

## 초음파 모드 변환 및 속도비 방법에 의한 지르코늄 압력관의 수소화물 블리스터 탐지

### Detection of Hydride Blisters in Zirconium Pressure Tubes using Ultrasonic Mode Conversion and Velocity Ratio Method

정용무\*<sup>†</sup>, 이동훈\*, 김영석\*

Yong-Moo Cheong\*<sup>†</sup>, Dong-Hoon Lee\* and Young-Suk Kim\*

**초 록** 중수로 압력관이 주위를 둘러싸고 있는 칼란드리아관과 접촉될 경우, 압력관의 내면과 외면의 온도 차로 인하여 수소(중수소)의 열확산이 발생하며 결과적으로 압력관 외면에 수소화물 블리스터가 형성된다. 수소화물 블리스터는 음향학적으로 지르코늄 매질과 연속성을 가지기 때문에 일반적인 초음파 검사법으로는 탐지하기가 어렵다. 지르코늄 압력관 외면에 발생한 작은 수소화물 블리스터를 압력관 내면에서 탐지하기 위하여 초음파 모드 변환 및 속도비 방법을 개발하였다. 정적인 열확산 실험 장치를 사용하여 압력관 외면에 수소화물 블리스터를 성장시켰다. 종파 에코의 비행시간과 모드 변환된 반사 횡파 에코의 비행시간을 측정하여 종파 대 횡파 속도비를 계산하였으며 이를 속도비를 수평된 등고선 표현 방식으로 나타냈다. 초음파 속도비 방법이 일반적인 종파 비행시간 방법보다 수소화물 블리스터 탐지 감도가 우수하며 블리스터 형상화 측면에서도 실제 형상과 유사하게 재현하고 있음을 알 수 있었다. 또한 중수로 압력관 초음파 검사사양과 동일하게 최적화 조건에서 수소화물 블리스터 탐지 한계는 보수적인 관점에서 압력관 외면에 나타나는 크기를 기준으로 약 500  $\mu\text{m}$ 로 평가되었다.

**주요용어:** 초음파 모드변환, 초음파 속도비, 수소화물 블리스터, 지르코늄합금

**Abstract** When the pressure tubes(PT) are in contact with the calandria tube(CI) in the pressurized heavy water reactor(PHWR), the temperature difference between inner and outer wall of PT results in a thermal diffusion of hydrogen (deuterium) and hydride blisters are formed on the outer surface of PT. Because the hydride blisters and zirconium matrix are acoustically continuous, it is not easy to distinguish the blisters from the matrix with conventional ultrasonic method. An ultrasonic velocity ratio method was developed to detect small hydride blisters on the zirconium pressure tube. Hydride blisters were grown in the PT specimen using a steady state thermal diffusion device. The flight times of longitudinal echo and reflected shear echo from the outer surface were measured accurately. The velocity ratio of the longitudinal wave to the shear wave was calculated and displayed using contour plot. Compared to the conventional flight time method of longitudinal wave, the velocity ratio method shows superior sensitivity to detect smaller blisters as well as better images for the blister shapes. Detectable limit of the outer shape of the hydride blisters was conservatively estimated as 500  $\mu\text{m}$ , with the same specifications of ultrasonic transducer used in the actual PHWR pressure tube inspection.

**Keywords:** ultrasonic mode conversion, ultrasonic velocity ratio, hydride blister, zirconium alloy

1. 서 론

중수로 압력관은 원자로 운전 중에 중성자 조사에 의한 크리프가 발생하여 원주 방향 반경 팽창 및 축 방향 길이 팽창이 일어난다. 또한 압력관과 칼란드리아관 사이에 간격을 유지하기 위하여 설치된 garter spring이 설계 위치에서 이동하는 경우 압력관 처짐(sagging)이 발생하며 칼란드리아관과 접촉하는 경우가 발생한다. 중수로 압력관이 칼란드리아관과 접촉할 경우 압력관 내면과 외면에 온도 구배가 발생한다. 이 때 압력관 내면의 고온부에서 외면 접촉 부위에 저온부(냉점)으로 온도 구배에 의한 수소의 열확산이 발생하여 냉점 주위로 수소화물로 모이게 되는 데 이때 수소화물의 부피 팽창으로 인하여 냉점 표면이 부풀어 오르는 현상을 수소화물 블리스터라고 한다. Fig. 1에 수소화물 블리스터 발생 기구를 보였다. 이러한 수소화물 블리스터는 부피 팽창에 의한 부풀어 오름과 동시에 균열이 발생하기 때문에 지연수소균열(DHC: delayed hydride cracking)의 원인이 되는 등 중수로 압력관의 안전성에 중요한 영향을 끼치는 인자이다.

