2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Zr-2.5Nb 압력관의 CB 시험편의 노치 크기가 DHC 실험 결과에 미치는 영향

Notch Size Effect on DHC Test Using CB specimen of Zr-.2.5Nb Pressure Tube

오 동준 • 김 상재 • 안 상복 • 임 경수 • 김 영석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

Zr-2.5Nb 압력관의 DHC(Delayed Hydride Cracking)를 측정하기 위한 CB(Cantilever Beam)시험편의 피로 예비균열을 만드는 것이 쉽지 않다는 이유 때문에, 일반적으로 피로 예비균열이 없는 CB 시험편을 이용한 DHC 실험이 행해지고 있다. 그러나 이런 결과에 대한 유효성 검증은 아직 이루어지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 60 ppm 의 수소를 장입한 후에 균질화한 CB 시험편을 사용하여 노치 크기에 따른 DHC 결과의 영향을 조사하였다. 결론적으로 곡율이 0.1 mm 이하인 노치를 갖는 CB 시험편의 DHCV 실험 결과와 피로예비균열을 갖는 시험편의 결과는 잘 일치하였으나, 0.1 mm 보다 큰 노치는 DHCV 결과에 대한 불확실성을 보였다. 또한 노치의 곡율이 증가함에 따라 incubation time 도 증가하였으며, K_{IH}값을 구하기 위한 DHC 실험을 위해서는 피로 예비균열의 시험편을 사용하여야 한다는 것을 확인하였다.

Abstract

Since it is not easy to make the pre-fatigue crack of CB(cantilever beam) specimen to carry out the DHC(Delayed Hydride Cracking) test of Zr-2.5Nb pressure tubes, DHC tests have been generally performed using CB specimen without pre-fatigue crack. However, there is no any trial to validate these test results of DHC. Therefore, the aim of this study is to investigate the notch size effect on DHC test using CB specimens in which 60 ppm hydrogen has been absorbed and heat-treated. In conclusion, while the DHCV result of CB specimen (notch radius 0.1 mm) made a good agreement with that of pre-fatigue specimen, DHCV results from CB specimens (notch radius > 0.1 mm) showed the test uncertainty. In addition, it was found that the incubation time was increased with the increasing of notch radius and that the CB specimens with pre-fatigue crack should be used for DHC test to obtain K_{IH}.

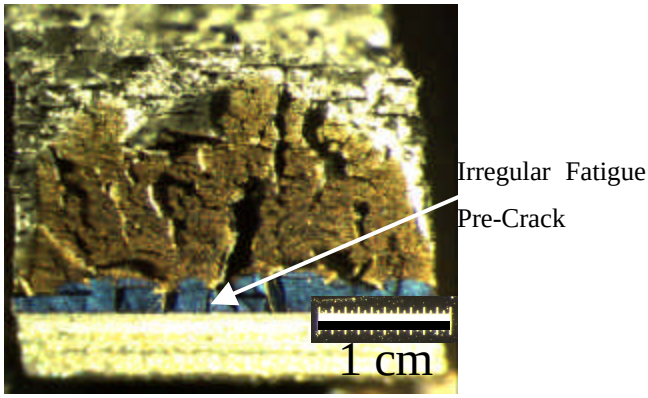
1. 서 론

현재 가동 19 년째인 CANDU 형 원자로인 월성 1 호기에 장착된 압력관 Zr-2.5wt%Nb 합금은 원자로내의 고온냉각수 분위기에서 장기간 사용되는 동안 여러 이유들에 의해 수소 및 중수소의 흡수가 발생하게 되고[1], 이들 함량이 matrix 내의 고용한도를 넘게되면 Delayed Hydride Cracking (DHC)의 유발과 수화물(Hydride)에 의한 파괴인성치의 취화로 인하여 압력관 파손사고를 일으키는 것으로 보고되고 있다[2]. 따라서 국내의 월성 1,2,3,4 호기를 포함한 모든 CANDU 형 원자로의 경우 정기적으로 압력관내 수소흡수량 측정 및 균열발생 여부를 점검하도록 규정하고 있으며[3,4], 수화물에 따른 압력관의 거동에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다.

따라서, Zr-2.5Nb 압력관 재료의 DHC 균열성장속도(DHCV)와 임계응력확대계수 (K_{IH})는 가동중인 압력관 재료에서 허용되는 균열의 크기나 균열의 성장이 원자로의 안전성을 어떻게 저해하게 되는 지를 판단하기 위하여 압력관의 파괴인성과 더불어 가장 중요한 정보 중의 하나라고 할 수 있다[5, 6]. 또한 여러 연구에 의하면, 현재까지는 압력관의 길이(axial)방향의 DHCV 는 반경(radial) 방향으로의 DHCV 보다 2 배정도 빠르며, 반경방향의 K_{IH}는 직경방향(circumferential)의 K_{IH}에 비하여 약 1.5 배정도 빠르다고 보고되고 있다 [6-11]. 이런 결과는 파괴 역학적인 측면에서 균열의 성장은 균열 면에 수직한 방향으로 가해지는 응력에 의하여 조절된다고 이해되고 있으며, 이 균열 면에 수직한 방향에서의 기저면 성분이 높아지면 DHCV 가 커지고 K_{IH}는 낮아지는 것으로 보고되어지고 있다 [7, 8]. DHC 에 의한 균열성장 방향이 압력관의 길이 방향이냐 반경 방향이냐 하는 차이가 있지만 실제로 DHC 에 의한 균열 성장 면은 같은 면이므로 이 면에서 측정한 기저면 성분이 같다는 점은 균열 면에 수직한 방향에서의 기저면 성분 이외에 다른 인자가 DHCV 나 K_{IH}에 영향을 끼칠 것이라는 추론에 의해 XRD 조사를 하여 소성변형의 특성의 차이를 비교하기도 하였다[12].

