

초음파에 의한 필렛 용접힐부의 표면결함 검출능에 관한 연구 (A Study on the Surface Flaws Detection at Fillet Weld Hills by Ultrasonic Method)

박 익근*, 이 철구*, 양 봉근*, 이 의중**
서울산업대학교 비파괴평가기술연구소
** 한국비파괴검사(주)

1. 서언

지금까지 국내에 건설되어 거의 20-30년 가동되고 있는 발전설비, 석유화학 플랜트 등 거대설비·기기들의 안전성에 대한 우려가 높아지고 있으며, 이들 설비의 안전성 및 신뢰성 확보와 잔존수명예측을 위한 고감도, 고정도의 정량적비파괴진단·평가(Quantitative Non-destructive Evaluation;QNDE)기법의 확립이 현안 과제가 되고 있다. 특히, 각종구조물, 설비 및 기기의 Maintenance가 중요시되고 있고 이들의 결함검출의 정량화에 대한 검토가 강력히 요구되고 있다. 이 경우 비파괴검사에 의한 결함의 정량화는 중요한 역할을 하게 된다. 결함을 존재하고 있는 위치로부터 분류하면 표면결함(표면직하 결함도 포함) 및 내부결함으로 분류하는 것이 가능하다. 표면결함은 기계적성질에 미치는 훨씬 영향은 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서, 수명예측을 하는 경우도 표면결함의 검출 및 그 정량화가 중요하게 된다. 재료나 구조물의 표면 및 그 근방에 존재하는 결함은 기계적인 성질이나 강도에 미치는 영향이 크고 이들의 검출 및 평가는 매우 중요하다.

최근 표면SH(horizontally shear wave)파에 의한 표면 또는 표면직하 결함검출 기술 개발에 관한 연구가 급속도로 진전되고 있다.[1-5] 각종 건축구조물이나 저장용기 등의 필렛용접힐(Heel)의 루트(Root)부에서 발생하는 균열은 용접열영향부를 따라 탐상면측을 따라 45°~55° 경사로 발생하는 경우가 많다. KS B 0896(강용접부의 초음파탐상시험방법 및 시험결과의 등급분류방법)에 규정되어 있는 사각탐상법으로 탐상을 적용할 경우 필렛용접힐의 루트(Root)부에서 발생하는 표면

균열은 탐상불능 영역에 존재하거나 경사로 존재하기 때문에 균열로부터의 결함에코의 검출이 어려울 뿐만 아니라 보강대가 있는 경우 형상의 영향에 의한 방해에코(무결함의 경우에도 에코가 발생하여 잘못된 판정을 하는 것)가 발생하는 경우가 많아 결함평가에 많은 어려움이 되고 있다.

표면 및 표면직하 결함검출에는 자분탐상시험(MT), 침투탐상시험(PT) 또는 와전류탐상시험(ET)등이 주로 적용되어 오고 있다. 그러나, 이들 방법으로는 검사하고자 하는 시험체의 종류나 형상에 크게 제한을 받으며, 결함의 깊이, 위치 및 높이를 정량적으로 평가하는 것은 곤란하고, 특히, 시험체에 접근이 불가능한 경우에는 적용할 수 없다. 이에 대해 종래 주로 내부결함의 검출에 이용되어 온 초음파탐상시험이 표면결함의 검출에 적용하는 새로운 비파괴시험이 최근 시도되고 있다.

초음파에 의한 표면 및 그 근방의 결함검출을 검출하는 방법으로는 표면파(Rayleigh wave; 시험체 표면에 수직으로 진동하는 횡파와 약간의 종파성분이 공존하는 표면파), 크리핑파(creeping wave) 및 표면SH파가 유효한 것으로 기대되고 있다.

