastically with the increasing radius of the notch tip, which appeared more strikingly on the furnace-cooled CB specimens than on the water-quenched. However, both furnace-cooled or water-quenched CB specimens show little change in the DHC velocity with the radius of the notch tip. These results demonstrate that the nucleation rate of hydrides at the notch tip determines the how fast the DHC starts, or the incubation time, and become constant once a sharp DHC crack is formed, which agrees with Kim's DHC model. A difference in the incubation time and the DHCV between the furnace-cooled and water-quenched specimens was discussed based on the nucleation rate of hydrides at the notch tip and the hydrogen solubility for dissolution with the hysteresis of hydride precipitation.

1. 서론

지르코늄 합금은 내 부식성, 충분한 고온 강도 및 낮은 중성자 흡수 단면적으로 경수로 및 중수로 원전의 피복관, 안내관 및 압력관과 같은 노심 재료로 사용되고 있는 핵심 재료이다. 특히 Zr-2.5Nb 합금은 충분한 강도 및 낮은 부식으로 중수로 원전의 압력관 재료로 사용되고 있다. 그러나 이들 지르코늄 합금의 노내성능 중 가장 문제가 되는 것은 가동 중 부식으로 인하여 발생되는 수소의 흡수이다. 흡수된 수소는 지르코늄 합금 내 수소화물로 석출하여 지르코늄 합금을 취화시키고 아울러 delayed hydride cracking (DHC)으로 파손시킨다 [1,2]. 특히, DHC 현상은 Zr-2.5Nb 압력관 표면에 표면결함 (surface defects) 부위나 rolled joint 지역과 같이 높은 인장 응력이 존재하는 곳에 결함 부위에 수소화물을 석출시키고 수소화물의 파단에 의하여 크랙 성장으로 다수의 파손시킨바 있다. 이러한 DHC 현상은 최근 핵연료 피복관에서도 일어나 축 방향으로 긴 크랙을 생성시켜 피복관을 파손시켰다 [3,4]. 따라서 DHC 로 인한 지르코늄 합금의 파손을 제어하기 위해서는 DHC 현상을 완벽하게 이해하는 것이 요구된다.

지금까지 DHC 현상의 구동력은 표면에 크랙이 존재할 때 크랙 앞 지역과 크랙에서 먼 지역의 응력 구배로 알려져 왔다 [5,6]. 이처럼 응력구배가 DHC 를 제어하는 인자라면 크랙 tip 반경에 따라 응력 구배가 달라지므로 DHC 속도가 달라져야 한다. 그러나 Kim 은 DHC 현상의 구동력은 응력 구배가 아니라 크랙 tip 과 크랙에서 먼 지역의 수소농도의 차이로 새로운 DHC 모델을 제시하였다 [7]. 이러한 수소농도의 차이는 크랙에서 먼 지역은 과포화된 수소농도를 유지하고 있는 반면 크랙 선단은 인장응력으로 수소화물 석출이 일어나 평형 수소농도 (terminal solid solubility for dissolution, TSSD)를 바뀌어지기에 나타난다. 이러한 수소농도의 차이가 형성되면, 수소가 크랙선단으로 빠르게 확산해가 크랙선단에 생성된 수소화물을 빠르게 성장시키고, 성장된 수소화물이 파단되면서 DHC 크랙이 시작된다. 따라서 DHC 잠복시간 (incubation time)은 크랙선단에서 수소화물 생성으로 과포화된 수소농도에서 평형 수소농도로 바뀌어지는 속도에 비례하여, 크랙선단이 예민할수록 적고 반대로 크랙선단이 둔할수록 그만큼 길어진다. 그러나 크랙선단에서의 수소농도가 평형수소 농도로 바뀌어지면 DHC 구동력인 수소농도의 차이는 일정하게 되므로 DHC 속도의 변화는 없을 것이다. 따라서 크랙선단의 곡률 반경에 따른 지르코늄 합금의 DHC 속도 및 잠복시간 측정은 DHC 현상의 구동력이 Kim 이 새롭게 제시한 바와 같이 수소농도의 차이인지 아니면 지금까지 인정되어온 응력 구배인지를 결정하게 해준다.

따라서 본 연구에서는 0.5 mm 깊이 노치의 tip 곡률반경을 피로균열, 0.1, 0.125 및 0.15 mm 로 변화시켜 Zr-2.5Nb 압력관의 반경방향에서의 DHC 속도 및 DHC 시작 잠복시간을 250 °C 의 일정온도에서 조사하였다. 아울러 수소 균질화 처리 후 냉각속도를 수냉 및 노냉으로 변화시켜 수소화물 크기를 변화시켜 이에 따른 DHC 속도 및 DHC 시작 잠복시간도 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 Cantilever beam 시편

본 연구에 사용된 재료는 cold-worked Zr-2.5Nb 압력관이며, 반경 방향에서 DHC 속도를 측정하기 위하여 그림 1 에 나타낸 바와 같이 너비 3.5 mm, 길이 38 mm 의 cantilever beam (CB) 시편을 사용하였다. CB 시편에 노치는 압력관의 반경 방향으로 형성시켜 DHC 크랙이 반경 방향으로 진전하도록 하였으며, 노치크기를 0.5 mm 일정 깊이에 선단 곡률반경을 피로균열, 0.1mm, 0125mm, 0.15mm 로 변화시켰다. 0.1-0.15 mm 크기의 선단 곡률반경을 갖는 노치는 방전가공으로 제작하였으며 (그림 2), 피로균열은 0.5 mm 깊이, 0.15mm 곡률 반경의 노치가 형성된 시편에 4 point bending 방법으로 0.5 mm 만큼 성장시켰다.

2.2 수소장입 및 열처리

CB 시편 내 수소장입은 전기분해 방식을 사용하여 충분한 두께의 수소화물 띠를 시편 표면에 형성시킨 후 302 °C 에서 30 시간 균질화처리를 통하여 이루어졌으며, 이론적으로 60 ppm 수소를 장입시키도록 하였다. 보다 자세한 수소 장입 절차는 KAERI 절차서에 기술되어있다 [8]. 실제 시편 내 수소량은 LECO RH 404 수소분석장치로 적어도 5 번 측정치의 평균값으로 결정하였으며, 노냉 시편 및 수냉 시편은 각각 평균 57 및 72 ppm H 를 함유하였다. 여기서 노냉 시편 및 수냉 시편은 수소화물 크기에 따른 DHC 거동을 관찰하고자 균질화 처리 후 노냉 (furnace cooling) 및 수냉 (water quenching) 시켜 각각 제작한 시편을 말한다. 노냉된 시편에서는 그림 3 에 나타낸 바와 같이 길이 방향으로 크게 성장한 수소화물이 나타났으며, 수냉된 시편에서는 미세한 수소화물이 보인다.