그러나 이런 CB(Cantilever Beam)시험편을 사용하는 DHC 실험법은 시험편의 규격이나 실험방법에 대하여 아직 국제적으로 규격화되어 있지 않은 실정이나, 일반적으로 캐나다 AECL 의 CB 실험 방법에 대한 지침서와 KAERI 에 의한 시험 절차서에 준하여 실험이 진행되고 있는 실정이다 [13, 14]. 이런 절차서에 의하면, CB 시험편에는 CCT 시험편과는 달리 균열선단에 피로 예비균열을 생성하지 않고 실험을 행하도록 되어있다. 피로 예비균열은 실험의 목적을 달성할 수 있도록 균열선단의 잔류응력의 영향을 제거할 뿐 아니라 실험 시 얻을 수 있는 가장 자연스러운 상태의 예비 균열인 것이다. 그러나 이런 예비균열은 CCT 시험편과는 달리 CB 시험편에서는 만들기도 힘들뿐 아니라, 예비균열의 파단면을 검사해보면, 파단면이 평활하지가 않고 요철이 심하게 형성된 것을 확인할 수 있다(Fig. 1). 이런 예비피로균열 부재에 의한 잔류응력이나 불균일한 형상의 피로균열로 인하여 발생할 수 있는 불확실성을 제거하기 위하여, 시험 결과에 영향을 주지 않는 작은 노치를 가진 CB 시험편을 사용하게 되었다. 그러나 이런 노치의 크기가 과연 어떤 실험결과에 영향을 줄 수 있으며, 어느정도 크기가 되면 우리가 구하고자 하는 실험결과에 영향을 미치지 않을 것인가에 대한

검토가 필요하게 되었다. 따라서 본 연구는 수소 장입 후에 열처리 조건을 달리하여 수소화물의 형상을 상이하게 만든 두 가지 Zr-2.5Nb 압력관을 사용하여, 일반적인 기계가공이 가능한 범위 내에서 노치의 크기가 DHC 실험에 줄 수 있는 영향과 그때의 DHC 의 특성에 대하여 고찰하여, 추후의 실험에 그 결과를 응용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다고 할 수 있다.



Crack L : 1.45 mm

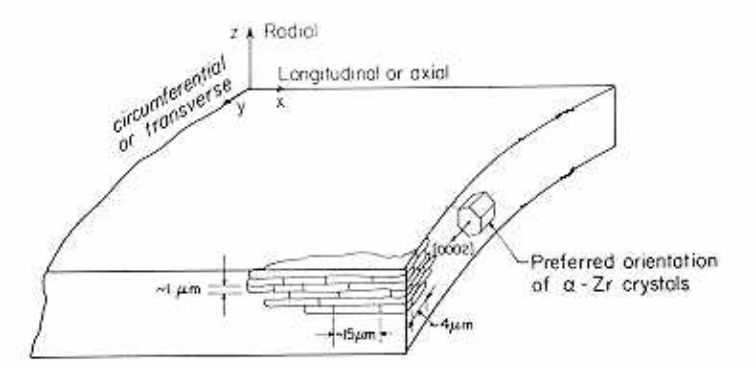
Fig. 1 Irregular Fatigue Pre-Crack of CB Specimen

2. 재료 및 실험

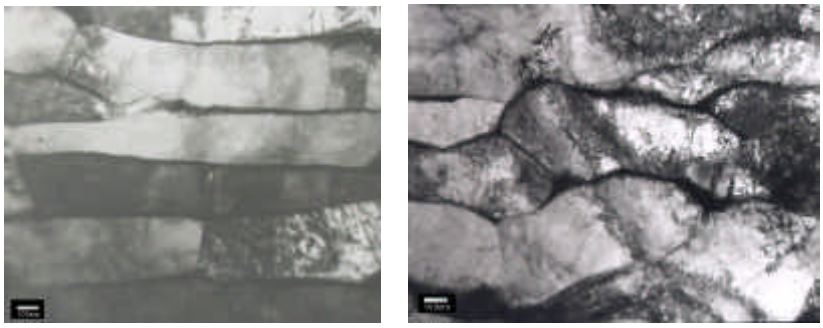
2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 CANDU 4 차 용해된 cold-worked Zr-2.5Nb 압력관이다. 캔두 압력관의 제조공정은 800°C 에서 11:1 로 Hot Extrusion 과 Cold Drawing (25%) 후에 400 °C 에서 24 시간 Autoclave 처리를 하였다. CANDU 압력관은 압출시의 심한 소성변형 (11:1 의 압출비율)으로 축 방향으로 길게 늘어진 결정립자를 관찰할 수 있다 (Fig. 2). 또한 길게 축 방향으로 늘어진 결정입자는 α-Zr 이었으며, α-Zr 와 α-Zr 사이에 β-Zr (β_1) 입자들이 길게 늘어져 있다.

Fig. 3 는 광학현미경으로 관찰한 조대한 수화물의 미세조직 사진이다. 이것은 Zr-2.5Nb 합금의 표준 미세조직과 형태상으로 유사한 조직을 나타낸다. 광학현미경으로 관찰되어진 조대한 수화물들은 Axial-section 에서 길게 늘어진 α-Zr 에 평행한 방향으로 정렬되어 있다는 사실로부터, 초기 압력관의 미세조직이 수화물의 석출과 분포에 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있다. 또한 원주 방향면에서도 수화물이 원주방향을 따라 분포된 것을 관찰하였다.



(a) Zr-2.5Nb **압력관의 표준조직**



(b) Axial Section (c) Circumferential Section

Fig. 2 Typical Microstructure of Zr-2.5Nb Pressure Tube

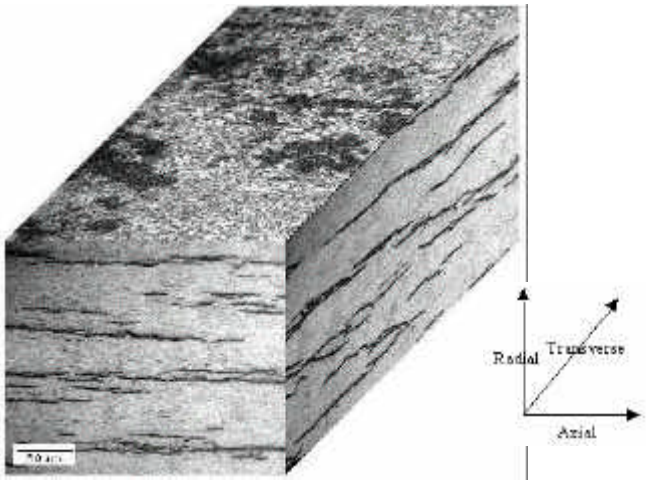


Fig. 3 Typical Microstructure of Circumferential Hydride on Zr-2.5Nb Pressure Tube

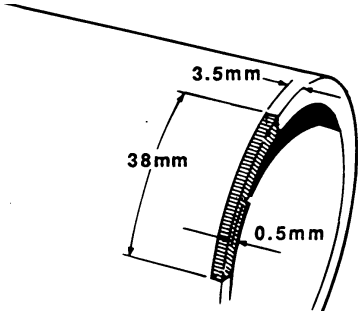


Fig. 4. Schematic Illustration of Cantilever Beam (CB)

Fig. 4 는 CANDU 압력관으로부터 소형 CB(Cantilever Beam) 시험편을 채취하는 방향과 위치 그리고 시험편의 치수를 보여주고 있다. 캔두 압력관의 내직경은 103 mm 이며, 두께는 4.2~4.4 mm 이다. CB 시험편은 너비 3.5 mm, 길이 38 mm 로써 균열진전 방향은 반경방향(radial)이며, 약 0.5 mm 노치 깊이에 노치 곡률은 각각 R=0.15, 0.125, 0.1 이 되도록 wire-cutting 작업을 하였다.

