

Coarse Grain 소재용 초음파 변환기 개발

김 병 극* · 이 재 옥* · 이 세 경*

Development of New Ultrasonic Transducer for Coarse-Grained Materials

B. G. Kim, J. O. Lee and S. Lee

Abstract In materials with the large grain size, ultrasonic waves are highly attenuated by the grain boundary acting as scattering centers due to discontinuity of elastic constant. In this study, the improved probes were developed so that they minimized the effect of grain scattering in order to detect deep flaws in coarse grained materials. As the result, the developed ultrasonic transducers showed the better sensitivity and signal to noise ratio when compared with the commercial probes in testing the interior of coarse grained material.

1. 서 론

초음파를 이용한 비파괴시험 기술은 강재를 포함한 거의 모든 소재의 결함검출 및 재질평가등에 널리 이용되고 있는 기술로서 특히 방사선투과시험 등의 다른 기술로는 검사가 어려운 두꺼운 강재에 적용이 가능한 기술로 알려져 있다. 그러나 주조재와 같이 미세조직의 입도가 조대한 소재의 초음파 시험에 있어서는 탄성 및 음향 임피던스가 다른 결정립계(grain boundary)로부터의 초음파의 산란으로 인하여 신호 대 잡음 비(S/N 비)가 낮아지고, 초음파의 감쇠가 커짐으로서 신호의 검출 및 분석에 있어서 어려움을 보이고 있다.^{1,2)} 즉 범용 초음파 변환기들을 포함하여 조대입도의 소재(coarse grain material)의 검사용으로 보급되고 있는

기존의 초음파 변환기들을 사용하는 경우에도 주조재와 같은 초음파의 고산란, 고감쇠 소재의 결함 검출 또는 비파괴적인 재질평가에 있어서, 특히 두꺼운 소재의 깊은 부위에 있는 결함검출에, 취약점을 보이고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 조대입도 소재의 깊은 부위결함에 대한 탐지능력이 기존의 초음파 변환기에 비해 향상된 초음파변환기를 개발하여 성능을 비교 검토하였다.

2. 이론 및 실험 방법

2.1 결정립계의 산란을 최소화 하는 초음파 변환기의 설계 이론 및 원리

주조재와 같이 미세조직의 결정립이 큰 소재(coa-

* 한국표준연구소 비파괴시험연구실

* 1990년 1월 5일 접수

rse-grained materials)에 초음파가 전파될 때 탄성 계수의 불연속 경계인 결정립계(grain boundary)가 초음파의 산란중심으로 작용하게 되어 초음파가 산란 및 감쇠되는 에너지의 손실을 겪는다. 이때 손실된 에너지와 관계되는 손실계수 α 는 식(1)과 같이 결정립의 크기와 초음파의 파장 및 초음파의 종류에 의존한다.^{3,4)}

$$\alpha = \tilde{D}^3 f^4 S (\tilde{D} > \lambda) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 \tilde{D} 는 결정립도의 평균크기, f 는 초음파의 진동수, λ 는 초음파의 파장이다. 또한 S 는 탄성계수 합수로서 Papadakis의 계산에 의하면 Iron이 경우 종파의 대해 700 횡파의 대해 3260이다.^{5,6)}

이는 대개의 강재에 대한 초음파 시험에서와 같이 초음파의 파장이 결정립의 크기보다 클 때 에너지 손실계수는 진동수의 4승에 비례하고 평균결정립의 크기의 3승에 비례하며 횡파의 경우가 종파에 비하여 3.5 배 큼을 나타낸다. 따라서 이 식에 따르면 결정립계에 의한 산란 감쇠를 줄이기 위하여는 종파의 저진동수의 초음파가 요구된다고 하겠다.

초음파의 산란 감쇠와 더불어 고려되어야 할 인자가 S/N비이다. 종파의 초음파는 S/N비의 특성이 큰결정립 소재에 대해 횡파에 비하여 월등하다는 것이 실험적으로 잘 알려져 있다.²⁾ 또한 Fig. 1b의 단일형 초음파 변환기를 이용하는 경우에 비하여 Fig. 1a와 같은 분리형 초음파 변환기를 사용하는 경우가 유효 영역(탐지 감도가 큰 영역)이 송신 및 수신 초음파의 빔이 교차하는 영역에 제한되어 있어서 이 영역 밖의 결정립계로부터 산란된 초음파는 S/N비에 고려되는 잡음에 기여하지 않는다는 보고가 있다.⁶⁾

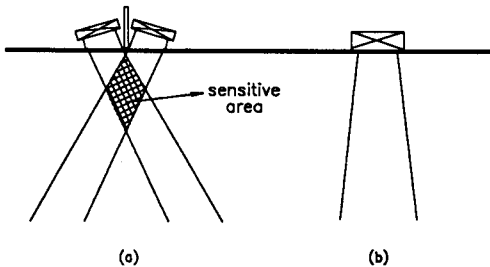


Fig. 1. Sound fields of (a) dual beam probe, (b) single beam probe.