2.3 DHC 시험

DHC 시험은 그림 4 에 나타낸 바와 같은 외팔보 시험장치를 이용하여 수행되었다. 시편의 온도는 K-type 열전대를 시편에 용접으로 부착시켜 직접적으로 감시 및 조절하였으며, CB 시편에서 DHC 잠복시간은 AE (acoustic emission) 센서 (100-300 KHz 공진주파수의 R15)가 AE 음향 신호를 최초로 감지한 시간이다. 아울러, 크랙진전에 따른 AE 음향 신호 수 (count)를 측정하여 AE 음향 신호수에 비례하여 하중을 자동적으로 줄여주는 프로그램 및 stepping motor 를 사용하여 일정한 응력집중세기, K_I 가 시편에 부하되도록 하였다. 자세한 하중 제어방법은 [9]에 기술되어있다. DHC 시험 시 0.5-5 °C 승온 속도로 peak 온도인 310 °C 까지 시편을 가열시킨 후 시험 온도인 250 °C 로 1-2 °C/min 의 냉각속도로 냉각시켰으며, 시험온도에 도달하면 K_I=20 MPa√m 을 시편에 부하하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 노치 선단 곡률반경에 따른 DHC 거동

그림 5 및 6 은 노치선단에 피로크랙을 형성시켜 노치선단의 곡률반경을 매우 작게 하거나 또는 그림 2 에 나타낸 바와 같이 노치선단의 곡률반경을 0.1 mm, 0.125 mm 및 0.15 mm 로 크게 하였을 때, 250 °C 의 일정 온도에서 노냉 CB 시편에서 측정한 전형적인 AE 음향 신호 수 및 하중의 변화, 그리고 DHC 파단면을 각각 보여준다. 노치선단의 곡률반경의 크기에 무관하게 DHC 로 크랙이 성장하였으나 (그림 6), 하중을 가한 후 DHC 를 일으키는데 소요되는 잠복시간은 크랙선단의 곡률반경에 따라 다르게 나타났다.

그림 5 에 나타낸 AE 음향 신호로부터 측정한 잠복시간 및 DHC 속도를 노치 선단의 곡률반경의 함수로 그림 7 에 나타냈다. 여기서 나타낸 잠복시간 및 DHC 속도 값은 적어도 2-4 개 시편에서 결정한 평균치이다. 예상한 바대로, 노치선단의 곡률반경이 커지면 잠복시간이 길어졌으며, 특히 노치선단의 곡률반경이 0.1 mm 이상으로 커지면 급격하게 길어졌다. 그러나 DHC 속도는 노치선단의 곡률반경이 0.125 mm 까지는 2.45×10^{-8} m/s 로 거의 일정하였으나 0.15mm 의 곡률반경에서서는 DHC 속도 값의 분산 (표준편차=1.15×10^{-8} m/s)이 커졌으며 그 평균값은 1.99×10^{-8} m/s 로 조금 작게 나타났다. 그림 5-7 의 결과는 신뢰성있는 DHC 속도 값을 측정하기 위해서는 노치선단에 곡률반경이 0.125 mm 이하로 작게 해야 한다는 것을 제시하고 있다. 이러한 노치 형상에 따른 DHC 잠복시간 및 속도는 수냉 시편에서도 그림 8 에 나타낸 바와 같이 동일하게 나타났다. 다시말해, 크랙 선단의 곡률 반경에 비례하여 DHC 잠복시간은 커졌으며, DHC 속도는 어느 정도 분산을 보였지만 크랙 선단의 곡률반경이 0.125 mm 까지는 일정한 값(2.7×10^{-8} m/s)으로 수렴하다가 0.15 mm 곡률 반경을 갖는 시편은 조금 낮은 DHC 속도를 나타냈다.

그림 7 및 8 의 결과로부터 DHC 를 일으키는데 소요되는 잠복시간은 크랙선단의 노치 곡률반경이 클수록 급격히 증가하며, DHC 속도는 노치선단의 곡률반경이 0.15 mm 미만이면 곡률반경에 무관하게 일정한 값을 나타내고 이보다 큰 곡률반경을 갖는 노치에서서는 낮아진다는 결론을 도출할 수 있다. 따라서 이처럼 크랙형상에 민감한 잠복시간 또는 무관한 DHC 속도 결과는 Kim 이 제시한 바와 같이 DHC 구동력은 크랙선단과 아닌 지점에서의 수소농도 차이라는 것을 입증한다.

시편을 310 °C 로 가열하여 60ppm 의 수소를 고용시킨 후 시험온도인 250 °C 로 냉각시키면 수소 석출 고용도 (Terminal solid solubility for precipitation)는 250 °C 보다 낮아 모든 수소는 과포화 고용된 상태로 존재한다 [10]. 그러나 크랙선단에 작용한 인장응력은 과포화로 고용된 수소를 수소화물로 석출시켜 크랙선단의 수소농도를 시험온도인 250 °C 에서의 TSSD (terminal solid solubility for dissolution)로 낮추어 수소농도의 구배를 만들고 이것이 DHC 를 일으키는 구동력이다 [7]. 이러한 가정의 이론적 타당성은 Puls [11] 도 제시한 바 있으나, 그가 추후에 제시한 DHC 이론에서는 이를 반영하지 않고 크랙선단에서 먼 지역에 있는 수소화물로부터 수소가 기지상에 고용되어 인장응력이 작용하는 크랙선단으로 확산해가 수소농도가 TSSP 에 도달하면 수소화물이 석출하는 개념을 도입하였다. [12,13]. 따라서 Puls 의 모델에 따르면 크랙선단에 수소농도가 기지상의 수소농도보다 높아져 TSSP 로 증가되어야만 수소화물이 석출되므로, 크랙선단의 수소농도가 크랙선단에서 먼 기지상의 수소농도에 비하여 높아져야만 한다. 그러나 이처럼 수소 농도가 높은 곳으로 수소가 확산하는 것은 불가능하므로, Puls 모델은 논리적으로 타당하지 않다. 그러나 Kim 이 제시한 DHC 모델에 따르면 크랙선단의 수소농도가 평형 수소농도인 TSSD 로 감소되기에 기지상의 수소농도가 TSSD 이면 크랙선단과 기지상의 수소농도 차이는 없으므로 DHC 는 일어나지 않을 것이고, 이를 실험적으로 검증해주는 결과가 Coleman [14] 결과이다. 그는 DHC 가 일어나지 않는 임계 수소농도를 온도의 함수로 측정한 결과, 수소농도가 Kearns 의 TSSD 에 도달하면 DHC 는 일어나지 않는다는 결과를 보였다. 한편 크랙선단에서의 수소화물 석출은 무작위로 일어나는 것이 아니라 $\{10\bar{1}7\}$면에서만 일어나기에 [15], 집합도가 수소화물 생성 속도 및 DHC 속도에 큰 영향을 미칠 것이다. 이것은 수소화물 생성으로 인한 탄성 변형에너지가 방향에 따라 다르므로, 동일한 인장응력 조건에서 수소화물 생성 속도는 방향 즉 집합도에 영향을 받을 것이다. 이것은 크랙선단에 부하되는 인장응력에 의한 일 에너지가 부피가 큰 수소화물 석출로 야기되는 기지상인 지르코늄 및 석출상 수소화물의 전체 변형 에너지보다 크거나 같아야만 수소화물 생성은 일어나기 때문이다 [6,11]. 따라서 20 MPa√m 의 동일한 인장 하중 조건에서 크랙선단에 작용한 일 에너지는 크랙선단의 곡률반경 크기에 반비례적으로 작게되어

