

## 표면결함유형이 초음파 후방산란 프로파일에 미치는 영향

### Effect of Surface Flaw Type on Ultrasonic Backscattering Profile

권성덕\*, 윤석수\*

Sung D. Kwon\* and Seok S. Yoon\*

**초 록** 후방산란된 초음파의 입사각 의존성을 이용한 표면 결함유형의 평가가 시도되었다. 평탄한 유리위에 순수한 홈, 구리로 채워진 홈, 표면위 붙여진 구리선등의 표면결함 시편에 대한 후방산란 프로파일은 제 1 임계각에서 종파의 산란과 관련된 새로운 프로파일을 보여주었다. 결함에 의한 산란효과가 클수록 후방프로파일들의 정점 위치는 작게 나타났다으며 후방복사 프로파일과 정점 위치에서의 파열의 모양은 결함의 유형과 위치에 따라 누수파와 산란파의 복합적 요인에 의해 다른 형태를 보여주었다.

**주요용어**: 초음파, 후방복사, 산란, 결함유형

**Abstract**: The classification of surface flaw types was performed on the basis of angular dependence of backscattered ultrasound. The copper line adhered on the surface, copper line filled in groove, pure groove and the normal edge were adopted as various surface flaw patterns of glass specimen. A backward longitudinal profile was formed probably by the longitudinal wave scattering at and near 1st critical angle. The wave trains at the peak angles of the backward radiation profiles showed different shapes according to the superposition ratio of scattered and leaky waves. The asymmetry of the backward radiation profile arose due to the scattering effect of flaw. The additive resonance effect of copper line appeared in the left side of the profile. The peak angles of both the longitudinal and radiation profiles were shifted toward small angle by the scattering effect.

**Keywords**: ultrasound, backward radiation, scattering, flaw type

## 1. 서 론

물속에 담겨진 시편표면에 초음파를 레일리(Rayleigh) 각으로 입사시키면 표면파가 파형변환에 의해 발생하고 발생된 표면파의 에너지 누수와 산란으로 인해 입사한 방향으로 상당량의 결맞음 초음파가 되돌아오는 후방복사가 나타난다. 이 후방복사는 뚜렷한 결함이 보이지 않는 시편에서는 표면 거칠기, 미세결함 분포나 다결정 입계등에 의해 발생하며[1] 그 세기가 작다. 그러나 구별될 만한 표면 결함이 있는 경우 후방복사의 대부분 에너지

는 그 결함에 의한 산란과 모드 전환에 의해 영향을 받으며 세기가 상대적으로 크게 나타난다. 이 경우 후방복사 발생각이나 프로파일(입사각 의존성)은 결함의 크기나 모양 그리고 재질의 구성등에 의해 구별되는 결함 유형에 따라 발생각의 변화와 다양한 프로파일을 보여 줄 것이 예상된다.

지금까지 초음파를 이용한 비파괴적 응용은 무엇보다 결함의 판별이었다. 그러나 결함의 판별에 더 나아가서 결함의 유형의 평가가 많은 연구자들의 관심을 이끌어 초음파 신호 패턴의 인식접근 방식을 채택한 용접부위의

인공지능 결합분류 탐상시스템의 개발과 시스템 개선에 대한 연구가 수행되었다[2]. 또한 각종 형태의 결함에 대한 탐상결과 신호를 수학적으로 표현하여 결함 유형에 따른 신호 패턴을 예측, 제시하고 정량적인 비파괴 평가 능력을 향상시키고자 하는 연구로 여러 모델링 기법들이 수행되고 있다[3,4]. 본 연구에서는 기존 초음파 신호 패턴의 분석법과는 다르게 표면탄성파의 산란과 밀접하게 연관되어 있는 후방복사의 프로파일을 이용해 표면지역에 존재하는 여러 형태의 표면 결함의 유형 평가를 시도한다.

2. 실험

12×6×4cm<sup>2</sup>의 광학적 평탄성을 유지한 강화유리에 직경 0.4mm의 반원형 홈을 파거나 직경 0.4mm의 반원형 구리선을 묻는 방법으로 Fig. 1과 같이 (1) 순수 홈 시편 (2) 구리 홈 시편 (3) 구리선 시편의 세가지 유형의 표면 결함 시편을 준비하였으며 비교분석을 위해 수직 절단면을 하나의 결함 유형 시편으로 사용하였다. 후방복사의 입사각 의존성 측정을 위하여 물속에 담겨진 시편에 대해 입사각이 등각속도로 변하는 초음파 각도계 시스템이 사용되었다. 4.7MHz 중심의 광대역 초음파가 입사되었고 입사지역은 결함의 한 두 과장 앞으로 이동하여 후방복사의 주파수 성분 유실이 없고 세기가 최대가 되는 직접 복사법[5]이 사용되었다. Fig. 2은 직접 복사법과 초음파 측정 시스템의 구역그림이다.