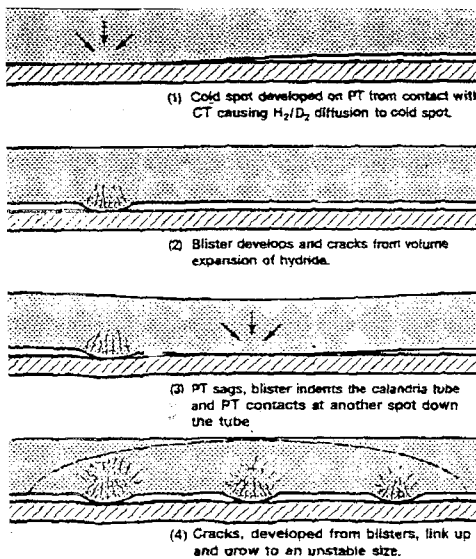


Fig. 1 Mechanism of hydride blister formation and growth

지르코늄 압력관에서 수소화물 블리스터가 발생하기 위한 필수 조건으로는 1) 원자로 운전 중에 압력관 내면에 냉각재 온도는 약  $\sim 300^{\circ}\text{C}$ 이고 칼란드리아관 외면에 감속재 온도는  $40\sim 60^{\circ}\text{C}$  인데, 진

동 등의 이유로 압력관과 칼란드리아 관 사이에 일정 간격을 유지하는 spacer (또는 garter spring)이 설계 위치에서 이동할 경우, 압력관 처짐 현상(Sagging)이 발생하고 따라서 압력관과 칼란드리아관이 접촉하여 압력관 외면과 내면 사이에 온도 구배가 발생해야 하며, 2) 지르코늄 압력관 내에 수소 농도가 충분히 높아서 냉점 (압력관 외면에 접촉점)으로의 수소 확산이 가능해야 한다는 조건을 만족해야 한다. 이러한 메카니즘으로 수소화물 블리스터가 발생할 경우 수소화물의 부피 팽창 및 잔류응력의 발생 등으로 균열이 발생하며 이후로는 전형적인 지연수소균열로 진행하여 압력관 파괴에 이를 가능성이 있다.

1983년도에 캐나다 Pickering 원전 2호기에서 발생한 압력관 파열 사고의 원인이 수소화물 블리스터에 의한 것이라고 밝혀지면서[1] 압력관과 칼란드리아관의 접촉으로 발생하는 냉점과 수소 확산, 블리스터 형성한계, 잔류응력 분포 등에 관한 종합적인 연구가 수행된 바 있다[2-7]. 한편 이렇게 발생한 수소화물 블리스터는 그 표면에 균열이 존재할 가능성이 높고 블리스터 그 자체가 결함으로 간주되기 때문에 국내에 운전 중인 중수로의 경우 spacer의 이동 또는 이들의 간격을 측정하여 중수로 압력관과 칼란드리아관이 접촉 가능성을 감시하고 있으며 접촉된 압력관에 대해서는 압력관 교체 등 후속 조치를 취해야 한다.

한편 정기 가동중검사 시에 선정된 압력관에 대해서 압력관 내면으로부터 초음파 탐상법, 외전류 탐상법, LVDT(linear variable differential transformer) 측정법 등을 적용하여 내면 및 외면 결함, 내경 및 외경 치수 변화, 압력관/칼란드리아관 간격, garter spring 위치, 압력관 처짐 측정 등 종합적인 검사를 시행하고 있으나 수소화물 블리스터는 탐지하지 않고 있다. 그 이유로 지르코늄 압력관의 두께는 4.2 mm로 얇은 튜브에 속하고 압력관 외면에 발생하는 수소화물 블리스터의 깊이도 최대 500  $\mu\text{m}$  정도로 미소 결함에 속하는데다가, 금속학적으로  $\delta$ -상으로 표현되는 수소화물 블리스터는 압력관 재료인  $\alpha$ -지르코늄 매질과 음향 임피던스의 차이가 크지 않아 음향학적으로 불연속성이 없기 때문에 일반적인 초음파 탐상법으로는 이를 탐지하기 어렵다.

본 연구에서는 이러한 수소화물 블리스터를 탐지하기 위하여 수소화물 블리스터와 지르코늄 매질의 음향학적인 특성을 극대화하기 위한 방법으로 종파/횡파 속도비를 변수로 사용하는 수소화물 블리스

터 탐지 방법을 개발하였다. 특히 압력관 저면에서 입사 종파가 횡파로 모드 변환하여 종파와 횡파의 속도를 동시에 측정하는 방법을 적용하여 비교적 간단한 관계식으로 종파/횡파 속도비를 계산하고 평면상에 등고선 도시 방식으로 표현함으로써 수소화물 블리스터를 탐지하는 방법을 개발하였다. 실험실적으로 제조한 다양한 크기 및 형상의 수소화물 블리스터 시편에 대해 이 방법을 적용한 결과 매우 우수한 탐지 성능을 나타냈은 물론 수소화물 블리스터의 외면 형상까지도 정확히 알아낼 수 있었다. 또한 현재 압력관 검사 장비에서 사용하는 초음파 탐촉자와 동일한 조건에서 초음파 빔 경로를 해석하여 최소 탐지능은 보수적으로 판단하여 약 500  $\mu\text{m}$ 을 추정하였고 이를 실험적으로 확인하였다.