곡률반경이 커지면 수소화물 생성속도 (nucleation rate)는 낮아지게 된다. 이러한 수소화물의 생성은 크랙선단의 수소농도를 과포화 상태에서 250 °C 에 해당하는 평형 수소농도, TSSD 로 감소시킬 때까지 지속될 것이다. 일단 크랙선단의 수소농도가 평형 수소농도인 TSSD 에 도달하면 더 이상의 수소화물 생성은 일어나지 않고 단지 수소농도 차이로 인하여 생성된 수소화물의 성장 만이 일어날 것이다. 그러나 수소화물의 성장 속도는 생성 속도에 비하여 매우 빠르게 진행되어 잠복시간을 결정하는 주 인자는 수소화물의 생성 속도일 것으로 보인다. 따라서 그림 7 및 8 에 나타낸 바와 같이 크랙선단의 곡률반경이 커짐에 따른 긴 잠복시간은 곡률반경에 반비례적으로 작용하는 일 에너지가 작아 수소화물의 생성 속도를 낮추는 효과로 DHC 잠복시간이 길어지는 것으로 설명할 수 있다. 크랙 선단의 수소농도가 언제부터 TSSD 에 도달하는 지는 그림 5 에 나타낸 AE 음향 신호 패턴에서 찾아볼 수 있다. 그림 5 에 나타난 음향 신호에 따르면 노치선단이 예각의 피로크랙이 형성된 시편에서는 하중을 가한 후 2 시간 이내에서 DHC 크랙이 생성되고, 그 후에는 연속적인 크랙 성장이 일어났다. 노치선단의 곡률반경이 큰 시편도 첫 DHC 크랙 또는 두 번째 DHC 크랙이 생성된 후에는 연속적인 크랙 성장 패턴을 보였다. 이처럼 크랙선단의 곡률반경에 거의 의존하지 않고 비슷하게 나타나는 AE 음향 신호 패턴은 적어도 DHC 크랙이 생성되었을 때 크랙선단의 수소농도는 평형 수소농도인 TSSD 에 도달하였다는 것을 시사한다. 이처럼 크랙선단에 수소농도가 평형 수소농도에 도달하게 되면 충분한 크기의 수소화물이 석출되고 성장된 수소화물이 인장응력으로 깨지면서 DHC 크랙이 성장하게 된다. 일단 DHC 크랙이 성장하게되면 크랙선단의 곡률반경은 매우 작고 그 이전의 노치선단 곡률반경에 무관하게 모든 시편에서 일정하게 되어 DHC 구동력인 수소농도의 차이를 일정하게 하여 그림 7,8 에 나타낸 바와 같이 일정한 DHC 속도를 보인다. 그림 5 에 나타낸 바와 같이 노치선단이 둔각일 때는 잠복시간이 길기에 초기 노치선단과 첫 striation line 의 간격 (striation spacing)이 크지만 DHC 크랙이 성장한 후에 striation spacing 은 균일하지만 작게 나타날 것이다. 이러한 striation spacing 의 불균일한 분포를 그림 9 에 나타낸 DHC 파단면에서 확인할 수 있다. 결론적으로 노치선단의 크기에 따른 잠복시간 및 DHC 속도 측정 결과는 파단면에서 관찰되는 stiration spacing 의 변화와 잘 일치한다.

3.2 냉각속도에 따른 DHC 속도 및 잠복시간

그림 10 은 노냉 및 수냉 시편에서 각각 측정한 DHC 잠복 시간의 차이를 보여준다. 노치 선단의 형상이 곡률 반경이 0.1mm 이하로 매우 예민할 때는 수냉 및 노내 시편에서 DHC 잠복 시간은 거의 비슷하였으나, 곡률 반경이 0.125mm 이상으로 커져 둔해지면 노냉 시편에서 현저하게 DHC 잠복 시간이 길어졌다. DHC 속도는 그림 10(b)에 나타낸 바와 같이 노냉 시편에 비하여 수냉 시편에서 모든 노치 형상 조건에서 평균 10% 높았다. 수냉 시편이 노냉시편에 비하여 특히 노치 곡률 반경이 클 때 매우 짧은 DHC 잠복시간을 보이는 것은 수소화물 석출의 hysteresis [16] 때문이다. 그림 2 에 나타낸 크기가 다른 수소화물을 310 °C 에서 고용한 후 동일한 속도로 250 °C 로 냉각될 때 크랙선단에서의 수소화물의 석출 패턴은 그 이전의 수소화물 석출 패턴을 따라 간다 [16]. 즉, 수냉시편에서는 수소화물이 빠르게 생성되지만 노냉시편에서는 더디게 생성되기에 그 만큼 잠복시간이 길게 나타난다. 이처럼 수소화물 석출패턴의 hysteresis 는 그 이전에 수소화물 석출로 인하여 생성된 결함이 310 °C 에서 열처리하여도 사라지지 않고 수소화물 생성 및 성장의 우선적인 장소로 작용하여 나타나는 것이다. 여기서 주목할 것은 크랙선단의 곡률반경이 0.1mm 이하로 예민해질 때는 수소화물 석출 거동의 hysteresis 효과가 나타나지 않았으며, 곡률반경이 매우 큰 경우에만 수소화물 hysteresis 효과가 나타났다는 것이다. 이것은 크랙선단의 곡

률반경이 매우 작아 인장 응력에 의한 크랙선단에 작용하는 일 에너지가 클 때는 크랙선단에서의 수소화물 생성속도는 수소화물 석출 hysteresis 보다는 외부 인장응력에 의한 일 에너지에 의하여 지배를 받아, 수냉시편 및 노냉시편에서 잠복시간의 차이가 없어지는 것이다. 반대로 크랙선단의 곡률반경이 클 때는 인장 응력에 의한 크랙선단에 작용하는 일 에너지가 작아 크랙선단에서의 수소화물 생성속도는 이전의 수소화물 석출 hysteresis 의 영향이 현저하게 되기에, 수냉시편과 노냉시편에서 잠복시간의 큰 차이가 나타나게 되는 것으로 보인다. DHCV 는 노치선단의 곡률반경에 관계없이 노냉시편보다는 수냉시편에서 약간 높게 나타났으나, 그 차이는 매우 작았다. 이러한 냉각속도에 따른 DHCV 차이는 Amouzouvi[17] 결과와 일치하는 동일한 경향을 나타냈지만 이들이 보고한 차이보다는 매우 적어, 이것이 실험오차인지 아닌지를 확인하고자 compact tension 시편에서 냉각속도에 따른 축방향 DHC 속도를 측정하는 검증시험이 추가로 수행되었다. 그림 11 은 60 ppm H 를 장입시킨 노냉 및 수냉시편에서 184 및 200 ^{o}C 에서 측정한 축방향 DHCV 를 보여준다. 시험온도 및 노치 형상에 관계 없이 수냉시편이 노냉시편에 비하여, 그 차이는 적었지만, 빠른 DHC 속도를 보인다는 것을 검증할 수 있었다. DHC 를 지배하는 구동력은 김에 따르면 크랙선단과 크랙선단이 아닌 지점에서의 수소농도의 차이이므로 [7], 수소화물 크기 및 분포가 다른 수냉시편 및 노냉시편에서의 용해 및 석출 시 수소 고용도 (TSSD 및 TSSP)의 차이에 대한 논의가 필요하다. 만약 수소화물 석출 hysteresis [16]가 있더라도 수소 고용도- TSSD 및 TSSP- 미치는 영향이 없다면 크랙선단과 여기서 멀리 떨어진 지점에서의 수소농도의 차이가 없으므로 두 시편에서 DHCV 차이는 없어야 한다. 그러나 실제로는 DHCV 의 차이가 두 시편에서 존재하므로, 이것은 수소화물 석출 hysteresis 가 수소화물 고용도인 TSSD 및 TSSP 에 영향을 미친다는 것을 역설적으로 검증하는 것이다. 수소가 미세하게 석출되면 높은 탄성에너지 때문에 수소화물 고용을 빠르게 촉진시켜 310 ^{o}C peak 온도에서 보다 많은 양의 수소가 고용될 것이고, 반대로 긴 수소가 석출된 경우에는 탄성에너지의 일부가 전위 형성에 소모되어 낮은 탄성에너지로 동일 온도에서 상대적으로 적은 양의 수소가 고용될 것이다. 이러한 수소화물 크기에 따른 TSSD 온도의 차이는 5-6 ^{o}C 정도로 적고, 수소화물 크기가 작을 때 낮은 TSSD 를 보일 것으로 사료된다 [18]. 따라서 310 ^{o}C peak 온도에서 고용되는 수소량이 미세한 수소화물이 형성된 수냉시편에서 높을 것이고, 이것은 시험온도에서 크랙선단과 아닌 지점에서의 수소농도 차를 크게 하여 수냉시편의 DHC 구동력을 크게하여 DHC 속도를 증대시킨다. 수소화물 크기에 따른 TSSD 차이가 5 ^{o}C 로 존재한다면 수냉시편에 고용된 수소량은 노냉시편에 고용된 수소량에 비하여 10% 정도 높게 되므로, 이것이 수냉시편의 DHC 속도를 10% 정도 증가시키는 것으로 사료된다.