표면파는 시험체 표면에서 표면으로부터 1과장 정도의 깊이까지의 범위를 전파하기 때문에 주파수가 높은 경우는 음압이 표면근방에 집중하고 표면에 개구한 결함의 검출에 매우 유효하나 주파수가 낮은 경우에 표면 아래 수mm 정도까지 초음파가 전파하고 표면직하의 결함검출이 가능한 것으로 보고되고 있다. 그러나, 기본적으로 표면파는 탐상면상의 장애물이나 요철에 의한 감쇠가 크고 방해에코가 나타날 수 있기 때문에 표면상태의 영향을 받기 쉽고 필렛용접부등에서는 그 내부에 1과장 정도만 침투가 가능하여 많은

어려움을 가지고 있다.

크리핑파는 재료의 자유표면 방향으로 전파하는 종파를 사용하는 탐상법으로 크리핑파의 송·수신은 비교적 용이하지만 횡파에 의한 반사파도 동시에 전파하기 때문에 탐상도형이 복잡해져 결함에코의 해석이 어렵고, 결함에서는 에너지의 일부가 연속적으로 SV(vertically shear wave)파로 모드변환(mode conversion)하여 전파하기 때문에 감쇠가 현저해진다.

이상의 방법에 비해 표면SH파에 의한 탐상법은 음파의 진동방향이 탐상면과 평행하기 때문에 표면상황의 영향이 적고 다른 모드파가 동시에 존재하지않기 때문에 표면 및 표면근방의 결함검출 및 평가에 유효한 것으로 보고되고 있다. 표면SH파는 모드변환이나 음속변위가 없고 거리에 의한 감쇠도 비교적 적으나 시험체 내부로 입사가 곤란하기 때문에 적절한 접촉매질의 선정이 매우 중요한 과제로 부각되었다. 이제까지는 횡파용의 특별히 점도가 높은 접촉매질을 사용하여 주사성이나 작업성이 나쁘고 충분한 활용이 어려웠다. 그러나, 최근 작업성이 매우 뛰어난 접촉매질이 개발되어 현장에서의 적용도 가능하다고 보고되고 있으나 실용적인 레벨에서는 아직 해결되어야 할 과제가 많이 남아있다.

이상과 같이 표면SH파는 필렛용접힐의 루트(Root)부에서 발생하는 표면균열이나 경사로 존재하는 표면직하 균열결함 탐상에 사각탐상법을 적용할 경우 탐상불능 영역에 존재하거나 보강대가 있는 경우 형상의 영향에 의한 방해에코가 발생하는 경우에는 결함평가에 많은 어려움이 예상되나 표면SH파법을 적용하면 표면상태의 영향을 거의 받지않고 필렛용접힐의 루트(Root)부에서 발생하는 균열탐상에는 최적한 탐상법이라 예상된다. 앞으로 접촉매질이나 시험조건의 선정방법, 결함평가방법의 검토가 앞으로의 중요한 연구과제가 되고 있으며, 시험체 표면 또는 표면근방만이 아니고 필요에 따라서 입사각을 자유롭게 선택이 가능한 사각SH파법을 적용하면 내부결함의 검출능의 향상과 정량적평가에도 큰 기대가 예상된다.

본 연구에서는 표면SH파탐촉자에 의한 표면결함 검출의 검출능과 정량적평가의 유용

성을 실험적으로 검증하기 위해 표면SH파탐촉자의 지향성, 거리진폭특성등을 측정하고 시험체의 표면에 가공한 깊이가 다른 슬릿형결함, 경사슬릿형결함등의 거리진폭특성, 용접부 표면의 균열결함에 대해 표면SH파의 결함검출능을 조사하고 향후 초음파탐상시험에 의한 표면 및 표면부근의 비파괴검사 기준제시를 시도하고자 한다.