2. 초음파 속도비 방법에 의한 수소화물 블리스터 탐지

초음파 속도비 방법이 일반적인 종파나 횡파 비행시간 방법에 비해서 감도가 높은 이유는 Table 1에서 보인 바와 같이 지르코늄 매질과 수소화물간의 음속을 비교할 경우 종파의 경우 수소화물이 지르코늄 매질보다 빠른 반면에 횡파의 경우에는 수소화물이 느리기 때문이다. 즉 수소화물 블리스터의 비율이 증가함에 따라 종파 속도는 빨라지고 횡파 속도는 느려지기 때문에 종파/횡파 속도비를 측정인자로 선택하면 지르코늄 매질과 수소화물 블리스터의 차이를 극대화할 수 있으며 Table 1에 따라 압력관의 건전 부위와 수소화물 블리스터 부위에 대한 종파/횡파 속도비를 구하면 압력관 두께 대 수소화물 블리스터 깊이 비율에 따라  $V_L/V_S = 2.008 \sim 2.842$  사이의 값을 가지게 된다.

Table 1 Ultrasonic velocity and velocity ratio[12]

Material	$V_L$ [m/s]	$V_S$ [m/s]	$V_L/V_S$
$\alpha\text{-Zr}$	4,780	2,380	2.008
$\delta\text{-hydride}$	5,400	1,900	2.842

박관 (또는 두께가 얇은 배관)을 검사하기 위해 종파 모드로 배관 내면에서 수직 초음파 탐사를 수행할 경우 저면(배관 외면)에서 반사된 종파와 더불어 종파에서 횡파로 모드 변환된 반사 횡파가 나타

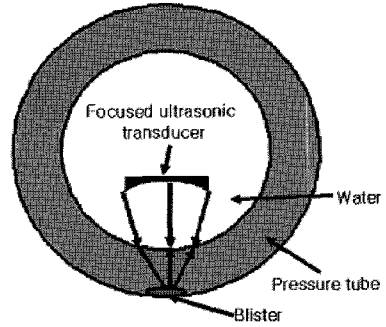


Fig. 2 Concept of ultrasonic velocity ratio measurement for blister detection

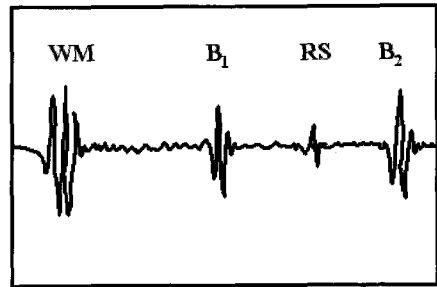


Fig. 3 Schematic echo pattern in time domain

난다[11]. 이 경우 모드 변환된 횡파의 속도가 종파에 비해서 느리기 때문에 시간 영역에서 신호를 해석해 보면 반사 종파보다 늦게 나타난다. Fig. 2에 보인 바와 같이 압력관 내면에서 초점형 수침 초음파 탐촉자를 사용하여 수소화물 블리스터를 함유한 지르코늄 압력관에 초음파를 송신하면 Fig. 3과 같은 종파 반사 에코와 더불어 종파-횡파 모드 변환된 반사 에코가 동시에 나타나는 데 여기서 신호 WM은 물/시편 계면 에코,  $B_1$ 은 첫 번째 종파 저면 반사 에코( $L-L$ ), RS (reflected shear)는 저면에서 모드 변환된 종파-횡파 저면 반사 에코( $L-S$ ),  $B_2$ 는 두 번째 종파 저면 반사 에코( $L-L-L-L$ )을 의미한다. 각각의 신호에 해당하는 비행시간을 계산하면,

$$\begin{aligned}
 B_1 &= \frac{2t}{V_L}, \\
 B_2 &= \frac{4t}{V_L}, \\
 RS &= \frac{t}{V_L} + \frac{t}{V_S},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서  $V_L$ ,  $V_S$ ,  $t$  는 각각 종파 속도 및 횡파 속도, 시편의 두께이며,  $RS$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  는 각 반사파의 비행시간을 의미한다. 식 (1)을 정리하여 종파/횡파의 속도비로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{V_L}{V_S} = 1 + \frac{2(RS - B_1)}{(B_2 - B_1)} \quad (2)$$