따라서 초음파의 산란 및 감쇠가 심한 조대입도 소재를 검사하는데 있어서 S/N 비와 감도의 증대를 위해서는 초음파 변환기가 종파의 초음파를 이용하고, 가능한 낮은 진동수를 이용하여(검출능 고려) 분리형으로 설계되어야 함을 알 수 있다.

2.2 저진동수 분리형 초음파 변환기 설계 제작

미세조직의 입도가 조대한 소재에서 기존의 초음파 변환기는 특히 약 50mm 이상의 두꺼운 소재의 깊은 부위에 있는 결함검출에 취약점을 보이고 있다. 초음파는 긴 경로를 지나면서 감쇠가 심화되어 검출신호가 미약해지고 따라서 S/N 비가 크게 낮아지게 된다.

본 연구에서는 입도가 조대한 소재의 깊은 부위의 결함검출능력이 향상된 초음파 변환기의 개발을 위하여 Fig. 3과 같이 종파를 이용하는 중심주파수 531 KHz의 저진동수 분리형 초음파 변환기(KSRI-0.5 DTR)를 설계 제작하였다.(기존의 초음파 변환기는 0.5 MHz 단일형이 보급되고 있으며 분리형은 보급되고 있지 않다.)

Fig. 2는 KSRI-0.5DTR의 내부 구조를 보이고 있으며 Fig. 3a와 Fig. 3b는 제작된 KSRI-0.5DTR들의 사진이며 Fig. 3c와 Fig. 3d는 조대입도 소재용으로 상품화 되고 있는 외국 K사의 중심 진동수 0.5MHz의 단일형 초음파 변환기(KO.5S와 BO.5SL)의 사진이다. KSRI-0.5DTR은 표면으로부터 40mm이상 100mm의

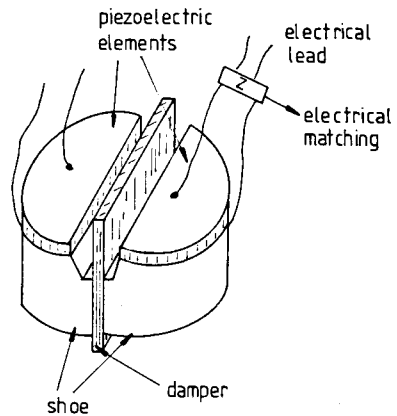


Fig. 2. Sketch of developed KSRI-0.5DTR

깊은 부위의 효과적인 검사를 위하여 초점거리가 약 55 mm 근처이도록 설계되었으며 압전소자는 E사의 직경 2"의 EC-65을 이등분하여 사용되었다. 또한 적정 인덕터와 저항을 사용하여 전기임피던스 matching을 하였고 damping을 조절하였다.

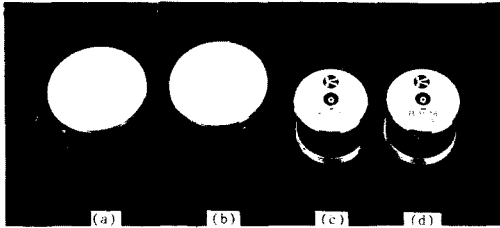


Fig. 3. (a) and (b) developed KSRI-0.5DTRs, (c) KO.5S of K Co., and (d) BO.5SL of K Co.

2.3 성능 평가 방법

제작된 KSRI-0.5DTR의 성능을 평가하기 위하여 결정립도가 큰 주조재 시편들을 제작 가공하여 사용하였다. Fig. 4a는 평균 결정립도가 약 150 μm인 망간강의 조직과 Fig. 4b는 평균 결정립도가 약 250 μm인 내열강의 조직을 각각 200배 확대한 사진이다. Fig. 5는 40 mm 깊이(반대쪽에서는 60 mm) 직경 10 mm, 5 mm, 2 mm, 1 mm의 관통형의 side drill hole이 방전 가공된 망간강 시편(MNA)과 내열강시편(HHA)의 도면이다.

제작된 KSRI-0.5DTR의 특성 평가를 위하여 초음파의 감쇠가 적은 강재에 대한 pulse-echo 시험에서 파형과 주파수 스펙트럼을 조사하였으며 위의 주조재

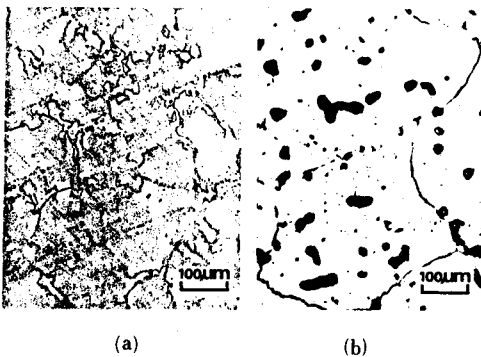


Fig. 4. Microstructure of specimens : (a) high manganese steel specimen(MNA) (b) heat resistant steel specimen(HHA).

