'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Hydride Blister를 함유한 Zr-2.5Nb 압력관 재료의 Cantilever Beam 시험

Cantilever Beam Test of Zr-2.5Nb Pressure Tubes with Hydride Blisters

정용무, 공운식, 권상철, 김성수, 김영석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

CANDU 원자로 압력관과 calandria관이 접촉하는 경우 Zr-2.5Nb 압력관 내에 온도 경사가 수소의 재배치를 유발하며 hydride blister를 형성한다. 압력관에 hydride blister가 발생하면 부피 팽창에 의하여 blister-matrix 경계 영역에서 심한 응력 구배를 유발하며 지연수소균열 (DHC)로 발전할 가능성이 있다. Pickering 2호기에서 Hydride blister에 의한 압력관 파열 사고 이후 많은 연구가 이루어졌는 데 수치해석 및 인장 시험 결과 등에서 blister-matrix 경계부 주위에서 매우 큰 압축 응력의 존재로 인하여 지연수소균열로 발전할 가능성이 낮다고 보고된 바 있다. 본 연구에서는 실험실에서 열확산으로 blister를 함유한 시편을 제작한 뒤 DHC 시험 방법의 하나인 cantilever beam 시험을 통하여 blister의 파괴 거동 및 DHC 유발에 대해서 조사하였다. 실험 결과 blister 영역에서 취성 파괴 거동을 보였고 zirconium matrix 영역은 전형적인 DHC 파괴 양상을 보였다. 응력 구배가 심하다고 예측되는 blister-matrix 경계부에서는 밀집된 circumferential hydride의 취성 파괴 양상을 보였다.

Abstract

The hydride blisters can be formed by the temperature gradient in the Zr-2.5Nb pressure tube if the pressure tubes contact to the calandria tubes. A volume expansion due to hydride blister causes steep stress gradient in the region of blister-matrix interface, possibly develops to delayed hydride cracking (DHC). After the rupture of pressure tubes due to hydride blisters in Pickering unit 2, many investigations concluded that the probability of blister to DHC may be low because the numerical analysis shows high compressive stresses are developed in the region of blister-matrix interface. This paper investigated fracture behavior of blister and possibility of DHC through cantilever beam test of blistered specimen produced by thermal diffusion processes in laboratory. The fractured surface after cantilever beam test shows a brittle fracture in the region of blister, typical DHC behavior in the region of Zr-2.5Nb matrix, and brittle fracture of crowded circumferential hydrides in the region of blister-matrix interface, where a steep stress gradient is expected.

1. 서론

1983년에 Pickering 2 호기 원자로에서 압력관 파열 사고가 발생하였는 데 이 사고의 원인은 압력관과 calandria관 사이의 간격을 유지하는 garter spring이 이동함에 따라 압력관과 calandria관이 접촉하게 되었으며 이로 인하여 압력관 내에 온도 경사가 발생하고 수소와 중수소가 냉점 부근으로 확산하여 hydride blister를 형성하였다. 이 가운데 어떤 hydride blister는 지연수소균열 (delayed hydride cracking,; DHC)로 발전하였으며 균열이 임계 크기로 커지는 순간 급작스럽게 전진하여 축방향으로 약 2 m 길이가 파열되었다 [1].

중수로 압력관이 calandria관과 접촉할 경우 접촉 부위에서 발생하는 온도 구배로 인하여 접촉 지역으로 수소가 확산하여 hydride가 집중되는 데 이 때 hydride의 부피 팽창에 의하여 부풀어오르는 현상을 hydride blister라고 한다. 이러한 hydride blister는 fcc 구조의 δ-상으로써 표면에서의 최대 수소농도는 약 16,000 ppm에 이르며 부피가 약 14 ~ 17% 팽창하여 압력관 외면이 부풀어오르게 되는 데 심한 경우에는 균열이 발생하기도 해서 압력관의 건전성에 영향을 끼치는 중요한 인자의 하나이다. Hydride blister의 기본적인 메카니즘은 수소가 hcp 구조 α-상에서 열확산하여 저온부에서 국부적인 용해도 한계를 넘어서면 hydride가 석출되는 현상으로써 ZrH_x 계에서 1) x = 1.0 ~ 1.59 구간에서는 기본적으로 fct (face-centered tetragonal) 격자 구조에서 Zr 원자 격자 내에 8개의 tetrahedral interstitial site 중에 수소 원자가 매 2번째 (110)면 자리에 들어가서 4 자리를 채우는 구조인 metastable한 γ-hydride, 2) x = 1.67 ~ 2.0 구간에서는 fcc (face-centered cubic) 격자 구조에서 tetrahedral interstitial site에 불규칙적으로 수소가 들어가서 non-stoichiometric dyhydride 상태로 존재하는 δ-hydride, 3) x = 2 인 경우에는 fct 격자 구조에서 수소가 8개의 tetrahedral interstitial site를 전부 채우는 구조인 ε-hydride가 존재한다고 알려져 있다 [2]. 이 분야에서 대한 다양한 실험과 이론적 모델이 발표된 바 있으며 [3-6] 과거 중수로 운전 온도 구간에서 δ-상만의 단독 존재 [7] 또는 255 °C에서의 γ-상의 peritectoid 변태 여부 [8], γ-상의 stable 또는 metastable 여부 등에 관해서는 아직도 논란의 여지가 있다. 그러나 일반적으로 γ-상은 peritectoid 변태가 아니라 martensitic shear 변태에 의해서 생성되는 metastable한 상으로 알려져 있다 [9].