4. 결론

Zr-2.5Nb 압력관으로부터 cantilever beam 시편을 사용하여 노치형상에 따른 반경방향으로의 DHC 속도 및 잠복시간을 조사하였다. 노치선단의 곡률반경이 커짐에 따라 DHC 잠복시간은 급격하게 증가하였으나, DHC 속도의 차이는 거의 나타나지 않았다. 다만, 노치 선단의 곡률반경이 0.15mm 로 커지면 약간 감소된 DHC 속도와 더불어 심한 분산으로 신뢰성이 낮아졌으며 낮은 DHC 속도 값을 보였다. 따라서 신뢰성있는 DHC 속도 값을 얻기 위해서 CB 시편의 노치선단의 곡률반경 크기는 0.1mm 이하로 제한해야 한다. 이처럼 크랙선단의 형상에 따른 잠복시간의 변화는, Kim 이 제시한 DHC 모델을 토대로, 과포화된 수소농도를 갖는 크랙선단이 외부 인장 응력 하에서 수소화물을 생성시켜 시험온도에 해당하는 평형 수소농도인 TSSD 에 도달하는 속도에 지배되어 일어나는 것으로 설명하였다. 즉, 크랙선단의 곡률 반

경이 큰 시편은 수소화물 생성속도가 늦어져 그 만큼 긴 잠복시간을 보이는 것이고 반대로 크랙선단이 예각일 때는 수소화물 생성속도가 빨라 짧은 잠복시간을 보이는 것이다. 특히, 크랙선단의 곡률반경이 커서 외부 하중에 의한 일 에너지가 상대적으로 낮을 때는 수소화물 생성속도는 수소화물 석출 이력에 영향을 받아 수냉시편에 비하여 노냉시편이 긴 잠복시간을 보였다. 수냉시편의 DHC 속도는 노치 형상에 무관하게 노냉시편에 비하여 약 10% 높게 나타났으며, 이것은 수소화물 석출 크기에 따른 peak 온도에서의 수소고용도 차이로 유발된 크랙선단과 크랙에서 먼 지점에서의 수소농도의 차로 설명하였다. 결론적으로 노치 형상에 따라 잠복시간은 민감하게 변화되지만 DHC 속도는 일정하게 나타난 연구 결과는 김의 제시한 DHC 모델이 타당하다는 것을 검증해주었다.

후 기

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

REFERENCES

[1] Y. S. Kim et al.: KAERI Report: KAERI/RR-1766/96, Korea Atomic Energy Research Institute (1997).

[2] Y.S. Kim, Y.M. Cheong, S.S. Kim and K.S. Im: J. Kore. Inst. Met. & Mater. 39 (2001)150.

[3] K. Edsinger, J.H. Davies and R.B. Adamson: Proceedings of the Twelfth International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP 1354 (2000) 316.

[4] P. Efsing and K. Petterson: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP 1295 (1996) 394.

[5] M. P. Puls, L. A. Simpson and R. Dutton: Fracture Problems and Solutions in the Energy Industry, ed. L. A. Simpson (1982) 13.

[6]. M. P. Puls: Metall. Trans., 21A (1990) 2905.

[7] Y.S. Kim, S.S. Park, S.S. Kim, Y.M. Cheong, K.S. Im: Proceedings of the 1st Materials and Fracture Symposium (2002) 82.

[8] Y. S. Kim et al.: KAERI Report, KAERI/RR-1766/96, Korea Atomic Energy Research Institute (1997).

[9] S.J. Kim: Effect of Heat Treatment on Delayed Hydride Cracking Behavior of Zr-2.5%Nb Alloy, Master Thesis (1999).

[10] Y.S. Kim: KAERI Report, KAERI/TR-1329/99, Korea Atomic Energy Research Institute (1999).

[11] M. Puls: Acta Metallurgica, 29 (1981) 1961

[12] S. Q. Shi and M. Puls: J. Nucl. Mater. 218 (1994) 30.

[13] S. Q. Shi, G. K. Shek and M. P. Puls: J. Nucl. Mater., 218 (1995) 189.

[14] C.E. Coleman, J.F.R. Ambler: Scripta Metall., 17 (1983) 72.

[15] Young Suk Kim, Sang Chul Kwon and Sung Soo Kim: J. Nucl. Mater. 280 (2000) 304.

[16] D.J. Cameron and R.G. Duncan: J. Nucl. Mater. 68 (1977) 340.

[17] K.F. Amouzouvi and L.J. Clegg: Metall. Trans. A18 (1987) 1687.

[18] Z.L. Pan and M.P. Puls: J. Alloys and Compounds 310 (2000) 314.

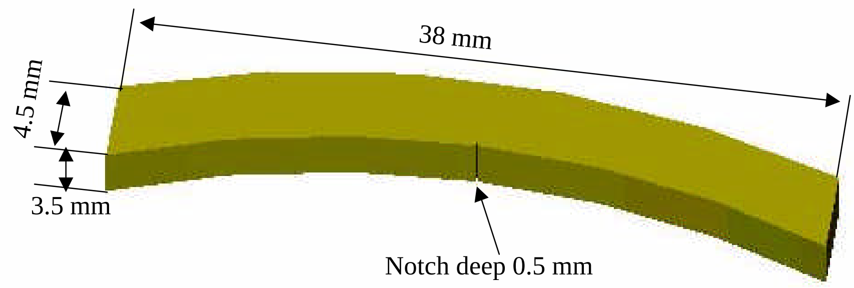

Fig. 1. Schematic diagram of the cantilever beam specimens taken from a CANDU Zr-2.5Nb tube.