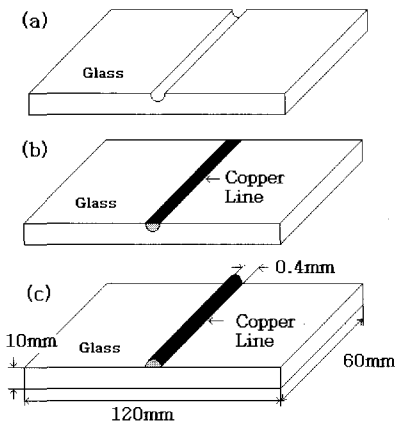


Fig. 1 Surface flaw types on optically flat glass specimen: (a) pure groove (b) copper groove (c) copper line

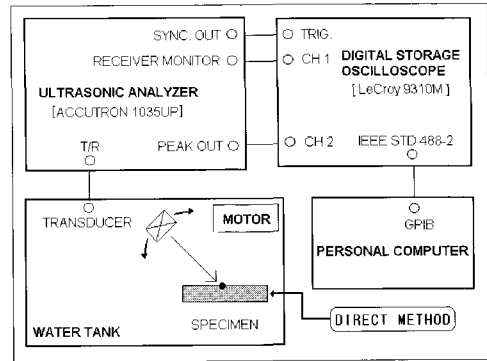


Fig. 2 Ultrasonic backscattering by direct method[5] and measuring system

3. 결과 및 논의

1) 후방산란 프로파일

Fig. 3은 절단면에 대한 후방산란의 입사각 의존성이 다. 입사지역에서 발생된 표면파의 대부분의 에너지가 절단면에서 수직 반사되는 만큼 25.22°를 정점으로 한 상당량의 후방복사가 나타남을 알수 있다. 기존 연구[1,5]에서 알려진 대로 입사각의 폭과 지향성 그리고 주파수 대역과 관련되어 표면파가 레일리각만이 아닌 이 각을 중심으로 한 일정폭의 입사각 영역(약 5°)에서 발생함을 나타내는 전형적 후방복사 프로파일을 보여주고 있다. 후방복사의 또다른 특징으로 제 2 임계각 근처에서 횡파의 산란과 모드전환에 의한 프로파일의 비대칭성[6]을 보여주나 수직 절단면의 방향성 특성으로 인해 비대칭성이 기존의 결과와는 상대적으로 작음을 알수 있다.

Fig. 3의 후방산란 프로파일에는 25°근처의 레일리파에 의한 후방복사 프로파일 외에도 14°근처에 새로운 프로파일이 보인다. 이는 기존 후방산란 측정에서는 나타나지 않던 현상으로 제 1임계각 근처에서 고체내 표면을 따라가는 종파의 산란과 파형변환에 의한 것으로 후방복사에 비해 상대적으로 작은 세기이기 때문에 절단면이나 과장에 비교될만한 크기의 결함을 가진 시편의 후방산란 프로파일에서만 보여지는 것으로 생각된다. 따라서 이 종파에 의한 프로파일의 정점각은 고체내 종파의 굴절각이 90°되는 제 1임계각과 일치할 것이며 스넬의 법칙을 이용하면 고체내 표면지역을 통과하는 종파의 속도에 대한 간접측정 수단이 될 수 있을 것이다. 기존의 이중반사법

에 의한 종파속도 측정값은 시편 체적내 종파 속도를 의미한다면 이 새로운 기법은 표면지역의 종파 속도를 의미하므로 체적 종파 속도와는 다른 값을 가질 것이며 표면지역의 특성평가와 함께 종파의 변위방향에 민감한 표면 결합 평가에도 이용될수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 새롭게 보여진 종파에 의한 프로파일을 후방종파 프로파일이라 부른다. 후방종파 및 후방복사 프로파일은 본 실험의 다른 모든 시편에서도 유사하게 나타났으며 이들 프로파일의 정점각, 프로파일 패턴, 파열모양 등이 결합 유형에 따라 어떻게 다른가에 대해 검토하고자 한다.