2. 표면SH파 탐상의 특징

일반적으로 사각탐상에 이용되고 있는 횡파의 진동은 진동모드의 차로 부터 SV파와 SH파로 나누어진다. Fig. 1과 Fig. 2는 SV파와 SH파의 전파양식을 나타내고 있다. Fig.2.1은 초음파 파형의 진동양식을 나타내고 있다. SV파는 시험체 표면에서는 전단력은 제로이기 때문에 전파방향이 표면을 따라가는 표면SV파는 존재하지 않는다. 이 때문에 SV파를 탐상에 사용할 수 있는 최대 굴절각은 5MHz의 경우는 약 80° 정도이다. 또, 종파의 임계각에서 SV파의 굴절각은 약 33°이다. 따라서, SV파에 의한 탐상가능 범위는 주파수 5MHz의 경우 굴절각 35°~80° 정도이다. SH파는 경계면의 영향을 받기 어렵기 때문에 필렛용접힐부까지 표면SH파의 입사가 가능하게 된다.

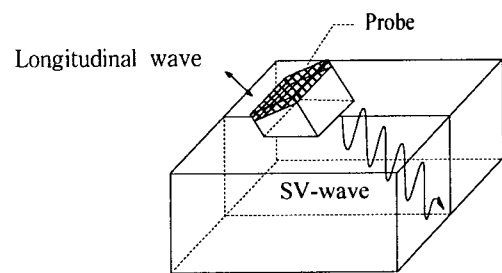


Fig. 1 Incidence of SV-wave

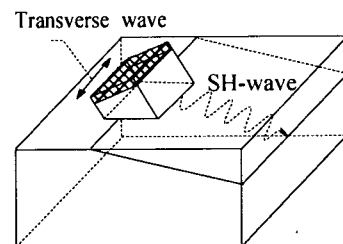


Fig. 2 Incidence of SH-wave

또, 균열로부터 반사의 경우는 종파성분이 없는 모드변환이 일어나기 때문에 탐상파형이

심플하여 해석이 용이하다. 한편, SH파는 Fig. 2와 같이 횡파를 직접 시험체중에 입사시키기 때문에 초음파의 입사에 주의할 필요가 있고 적절한 점도와 음향임피던스를 갖는 접촉매질의 사용이 요구되고 있다.

각종 건축구조물이나 저장용기등의 필렛용접철의 루트(Root)부에서 발생하는 균열은 Fig. 3과 같이 용접열영향부를 따라 탐상면적을 따라 45~55° 경사로 발생하는 경우가 많다. KS B 0896(강용접부의 초음파탐상시험방법 및 시험결과와 등급분류방법)에 규정되어 있는 사각탐상법으로 탐상을 적용할 경우 필렛용접철의 루트(Root)부에서 발생하는 표면균열은 탐상불능 영역에 존재하거나 결함이 경사로 존재하는 경우 균열로부터 결함에코의 검출이 어려울 뿐만 아니라 보강대가