Pickering 사고 이후 Zr-2.5Nb 압력관에서의 blister 형성에 관한 다양한 이론적 연구 및 실험이 수행되어 왔다. 실험적 연구로 다양한 조건 및 주변 hydride 분포에 대해서 blister를 형성에 관한 다양한 보고가 있었는 데 Puls[10]는 Zr-2.5Nb 시편에 Cu 봉을 접촉시켜서 냉점을 재현하여 제작한 blister 시편에 대해서 원주 방향으로 인장 응력을 가하여 (DHC 실험 조건) 파단되지 않은 시편 blister 주변에서 압력관 원주 방향에 수직한 radial hydride가 존재하는 것을 관찰하였다. Leger et al.[11]은 압축 공기 제트를 소형 시편에 불어넣어서 냉점을 형성하고 blister 시편을 제작하여 blister 주변에서 압력관의 반경 방향에 수직한 circumferential hydride만을 관찰하였다. Domizzi et al. [12] 및 정용무 et al. [13]은 물로 냉각되는 냉점을 시편에 접촉하여 blister를 제작하였는 데 radial hydride는 보이지 않았으며 일부 시편의 blister 표면에서 crack이 관찰된 바 있다.

Zr-2.5Nb 압력관의 DHC 현상에 대한 수많은 연구가 수행된 바 있는 데 대개의 경우 circumferential hydride를 함유한 압력관 시편에 대해서 fatigue pre-crack을 형성하고 DHC 현상을 실험한 것이 대부분이며 DHC 유발 원인의 하나로 예측되는 hydride blister를 연계하여 Zr-2.5Nb 압력관의 파괴 거동 및 DHC 응력 집중 인자에 대한 연구는 별로 없다. 실제 압력관에서 주된 응력은 hoop(circumferential) stress이며 이는 cantilever beam 시험을 통하여 모사할 수 있다. Hydride blister와 관련하여 실제 중수로 압력관의 운전에서는 단지 재료 내에서 hydride의 재배치 현상이 발생되지 않도록 위해서 circumferential stress가 ~ 190 Mpa를 넘지 않도록 하고 있다 [14]. Zr-2.5Nb

압력관에 hydride blister가 형성될 경우 부피 팽창으로 인하여 hydride blister와 zirconium matrix 양쪽에 응력이 발생하는데 [15-17], 이 응력을 예측하기 위한 수치 해석 결과, blister-matrix 경계면 부근에서 급격한 응력 구배가 발생하며 blister 쪽에는 반경 방향 및 원주 방향 모두 매우 큰 압축 잔류 응력이, matrix 쪽은 인장 잔류 응력이 존재한다고 예측하였고 [18], 따라서 원자로 운전 시에 가해지는 응력이 radial hydride가 석출하기 위한 임계 응력을 넘지는 못한다고 주장하였다.

본 연구에서는 이러한 모델 예측에 감안하여 실제로 hydride blister DHC로 발전할 수 있는 지 여부를 알아보고자 한다. 실제 중수로 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금에 전해법으로 수소 장입, 균질화 처리를 거친 후 내면과 외면에 온도 경사를 조성하여 냉점 부근에서 hydride blister를 형성하였다. 실제 원자로 운전 조건보다 가속 실험을 하기 위해서 압력관 내면을 415 °C의 항온 알루미늄 block으로 접촉하고 외면에는 15 °C의 흐르는 물로 냉각되는 알루미늄 냉점으로 접촉하여 hydride blister를 생성시켰다. 이렇게 hydride blister를 함유한 압력관 시편에 대해서 cantilever beam 시험을 통하여 hydride blister로부터 DHC가 발생하였음을 확인할 수 있었으며 파면 분석을 통하여 hydride blister의 파괴 거동 및 매질인 α-Zr의 DHC 파괴 현상을 논의하였다.

2. 실험 방법

2.1. 수소 장입 및 hydirde blister 생성

중수로에서 실제 사용되는 Zr-2.5%Nb 압력관(직경 112 mm, 두께 4.25 mm)을 가지고 hydride blister를 형성시켰다. 시편은 약 30 - 35 mm의 장방형 형태를 사용하였으며 압력관 특성시험 절차서 KAERI-ZR-100-1에 의거하여 수소 장입을 하였다 [19]. 사용된 황산 전해액의 농도는 0.2 M, 전해액 온도 65±5 °C, 전류 밀도 2 kA/m^2 이었으며 양극으로는 두께 3 mm의 Pb 판을 사용하였다. 목표 수소 농도를 얻기 위해 필요한 최소 수화물층 두께를 계산하여 이에 따른 소요 시간을 계산하였다. 자세한 실험 내용은 압력관 특성시험절차서, KAERI-ZR-001-1 지르코늄합금의 수소장입 절차서를 따른다. 전해 수소 장입을 위한 시편은 표면을 grind한 후 초음파 세척하여 이물질을 제거하였으며 전해액의 증발을 방지하기 위하여 상부에 냉각수를 흘렸다.