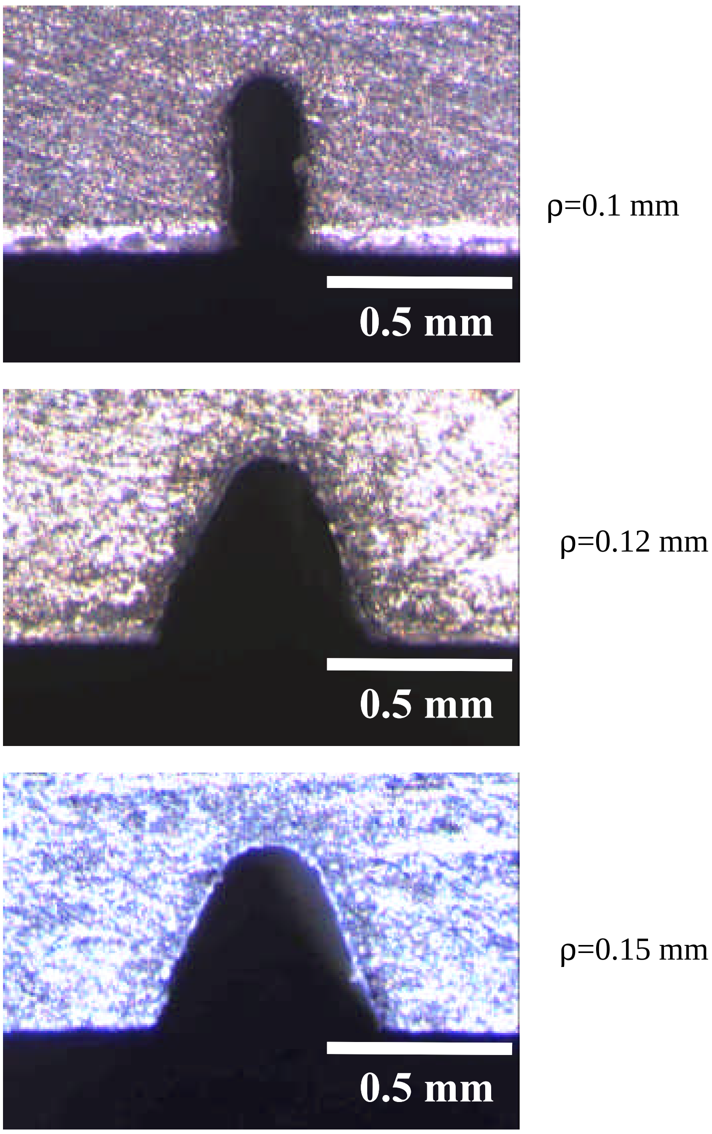

Fig. 2. Cantilever beam specimes with the notch tip radius ranging from 0.1 to 0.15 mm.

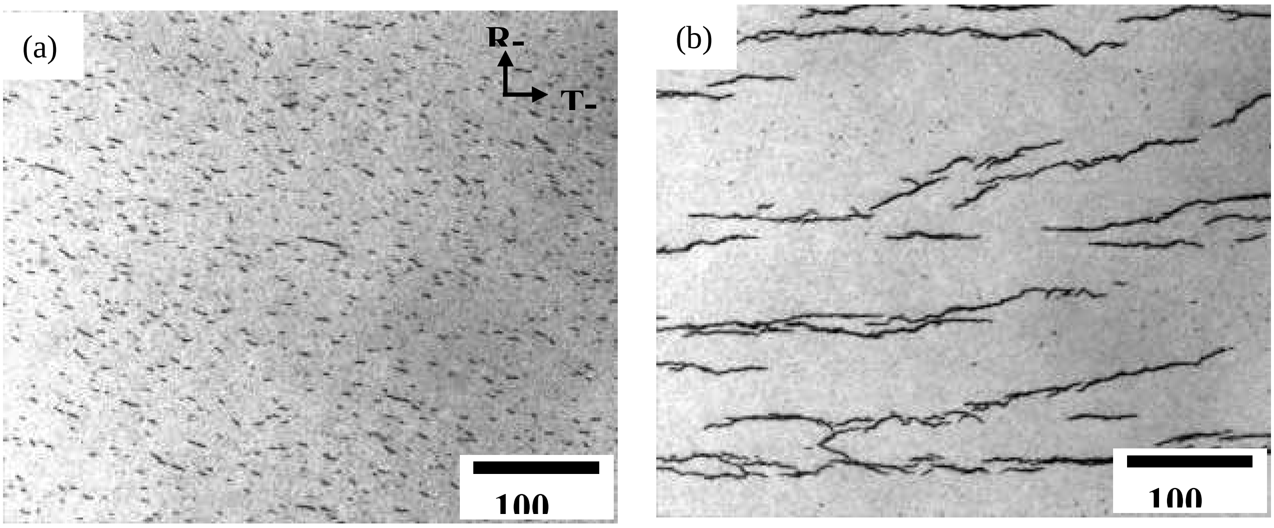

Fig. 3. Hydrides with the cooling rate on (a) the water-quenched and (b) the furnace cooled CB specimens.

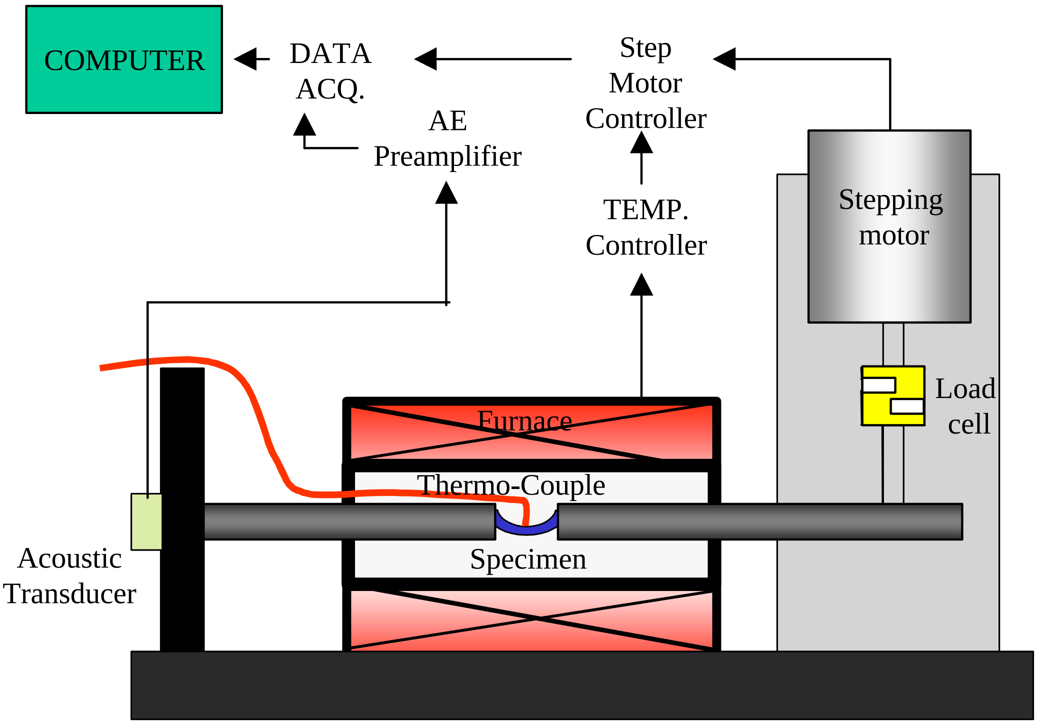

Fig. 4. Schematic diagram of the testing equipment used for DHC tests.with an acoustic emission sensor to determine the iniation and growth of the DHC crack.

