

## 베릴륨 표면확산 층을 가진 지르코늄 판재에서의 후방산란 프로파일

### Ultrasonic Backscattering Profiles from Zirconium Plate with Beryllium Diffusion Layer

황용화\*, 권성덕\*\*†, 최현옥\*\*, 박준호\*\*\*, 이영호\*\*\*\*

Y. H. Hwang\*, S. D. Kwon\*\*†, H. O. Choi\*\*, C. H. Park\*\*\* and Y. H. Lee\*\*\*\*

**초 록** Zr(1.32mm) 판재 위 Be-Zr(100 $\mu$ m) 합금층의 평가를 목적으로 후방산란 초음파의 입사각 의존성인 프로파일이 여러 입사위치에서 측정되었다. 누설 램(Lamb)파로부터 후방복사된 초음파 프로파일에는 4개의 주요 세부 프로파일이 발견되었다. 세부프로파일들의 정점각과 정점세기는 Be 확산층의 강화효과로 인해 감소하였다. 세부 프로파일들의 존재와 변화가 시편재질의 음향학적 특성, 램파모드들의 군속도 집단적 변화 그리고 표면과의 누설율 차이 등으로 설명되었다. 판재 위 얇은 확산층의 평가를 위한 유용한 평가 기법으로 판재로부터의 후방복사 세부 프로파일이 제안되었다.

**주요어 :** 후방산란 초음파, 누설 램파, 후방복사 프로파일, 핵연료봉

**Abstract** Ultrasonic backscattering profiles of the Zr plates(with a thickness of 1.32mm) with/without Be-Zr alloy layer(with a thickness of 100 $\mu$ m) were measured at various incidence positions to evaluate the characteristics of Be diffusion layer. Four principal subprofiles were observed in the backward ultrasound radiated from leaky Lamb waves. The angles and the intensities of the subprofile peaks decreased by the stiffening effect of Be layer. Generation and change of the subprofiles were explained by the acoustical property, collective group velocity and leaky factor difference of the plates under consideration. Backward radiation subprofiles turned out to be an useful method for evaluating thin diffusion layers on plates.

**Keywords:** backscattered ultrasound, leaky Lamb wave, backward radiation profile, nuclear fuel rod

#### 1. 서 론

하나의 중수로 원전 연료 다발에는 연료봉간 간격유지와 냉각수 통과를 위하여 약 210여 개의 부착물이 Zr-4 cladding 핵 연료봉 외면에 경납 접합되며 이때 금속 Be을 용가재로 사용한다. 재래의 증착 Be 용가재를 사용 할 경우, Be 독성과 Be 증착, 부착물 성형 그리고 점용접중에 Be 증착층의 일부가 떨어져 나가는 flaking 현상으로 인해 경납

접합부에 결함이 발생되는 문제가 발생하므로 부착물 접합 신기술 개발의 일환으로 열처리를 통해 표면에 Be-Zr 합금층을 형성시켜 건전성을 향상시키는 연구가 진행 중에 있다. 이 새로운 기술에서는 합금층의 두께와 물성 그리고 확산 기율기에 대한 최적 조건 설정이 매우 중요하기 때문에 이를 위하여 확산층의 특성에 대한 비파괴적 평가가 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 그러나 표면 확산층을 전통적인 초음파 시험법으로 평가하는 데에는 확산

(접수일: 2003. 6. 4, 심사완료일: 2003. 7. 18) \* 한국원자력연구소 핵연료주기시험부, \*\* 안동대학교 물리학과, \*\*\* 한전원자력연료(주) 중수로연료처, \*\*\*\* 충남대학교 기계공학과, † Corresponding Author: Department of Physics, Andong National University, Andong 760-749 (sdkwon@andong.ac.kr)

층의 얇은 두께뿐 아니라 판재 형태의 기하학적 형상으로 인해 많은 어려움이 있다.