2.2 실험 장치 및 방법

2.2.1 실험 장치

사용된 실험장치는 Fig. 5 와 같은 CB 시험편의 균열성장을 탐지하기 위하여 음향방출(Acoustic Emission)장치를 부착한 DHC 시험기이며, 이때 PC 상의 제어 소프트 웨어는 실시간으로 균열진전 시 발생하는 음향의 수(count)가 일정 이상이 되면 하중을 줄여 원하는 K 값을 유지할 수 있도록 프로그램화 되어 있다. 하중은 0.5 ~ 1.0 mm/min 의 속도로 stepping motor 를 조절하여 주어진 K 값에 도달하도록 되어 있다. 하중제어는 로드셀로부터 측정된 하중을 목표치와 비교하여 하중의 크기가 작은 경우는 하중을 더 가하는 방향으로 작동하고 하중이 목표치의 허용한도에 들면 stepping motor 의 작동이 중지된다.

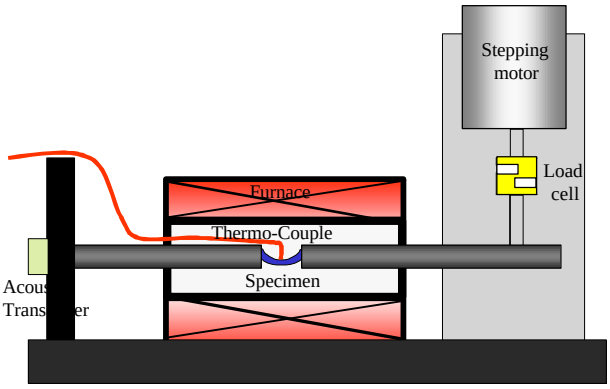
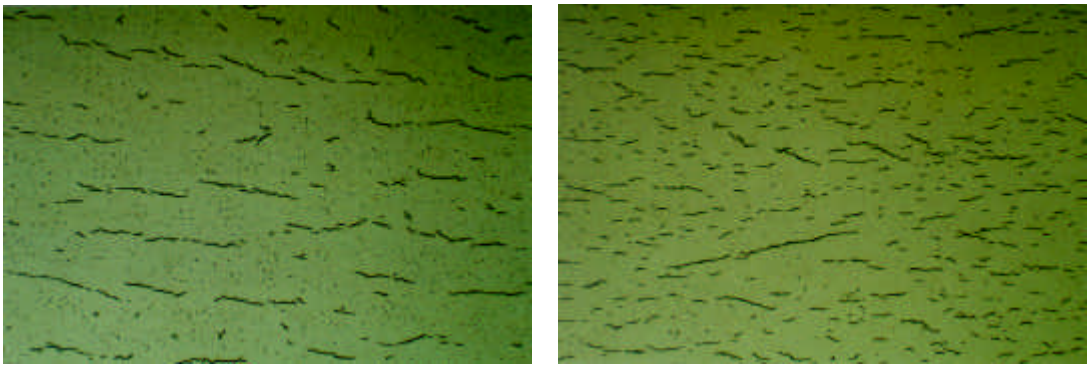


Fig. 5 DHC 실험 장치

2.2.2 수소 장입

인위적인 농도의 수화물을 석출 시키기 위하여 고온 음극 수소 장입 방법 (Cathodic Hydrogen Charging Method)을 이용하여 수소를 60 ppm 이 되게끔 장입하였다. 이 방법은 전기화학적 방법으로, 시편 표면에 수화물 층을 형성시키고자 KAERI 의 표준 수소 장입 절차서에 [14] 의해 시편은 음극에 설치하고 음극의 2 배 면적을 갖는 양극(납)을 65±5°C 로 일정하게 유지되는 0.1~0.2 molar 의 황산용액(전해액)에 담근 후, 150 mA/cm^2 의 전류밀도를 23 시간 가해, 이론치보다 50% 두껍게 시편표면에 수화물 층이 형성되도록 하였다.

시편표면에 형성된 수화물 층으로부터 수소를 내부로 확산시키기 위해 관상의 진공로를 사용하여 균질화 처리를 수행하였다. 균질화 시간과 온도는 확산방정식을 이용하여 60 ppm 을 얻기 위해 302°C 에서 30 시간동안 열처리하였다. 균질화 처리 후 냉각은 수소화물의 분포도가 DHC 에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 냉각 속도를 변화시켜 노냉(furnacae cooling)과 급냉(water quenching)을 행하여 Fig. 6 과 같은 수소화물을 만들었다. 노냉의 경우에는 길이 방향으로 길게 성장한 수소화물이 잘 관찰된 반면에 급냉의 경우는 노냉에 비해 길이 방향의 수소화물의 성장이 억제되어 보다 짧은 길이의 수소화물이 많이 생성된 것을 알 수 있다. 균질화 열처리 후 Hot Vacuum Extraction 장치를 사용하여 장입된 수소량을 분석하였다.



(a) Furnace Cooling(Slow) (b)Water Quenching(Fast)

Fig. 6 Morphology Comparison of 60 ppm Hydride Depending on Cooling Speed

2.2.3 CB 시험편의 피로예비균열

CB 시험편의 형상은 single edge center bending 시험편과 흡사하나 곡면을 띄고 있으므로 일반적인 방법으로는 시편의 고정이 용이하지 않으므로 CB 시험편을 위해 고안된 그립을 사용하여 4 point bending method 에 의해 피로 균열을 만들 수 있었다. 피로균열선단의 조건은 실험값에 큰 영향을 주게 되므로 양질의 피로균열을 형성하기 위해 ASTM 이나 BS 에 규정한 표준방법에 의해 노치부를 가공해야 한다[15, 16]. 노치 끝의 곡율 반경(Root Radius)이 크면 피로균열을 형성할 때에 많은 횟수의 피로하중을 가하여야 하므로 뿌리 반경은 가능한 작게 만들어야 한다. 또 노치에 의한 잔류응력의 영향 등을 제거하기 위해 피로균열은 노

치끝을 지나 최소한 1.3 mm 진전되어야 한다고 규정하고 있다. 하지만 이런 조건들은 본 실험의 CB 시편 형상이 작고 Zr-2.5Nb 가 방향성이 있는 재료라는 제약조건 때문에 CB 시험편에 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 실험에서는 가급적 작은 노치 곡율 반경 하에서 약 0.5 mm 직선의 피로균열을 인위적으로 만들었다.