식 (2)에서 보인 바와 같이 각각의 모드 신호에 해당하는 상대적인 비행시간을 측정하면 종파/횡파 속도비를 계산할 수 있으며 초음파 센서를 압력관 내면에서 정밀 주사하면서 등고선 방식으로 화면 처리하면 수소화물 블리스터의 형상을 도시할 수 있다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1. 수소 장입

중수로에서 실제 사용되고 있는 Zr-2.5Nb 압력관 (직경 112 mm, 두께 4.2 mm)을 시편으로 사용하여 다양한 수소 농도를 가진 시편을 제조하였다. 압력관을 약 30~35 mm 의 장방향 시편으로 절단하고 압력관 특성시험 절차서에 의거하여 전해법으로 수소를 장입하였다[8]. 장입할 목표 수소 농도에 따라 필요한 수소화물 층 두께를 계산하고 이에 따른 소요 시간을 계산하였다. 전해장입법으로 시편 표면에 수소화물을 형성시킨 뒤 유리로 진공 밀봉 후 annealing하여 균질화 처리함으로써 수소가 시편 전체에 고르게 확산, 분포하도록 처리하였다. 균질화에 소요되는 시간 및 온도는 시간에 따른 농도 profile을 기초한 확산 거리 공식을 적용하여 시편 내부 중앙에서의 수소 농도가 표면에 대해 97%가 되는 시간을 계산하여 적용하였다.

#### 3.2. 수소화물 블리스터 형성

압력관 시편 외면에 수소화물 블리스터를 형성, 성장시키기 위하여 Fig. 4에 보인 열확산 장치를 통하여 steady thermal field를 시편에 가했다.  $415 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지되는 항온 알루미늄 블록 위에 시편을 놓고 시편-블록 간에 열 접촉을 균일화하기 위하여 알루미늄 분말을 도포하였으며 시편 상부 중앙을 평평하도록 연마한 뒤 수냉 알루미늄 finger를 사용하여 냉점을 구성하였다. 냉각수 온도는

14 ~ 16°C로 유지되었으며 수소화물 블리스터가 충분히 성장하도록 하기 위하여 7 ~ 30일 동안 열확산을 실시하였다. 별도의 온도 측정을 실시하지는 않았으나 유한요소법으로 온도 분포를 분석한 결과 냉점 위치에서 173°C, 고온 블록과 시편 접촉면에서 369°C로 나타났으며[9] 이는 다른 연구 결과[10]와도 유사하다. 이러한 시편 내면과 냉점 간에 온도 차이가 수소의 열확산 구동력으로 작용한다.

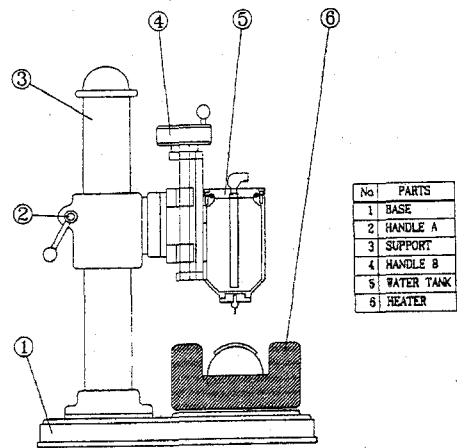


Fig. 4 Thermal diffusion device for formation and growth of hydride blister

#### 3.3. 초음파 속도비 방법에 의한 수소화물 블리스터 탐지

중수로 압력관의 초음파 검사에 사용되는 탐촉자와 동일한 사양으로 직경 6.35 mm (0.25 inch), 중심 주파수 10 MHz, 구면형 초점거리 20.3 mm (0.8 inch)인 초점형 수침 초음파 탐촉자를 사용하였다. Fig. 5 에 실험 장치 개략도를 보였는데 초음파 송신 및 수신을 위하여 JSR DPR-50 plus 장비(최대 발전 주파수 = 50 MHz)와 디지털 오실로스코프 (Lecroy LC 574A, 샘플링 주파수 = 1 GHz)를 사용하였으며 수신 신호를 분석하여 반사파의 비행시간을 측정하였다. 초음파 탐촉자-압력관 내면 간에 물-거리를 변화시키면서 압력관 저면(압력관 외면 또는 수소화물 블리스터)에서 종파-횡파 모드 변환 반사파의 진폭이 최대가 되도록 조절하였으며 이 상태에서 각각의 반사 에코 신호의 비행시간을 측정하였다. 오실로스코프의 시간 측정에 대한 정밀도는  $10^{-9}$  second 였으며 다중 에코 신호의 첫 번째 peak