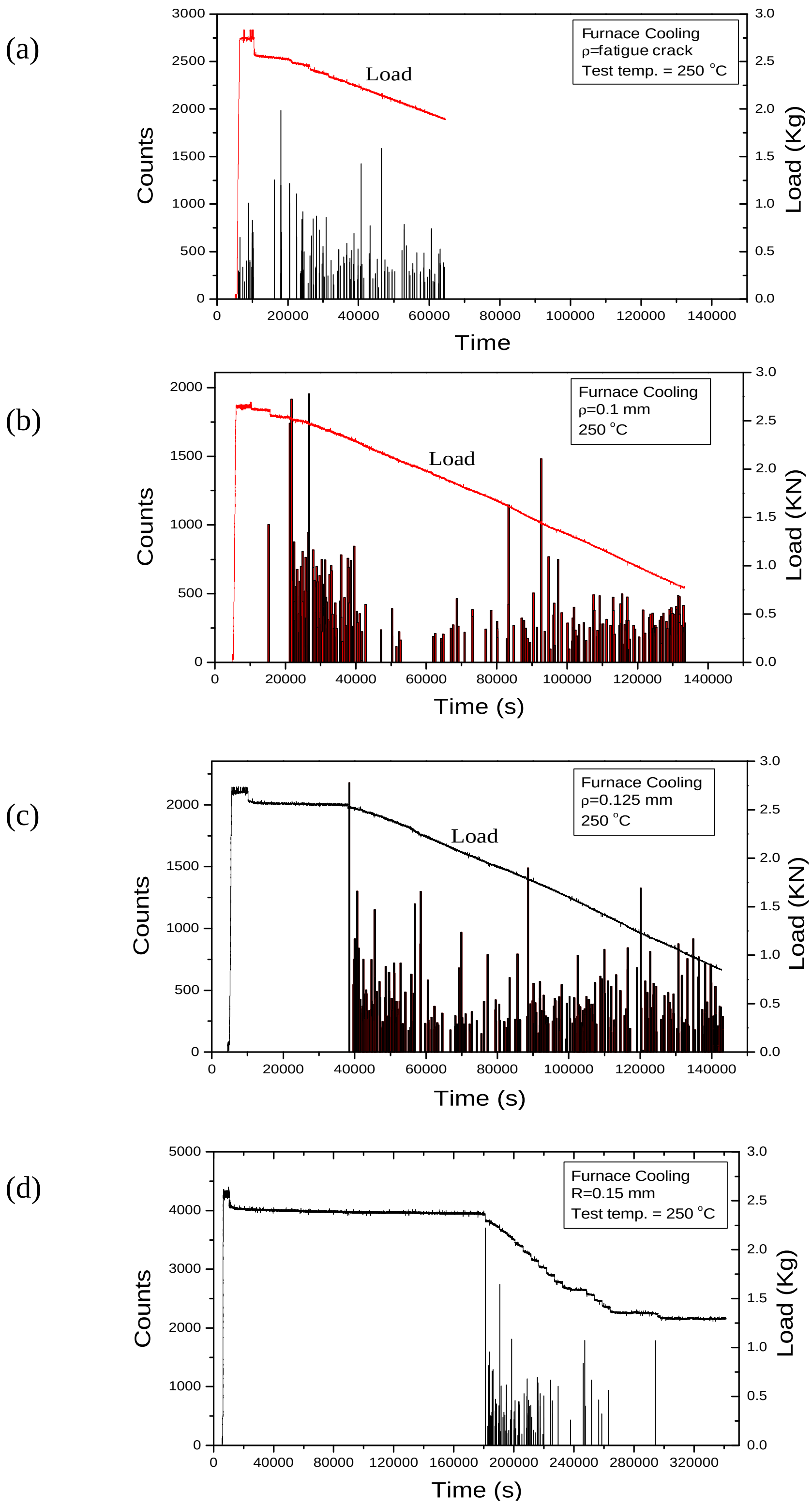

Fig. 5. Acoustic emission counts and load with time for the furnace-cooled CB specimens with different notch tip radii during DHC tests at 250 ^{o}C: (a) fatigue crack and (b), (c), (d) the notch tip radius of 0.1, 0.12 and 0.15 mm, respectively.

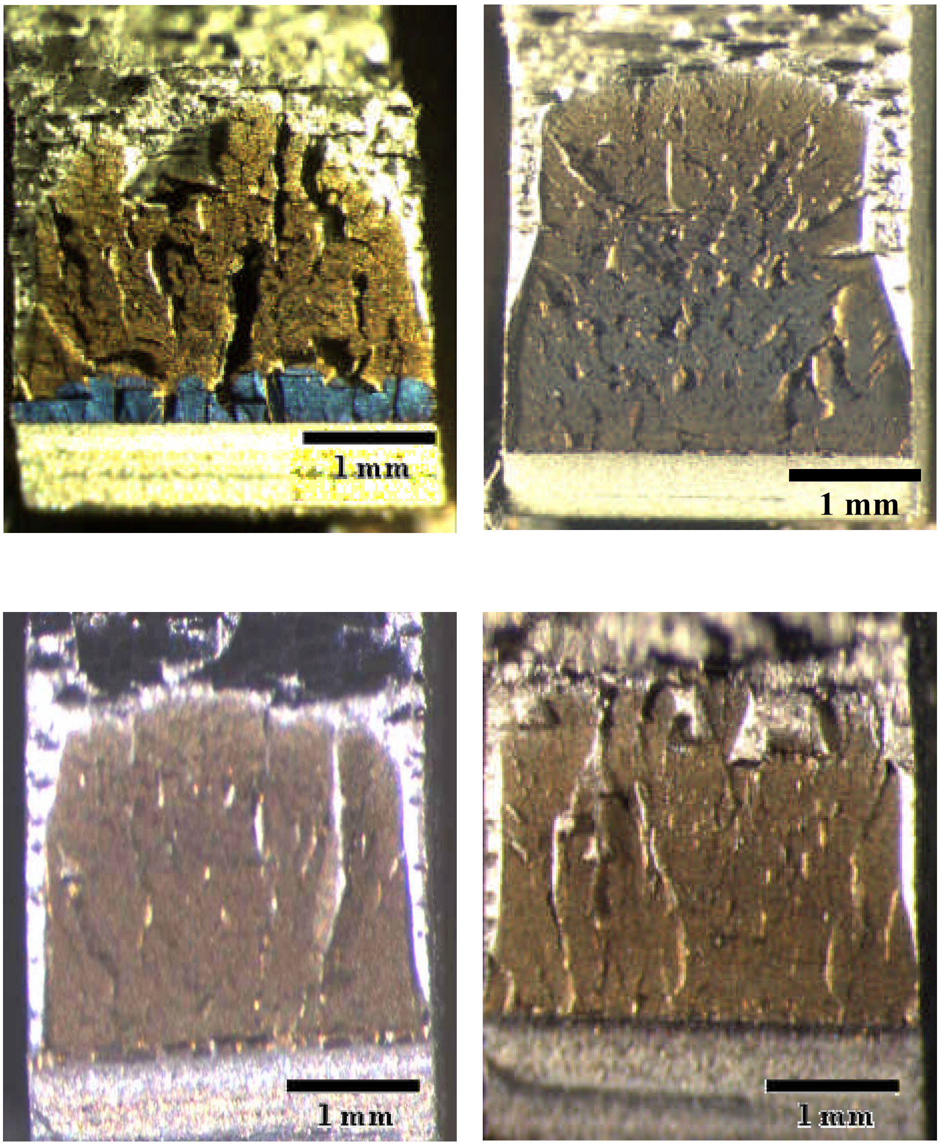

Fig. 6. Fracture pattern of the DHC cracks for the furnace-cooled cantilever beam specimens with different types of cracks: (a) fatigue crack, (b), (c), (d) the notch tip radius of 0.1, 0.125 and 0.15 mm.