2.2.4 DHC 실험 및 계산

Fig. 5 와 같이 CB 시험편을 노내에 있는 외팔보에 설치하고, 실험온도를 측정하기 위해 열전대를 시편 중앙의 노치 위에 접촉시켰다. 초기의 K 값은 동일 조건하에서의 실험의 재현성을 얻기 위해 안정한 균열성장이 일어나는 구간인 12 ~25 $MPa\ddot{O}m$ 의 평균값보다 약간 높은 20 $MPa\ddot{O}m$ 를 선택하였다. 실험온도는 분당 0.5~5°C 로 soaking 온도까지 올렸고, soaking 온도는 실험온도보다 약 50 °C 높게 하여 1 시간 유지한 뒤 1~2 °C/min 의 냉각속도로 250 °C 의 DHC 실험온도에 도달하도록 하였다. 이때 soaking 온도는 재료 내에 석출되어 있는 수소화물이 분해되어 재료 내에 재고용 되도록 하는 열처리이며, 만약 DHC 실험 전에 soaking 열처리가 수행되지 않으면 균열진전속도의 재현성을 확보하기 어려울 수도 있다[17].

DHC 실험 중에 균열이 시작은 AE 신호가 최초로 발생한 때를 말하고 그 시간을 균열시작시간(crack initiation time)이라 한다. 그 균열시작시간까지 걸린 시간을 잠복기(incubation time)라 한다. 따라서 균열이 성장하는 시간은 전체 실험시간에서 잠복기를 뺀 나머지 시간이 된다.

실험이 끝난 후, 시험편을 파단시켜 stereoscpe 를 이용하여 파단면 사진을 촬영하였으며, 이때 파단면으로부터 Image analyzer 를 이용하여 균열길이(a)를 9-point average method 에 의하여 측정하였다. 이렇게 구한 균열길이는 DHCV 를 계산하는데 이용되었다. DHCV = $a/(t_f - t_i)$라는 관계로 부터 DHCV 는 쉽게 계산할 수 있었다. 여기서 t_f는 시험이 끝난 시간을 의미하며 t_i는 균열이 시작된 시간을 나타내고 있다.

3. 실험 결과 및 토의

먼저 노냉한 시험편을 가지고 250 °C 에서의 DHC 실험을 행하였다. 먼저 피로 예비균열을 갖는 CB 시험편과 노치 뿌리의 곡율을 변화시킨 R = 0.1, 0.125, 0.15 인 시험편을 가지고 실험을 행하여 그 DHCV 와 Incubation Time 등을 비교하였다. 그 후에 다시 시험편의 수소화물의 분포가 다른 급냉한 CB 시험편을 가지고 다시 그 결과를 비교 확인하였다.

3.1 노냉(FC)한 시험편

Fig. 7 은 노냉한 CB 시험편을 250 °C 에서 DHC 실험을 한 결과이다. 각 그림의 왼쪽 도표는 실험시에 얻은 시간에 따른 AE count 와 하중을 감소시킨 것을 보여주고, 오른쪽 사진은 균열진전길이를 알기 위해 실험이 끝난 후의 파단면을 관찰한 것이다. (a)는 피로 예비균열

이 있는 경우이며, (b)~(d)는 각각 노치 뿌리의 곡율이 0.1, 0.125, 0.15mm 인 경우를 보여주고 있다. Fig. 8 은 이로부터 계산하여 얻은 DHCV 를 비교한 것이다. 피로 예비균열의 경우에는 DHCV 가 약 2.463×10^{-8} m/sec 였으며, 노치 뿌리 곡율이 0.1, 0.125.의 경우에는 각각 2.398×10^{-8} m/sec, 2.449×10^{-8} m/sec 였으나, 곡율이 0.15 mm 인 경우에는 실험의 불확실성의 영향으로 인하여 각각 큰 차이가 나는 결과를 보였다. 그러나 Fig. 9 에서의 incubation time 을 비교하면 노치의 곡율이 증가함에 따라 incubation time 이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 위의 사실로부터 수소화물이 축방향으로 길게 성장한 노냉의 노치 곡율이 0.125 이하인 경우에는 DHCV 는 거의 비슷하고 재현성이 있었으나, K_{IH} 를 구하기 위한 실험의 경우에는 incubation time 이 실험 결과에 미치는 영향이 크므로 노치의 상태에 대한 검증이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

3.2 급냉(QW)한 시험편

앞의 노냉의 결과를 다시 확인하기 위하여 급냉한 CB 시험편을 이용하여 앞의 조건과 같은 DHC 실험을 행하였다. Fig. 10 의 왼쪽 도표는 실험 시에 얻은 시간에 따른 AE count 와 하중을 감소시킨 것을 보여주고, 오른쪽 사진은 균열진전길이를 알기 위해 실험이 끝난 후의 파단면을 관찰한 것이다. (a)는 피로 예비균열이 있는 경우이며, (b)~(d)는 각각 노치 뿌리의 곡율이 0.1, 0.125, 0.15mm 인 경우를 보여주고 있다. Fig. 11 은 이로부터 계산하여 얻은 DHCV 를 비교한 것이다. 피로 예비균열의 경우에는 DHCV 가 약 2.59×10^{-8} m/sec 였으며, 노치 뿌리 곡율이 0.1, 0.125., 0.15 의 경우에는 각각 2.57×10^{-8} m/sec, 2.15×10^{-8} m/sec, 2.33×10^{-8} m/sec 였다. 여기서 확인할 수 있는 것은 노치 곡율이 0.1 mm 이하인 경우에는 피로예비균열의 경우와 DHCV 의 결과에서 큰 차이를 나타내지 않는다는 점이다. 그러나 Fig. 12 에서의 incubation time 을 비교하면 노치의 곡율이 증가함에 따라 급냉에서도 incubation time 이 서서히 증가하는 경향을 보여주었다. 그러나 이런 경향은 노냉의 경우에 비하여 완만해진 것을 알 수 있다. 따라서 노냉보다 수화물의 길이가 짧아지고 분포가 늘어난 급냉의 경우에는 DHCV 를 구하는 실험을 위해서는 노치 곡율이 0.1 mm 이하이면 실험결과에 영향을 미치지는 않지만, 역시 K_{IH} 값을 구하는 실험을 위해서는 역시 노치 상태의 검증이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