전해 수소 장입에 의해 시편 표면에 부착된 hydride를 균질화하기 위하여 유리로 진공 밀봉한 후 annealing하여 균질화 처리하였다. Annealing 온도는 최종 목표 수소 농도를 고려하여 한계고용도 방정식에 따라 결정하며 균질화에 소요되는 시간은 시간에 따른 농도 profile에 기초한 확산 거리 공식을 적용하여 두께 $2L$ 인 시편에 hydride가 양면에 덮인 경우 중앙에서의 농도가 표면의 97% 가 되도록 목표로 할 조건으로 균질화 시간을 계산하였다 [20],[21]. 본 연구에서 최종적으로 얻은 수소 농도는 33 ppm 및 144 ppm 이었다.

시편 외면에 blister를 형성하기 위하여 Fig. 1과 같은 장치를 통하여 steady thermal field가 시편에 가해졌다. 415±2 °C로 유지되는 항온 알루미늄 블록 위에 시편을 놓고 시편-블록간에 열접촉을 균일화하기 위하여 직경 0.05 m Al_2O_3 분말을 도포하였다. 시편의 상부 중앙은 평평하도록 연마하고 수냉 알루미늄 finger를 사용하여 냉점을 구성하였다. 냉각수의 온도는 14 - 16 °C였으며 알루미늄 finger는 길이 10 mm, 직경 1.0 mm의 원형이었다. 냉점에서 blister를 형성하기 위한 열확산 시간은 6×10^5 sec (6.9일)이었고 별도의 온도 분포 측정은 실시하지 않았으며 유한요소법으로 본 실험 조건에서의 온도 분포를 분석한 결과 냉점과 접하는 위치에서 172.9 C, 전기로와 시편 접촉면에서 368.9 C로 나타났으며 [13] 이 결과는 다른 연구 결과 [12]와도 유사하다.

2.2. Cantilever Beam Test를 적용한 DHC 시험

Blister가 형성된 시편 중에 현미경으로 관찰하여 시편 표면에 crack이 발생하지 않은 시편만을 선택하여 cantilever beam 시험용 시편으로 가공하였다 시편의 길이는 38.8 mm, 폭은 3.2 mm, 두께는 4.2 mm로 가공하였으며 기본적인 cantilever beam 시편은 내면 중앙에 0.3 mm 깊이의 notch를 가공하여 DHC crack을 발생시키는 데 반해 본 시편에는 압력관 외면에 생성된 blister를 DHC의 원인으로 간주하여 Fig. 2.와 같이 종래의 DHC 시험 시편 grip을 상하를 뒤바꾸는 형식으로 개조하여 cantilever Beam 시험을 실시하였다 [19]. 시편에 가해지는 하중은 시편의 너비와 두께를 측정하여 이론 하중을 계산하였다. Hydride blister를 함유한 압력관에 대한 인장 시험에서 보고된 DHC 유발 응력집중계수, K_{IB} = 10.7 ~ 15.7 $MPa\sqrt{m}$ 및 순수 hydride의 응력집중계수, $K_{IH} \simeq 6\ MPa\sqrt{m}$을 참조하여 [10] 가상적인 결함 깊이 0.5 mm를 가정하여 초기 K_I 값을 20 $MPa\sqrt{m}$가 되도록 설정하였다. 이렇게 산정한 기준은 앞서 보고된 논문에서 [13] 생성된 blister의 깊이는 300 - 700 μm 정도로 측정된 결과를 기초로 한 것이다. AE 센서에서 crack 진전 신호가 감지되면 하중을 5% 감소시키도록 stepping motor를 사용하여 하중을 제어하였다. 수소의 solubility를 높이기 위하여 0.5 - 5 °C/min 로 soaking 온도(300 °C)까지 가열하여 1 시간 유지한 뒤 1 ~ 2 °C/min의 냉각 속도로 실험 온도인 250 °C에 도달하도록 하였다. Soaking 온도는 이미 석출되어 있는 hydride가 분해되어 재료 내에 재고용되도록 하는 열처리이므로 DHC 시험 전에 soaking 처리를 실시하지 않으면 DHC 시험의 재연성을 확보하기 어렵다 [22]. DHC 시험은 마지막 AE 신호가 나타난 후 24 시간동안 다른 신호가 나타나지 않으면 시험이 정지하도록 하였다. 실험 종료 후 시편의 외면 및 옆면을 입체 광학현미경으로 관찰하였으며 시편 파괴 후 파면을 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. Hydride blister의 파괴 거동

Fig. 3에 hydride blister 시편에 표면 및 측면에 발생한 crack을 보였다. blister 형성 전에 균질화 상태에서 시편 내에 수소 농도는 144 ppm 이었으며 300 °C에서 1 시간 soaking 처리하고 250 °C 에서 K_I = 16$MPa\sqrt{m}$을 가한 경우이다. blister 중심을 가로지르는 crack이 보이며 측면 사진에서 불연속적인 crack이 관찰된다. 한편 Fig. 4에서 시편 외면에 존재하는 blister가 파괴되면서 두 조각으로 나뉘어진 것을 관찰할 수 있으며 Fig. 5에서 파단면의 SEM 사진을 보면 blister 영역에서 전형적인 취성 파괴가 발생하였음을 확인할 수 있다.

3.2. Hydride blister의 DHC 유발

Fig. 6 및 Fig. 7을 관찰하면 초기에 brittle fracture 거동을 보이는 blister crack이 전진하면서 전형적인 DHC 균열로 발전함을 알 수 있다. 파면을 크게 구분하여 대략 3 영역으로 구분할 수 있는 데 첫번째 영역은 blister의 취성 파괴 영역이며 두 번째 영역은 주로 전형적인 DHC 에 의한 파괴가 발생한 영역이고, 세 번째 영역은 DHC 시험이 종료된 후 파면 관찰을 위해 overloading에 의한 ductile fracture와 연관된다. 특히 Fig. 6에서 matrix 영역을 보면 전형적인 DHC 패턴을 의미하는 수많은 주름살 모양의 striation 패턴을 볼 수 있다.