의 최저점을 기준으로 하여 측정하였다. 실제로 종파-횡파 모드 변환된 횡파 ( $RS$  신호)의 진폭이 최대인 물-거리 (water distance)는 약 10 mm 였으며, 이 조건에서 실제로 측정된 전형적인 오실로스코프 화면을 Fig. 6에 보였다. 또한 Fig. 7에 보인 바와 같이  $RS$  신호가 최대가 되도록 물-거리를 최적화한

상태에서 빔 퍼짐 현상을 무시하고, 초점형 수침 초음파 탐촉자에서 발생한 초음파가 지르코늄 압력관 내면에서 굴절되어 들어가는 빔 경로 및 초점 위치 및 크기 등을 분석한 결과, 압력관 외면 또는 수소화물 블리스터 위치에서 defocused 되는 길이는 약 500  $\mu\text{m}$  이며 정확한 초점 위치는 외면에서 내부로 약 1 mm 정도 들어간 위치로 계산되었다.

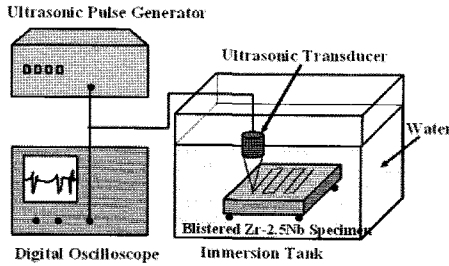


Fig. 5 Schematic diagram of ultrasonic velocity ratio measurement system

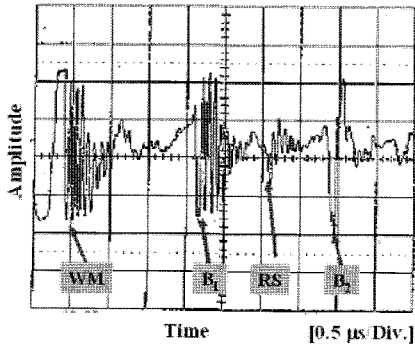


Fig. 6 Typical CRT echo pattern

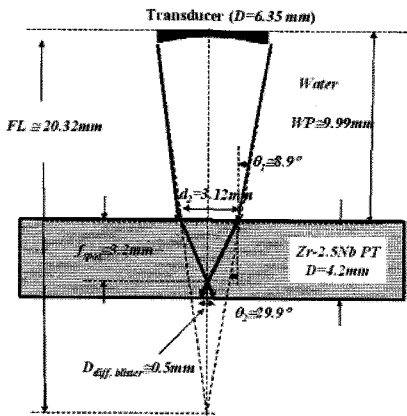


Fig.7 Calculation of water distance and focal point at the blister in the Zr-2.5Nb pressure tube

#### 4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 8에 전형적인 수소화물 블리스터의 단면 사진을 보였다. 냉점 주위로 수소화물이 확산하여 몰려들면서 압력관 외면에 부풀음 현상을 나타내고 있으며 외면에서 발생한 균열도 관찰된다. 수소화물 블리스터의 균열은 표면에서 시작하며 내부로 전진하고 있음을 알 수 있으며 그림에도 불구하고 어떤 경우에도 균열은 블리스터와 지르코늄 매질의 경계면을 넘지 않고 있다. Fig. 9(a)에 초기 수소농도 200 ppm 으로 415°C에서 1개월간 수소화물 블리스터로 성장시킨 시편의 외면 사진을 보였다.

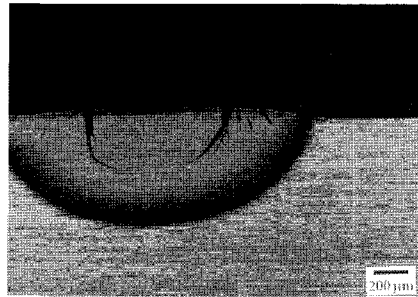


Fig. 8 Typical cross-sectional view of hydride blister

수소화물 블리스터 주위를 압력관 내면 쪽에서 정밀 스캐너로 주사하면서 각각의 초음파 에코의 비행시간을 측정하였으며 이를 앞서 기술한 초음파 속도비 방법으로 계산하여  $V_L / V_S$  값을 x-y 평면에서 등고선 방식으로 도시하였다. 직경이 약 3 ~ 6 mm 의 비교적 큰 수소화물 블리스터에 대한 분석 결과를 Fig. 9에 보였는데 Fig. 9(b)에는 초음파 속도비 방법에 의한 결과를, Fig. 9(c)에는 단순히 종파 비행시간 결과를 도시한 결과를 보였다. 초음파 속도비 측정 결과와 종파 비행시간 측정 결과 모두 Fig. 9(a)에 보인 실제 수소화물 블리스터 외관 형상과 거의 비슷한 도시 화상을 얻었으며 다만 초음파 속도비 방법이 종파 비행시간 측정정보 다 높은 감도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