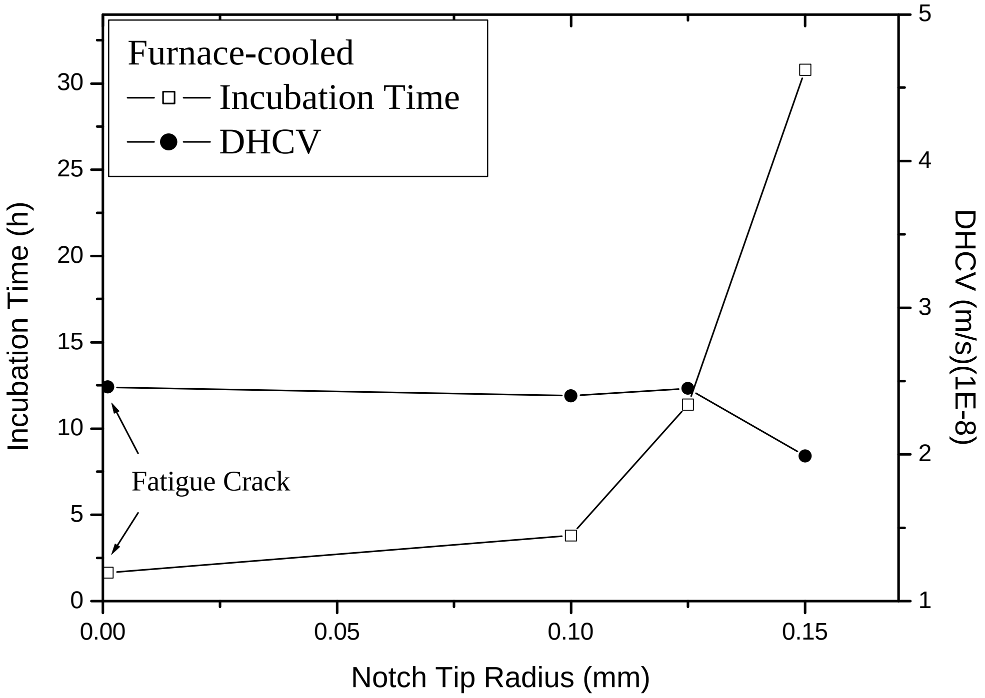

Fig. 7. The incubation time and DHC velocity with the notch tip radius for the furnace cooled CB specimens at 250 °C

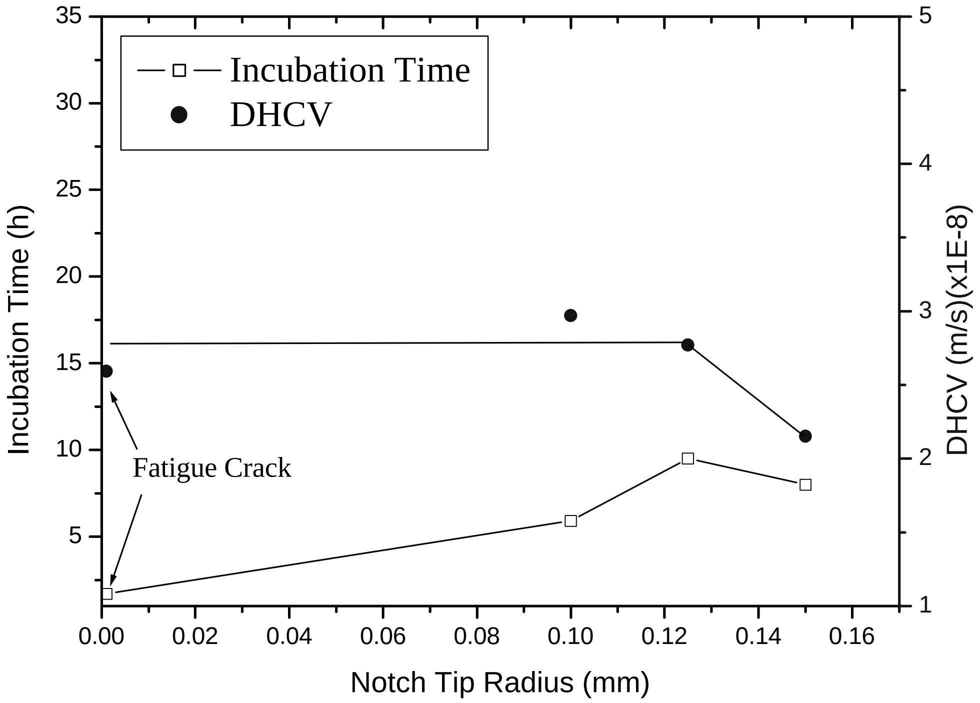

Fig. 8. The incubation time and DHC velocity with the notch tip radius for the water-quenched CB specimens at 250 °C.

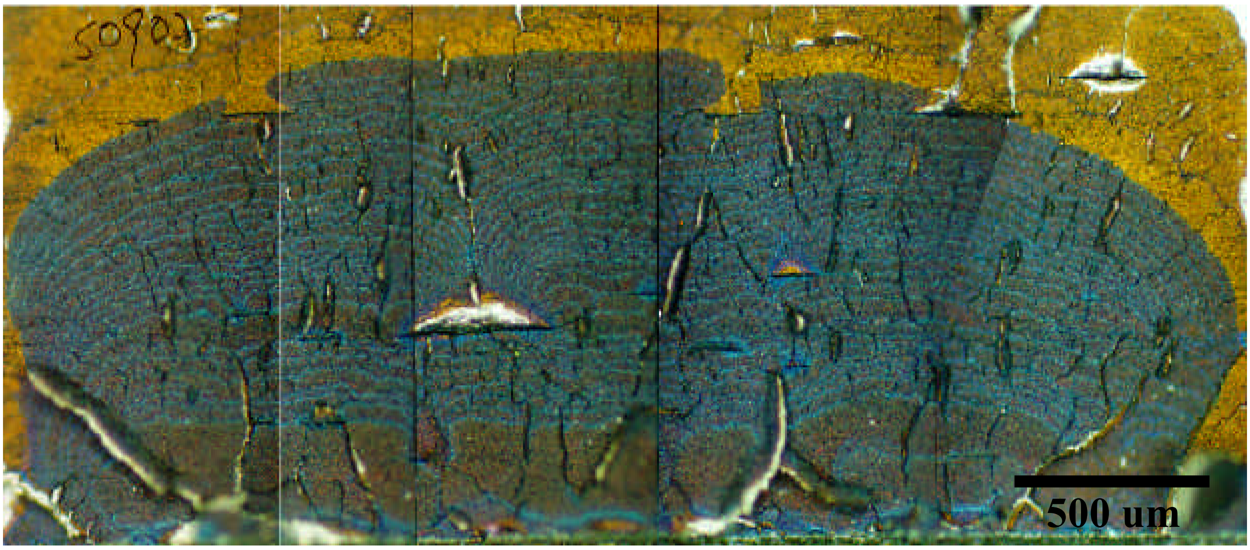

Fig. 9. Striation lines observed on the fracture surface of a CB specimen: the first spacing between the 1st and 2nd lines is very long compared to that of other striation lines.