최근 두께가 상당히 두꺼운 재료의 표면에 형성된 부식열화층의 물성을 평가하는데 적용된 바 있는 누설 레일리(leaky Rayleigh)파에 의한 후방복사 기법[1]을 판재에 적용한 결과, 그 특성이 판재의 두께, 주파수, 누설 램파의 분산선도 등에 의존하기 때문에 판재 표면지역의 물성 평가에 매우 유용한 비파괴 기법임을 확인하였다[2,3]. 본 연구에서는 판재에서의 누설 램파에 의한 후방복사기법을 Zr 판재 위 확산 Be-Zr 합금층이 있는 시편에 적용하였다. Be 확산층의 효과를 후방복사 프로파일, RF 파열의 변화, 주파수 성분 그리고 램파의 이동거리에 따른 프로파일 및 성분 변화 등을 이용하여 분석함으로써 판재형태의 시편 표면지역에서의 물성변화를 평가하는 새로운 비파괴 평가기법의 가능성을 살펴보았다.

2. 실험

본 연구에서는 실험시편으로 두께 1.32 mm, 폭 30 mm 그리고 길이 10 cm 의 지르코늄(Zr) 판재에 두께 13 μm의 베릴륨(Be)을 증착시킨후 열처리(1100도에서 약 2분)를 통해 확산시킨 합금판재와 합금층이 없는 지르코늄판재 두 가지를 준비하였다. Fig. 1은 200배 배율의 광학현미경으로 측정한 Be 확산 시편 단면이다. Be의 작은 원자번호로 인해 약 100 μm의 Be 확산층이 형성되어 있음을 알 수 있다. Table 1은 시편에 사용된 재료들의 음향학적 물성이다.

Table 1 Material properties used in dispersion and leaky factor calculation

property \ material	Zirconium	Beryllium
Longitudinal Wave Velocity (Km/s)	4.65	12.9
Transverse Wave Velocity (Km/s)	2.25	8.8
Rayleigh Wave Velocity(Km/s)	2.103	7.87
Density (g/cm <sup>3</sup> )	6.52	1.82

\* Velocity in water : 1.48 Km/s

본 연구에서 순수 지르코늄 시편은 Z0 그리고 표면층에 베릴륨 합금층을 가진 시편을 Zb로 표시한다. 두 시편에 대해 Fig. 2의 평균법 후방복사[4] 측정 시스템을 이용하여 모서리로부터의 거리를 최대 3 cm 까지 이동해 가면서 후방복사 프로파일, 정점각, 정점주변에서 RF신호의 변화 등을 측정하였다.

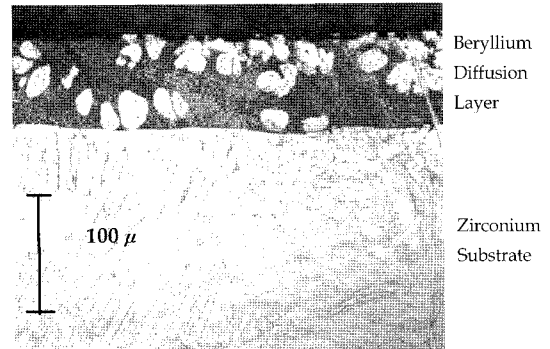


Fig. 1 Cross sectional view by optical microscope (200x): Measured average layer thickness is about 100 μm