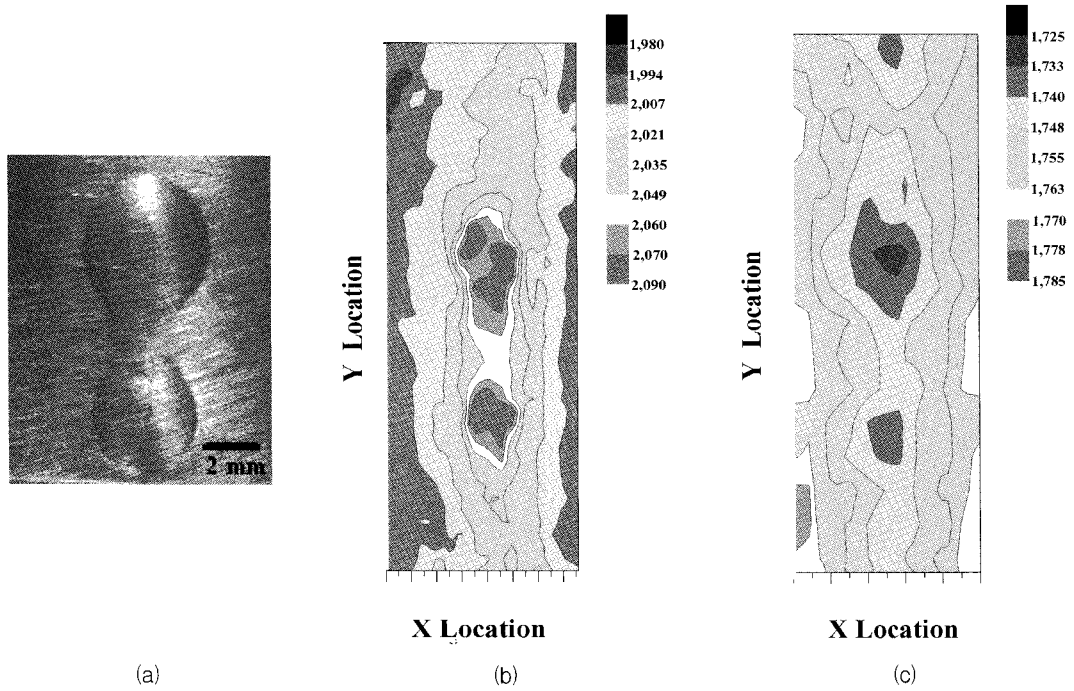


Fig. 9 Comparison of (a) outer shape of blister grown 30 days with  $[H] = 200$  ppm (scale bar = 2 mm) (b) Contour plot of velocity ratio method, (c) Contour plot of time-of-flight of longitudinal wave method