시편의 각각의 인공 결함에 대한 pitch-catch 신호의 높이와 S/N비를 조사하였다. 이때 pulser-receiver는 Krautkramer-Branson USK7과 Panametrics ultrasonic analyzer 5052UA가 사용되었다. 또한 성능의 비교검토를 위하여 Fig. 3a와 Fig. 3b에 나타낸 K사의 0.5 MHz의 저진동수 초음파 변환기들 중 성능이 비교우위에 있는 KO.5S를 위의 주조재 시편들에 대하여 시험하였다.

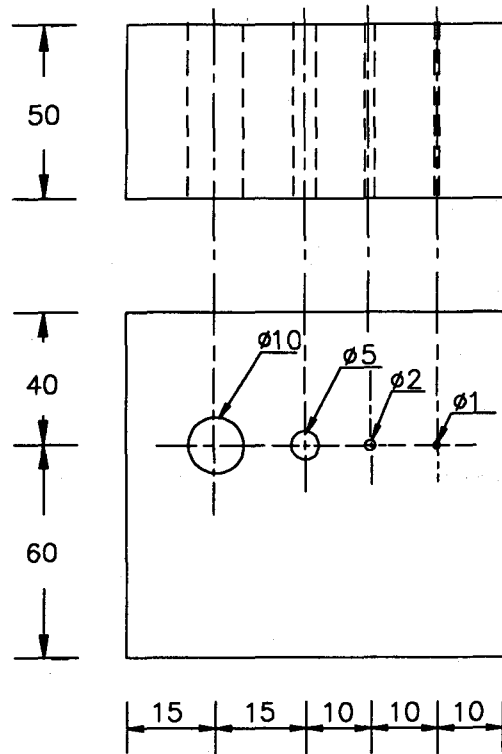
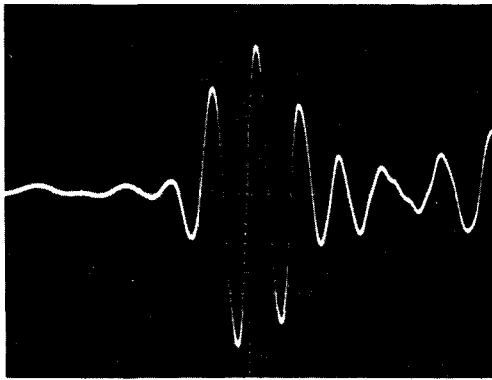


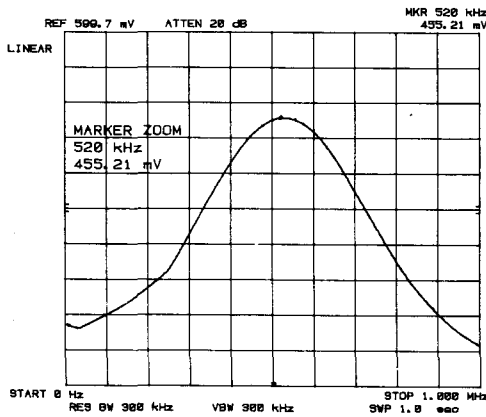
Fig. 5. Drawing of specimen.

3. 결과 및 논의

개발된 KSRI-0.5DTR은 120mm steel 시편에 대한 저면 echo의 파형을 조사한 결과 최대 peak의 25% 이상되는 peak의 수(ringing number)가 3개로서 비교적 damping이 잘되었으며 중심주파수가 531 KHz, 띠틈폭(band width)이 98%로 나타났다. Fig. 6은 조사된 파형과 주파수 스펙트럼을 보이고 있다.



(a)



(b)

Fig. 6. (a) Waveform and (b) frequency spectrum of the echo signal by KSRI-0.5DTR. (a) Hor. : 2 μ s/div

Fig. 7은 비교적 초음파의 산란 및 감쇠가 덜한 MNA 시편에서 40 mm 깊이에 여러 인공 결함들에 대하여 KSRI-0.5DTR과 KO.5S를 사용하여 조사한 echo 신호의 상대적인 크기를 나타낸 것이며 Fig. 8은 MNA 시편의 60 mm 깊이의 결함에 대한 것이다. 또한 Fig. 9는 초음파의 산란 및 감쇠가 심한 HHA 시편의 40 mm 깊이의 결함에 대하여 시험한 결과이며 Fig. 10은 HHA 시편의 60 mm 깊이의 결함에 대한 시험 결과이다.