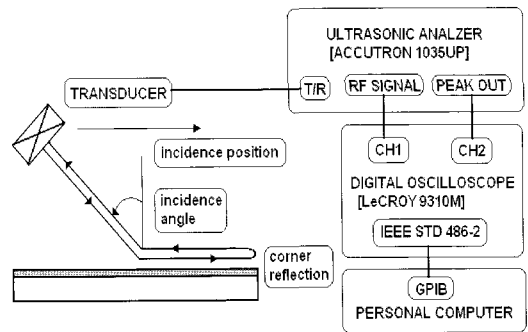


Fig. 2 Measuring system of ultrasonic backscattering by averaging method

3. 후방복사 프로파일

Fig. 3은 모서리 기점으로부터 0.5 cm와 2 cm 입사점에서 측정된 평균법에 의한 후방복사 프로파일의 비교이다. 레일리(Rayleigh) 표면파에 의한 후방복사는 그 표면파가 발생하는 입사각영역에서 단일 후방복사 프로파일을 보여주며 그 패턴은 시편의 분산성, 탐촉자의 방향성과 주파수 특성 그리고 거칠기, 결정 입계나 미세 결함과 같은 산란원에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다[1]. 본 실험에서 사용한 시편과 같은 판재에서는 램(Lamb) 표면파가

모든 입사각에서 발생할 수 있음에도 불구하고 전 영역에 걸친 단일 프로파일이 나타나지 않고 4개의 주요 세부프로파일(subprofile)로 구성된 후방복사 프로파일을 보여주고 있다. 이 세부프로파일들은 나타난 순서대로 SP1, SP2, SP3, SP4라고 표시한다. 세부프로파일의 존재와 입사지점에 따른 변화는 여러 램(Lamb) 표면파 모드들의 복합적 요인들에 의해 나타나는 현상으로 본다. Fig. 4는 17도 근처에서 나타난 첫번째 세부프로파일인 SP1의 정점 근처에서 획득된 RF 신호들의 변화이다. 정점 이전과 이후의 입사각에서 발생한 여러 램과 모드들이 각기 다른 군속도와 발생효율을 가지기 때문에 RF 신호가 넓은 영역에 걸쳐 퍼져있는 형태를 보이며, 정점에 가까워질수록 파열들의 분포범위가 앞으로 당겨지면서 좁은 시간대 영역으로 모여 최대 세기의 후방복사(정점)가 나타남을 알수 있다. 또한 초기 입사 때 발생한 램파들은 모드에 따라 물 속으로의 누설율이 다르므로[5] 진행거리에 따른 모드별 감쇠차와 누설 에너지차도 후방복사 세부프로파일의 발생과 변화에 영향을 줄 것이다. 결론적으로 세부프로파일의 발생은 발생모드들의 군속도 근접에 따른 복사세기의 급격한 증가로 설명될 수 있으며 전반적으로 램파에 의한 후방복사 프로파일은 램파의 분산선도, 발생효율, 누설율, 군속도 그리고 탐촉자 주파수 특성 등에 영향을 받는다고 할 수 있다.

4개의 세부프로파일들은 입사지점에 무관하게 Z0 보다 Zb 시편에서 정점세기와 정점각(각 세부프로파일의 최대 세기를 유발하는 입사각)이 작게 나타났다. 스넬의 법칙으로 환산하면 작은 정점각은 발생 표면파의 위상속도가 높음을 의미한다. 판재두께에 비해서 매우 얇은 약 100  $\mu$ m의 Be 확산층 임에도 Table 1에서 보듯이 Zr 보다 약 3배나 더 큰 초음파 속도값을 가진 확산전 Be층의 섭동효과[6,7]가 세부프로파일 정점각의 감소에 영향을 준 것으로 보인다.

4. 주파수 성분

Fig. 5는 모서리 기점으로 부터 0.5 cm와 2 cm 입사점에서 측정된 평균법에 의한 후방복사 세부프로파일들의 정점에서 획득된 RF 신호들의 주파수 스펙트라이다. SP1과 SP2 스펙트럼을 볼 때, Z0와 Zb 모두 0.5 cm에서 모드성분들의 중첩으로 뭉쳐있는 형태를 보이지만, 진행거리가 4배인 2 cm에서