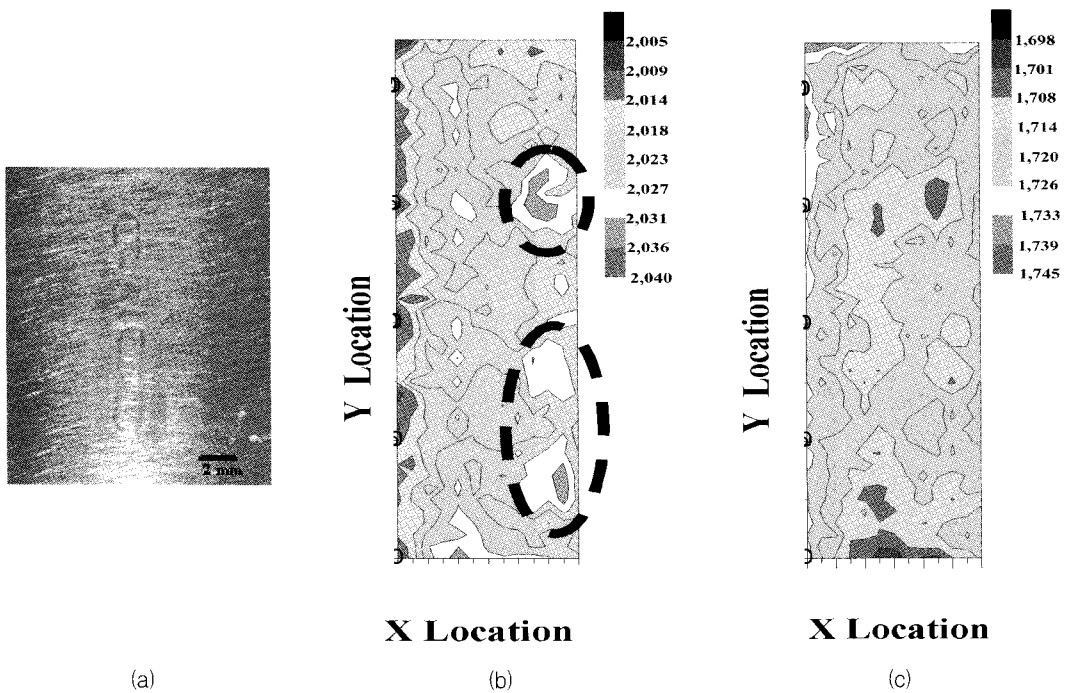


Fig. 10 Comparison of (a) outer shape of blister grown 14 days with  $[H] = 188$  ppm (scale bar = 2 mm) (b) Contour plot of velocity ratio method, (c) Contour plot of time-of-flight of longitudinal wave method

모든 비파괴검사 방법이 그러하듯이 중수로 압력관의 수소화물 블리스터의 탐지에서도 적용된 실험 조건에 따라 탐지 한계가 존재한다. 앞서 언급한 바와 같이 실제 중수로 압력관 초음파 검사에 사용되는 탐촉자와 동일한 조건으로 초음파 속도비 방법의 탐지 한계를 알아보기 위해서 다양한 크기의 수소화물 블리스터 시편에 대한 측정을 실시하였다. 그 중에서 탐지 한계에 가깝다고 판단되는 시편에 대한 실험 결과 사례를 Fig. 10에 보였다. 수소농도 188 ppm 으로 415°C에서 14일간 성장시킨 수소화물 블리스터 시편에 대한 결과를 Fig. 10(a)에 보면 현미경 사진, Fig. 10(b)에 초음파 속도비 방법으로 측정된 결과, 그리고 Fig. 10(c)에 종파 비행시간 측정 결과를 제시하여 비교하였다. 이 시편은 Fig. 10(a)에 보인 바와 같이 수소화물 블리스터의 크기 및 깊이가 비교적 작은 경우인데 Fig. 10(c)에서와 같이 종파 비행시간 측정 결과에서는 거의 수소화물 블리스터를 구분하기 어려운 반면에 Fig. 10(b)의 초음파 속도비 측정 결과에서는 수소화물 블리스터의 형상을 구분할 수 있었다. 따라서 초음파 속도비 방법이 종래의 종파 비행시간 측정법보다는 높은 탐지능 및 분해능을 보임을 알 수 있다.

다양한 수소화물 블리스터 생성 및 성장 실험 결과를 종합해 보면, 수소화물 블리스터는 그 외면 크기가 커지더라도 깊이는 최대 500  $\mu\text{m}$  정도까지 성장한다[24]. Fig. 11에 이러한 수소화물 블리스터 단면 사진과 초음파 빔 경로를 개략적으로 표시하였는데 여기서도 수소화물 블리스터의 크기는 대략 깊이 및 길이가 각각 500  $\mu\text{m}$  정도임을 알 수 있다.

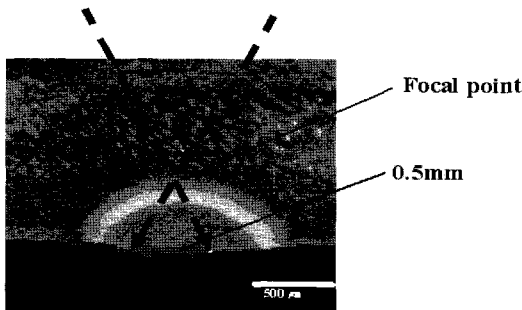


Fig. 11 Cross sectional view of blister grown for 14 days with  $[H] = 188 \text{ ppm}$ . The focal spot and defocused area indicates the resolution of the inspection condition be no greater than 0.5 mm.

초음파 빔의 물-거리를 변화시키면 defocus되는 길이도 변화하나 본 실험에서는 종파-횡파 모드 변환된 RS 신호의 진폭이 최대가 되도록 물-거리를 최적화한 상태, 즉 최대 감도 상태에서 분석한 결과 Fig. 7에서 보인 바와 같이 defocus 거리가 대략 500  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 이러한 사실을 감안해 보면 본 실험 조건에서 초음파 속도비 방법으로 수소화물 블리스터를 탐지할 수 있는 한계는 보수적 관점에서 압력관 외면에 나타난 크기를 기준으로 대략 500  $\mu\text{m}$  정도라고 추정할 수 있다.