3.3 토의

Fig. 13(a)은 피로예비균열과 노치 곡율이 0.1 mm 을 갖는 CB 시험편의 DHCV 결과를 노냉과 급냉한 재질에 대하여 비교한 것이다. 작은 양이기는 하지만, FC 보다는 QW 의 경우에 DHCV 가 약간 빠른 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 13(b)에서는 피로예비균열과 노치 곡율이 0.1 mm 인 시험편의 경우에는 노냉의 경우보다 급냉의 경우가 Incubation time 이 약간 느린 것을 알 수 있었다. 그러나 0.1 mm 보다 노치곡율이 증가할 수록 incubation time 은 급냉보다 노냉의 경우가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

이런 노치 크기에 따른 영향은 CB 시험편을 이용한 DHC 실험 시에 발생하였던 불확실성의 원인을 파악할 수 있는 근거로써, DHCV 실험을 위해서는 지금까지 알려져 있는 CB 시험

편의 노치 뿌리의 곡율은 최대한 0.1mm 로 제한하여야 하며, 만일 K_{IH} 실험 시에는 반드시 피로 예비균열을 만들거나, 자연 균열에 근사한 곡율 30 mm 로 제한하여야 한다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

60 ppm 으로 수소를 장입한 후에 냉각속도를 달리한 두 종의 CANDU Zr-2.5Nb 압력관 재료 CB 시험편의 DHC 실험을 250°C 에서 행한 후에 DHCV 와 Incubation time 을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) DHCV 를 구하기 위한 실험에서는 수화물의 상태가 다른 노냉(FC)이나 급냉(QW)의 조건과 관계없이 노치 뿌리의 곡율이 0.1 mm 이하라면 피로예비균열을 만들지 않더라도 그 DHCV 실험값은 유효하다.

(2) 냉각속도와 무관하게 노치 뿌리의 곡율이 감소함에 따라 incubation time 은 감소한다. 또한 곡율이 0.1 mm 일지라도 그때의 incubation time 은 피로예비균열일 때의 incubation time 과 비교하여 현격한 차이를 보이고 있다. 따라서 K_{IH} 값을 구하기 위한 실험에서는 반드시 피로예비균열을 가진 시험편을 사용하여야만 그 K_{IH} 실험값이 유효하다.

.(3) 피로예비균열과 노치 곡율이 0.1 mm 인 CB 시험편의 경우에는 노냉의 경우보다 급냉의 경우에 DHCV 가 약간 빠르고 incubation time 은 약간 느린 것을 알 수 있다. 그러나 노치 곡율이 0.1mm 보다 증가할 수록 incubation time 은 급냉보다 노냉의 경우가 급격히 커지는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구 개발 사업 중 중수로 압력관 재료 과제에서 수행되었습니다.

참고문헌

[1] IAEA, IAEA-TECDOC-684, IAEA, Vienna, 1993, pp.7-56.

[2] B.A. Cheadle et als, ASTM STP 939, ASTM, Philadelphia, 1987, pp.224-240.

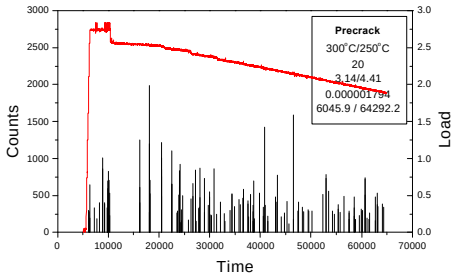
[3] A National Standard of Canada, CAN/CSA-N285.4-M94 (1994).

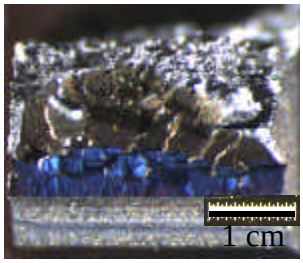
[4] 한국원자력안전기술원, "월성원자력 1 호기 정기 검사보고서 (1994 년도), 1994

[5] C. E. Coleman, B. A. Cheadle, C. D. Cann, and J. R. Theaker, Zirconium in the Nuclear Industry, Eleventh International Symposium, ASTM STP 1295, 1996, pp. 884-898.

[6] S. Sagat, C. E. Coleman, M. Griffiths, and B. J. S. Wilkins, Zirconium in the Nuclear Industry, Tenth

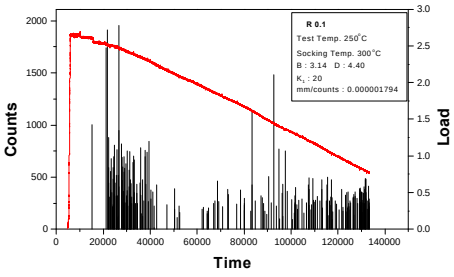
International Symposium, ASTM STP 1245, 1994, pp. 35-61.
[7] S. S. Kim, S. C. Kwon, and Y. S. Kim, J. Nucl. Mater. Vol. 273, 1999, pp.52-59.
4. C. E. Coleman, S. Sagat, and K. F. Amouzouvi, Control of Microstructure to Increase the Tolerance of Zirconium Alloys to Hydride Cracking, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-9524 (1987).
[8] C. E. Coleman, Zirconium in the Nuclear Industry, Fifth Conference, ASTM STP 754, 1982, pp. 393-411.
[9] H. Huang, and W. J. Mills, Metal. Transactions A 22A (1991), pp.2149-2060.
[10] W. J. Mills, and F. H. Huang, Eng. Frac. Mech. 39 (1991), pp. 241-257.
[11] S. S. Kim, K. N. Choo, S. B. Ahn, S. C. Kwon, Y. S. Kim, and I. L. Kook, Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Seoul, Korea, May, 1998, 93-98.
[12] S. S. Kim, K. N. Choo, K.S Lim, S. Y.M. Chung, and Y. S. Kim, "The effect of the anisotropy of texture on the DHC behavior in Zr-2.5%Nb pressure tube materials," Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Seoul, Korea, October 1999
[13] A.D. Lepage, W.G. Newell and R.A. Leblond, "Procedure for Delayed Hydride Cracking Tests," AECL AM-PROC-34
[14] KAERI, "Zr-2.5Nb **압력관의 특성시험 절차서**," KAERI/TR-1329/99
[15] ASTM E399-81: Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC}
[16] BS 5762 (1979), "Methods of test for crack opening displacement (COD) Testing," British Standards Institution, London
[17] G.K. Shek and D.B. Graham, "Effects of Loading and Thermal Maneuvers on Delayed Hydride Cracking in Zr-2.5Nb Alloys," ASTM STP 1023, 1989, pp. 89-110