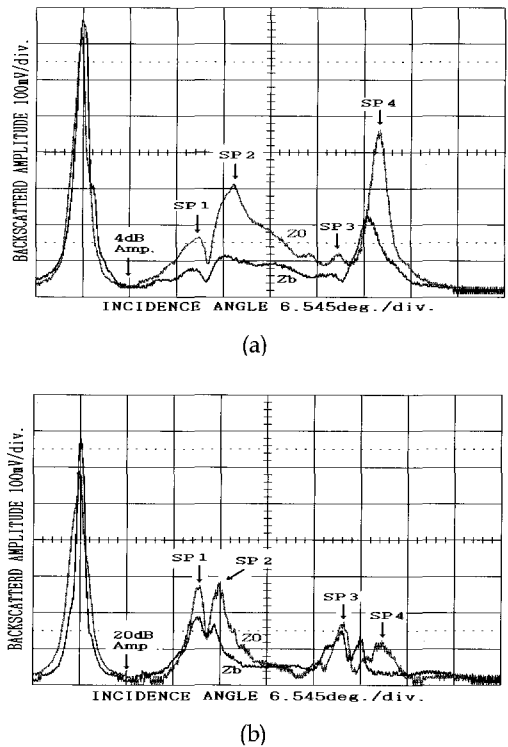


Fig. 3 Averaging backward radiation profiles of Z0 and Zb at incidence position (a) 0.5cm and (b) 2cm from corner

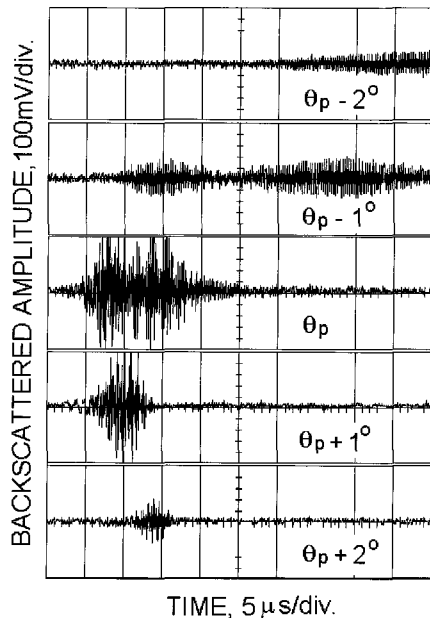
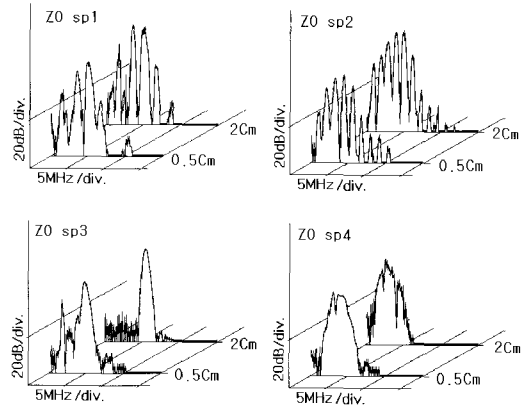


Fig. 4 RF signals at and near peak angle of 1st backward radiation subprofile(SP1) of Z0

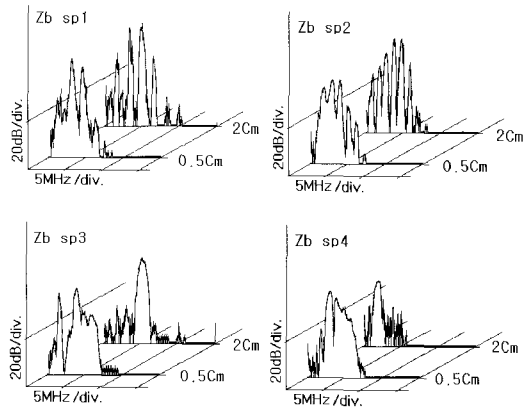
는 누설율이 큰 모드들의 상대적으로 큰 감쇠로 인해 여러개의 세부 주파수 성분으로 분리되어 있고 이 경향은 진행거리에 비례하였다. Zb의 세부 성분들이 낮은 주파수쪽으로 약간씩 이동한 것은 램파 모드들이 높은 속도(작은 정점각)에서 더 낮은 주파수에 대응되는 분산선도의 특성으로 설명이 된다. Be층의 부가효과로 정점세기와 정점각의 감소와 함께 정점신호 스펙트럼에도 작은 변화가 있음을 알 수 있다.