3.3. Blister-matrix 계면에서의 파괴 거동

Hydride blister 내부의 파단면, blister-matrix 계면에서의 파단면 및 zirconium matrix의 파단면을 각각 Fig. 8(a) - (c)에 보였다. Fig. 8(a)를 관찰하면 blister 내부에서는 취성 파괴가 발생하였음을 알 수 있으며 Fig. 8(c)에서 zirconium matrix는 DHC 기구에 따라서 파괴가 일어나서 취성 파괴가 발생하였음을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서 보인 바와 같이 blister-matrix 계면에서의 파괴는 blister가 생성될 때에 hydride의 morphology 형상, 즉 circumferential hydride들이 밀집한 상태에서 hydride 파괴가 발생한 것을 알 수 있다. 즉 이 영역에서는 circumferential hydride가 워낙 밀집한 상태이기 때문에 특별히 radial hydride로의 재배치 현상이 일어나기 전에 circumferential hydride의 파괴가 일어난 것으로 판단된다.

이것은 과거에 blister-matrix 계면에서 큰 압축 잔류 응력이 존재하기 때문에 blister에 의한 DHC 유발 가능성이 낮다는 예측과는 상반되는 결과이다. 과거에 유한요소법을 이용하여 blister 주변에 대한 응력 해석 결과, blister-matrix 경계면 부근에서 급격한 응력 구배가 발생하는 데 blister 쪽에는 반경 방향 및 원주 방향으로의 응력은 최대 -700 MPa의 매우 큰 압축 잔류 응력이 존재하고 matrix 쪽은 반경 방향 및 원주 방향 모두 약 300 MPa의 인장 잔류 응력이 존재한다고 예측하였다 [18]. 따라서 설령 열확산에 의한 blister 생성 시에 균열이 발생하였더라도 압축 잔류 응력이 균열의 전진을 방해하는 역할을 하기 때문에 blister-matrix 경계선을 넘어서 matrix 내에서 DHC로 발전하기는 어렵다고 예상하였다. hydride blister에 관한 다른 연구 결과에서도 crack이 zirconium matrix까지는 미치지 못하며 이는 무응력 상태는 물론이고 인장 응력을 가한 경우에도 blister 내부 또는 경계면 부근에서 인가된 인장 응력이 crack tip 부분에서의 압축응력을 넘지 못하였기 때문이라고 설명하였다. 즉 blister 또는 이와 동반하는 crack이 응력 집중 역할을 하지 못하기 때문에 DHC 균열로 발전하기 어렵다고 예측하였다.

그러나 본 연구 결과에서는 우선 cantilever beam 시험 시에 DHC를 유발하기 위해서 기본적으로 필요한 notch 또는 pre-crack이 없이 단순한 blister 만으로도 DHC 균열이 발생한다는 점을 확인하였다. 즉 초기에 crack이 없는 상태의 blister 자체만으로도 응력 집중 효과가 나타나며 특히 brittle한 blister 영역에서 crack이 발생하면 쉽게 blister-matrix 계면까지 전진하고 계면에 집중된 circumferential hydride의 파괴를 거쳐서 matrix 영역에서 DHC 파괴로 발전하는 현상을 관찰하였다. 이와 같이 본 연구 결과가 과거의 수치 해석 결과와 다른 이유로는 수치 해석 모델에서는 재료 내에 미세 조직의 차이를 고려하지 않았으며 특히 blister-matrix 계면 부근에서 밀집된 circumferential hydride는 다른 영역보다도 crack의 전진에 대한 저항성이 약할 것으로 판단되기 때문이다. 본 연구에서는 K_{IB} = 16 $MPa\sqrt{m}$에서 blister 파괴가 발생한 뒤에 DHC가 유발되었는 데 이는 보고된 hydride blister에서 DHC 유발 응력집중계수, K_{IB} = 10.7 ~ 15.7 $MPa\sqrt{m}$의 상한값에 준한다 [10].

한편 온도 차이에 의한 열확산 방식으로 발생한 blister를 250 °C 상태로 3 ~ 4일 동안 cantilever beam 시험을 실시하여도 blister는 소멸하지 않은 것으로 미루어 보아 일단 생성된 blister는 상당히 안정된 상으로 판단된다. 이를 실제 중수로 압력관에 연관지으면 일단 압력관/칼란드리아관의 접촉에 의해서 발생한 blister는 추후에 SLAR(spacer location and repositioning) 작업을 통하여 garter spring을 이동하여 접촉된 부위를 분리하더라도 쉽사리 없어지지 않는다고 유추할 수 있는 데 이러한 결론에 도달하기 위해서는 좀더 많은 실험 결과가 축적되어야 하겠으며 아직은 성급한 결론이라고 보여진다. 특히 본 논문에서는 blister 시편에서의 DHC 시험에 관한 초기 결과만을 보였으며 앞으로 다양한 실험을 통하여 blister에서 DHC가 발생하기 위한 응력집중계수 및 DHC 속도 등의 자

료를 많이 축적하여 중수로 압력관의 건전성 확보를 위한 기초 자료로 활용할 예정이다.