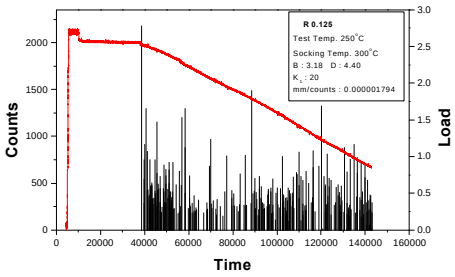


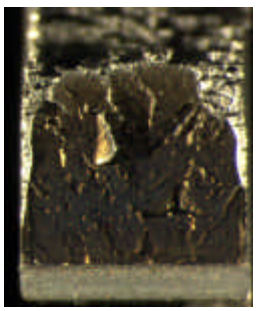
Crack L : 0.85 mm

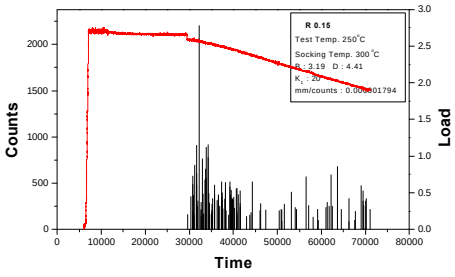
(a) Notch with Pre-Fatigue Crack

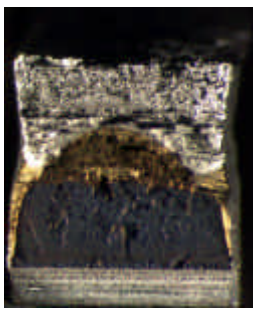


(b) Notch Root = 0.1 mm









(d) Notch Root = 0.15 mm

Fig. 7 AE Counts & Load History and Fracture Surface (FC)

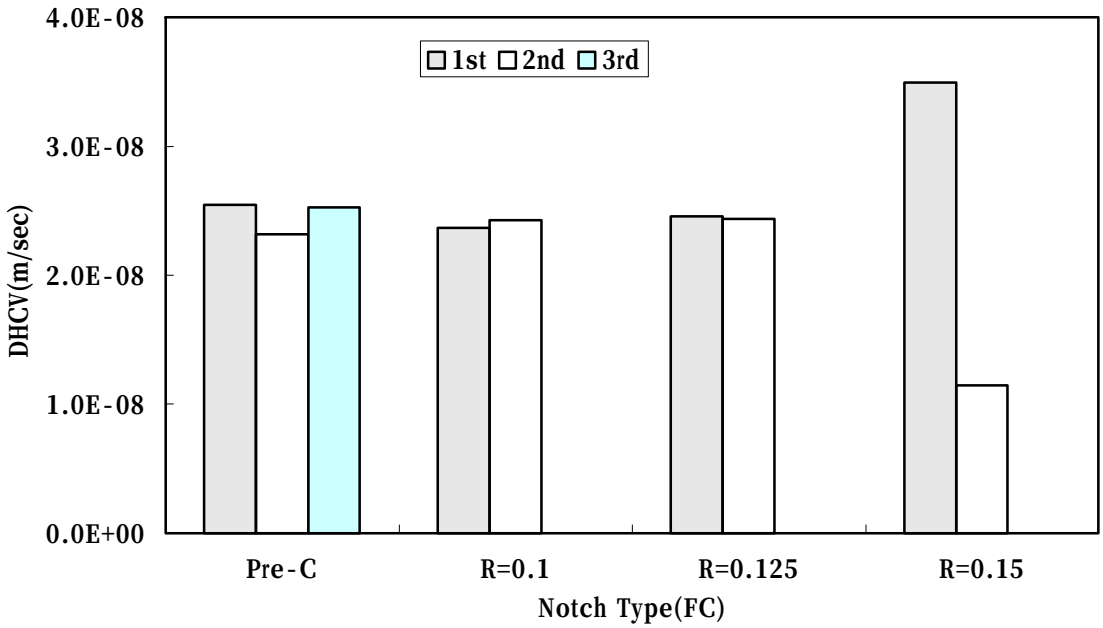


Fig. 8 Comparison of DHCV with the variation of Notch Root (FC)

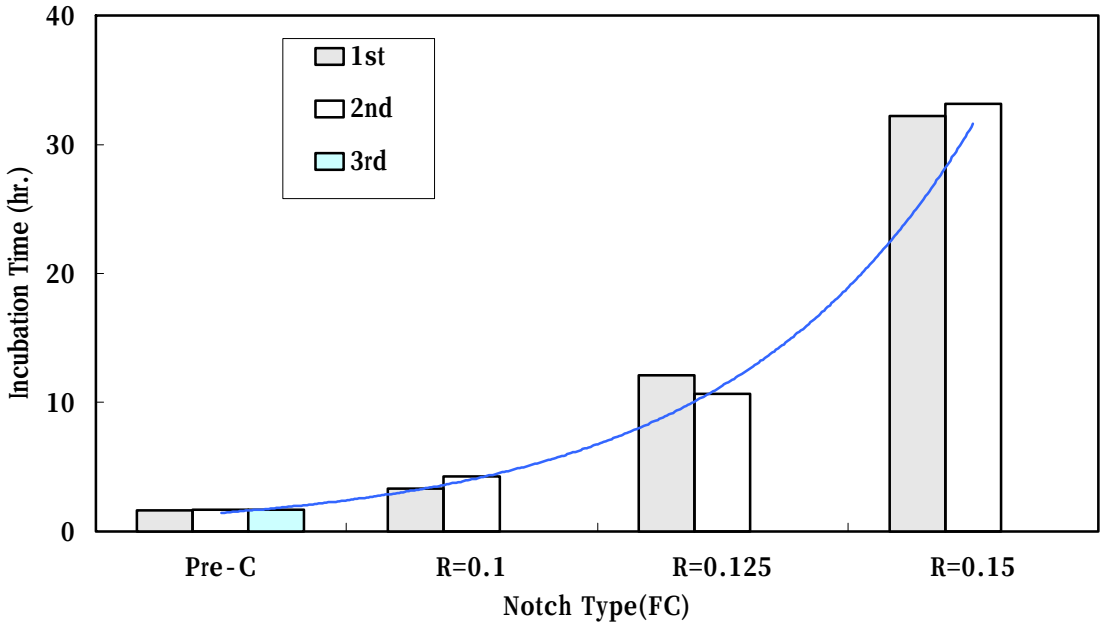
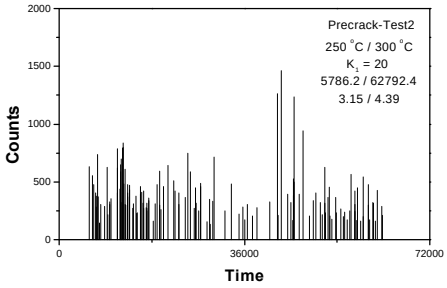
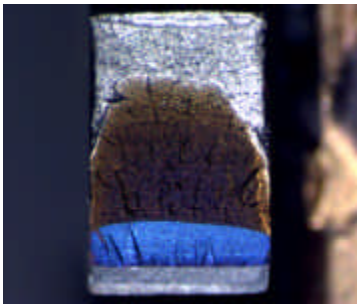
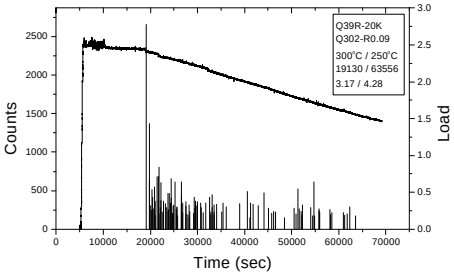