SP3의 스펙트럼은 0.5cm에서 2MHz 성분의 램파 모드의 존재를 제외하면 다른 모든 입사지점에서 5MHz 중심의 단일 모드 성분을 보여주며 환산된 속도값은 Zr의 횡파속도값에 근접한다. SP3는 이전 판재 후방복사 연구에서도 유사한 성분의 후방복사가 발견되었고[3] 표면에 평행한 방향의 변위를 가지는 quasi-SH 모드[8]에 의한 것으로 추정되며 Fig. 6에 제시된 Zr 판재에서 SH 모드들의 분산선도[9]와 약 38°의 SP3 발생각에 대응되는 약 2.4 km/s의 속도 그리고 5 MHz 중심의 주파수 성분영역을 고려할 때, n=2 모드의 SH파에 대응됨을 알 수 있다.

마지막으로 42도 근처의 SP4 세부프로파일은 스펙트럼에 조금씩 분리가 남아 있어서 단일 모드라고는 주장할 수 없으나 광대역 5MHz의 탐촉자 주파수 특성과 닮은 스펙트럼임을 알 수 있다. 대부분의 램파 모드들의 분산성은 주파수와 두께가 증가할수록 속도가 감소(입사각 증가)하면서 레일리 표면파 속도로 수렴하는 형태를 보여주며 여러 모드가 중첩된다. Z0 시편의 입사위치 0.5 cm에서의 SP4 정점각에 해당하는 2235 m/s의 속도는 Zr 시편의 레일리 표면파 속도인 2103 m/s 보다는 약간 크나 5 MHz 주파수에서는 아직 레일리 속도로 수렴하기전의 영역이므로 시편의 두께가 두꺼워지거나 탐촉자 중심 주파수가 증가함에 따라 결국 레일리파에 의한 후방복사 프로파일로 전환될 세부프로파일로 보이며 본 논문에서는 의사 레일리 (quasi-Rayleigh) 프로파일이라 부른다. Zb 시편의 SP4 정점각에 해당하는 속도는 2309 m/s이며 Z0보다는 속도가 증가한 것이다. 이 속도로부터 100 μm 두께의 Be 확산층만의 평균 레일리 표면파 속도를 섭동 이론[7]을 이용해 추정하면 약 2170 m/s로 확산층은 초기 확산 전 Be 강화(Stiffening)와는 다르게 중간층(Intermediate)의 경우[10]임을 알 수 있다. 진행거리 증가에 따라 의사 레일리 프로파일의 스펙



(a)



(b)

Fig. 5 Frequency spectra at the peaks of backward radiation subprofiles of (a) Z0 and (b) Zb at 0.5 cm and 2.0 cm incidence position

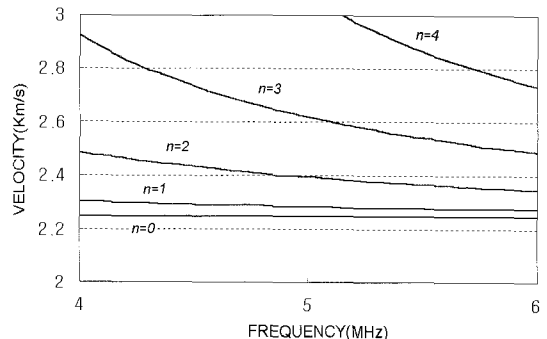


Fig. 6 Dispersion curves of SH (shear horizontal) modes in 1.32 mm Zr plate

트럼이 낮은 주파수 쪽으로 약간의 이동을 보여주는데 이는 식 (1)에서 보듯이 주파수에 비례하는 누설율(leaky factor)에 의한 높은 주파수 성분의 유실에 의한 것이다.