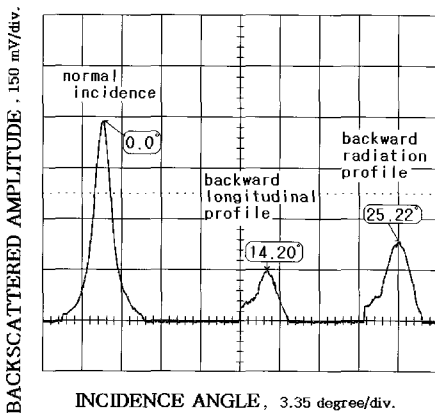


Fig. 3 Angular dependence of backscattered ultrasound from normal edge specimen, involving a backward longitudinal profile and a backward radiation profile

2) 후방종파 및 후방복사의 파형비교

Fig. 4의 (a)와 (b)에는 각각 후방종파와 후방복사의 정점각에서의 파형비교이다. 절단면을 포함한 네가지 결합 유형 모두 후방종파의 경우에는 별다른 차이를 보이지 않고 대칭적으로 퍼져있는 일반적인 산란파형을 보인다. 반면 후방복사파들은 파열의 초반부에 정점이 있고 파의 크기가 급격한 지수적 감소로 이어져 파열의 폭도 상대적으로 좁아 보인다. 이렇게 급격히 감소하는 경향의 파형은 기존 비분산성 시편에서 펄스형태의 입사법에 의한 후방복사 신호의 전형적 패턴이며 발생된 표면파의 누수(leaky)효과로 알려져 있다[7]. 또한 산란실험에서 산란파열의 후반부에 나타나는 결맞음 공명파형과도 유사하다[8]. 절단면과 구리선 시편의 후방복사파는 전형적 비대칭 누수효과를 보여주나 구리홈과 순수홈은 상대적으로 파열의 비대칭성과 연속성이 무너지고 정점이 중심부로 이동

하는 경향을 보여준다. 이는 후방복사의 주 요인인 표면파로부터의 누수효과가 감소하고 결합에 의한 산란효과가 증가한 것으로 생각되며 절단면이나 구리선에 비해 복사파의 세기가 현저히 작아진 것도 이를 뒷받침한다. 따라서 후방복사파는 Fig. 4의 (c)에 도식적으로 설명되어 있는 것과 같이 누수파와 산란파의 중첩으로 볼수 있다.

구리홈과 순수홈 같이 표면아래 결합들은 발생된 표면파의 발생효율을 감소시키고 입사파 및 표면파의 산란효과를 증가시켜 후방복사파의 세기는 감소함으로써 비대칭적 복사파열 모양에서 벗어난다고 할 수 있으며 파형의 특성 비교로 산란효과와 비종파 결합 위치의 추정 가능성이 보여준다. 한편 매우 깊은 표면아래 수직 결합으로 취급되어 이번 실험의 결합유형중 가장 큰 복사파를 유발할것으로 예상되는 절단면 시편이 표면위 구리선 시편에 비해 상대적으로 작은 후방복사를 보여준 것은 흥미로운 결과이다. 이는 표면파의 경계면 반사과정에서 종파나 횡파로의 파형변환으로 인해 수직단면에서 표면파의 반사율이 최대가 아닌 것으로[9] 설명될수 있으며 덧붙여 표면파의 반사에는 절단면 못지 않게 표면위에 부가된 인위적 반사물도 효과적일수 있음을 보여주는 것이다.

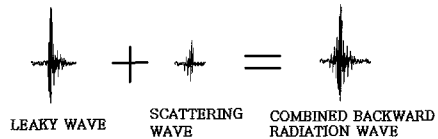


Fig. 4 (a) Leaky wave pattern from pulsed Rayleigh surface wave, (b) Scattering wave by microstructures, (c) Superposition of scattered and leaky waves

3) 후방복사 프로파일 비교

Fig. 5는 네가지 결합유형 모두에서 비대칭성 패턴을 보여주는 후방복사 프로파일의 비교이다. 절단면과 구리선 시편은 90° 굴절된 횡파가 발생하는 제 2 임계각 영역인 프로파일 왼쪽부분에서 약간의 차이를 제외하고는 매우 유사한 패턴을 보여준다. 앞서 정점 파열비교에서 언급된 것과 같이 표면위 결합인 구리선에서 더 큰 후방복사 프로파일을 보여주며 특히 절단면 프로파일과 비교할 때 왼쪽 프로파일의 폭과 크기 증가분은 구리선의 에너지 흡수와 방출전환에 의한 공명효과로 보이며 구리홈 시편의 프로파일에도 역시 같은 효과를 보여준다. 표면지

역내 구리선이나 구리홈 같은 횡파 에너지를 흡수할 수 있는 이질물질의 존재는 표면파의 산란효과와 공명효과로 인해 이에 민감한 후방복사 프로파일 왼쪽 부분의 증가와 변형으로 나타난다고 할수 있다.