4. 결론

중수로 원전에서 사용되는 Zr-2.5Nb 압력관에 수소를 장입한 뒤 온도 경사를 유지하여 수소의 열확산에 의한 hydride blister를 생성하고 cantilever beam 시험을 통하여 DHC를 유발하였다. 어떠한 crack도 존재하지 않고 blister만으로 K_{IB} = 16 $MPa\sqrt{m}$에서 blister 파괴 및 DHC가 유발되었다. Blister 내부는 전형적인 취성 파괴 거동을 나타냈으며 blister-matrix 계면에서는 밀집된 circumferential hydride의 파괴를 관찰하였다. 또한 zirconium matrix는 전형적인 DHC 파괴 양상을 보였다. Blister-matrix 계면에 높은 압축 응력 때문에 blister가 파괴되거나 blister 내에 crack이 존재하더라도 matrix 내로 crack이 전지하기 어렵다는 종래의 예측과는 달리 blister에서 DHC가 유발되었다. 이것은 수치 해석 모델 예측에서는 재료의 미세 조직의 변화를 고려하지 않았으며 특히 blister-matrix 계면에서 밀집된 circumferential hydride가 crack 저항성을 약화시켰기 때문이라고 판단된다.

열확산 방식으로 발생한 blister를 250 °C 상태로 3 ~ 4일 동안 cantilever beam 시험을 실시하여도 blister는 소멸하지 않은 것으로 미루어 보아 일단 생성된 blister는 상당히 안정된 상으로 판단되며 앞으로 다양한 실험을 통하여 blister에서 DHC가 발생하기 위한 응력집중계수 및 DHC 속도 자료를 축적하여 중수로 압력관의 건전성 확보를 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업 중 중수로 압력관 재료 과제에서 수행되었습니다.

참고 문헌

1. G. J. Field, J. T. Dunn, B. A. Cheadle, Can. Metall. Q. 24(3) (1985) 181.
2. I. O. Bashkin, V. Yu. Malyshev, and M. M. Myshlyaev, Sov. Phys. Solid State, 34 (7), pp.182-1184(1992).
3. J. M. Markowitz, Trans Metall. Soc. AIME 221 (1961) 819.
4. A. Sawatzky, J. Nucle. Mater. 2 (1960) 321.
5. A. Sawatzky, E. Vogt, Trans. Metall. Soc. AIME 227 (1963) 917.
6. A. Sawatzky and B. Wilkins, J. Nucle. Mater. 22 (1967) 304.
7. M. Plus, Acta Metall. 29 (1981) 1961.
8. K. G. Barraclough, D. J. Beevers, J. Mater. Sci. 4 (1968) 518.
9. D. O. Northwood, and U. Koasih, INt. Metals Rev. 28 (2) (1983) 92.
10. M. P. Puls, Metall. Trans. A 19 (1988) 2247.
11. M. Leger, G. D. Moan, A. C. Wallace, N. J. Watson, ASTM STP 1023, Americal Society for Testing and Materials, 1989, 50.
12. G. Domizzi, R. A. Enrique, J. Ovejero-Garcia, G. C. Buscaglia, J. Nucl. Mater. 229 (1996) 36.
13. 정용무 공운식, 주기남, 김성수, 김영석, "Zr-2.5Nb 압력관 재료에서 Hydirde Blister의 균열 현상

“, 한국원자력학회, 1999추계 학술발표회 논문집 (1999.10.29-30, 서울대).
14. M. Leer, A. Donner, Can. Metall. Q. 24 (3) (1985) 235.
15. S. Q. Shi, M. P. Puls, J. Nucl. Mater. 208 (1994) 232.
16. B. W. Leitch, M. P. Puls, Metall. Trans. A 23A (1992) 797.
17. G. C. J. Carpenter, J. Nucl. Mater. 48 (1973) 264.
18. M. L. Vanderglas, Y. J. Kim, Int. J. Pres. Ves. Piping 22 (1986) 177.
19. 김영석 외, "Zr-2.5Nb 압력관 특성시험 절차서", 한국원자력연구소, KAERI/TR-1329/99, (1999.6).
20. J. J. Kearns, J. Nucl. Mater., 22(1967) 298.
21. J. J. Kearns, J. Nucl. Mater., 43 (1972), 336.
22. G. K. Shek and D. B. Graham, ASTM STP 1023 (1989) 89.

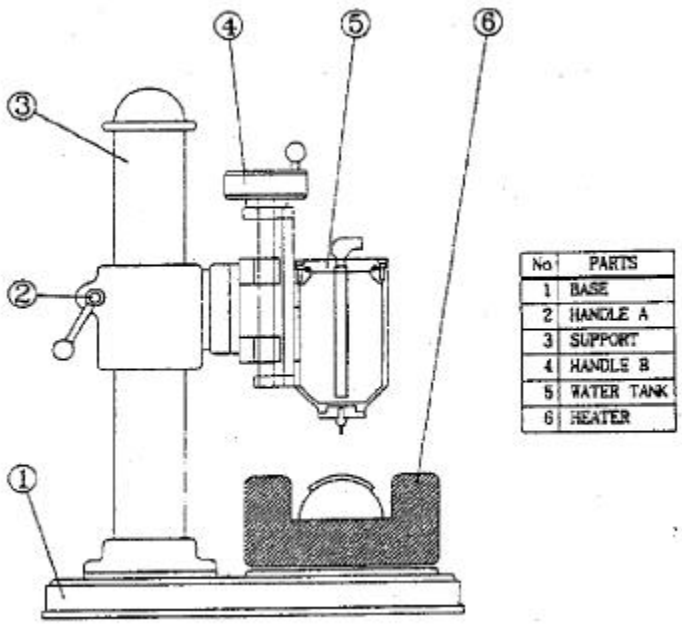


Fig. 1 Experimental device for blister formation and growth.