5. 레일리 표면탄성파의 누설율

액체에서 고체로 초음파가 레일리각으로 입사하면 고체표면에 레일리 표면파가 발생한다. 발생된 표면파는 진행하면서 발생기구의 역으로 액체로 에너지를 누설하게되고 그 방향은 입사각과 같은 레일리각을 이룬다. 후방복사 측정은 기본적으로 표면에 발생된 표면파 누설에너지의 입사각 의존성을 측정하는 것으로 후방복사 프로파일의 크기나 모양은 표면탄성파의 누설율에 의존한다. 이 누설율은 근사적으로 유도된 식으로 계산이 가능하며 다음과 같다[5].

$$\epsilon = \rho_L k_R B / \rho$$

인데, B는 다음과 같이 주어진다.

$$B = \frac{k_l^4}{8 k_R^2 \sqrt{k_R^2 - k_l^2} \sqrt{k_L^2 - k_R^2}} \left[ 1 + \frac{k_R^2}{2(k_R^2 - k_l^2)} + \frac{k_R^2}{2(k_R^2 - k_l^2)} - \frac{4 k_R^2}{2 k_R^2 - k_l^2} \right]^{-1}$$

여기에서  $k_R, k_l, k_t$  는 각각 고체시편내에서 레일리파, 종파 그리고 횡파의 파수이며,  $k_L$  액체내에서의 종파의 파수이고,  $\rho_L$ 과  $\rho$  는 각각 액체와 고체 매질의 밀도이다.

이 누설율은 간단한 조작에 의해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\rho_L 2 \pi f B}{v_R \rho} \tag{1}$$

여기에서,

$$B = \frac{T^2}{8V(1-T)W-1} \left[ 1 + \frac{1}{2(1-T)} + \frac{1}{2(1-L)} - \frac{4}{(2-T)} \right]^{-1}$$

$$T = \left( \frac{C_R}{C_t} \right)^2, L = \left( \frac{C_R}{C_l} \right)^2, W = \left( \frac{C_R}{C_w} \right)^2$$

여기에서  $C_R, C_l, C_t$  는 각각 고체시편내에서 레일리파, 종파 그리고 횡파의 속도이며,  $C_w$ , 물속에서 종파의 속도이다.

Table 2의 Leaky factor 1은 Table 1의 값들을 식 (1)에서 대입하여 구한 5 MHz 레일리 표면탄성

파의 Zr과 Be에서의 누설율이다. 물 속에서 Zr은 0.3066 (mm<sup>-1</sup>), 그리고 Be은 0.0781 (mm<sup>-1</sup>)로 각기 1mm 진행할 때마다 exp(-0.3066)과 exp(-0.0781)씩 표면탄성파의 크기가 누설에 의해 감소한다는 것으로 누설율이 큰 Zr에서의 레일리 표면파가 Be에서 보다 약 4배 정도 감쇄가 더 심하다. 그러나 이 누설율이 크다는 것은 역으로 초음파가 액체/고체 경계면에 입사할때 표면탄성파의 발생을 역시 크다는 것을 의미한다. 100 μm 두께의 Be-Zr 합금층에서 확산의 특성을 고려할 때 표면에 가까울수록 작은 누설율의 Be 농도가 클 것이다. 따라서 Zb 시편의 합금층 경계면에서 표면탄성파의 발생율은 Be의 영향을 받아 Z0에 비해 작을것이 예상된다. 이 발생율의 차이가 분산선도의 미미한 변화에도 불구하고 실험에서 보인 Z0 시편의 후방복사 프로파일의 세기가 크게 나타난 이유가 될 것이다. Table 1에 제시된 값들은 비록 레일리 표면파에 대한 것이지만 전반적으로 램(Lamb)파 모드들에 있어서도 누설율과 발생율은 Zr이 4배정도 클 것이 예상된다[5].