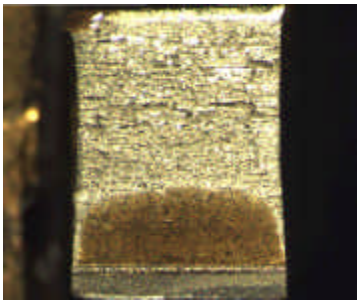
Fig. 9 Comparison of Incubation Time with the Variation of Notch Root (FC)



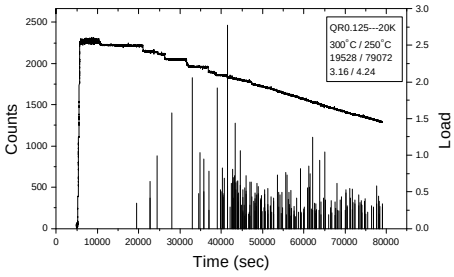


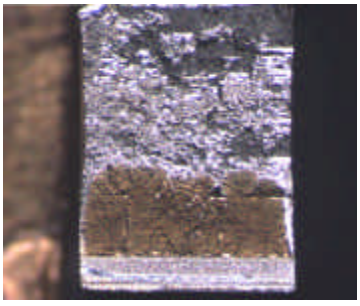
(a) Notch with Pre-Fatigue Cracking



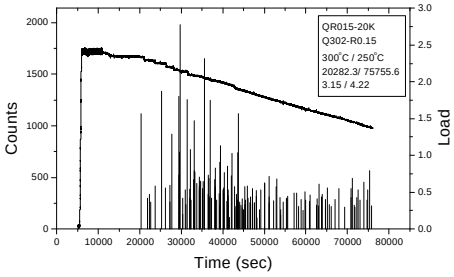


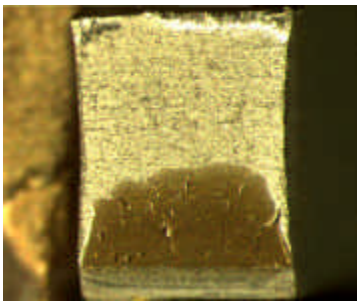
(b) Notch Root = 0.1 mm





(c) Notch Root = 0.125 mm





(d) Notch Root = 0.15 mm

Fig. 10 AE Counts & Load History and Fracture Surface (QW)

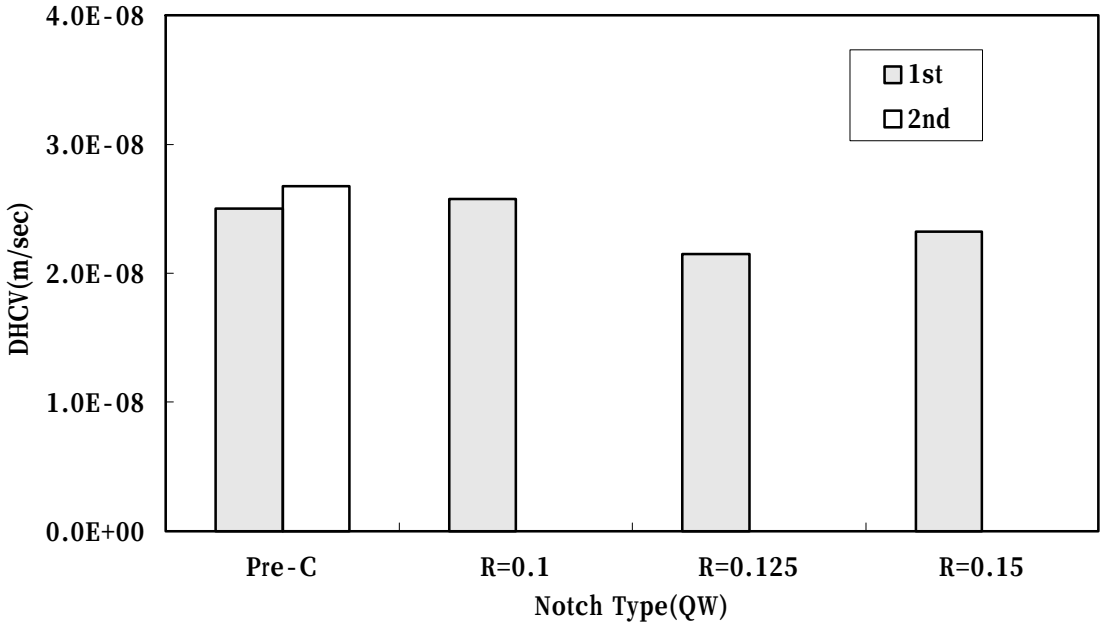


Fig. 11 Comparison of DHCV with the variation of Notch Root (QW)