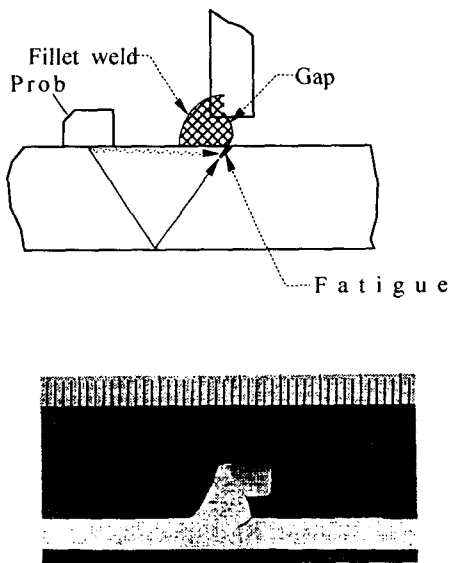


Fig. 3 Crack detection at heel of fillet weld

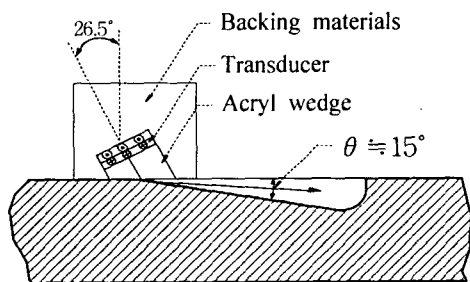


Fig. 4 Radiation pattern of surface SH-wave probe

있는 경우 형상의 영향에 의한 방해에코(무결함의 경우에도 에코가 발생하여 잘못된 판정을 하는 것)가 발생하여 결함평가에 많은 어려움이 예상된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에서 표면SH파에 의한 표면결함검출을 위해 구성된 펄스반사식 초음파계측시스템에는 A-Scan 초음파탐상기(디지털, USD-15) (KrautKramer)를 사용하였으며, 초음파 탐촉자는 Japan Probe(주)제의 표면SH파탐촉자 5C10×10SH-90 및 2Z10×10SH-90를 사용하였다. 초음파비파괴계측시스템의 신호흐름도는 탐촉자에 수신된 초음파 파형은 초음파 탐상기에 A-scan mode로 표시되고 이 수신된 초음파 신호는 컴퓨터와 RS 232C 방식으로 인터페이스 되어 실시간(real time) A-scan 표시되며, 아울러, 초음파 탐촉자에 수신된 초음파파형은 디지털스토리지 오실로스코프(Lecroy 9374M)에 RF-signal로 표시되고, GAGE(사)의 CS 2125 고속A/D 변환기에 의해 컴퓨터와 인터페이스되어 초음파파형의 실시간계측에 의해 스펙트럼해석, 음속이나 감쇠 등의 측정이 가능한 계측시스템을 구축하였다.

접촉매질은 시험체에 탐촉자의 접촉압력이나 접촉상태, 접촉매질의 점성이나 음향임피던스, 접촉매질층의 두께 및 온도등의 영향에 따라 표면SH파의 변환특성이 달라질 수 있기 때문에 접촉매질로 D에세틸렌(주)제의 소니코트SHN 10, 20, 30, 40, 50의 횡파전용 접촉매질을 사용하였다. 측정의 경우에는 무게 3kg의 Weight를 사용하여 에코를 안정화시키는 것으로 하였다.

본 실험에 사용한 시험편은 기본적인 장비의 교정을 위해 STB-A1, STB-A2 표준시험편과 슬릿(Slit)형시험편(재질 SB410), 경사슬릿(Slit)형시험편, SDH(Side Drill Hole)시험편, Sonaspection(주)의 주문제작으로 초음파탐상시험용의 T이음용접부의 용입불량 및 표면크랙 인공결함시험편을 사용하였다.

3.2 실험방법

표면SH파탐촉자의 입사점은 탐촉자의 중앙

눈금을 입사점으로 하였으며, 측정범위의 조정 방법은 STB-A1 표준시험편의 25mm면을 이용하여 측정범위를 조정하였다. 측정범위 조정 후 표면SH파 에코의 지향성을 측정하고, STB-A2 표준시험편의 $\phi 4 \times 4$ 를 이용한 거리진폭특성곡선과 개구형슬릿(Slit)결함 시험편 표면에 개구한 슬릿결함 깊이와 에코높이와의 관계를 실험한다. 슬릿결함은 기계가공에 의해 결함깊이(높이)는 2.0mm, 결함의 경사는 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 °이다. 용접부의 결함탐상은 탐상감도 조정은 STB-A2 표준시험편 $\phi 4 \times 4$ 의 탐촉자 선단거리를 40mm로 유지하고 이 사이에도 접촉매질을 도포하고 에코높이가 안정될 때까지 유지한 채 에코높이를 50%에 감도를 조정 한 후 + 6 dB 감도를 높이고 이것을 탐상감도로 한다.