같은 표면아래 결합인 구리홈과 순수홈은 둘 다 프로파일의 비대칭성이 증가시키는 형태이다. 앞서 논의된 파열비교에서 산란효과가 증대된 시편들에서 프로파일의 비대칭성이 증가한 것은 왼쪽 프로파일 혹은 비대칭성이 표면 결합에 의한 산란효과와 밀접하게 연관되어 있음을 보여주는 것이다. 구리홈 시편에서의 공명효과를 제외하면 두 프로파일은 매우 유사하며 구리홈 프로파일은 순수홈 프로파일에 구리선 이질물질에 의한 공명효과가 부가된 것으로 설명할수 있다. 이와 같이 후방복사의 왼쪽 프로파일은 표면아래 같은 크기의 결합에서도 결합의 모양과 재질에 따라서 구별되는 패턴을 보여줄 것이며 결합 유형의 결정적 판단자료가 될것이다.

본 논문에 제시되지는 않았지만 새롭게 나타난 후방종파 프로파일은 결합 유형에 따른 일관성을 보여주지 못하였다. 이는 종파의 파장(약 1.2mm)이 표면파의 파장(약 0.67mm)에 비해 2배정도로 크며 표면을 따라가지만 표면파처럼 표면지역에 한정되지 않는 체적파의 특성상 표면파보다는 표면 결합에 덜 민감한 것으로 생각된다.

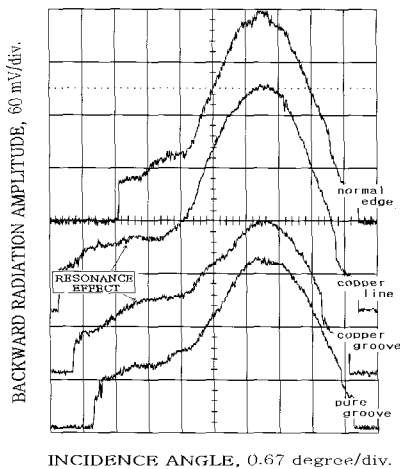


Fig. 5 Backward radiation profiles

4) 후방 프로파일에 의해 결정된 종파 및 표면파 속도의 비교

후방복사의 정점각은 입사지역에 발생된 표면파의 속도의 간접측정이 되며 분산관계나 산란등의 여러 이유로 인

해 실제 위상속도와는 약간의 차이를 보여준다[10]. Fig. 6에는 각 후방 프로파일의 정점각으로부터 환산된 종파 및 표면파의 속도를 시편별로 표시한 것이다. 이 실험에서 초음파 빔의 입사위치는 후방복사가 최대가 되는 인위적 결합들의 한두 파장 앞이므로 결합없는 이 지역에서 발생된 표면파의 속도는 결합의 종류와 무관하게 같다고 할수 있다. 그러나 결합의 유형에 따른 산란, 에너지 흡수 및 방출 그리고 파형변환등의 효과가 프로파일 패턴의 변화를 일으키고 정점각의 위치도 변화할 것이며 특히 산란효과가 큰 시편에서 더 큰 변화가 예상된다.

환산 종파 및 표면파 속도 모두 절단면과 구리선 시편에서 거의 같은 값을 보여주는 것은 흥미로운 일이다. 파형과 프로파일의 유사성이다 측정 속도값의 일치하는 절단면의 반사를 이용하는 후방복사 평균법[11]이나 구석법[5]의 적용에서 수직 절단면의 사용이 어려운 시편에서도 인위적 표면위 결합의 부가로 같은 효과를 기대할수 있음을 보여준다. 파형이나 프로파일에서 절단면에 비해 상대적으로 산란효과가 더 큰 구리홈과 순수홈의 환산 속도값이 더 크게 나타났다. 이는 산란효과로 인해 왼쪽(더 적은 입사각 영역) 프로파일의 변화가 커지면서 정점각도 더 작은 각도(왼쪽)로 이동한 것으로 보이며 산란효과가 클수록 환산 속도값은 더 크게 나타날 것으로 예상된다. 유리/구리 경계면인 구리홈보다 유리/물 경계면인 순수홈에서의 반사계수가 더 크며 이는 더 큰 산란 에너지 및 산란효과를 의미하므로 순수홈 시편에서의 환산 속도값이 가장 크게 나타난 것을 설명해준다.