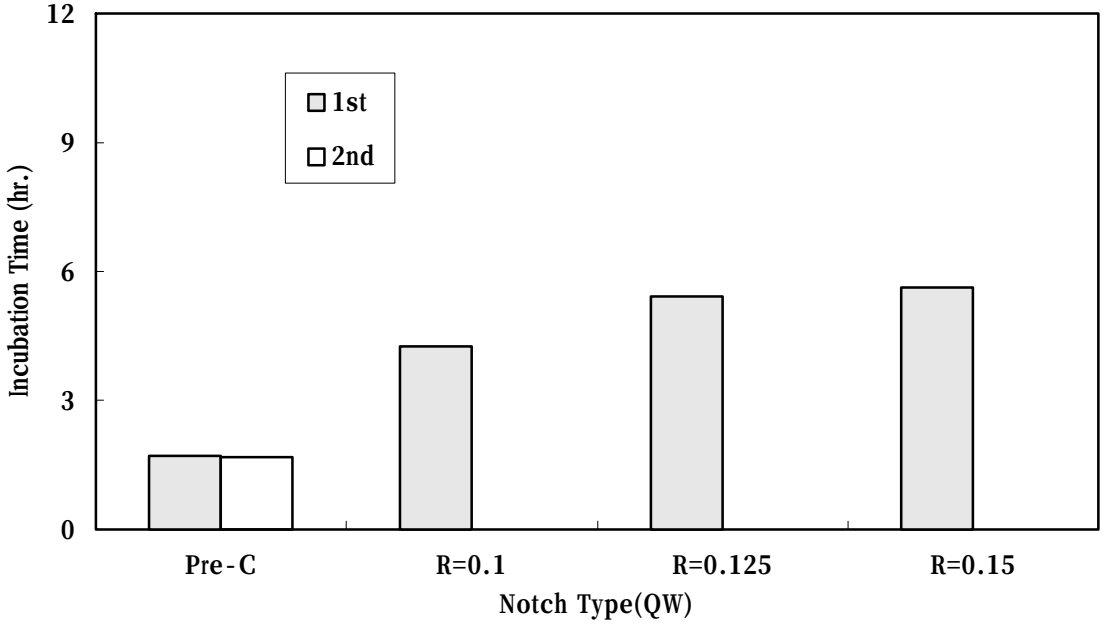
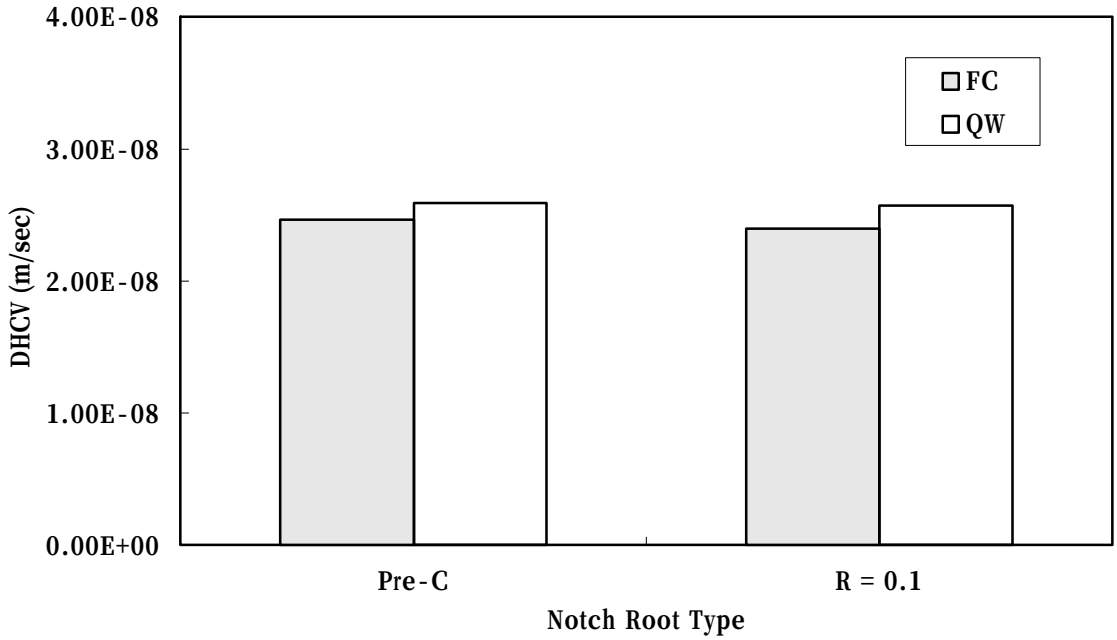
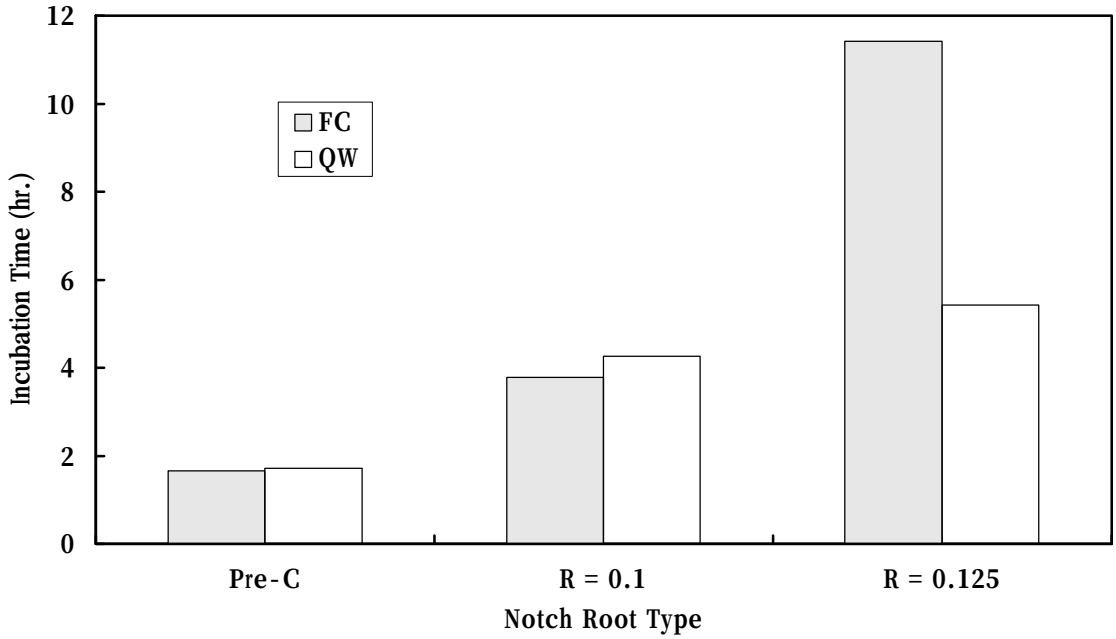


Fig. 12 Comparison of Incubation Time with the Variation of Notch Root (QW)



(a) Comparison of DHCV between FC and QW



(b) Comparison of Incubation Time between FC and QW

Fig. 13 Comparison DHCV and Incubation Time between FC and QW