용접부탐상은 Sonaspection(주)에서 제작한 맞대기이음용접부(Specimen Type :Plate)의 Toe Crack(3번결함)과 T이음용접부(Specimen Type :Tee)의 Root Crack(1번결함), 용입불량(Incomplete Root Penetration;2번결함)등의 UT 시험편을 사용하여 결함검출능을 조사하였다. 탐상방법은 전후, 좌우, 목돌림주사를 하면서 시험대상이 되는 루트부로부터 30~40 mm위 치에 탐촉자를 놓고 표시기의 빔진행거리가 30~40mm위치에 나타나는 결함에코높이가 50%를 넘는 것은 용입불량이라 판단하고 에코높이가 50% 이하이면 건전부로 판단한다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 주파수 5MHz 및 2MHz 표면SH파 탐촉자의 지향성 측정 결과를 나타내고 있다. 탐촉자 5C10×10A90-SH에서는 표면층의 지향성은 상당히 예리하고, 깊이 1mm, $\phi 1.5$ mm SDH(각도 약 88.08 °)에 최대에코가 얻어져 표면층의 음압이 가장 강한 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 정확한 표면음압의 확인은 불가능하다.

최고에코높이를 기준으로 - 6dB 한 SDH는 표면에서 깊이 약5.2mm(각도 약 80 °)였으며 최대에코높이에 - 6dB 빔폭을 적용하면 약 10 ° 이하의 지향각 범위를 가지고 있다. 깊이 4mm SDH(각도 약 82.34 °)로부터의 에코는 급격(6dB)하게 저하하였다.

탐촉자 2Z10×10A90-SH의 경우는 5Z5×

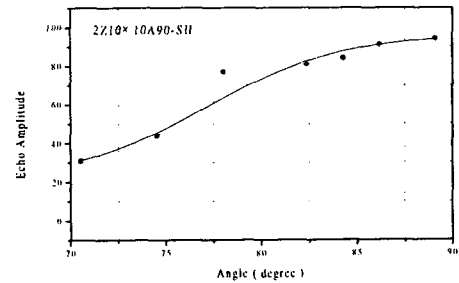
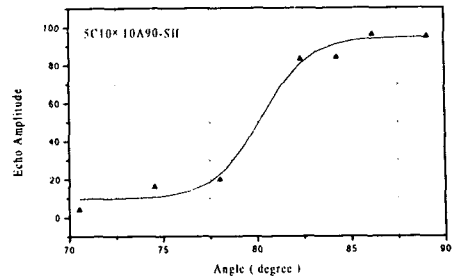


Fig. 4 Experimental results of directivity beam spread in 5MHz and 2MHz for surface SH Wave probes

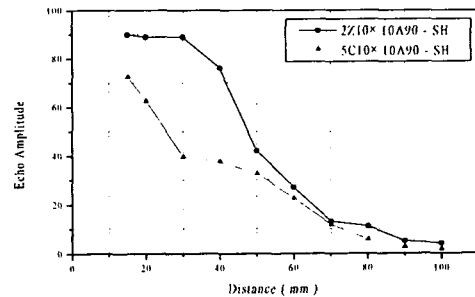


Fig. 5 Relationship between echo amplitude and distance (STB-A2 $\phi 4 \times 4$)

5A90-SH에 비해 비교적 넓은 지향각을 가지고 있기 때문에 깊이 10mm의 SDH의 경우 5Z5×5A90-SH에 비해 약 10dB정도의 감도차가 있었다. 최고에코높이를 기준으로 - 6dB 한 SDH는 표면에서 깊이 약7.7mm(각도 약 75 °)였으며 최대에코높이에 - 6dB 빔폭을 적용하면 약 15 ° 이하의 지향각 범위를 가지고 있다.

주파수 2MHz, 5MHz의 표면SH파탐촉자에
서 반사원을 STB-A2 $\phi 4 \times 4$ 로 한 경우의 탐
촉자거리와 에코높이의 관계를 Fig. 5에 나타
내고 있다. 2MHz와 5MHz의 탐촉자는 거리진
폭특성이 다르게 나타나고 있으며 거리
100mm 이상에서는 명확한 에코가 얻어지지않
았다.