아래 식 (2)는 레일리각으로 초음파가 입사할 때 반사장에서 기하학적으로 예견되지는 않지만 나타나는 쇼흐변위(Schoch displacement)를 위상변화 조건으로 유도한 식이다[11]. Bertoni와 Tarnir[12]는 이 반사법의 이동이 표면탄성파의 누설에 의한 에너지 분포의 변화로 인한 것으로 설명하였고 누설율(leaky factor)은 쇼흐 변위의 역수에 2를 곱한 값이 된다고 주장하였다. Table 2의 leaky factor 2 값은 식 (2)에 의해 구해진 쇼흐변위에 역수를 취한 후 2배한 값으로 식 (1)에 의해 결정된 leaky factor 1과 매우 일치함을 알 수 있다.

$$\Delta_s = \left( \frac{2 c_w \rho}{\pi f} \right) \left( \frac{r(r-s)}{s(s-1)} \right)^{1/2} \times \left( \frac{1+6s^2(1-q)-2s(3-2q)}{s-q} \right) \tag{2}$$

여기에서,  $s = T^{-1}, r = WT^{-1}, q = LT^{-1}$

Table 2 Leaky factor and 2/Δs of Rayleigh wave(5MHz) in water : Δs is Schoch displacement

Specimen	Leaky factor1, ε (1/mm)	Leaky factor2, 2/Δs(1/mm)
Zr	0.3066	0.2999
Be	0.0781	0.0878

6. Be 확산층 평가용 변수

Zr판재에 Be 층이 부가되면, 후방복사 프로파일의 특성중 세부프로파일들의 정점각과 정점세기가 가장 뚜렷한 변화를 나타낸다. Fig. 7은 Z0와 Zb 시편에서 관찰된 표면과 진행거리(입사지점)에 따른 정점각들의 변화를 비교한 것이다. 4개의 세부프로파일 모두 입사지점 전 영역에서 Zb의 정점각이 작게 나타났다. 그러나 SP1 경우, Z0는 큰 변화가 없이 Zb는 소폭의 입사각의 증가가 보였다. SP2 경우는 전반적으로 입사거리에 따라 감소하는 경향이 보이거나 1 cm에서 두 값이 매우 근접함을 알 수 있다. SP3와 SP4의 경우, 표면과 진행거리가 커질수록 증가하는 경향을 보였고 특히 의사 레일리 프로파일의 경우 거리가 커질수록 두 값의 차가 작아짐을 보였다. 따라서 Be층의 부가효과를 평가하기 위한 변수로써 각 세부프로파일의 정점각을 선택한다면 입사지점이 코너에 가까워질수록 분별력이 좋아짐(즉, 정점각의 차이가 커짐)을 알 수 있다.

Fig. 8은 Z0와 Zb 시편에 대해 표면과 진행거리(입사지점)에 따른 정점세기들의 변화를 비교한 것이다. 4개의 세부프로파일 모두 Z0에서 정점세기가 크게 나타났고 진행거리에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. 정점세기의 차이와 지수적 감소는 앞에서 논의한 표면파들의 발생율과 누설의 지수적 의존성[12]으로 설명될 수 있다. Z0와 Zb 두 시편의 정점 세기는 전 영역에서 일정한 차이를 유지하고 있어 Be확산층의 강화효과를 평가하는 측정 변수로 매우 안정되고 유용하다고 판단된다.

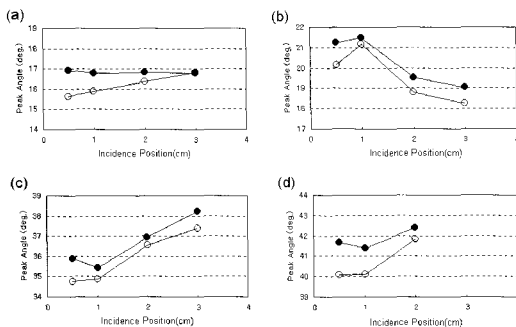


Fig. 7 Peak angles of backward radiation subprofiles of Z0(●) and Zb(○) versus incidence position : (a) SP1, (b) SP2, (c) SP3, (d) SP4.