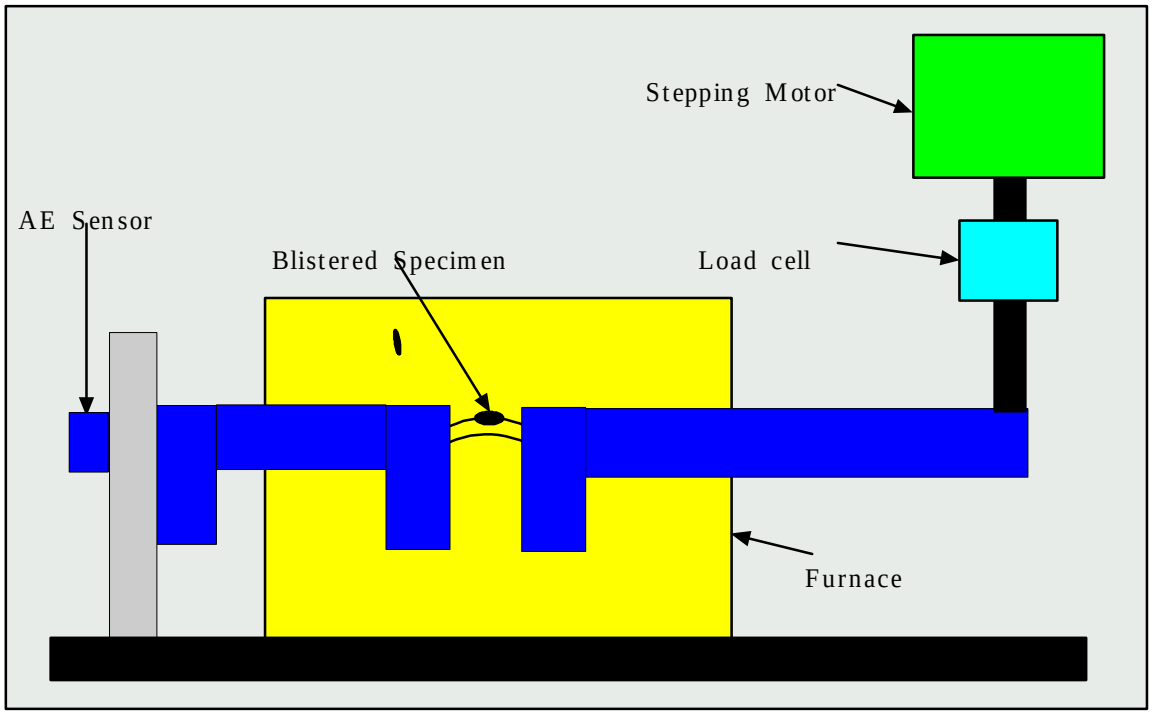
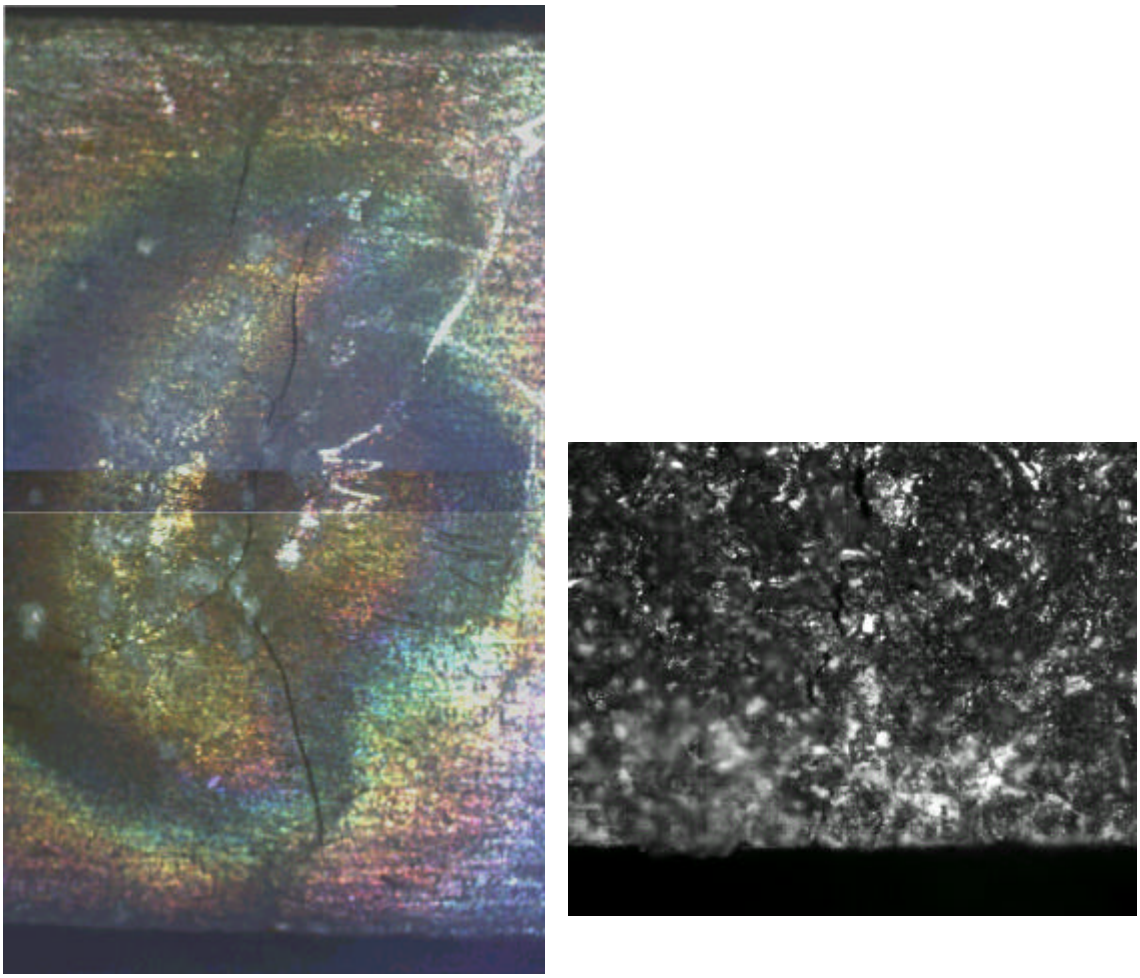