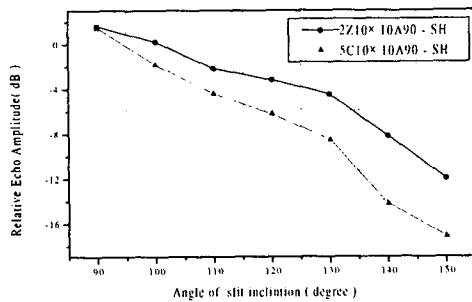


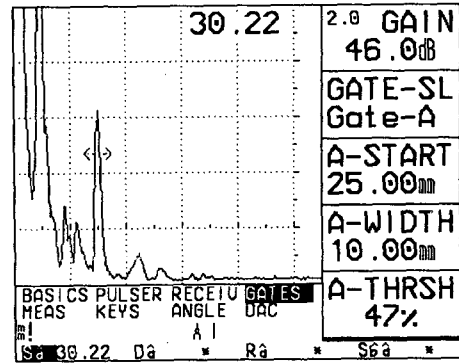
Fig. 6 Relationship between echo amplitude and oblique angle of slit using a surface SH wave probe

Fig. 6은 슬릿 반사면의 경사각과 에코높이
의 관계를 나타내고 있다. 슬릿결함은 기계
가공에 의한 결함깊이(높이)는 0.2mm, 0.5mm,
0.7mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 결함의 경사는
0, 10, 20, 30, 45, 60, 60, 70 °이다. SH파가
반사면에 대해 수직(90도)로 입사할수록 에코
높이는 높아진다. 반사면에서의 입사각이 90
도 근방보다 떨어질수록 에코높이는 작아진
다.

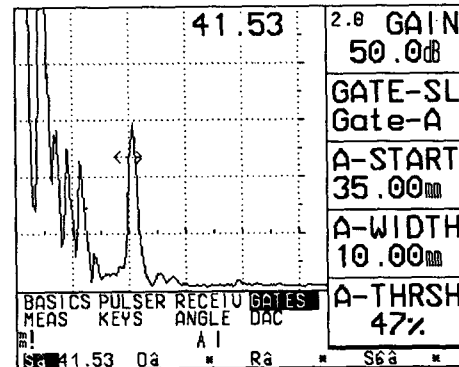
용접시험체에 존재하는 용입불량과 표면균
열을 탐촉자 2Z5x5A90SH를 사용하여 탐상한
결과를 Fig. 7에 나타내고 있다.

Fig. 7 (A)는 T이음 용접부에서 자주 발생할
수 있는 용입불량의 존재 유무를 검출한 결과
로 용입불량의 초음파신호는 명확히 식별이 가
능함을 나타내고 있다.

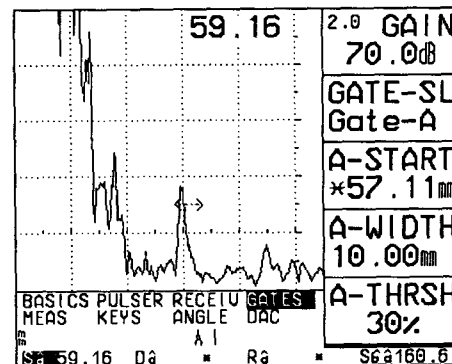
Fig. 7(B) Plate(Toe crack), (C) Tee(Toe crack)
는 일반 사각탐촉자(실측굴절각 77°)에 비해
4dB, 3.5dB 더 높은 탐상감도로 결함검출이 가
능하였으며, MT, PT등의 검사를 위해 접근이
불가능한 곳이라든가 사각탐상에 의한 검사시
존재하는 탐상불능영역에 상관없이 표면크랙검
출이 가능함을 알 수 있다.



(A) Tee(Incomplete root penetration)



(B) Plate (Toe crack)



(C) Tee(Toe crack)

Fig. 7 A-scan display for weld defect indication

5. 결론 및 향후 연구계획

초음파탐상시험에 의한 표면 및 표면근방
결함검사방법의 검사기준 제시를 위해 표면
SH파탐촉자에 의한 표면결함 검출의 검출능
과 정량적평가의 유용성을 실험적으로 검증

한 결과에 대한 1차 연구결과는 다음과 같다.