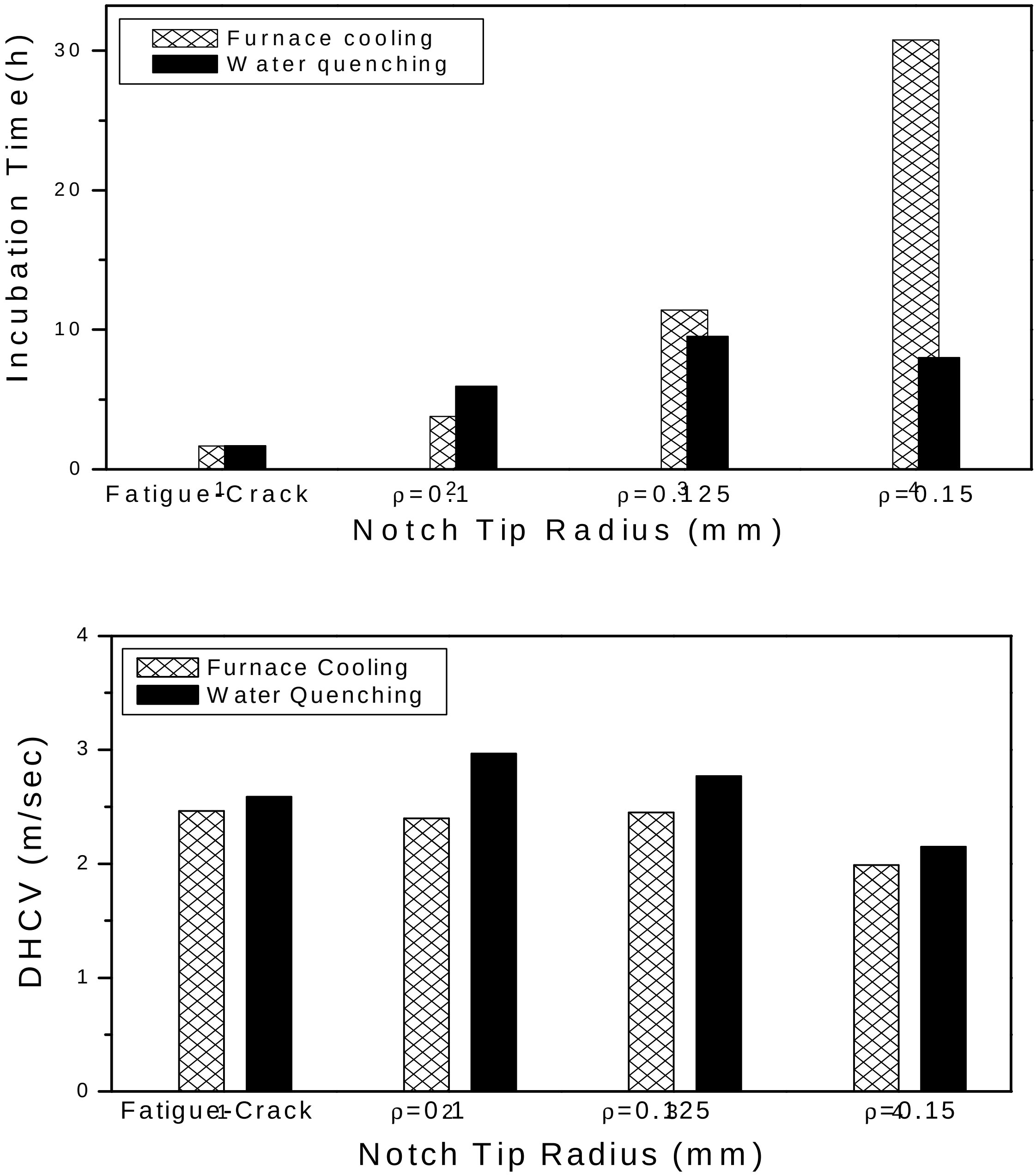

Fig. 10. Comparison of the incubation time and DHCV of the furnace-cooled and water-quenched cantilever beam specimens at 250 ^{o}C.

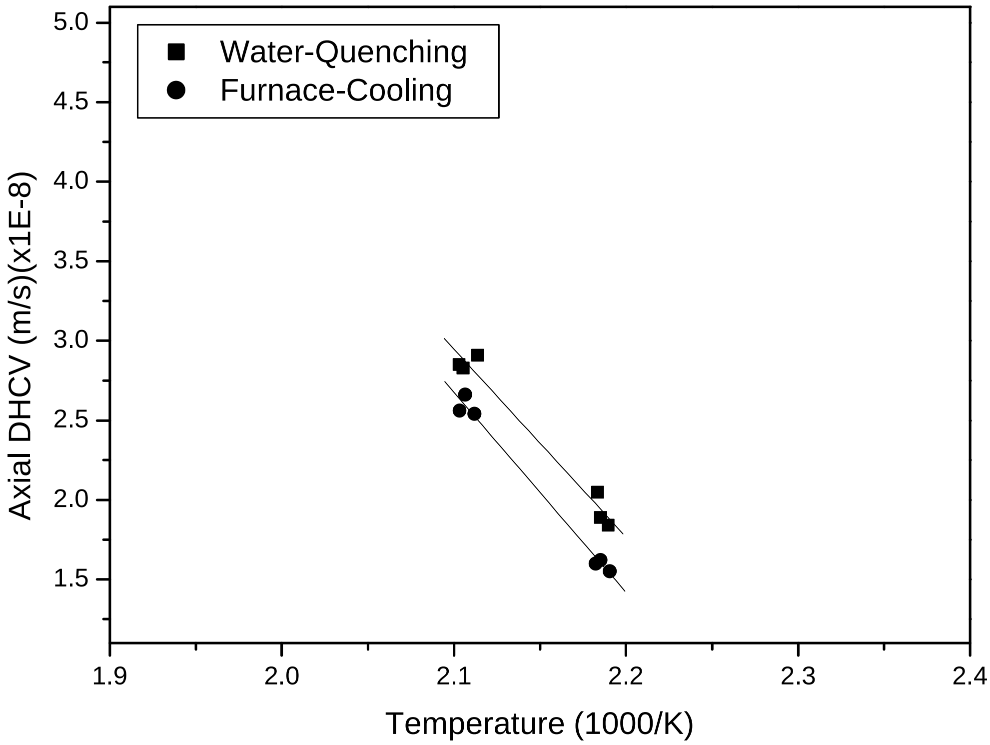

Fig. 11. Axial DHC velocity of Zr-2.5Nb tube subjected to water quenching and furnace cooling after homogenization treatment to dissolve 60 ppm H: the water-quenched compact tension specimens had slightly higher DHCV than the furnace-cooled.