Fig. 2. Schematic diagram for cantilever beam test of hydride blistered specimen.



(a) Top view (X50) (b) Side view (X200)

Fig. 3. cracked hydride blister(K_I = 16 $MPa\sqrt{m}$, T =250 ° C, [H]=144 ppm).

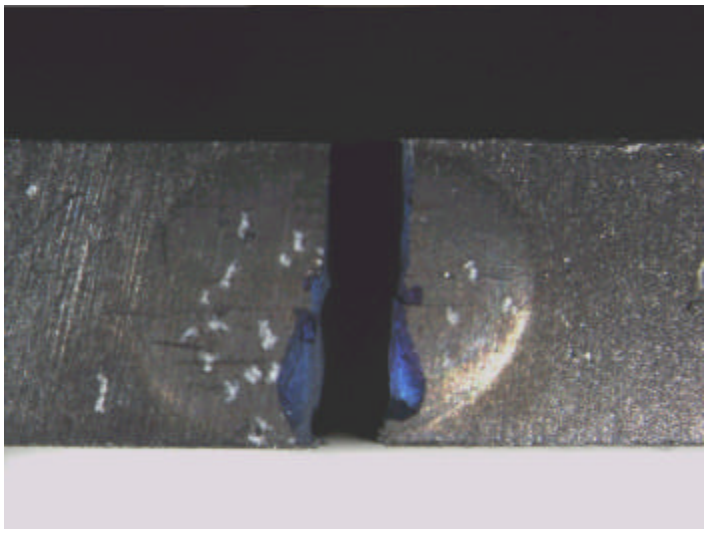


Fig. 4. Top surface of fractured hydride blister.

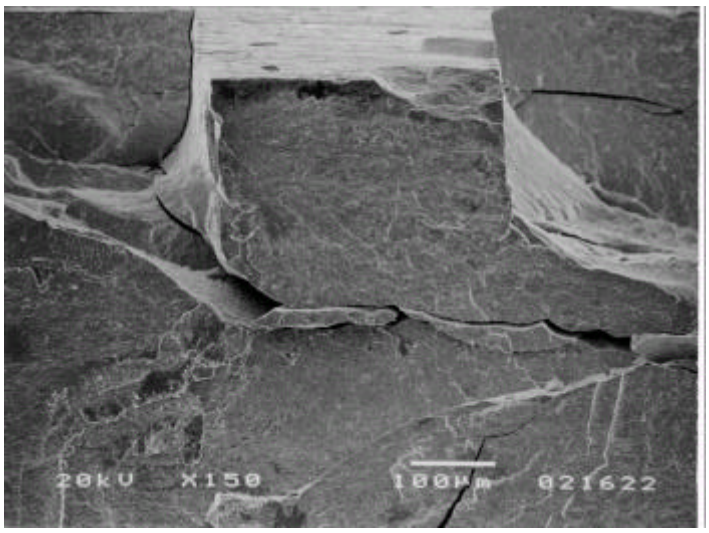


Fig. 5. SEM photpgraphy shows brittle fracture behavior of hydride blister.