## 5. 결론

전해 수소 장입법으로 수소를 장입한 지르코늄 압력관 시편에 대해서 실험실적으로 수소화물 블리스터를 성장시켰다. 음향학적으로 큰 차이가 없는 수소화물 블리스터와 지르코늄 모재에서 수소화물 블리스터를 탐지하기 위한 종파/횡파 속도비 방법에 의한 초음파 검사 방법을 확립하였으며 이를 위하여 저면에서 모드 변환된 횡파 에코 신호를 탐지하였으며 저면에서 반사된 종파 에코에 대한 비행시간 및 횡파 모드 변환된 에코에 대한 비행시간을 측정하여 종파/횡파 속도비를 계산하였다. 압력관 내면에서 초점형 수침 초음파 탐촉자를 사용하여 x-y 면에서 주사하면서 측정된 데이터에서 초음파 속도비를 구하여 등고선 방식으로 도시하였으며 이를 단순 종파 비행시간 측정 결과와 비교하였다. 종파 비행시간 결과에 비해 초음파 속도비 방법의 탐지 감도가 우수하였으며 블리스터의 외면 형상도 정확히 알아낼 수 있었다. 한편 실제 중수로 압력관 검사와 동일한 조건으로 빔 퍼짐을 무시하고 빔 경로를 분석하여 초점 위치 및 defocused된 폭 등을 검토한 결과 초음파 속도비 방법에 의한 수소화물 블리스터의 탐지능은 보수적인 관점에서 약 500  $\mu\text{m}$  정도로 추정된다. 앞으로 자동화 주사장치 및 신호 처리 시스템이 개발되면 중수로 압력관의 현장 가동중검사 시에 수소화물 블리스터를 탐지하는데 적용할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업 중 중수로 압력관 건전성 평가기술 개발 과제에서 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] G. J. Field, J. T. Dunn, B. A. Cheadle, "Analysis of pressure tube failure at Pickering NGS "A" unit 2 nuclear system department," *Can. Metall. Q.* Vol. 24, No. 3, pp. 181-188, (1985)
- [2] Y. M. Cheong, U. S. Gong, K. N. Choo, S. S. Kim, Y. S. Kim, "Formation and growth of hydride blisters in Zr-2.5Nb pressure tubes," *J. Korean Nucl. Soc.*, Vol. 33, No. 2, pp. 192-200 (2001)
- [3] Y. M. Cheong, S. C. Kwon, H. K. Jung, "Determination of anisotropic elastic moduli of Zr-2.5Nb CANDU pressure tube materials," *J. Mater. Sci.*, Vol. 35, No. 5, pp.1195-1200 (2000)
- [4] Y. M. Cheong, S. S. Kim, Y. S. Kim, "Temperature effect of dynamic anisotropic elastic constants of Zr-2.5Nb pressure tube by resonant ultrasound spectroscopy," *J. Nucl. Mater.*, Vol. 303, pp. 83-91 (2002)
- [5] 정용무, 공운식, 권상철, 김성수, 김영석, "Hydride blister를 함유한 Zr-2.5Nb 압력관 재료의 cantilever beam 시험," 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, (2000)
- [6] 정용무, 공운식, 권상철, 김성수, 김영석, "Zr-2.5Nb 압력관 재료에서 hydride blister의 생성 및 파괴," 2000 기기건전성 Workshop, KINS (2000.5.9)
- [7] 정용무, 공운식, 김상재, 김영석, "지르코늄 압력관에서 hydride blister 에 의한 잔류응력 측정," 대한기계학회 2001 재료 및 파괴부문 학술대회논문집 pp. 128-133 (2001)
- [8] 김영석, 정용무, 권상철, 안상복, "Zr-2.5Nb 압력 관특성시험 절차서," 한국원자력연구소, KAERI/TR-1329-99 (1999)
- [9] 정용무, 공운식, 주기남, 김성수, 김영석, "Zr-2.5Nb 압력관 재료에서 hydride blister의 균열 현상," 한국원자력학회 1999 추계학술발표회 논문집 (1999)
- [10] G. Domizzi, R. A. Enrique, J. Ovejero-Garcia, G. C. Buscaglia, "Blister growth in zirconium alloys: experimentation and modeling," *J. Nucl. Mater.* Vol. 229 pp. 36-47 (1996)
- [11] Y. H. Kim and S. J. Song, J. K. Lee and H. C. Kim, "Transverse-wave modes in the pulse-echo signal of a normal-beam longitudinal wave mode transducer," *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 42, No. 1, pp. 111-117, (2003)
- [12] P. P. Nanekar, M. Bandyopadhyay, M. D. Mangsulikar, A. K. Bandyopadhyay and B. K. Shah, "Ultrasonic characterization of service-induced flaws in zirconium alloy pressure tube of pressurized heavy water reactors," *Proc. ZIRC-2002*, pp. 270-274, BARC (Sep. 2002)