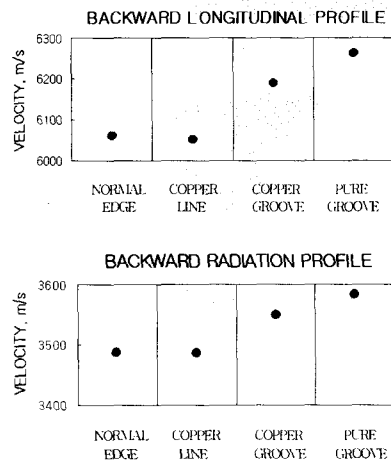


Fig. 6 (a) Longitudinal wave velocity by peak angle, (b) Rayleigh wave velocity by peak angle

#### 4. 결 론

과장에 비교될만한 표면 결함에서 측정된 후방산란의 입사각 의존성에서 제 1임계각 근처에서 종파의 산란과 관련된 새로운 후방종파 프로파일의 존재가 확인되었다. 후방복사 정점각에서의 파열 모양의 결함 유형에 따른 변화는 누수파와 산란파의 중첩으로 설명이 되었다. 후방복사 프로파일의 비대칭성은 표면파 및 횡파의 산란효과를 대변하며 특히 왼쪽 프로파일의 패턴은 이질결합의 공명효과에 영향을 받을 수 있었다. 정점각 측정으로부터 환산된 종파 및 표면파 속도값은 산란효과가 큰 표면 아래 결함들에서 더 크게 나타났으며 표면위 결함인 구리선과 수직 절단면의 유사성은 후방복사의 새로운 측정기법을 제시해준다. 본 연구는 후방복사 프로파일을 이용하여 결함의 유형을 구별해 보기 위한 최초의 시도로써 그 가능성을 보여주었으나 새롭게 확인된 후방종파의 응용에 대한 연구와 더 다양한 결함유형들에 대한 반복적이고 정밀한 실험을 통한 데이터 베이스 구축이 향후 과제로 남아 있다.

#### 후 기

본 연구는 1999년 안동대학교 기성회 학술연구조성비의 지원에 이루어진 것으로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 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] Sung-Jin Song, Hyeon Cho and Hak-Joon Kim, "Performance enhancement of intelligent ultrasonic flaw classification in weldments," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, edited by D. O. Thompson and D.E. Chimenti, Vol. 20A, pp. 803-810 (Plenum Press, New York, 2001)
- [3] 조운호, "유한 고체내 탄성동역학 문제의 모델링", 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 2, pp. 138-149 (2000)
- [4] 송성진, "초음파탐상시험 모델링과 그 응용", 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 2 pp. 150-161 (2000)
- [5] 권성덕, 윤석수, 송성진, 배동호, "후방복사된 초음파를 이용한 12Cr강 부식 피로특성 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 5, pp. 397-401 (2000)
- [6] S.D.Kwon, S.S.Yoon, H.D.Han and D.J.Yoon "The Effect of Interfacial Roughness Under Painting Layer on the Ultrasonic Backward Radiation", Proceedings of Fourth Far East Conference on Nondestructive Testing (FENDT'97) Edited by Un Su Park, Oh-Yang Kwon and Young H. Kim, pp. 529-537 (1997)
- [7] 박정만 "한 면만 유체와 접한 평판으로부터 초음파 펄스 빔의 반사", 새물리, Vol. 41, No. 1, pp. 88-92 (2000)
- [8] 최명선, 박재석, 김태권, 안윤국, 김진호, "음파 산란에 의해 여기된 탄성체의 공명 스펙트럼: 고유 공명 산란 이론의 실험적 검증", 새물리, Vol. 41, No. 2, pp. 116-122 (2000)
- [9] I.A.Viktorov, Rayleigh and Lamb waves, (Plenum Press, New York, 1967), pp. 43
- [10] 권성덕, 윤석수, 이승희, "주파수 의존성이 표면탄성파의 속도 결정에 미치는 영향", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 5, pp. 340-346 (1999)
- [11] 권성덕, 윤석수, 송성진, 이영제, "표면탄성파를 이용한 잔류응력의 평가", 비파괴검사학회 2001년도 춘계 학술발표회, pp. 320-326 (2001)