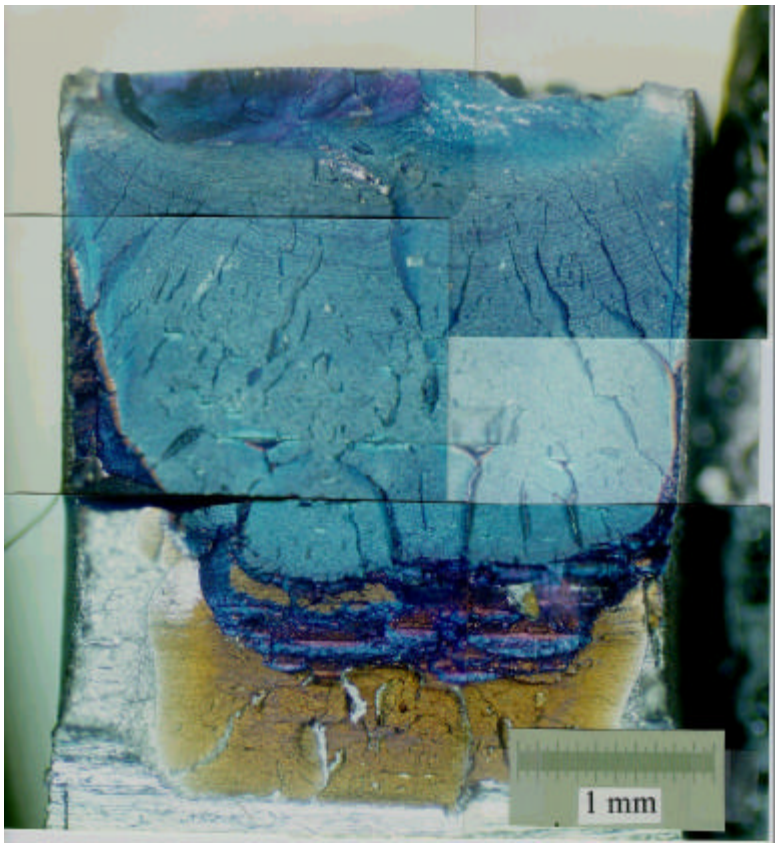


Fig. 6. Fracture surface of hydride blister shows a typical DHC pattern in the matrix region.

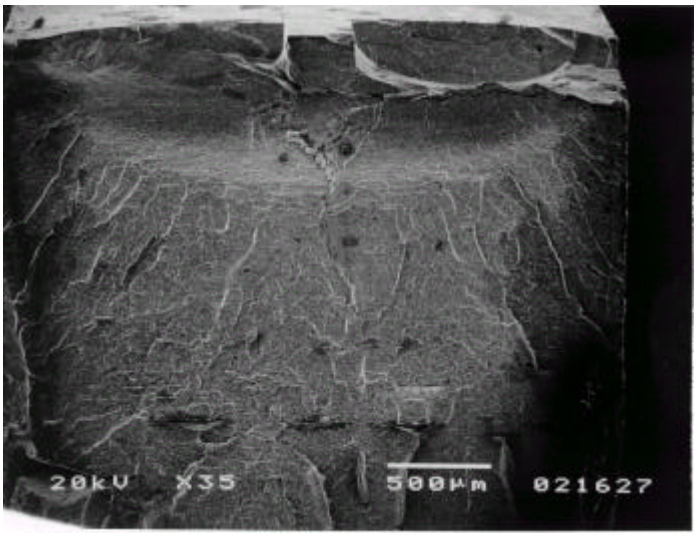


Fig. 7. SEM photpgraphy shows DHC fracture behavior initiated from hydride blister.

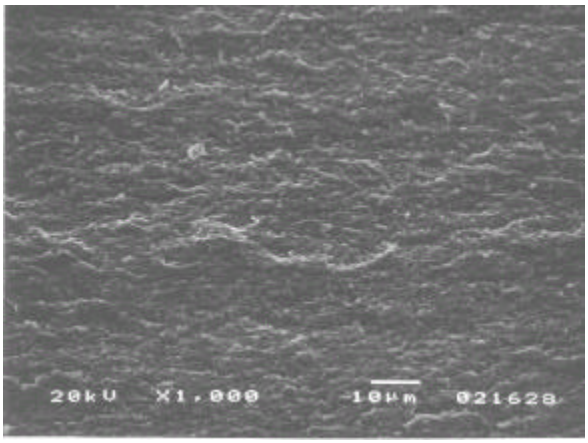


Fig. 8(a). SEM photography of blister region shows a brittle fracture behavior.

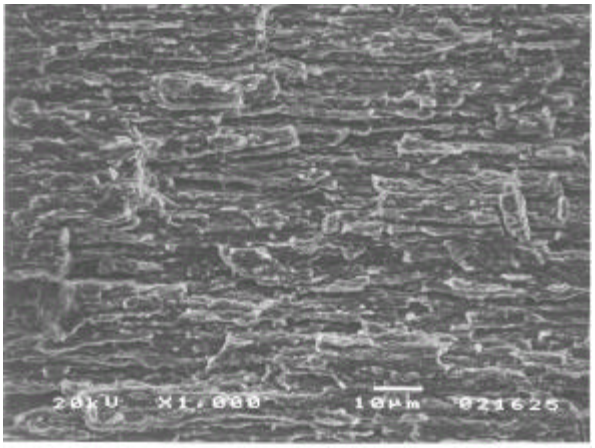


Fig. 8(b). SEM photography of interface region between hydride blister and matrix shows a fracture of circumferential hydrides.

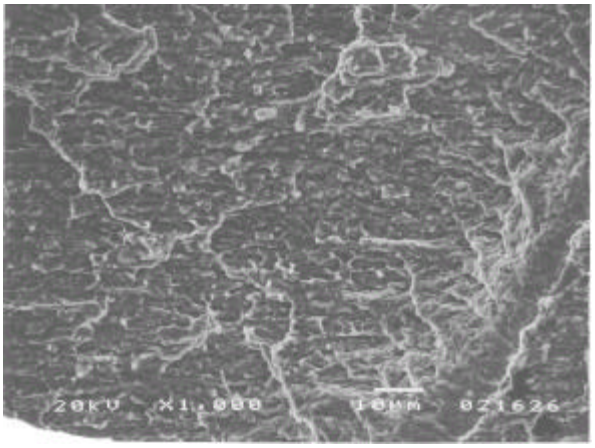


Fig. 8(c). SEM photography of matrix region shows typical DHC characteristics.