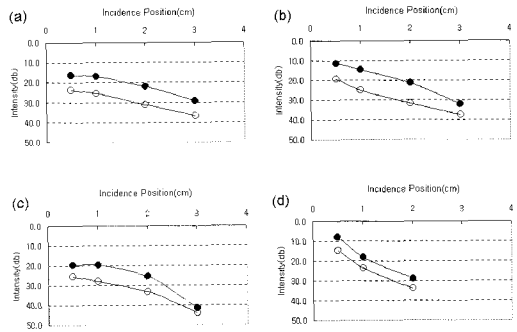


Fig. 8 Peak intensities of backward radiation subprofiles of Z0(●) and Zb(○) versus incidence position : (a) SP1, (b) SP2, (c) SP3, (d) SP4.

7. 결 론

증착 및 열처리를 통해 Zr 판재표면에 Be-Zr합금층을 조성하는 Be층의 비파괴적 평가를 위해 후방복사 초음파 기법이 적용되었다. 측정된 후방복사는 4개의 세부프로파일을 보여주었는데, 발생 램파 모드들의 군속도의 뭉침이 그 원인임을 밝혔다. 주파수 성분분석을 통해 각 세부프로파일들의 발생기구가 규명하였다. Be 층의 존재로 인해 후방복사 세부 프로파일들의 정점각과 정점세기가 감소하였고 이는 Zr과 큰 차이를 갖는 누설 램파 발생율과 속도값을 갖는 Be이 확산된 Be-Zr 합금층의 효과로 설명을 하였다. Be층의 존재로 인해 다양한 측정변수들이 변화하지만 그 중에서 세부프로파일의 정점 세기가 가장 안정적이고 분별력이 좋은 변수임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 원자력연구개발 중장기계획사업 (M20351010001-03A1039-00511: 한전원자력연료(주) 위탁과제)지원으로 수행되었음.

참고문헌

[1] Sung D. Kwon, Myoung S. Choi and Seung H. Lee, "The applications of ultrasonic backward radiation from a layered substrate submerged in liquid," NDT & E International, Vol. 33, Issue 5, pp. 275-281, (2000)

- [2] M. de Billy, L. Adler and G. Quentin, "Measurements of backscattered leaky Lamb waves in plates", *JASA*, Vol. 75, No. 3, pp. 998-1001, (1984)
- [3] 김영환, 송성진, 정민호, 권성덕, "판재에서 발생되는 후방복사 초음파의 분산성," *새물리*, Vol. 45, No. 2, pp. 135-141, (2002)
- [4] Sung D. Kwon, Sung J. Song, Dong H. Bae and Young Z. Lee, "Nondestructive Evaluation of the Characteristics of Degraded Materials Using Backward Radiated Ultrasound," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 9, pp. 1084-1092, (2002)
- [5] I. A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb waves*, (Plenum Press, New York, 1967)
- [6] T. L. Szabo, *J. Appl. Phys.*, Vol. 46, No. 4, pp. 1448-1454, (1975)
- [7] S. D. Kwon and H. C. Kim, "Dispersion of acoustic surface waves by velocity gradients," *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, pp. 2660-2664, (1987)
- [8] M. Castings and B. Hosten, "Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates" *NDT & E International* Vol. 34, No. 4, pp. 249-258 (2001)
- [9] L. M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media*, (Academic Press, New York), p. 60, (1980)
- [10] G. W. Farnell and E. L. Adler, *Elastic wave propagation in thin layers*, *Physical Acoustics*, Vol. IX, Academic Press (1981)
- [11] L. M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media*, Academic Press, New York, p. 108 (1980)
- [12] H. L. Bertoni and T. Tamir, "Unified theory of Rayleigh angle phenomena for acoustic beam at liquid-solid interfaces," *Appl. Phys.* 2, pp. 157-172, (1973)