1) 탐촉자 5C10×10A90-SH는 2Z10×10A90-SH보다 표면층의 지향성은 예리하고, 깊이 1mm, ϕ 1.5mm SDH(각도 약 88.08°)에 최대에코가 얻어져 표면층의 음압이 가장 강한 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 정확한 표면 음압의 확인은 불가능하다. 최대에코높이를 기준으로 -6dB 한 SDH는 표면에서 깊이 약 5.2mm(각도 약 80°)였으며 최대에코높이에 -6dB 빔폭을 적용하면 약 10° 이하의 지향각 범위를 가지고 있다.

탐촉자 2Z10×10A90-SH의 경우는 5Z5×5A90-SH에 비해 비교적 넓은 지향각을 가지고 있기 때문에 최대에코높이를 기준으로 -6dB 한 SDH는 표면에서 깊이 약 7.7mm(각도 약 75°)였으며 최대에코높이에 -6dB 빔폭을 적용하면 약 15° 이하의 지향각 범위를 가지고 있다.

2) 경사슬릿결함의 탐상결과는 5Z5×5A90SH에서는 슬릿각 120°에서 20dB 저하하고 135° 이상의 경사에서 에코는 거의 얻어지지 않았다.

3) 용접시험체에 존재하는 용입불량과 표면균열을 탐촉자 2Z5×5A90SH를 사용하여 탐상한 결과를 T이음 용접부에서 자주 발생이 예상되는 용입불량(Incomplete root penetration)의 존재 여부를 매우 높은 탐상감도로 식별하는 것이 가능하였다.

Plate(Toe crack)와 Tee(Toe crack)는 일반 사각탐촉자(실측굴절각 77°)에 비해 4dB, 3.5dB 더 높은 탐상감도로 결함검출이 가능하였다.

이상의 표면SH파를 적용하면 MT, PT등의 비파괴검사를 위해 접근이 불가능한 곳이라든가 사각탐상에 의한 검사시의 탐상불능영역에 존재하는 표면크랙검출이 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) 横野泰和, 南康雄, 迎静雄, 加藤光昭, 西尾一政 : 表面下の穴陥の検出に關する基礎的檢討(第2報)一超音波探傷試驗に關する檢討一, 非破壊檢査, 39(11), pp937-943, 1990
- 2) 高橋雅和 : 表面およびその近傍を伝播する波に關する實驗的檢討, 非破壊檢査, 42(8), pp448-454, 1993
- 3) 戸田裕己 : 外山和男, 尖壁正樹, 中浦亨, 東材一弘, 福岡和 : 鐵道車兩用車軸のフレックテイク疲勞き裂の表面SH波による定量評價, 非破壊檢査, 40(3), pp 158-164, 1991
- 4) 横野秀和, 南康雄, 迎静雄, 加藤光昭, 西尾一政 : 表面SH波の特性と表面きずの検出に關する檢討, 平成5年度日本非破壊檢査協會春季大會講演概要, pp 101-102, 1993
- 5) 横野泰和, 南康雄, 迎静雄, 加藤光昭, 西尾一政 : 表面SH波による表面下きずの定量評價に關する檢討, 平成6年度日本非破壊檢査協會春季大會講演概要, pp 1-6, 1994
- 6) 横野泰和, 南康雄, 迎静雄, 加藤光昭, 西尾一政 : 廣帶域表面波探触子による表面きずの評價方法に關する檢討, 平成6年度日本非破壊檢査協會春季大會講演概要, pp 323-328, 1994
- 7) 高橋, 雅和, 勝美, 星野, 宏充 : 表面SH波及びSH波斜角探触子のエコーの指向性に關する實驗的檢討, 平成8年9月, pp 688, 1996