Fig. 7의 MNA 시편의 40 mm 깊이의 결함에 대한 시험결과는 결함크기에 따라 최대 7 dB에서 최소 3 dB로 차이로 KSRI-0.5DTR이 KO.5S에 비하여 수신감도가

좋은 것을 나타내고 있다. 또한 Fig. 8의 MNA 시편의 60 mm 깊이의 결함에 대한 시험결과는 결함크기에 따라 최대 9 dB에서 최소 5 dB로 차이로 KSRI-0.5 DTR이 KO.5S에 비하여 수신감도가 좋은 것을 나타내고 있다. Fig. 7와 Fig. 8의 시험결과를 상호비교 할 때 40 mm 깊이의 결함에 대한 수신감도의 차이에 비하여 60 mm 깊이에 대한 감도의 차이가 더 큰 것을 알 수 있는데 이는 개발된 KSRI-0.5DTR가 설계상의 초점거리 56 mm의 근처에서 결함탐지능력이 커지고 있음을 나타내는 것이다.

고 산란, 고 감쇠 소재인 HHA 시편에 대한 시험 결과도 MNA 시편에 대한 시험결과와 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 9에 나타난 40 mm 결함에 대한 실험결과는 최대 13 dB에서 최소 4 dB로 차이로 KSRI-0.5DTR이 KO.5S에 비하여 수신감도가 좋으며 ϕ 1 mm의 결함에 대한 탐지능이 특히 우수함을 나타내고 있다. Fig. 10에 나타난 60 mm 결함에 대한 실험 결과는 최대 15 dB에서 최소 6 dB의 차이로 KSRI-0.5DTR이 KO.5S에 비하여 수신감도가 우수하며 역시 ϕ 1 mm의 결함에 대한 감도차가 특히 크게 나타나고 있음을 보이고 있다.

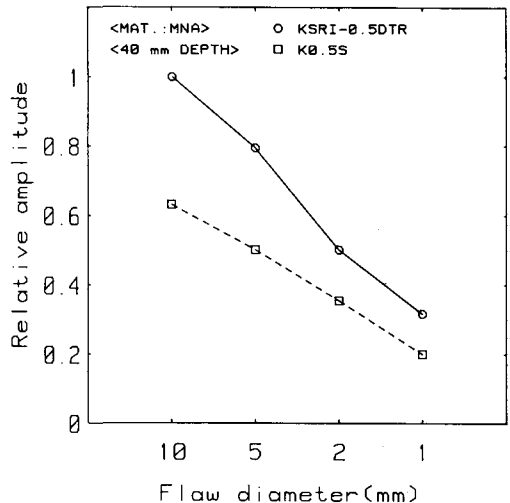


Fig. 7. Relative echo amplitude of the KSRI-0.5DTR and the KO.5S for the cylindrical side drill holes of several size at 40 mm depth in the MNA specimen.

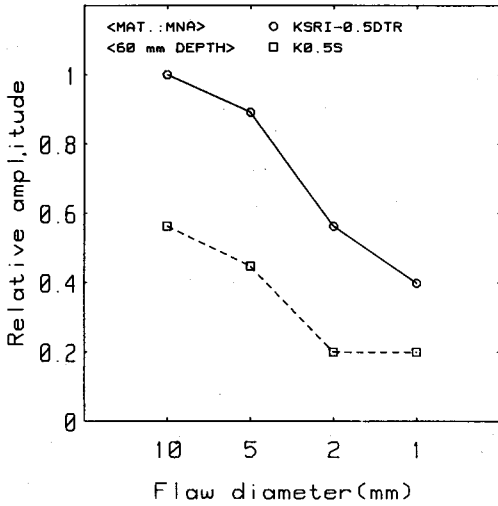


Fig. 8. Relative echo amplitude of the KSRI-0.5DTR and the KO.5S for the cylindrical side drill holes of several size at 60 mm depth in the MNA specimen.

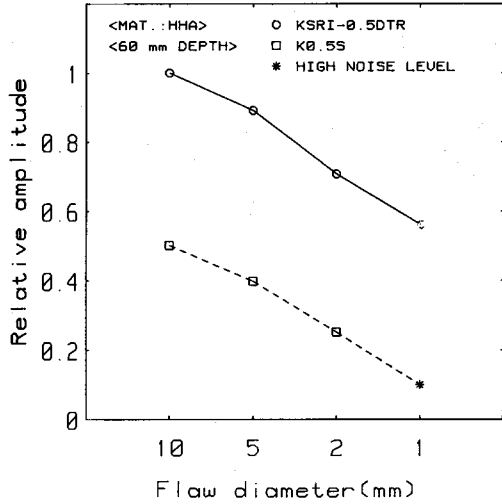


Fig. 10. Relative echo amplitude of the KSRI-0.5DTR and the KO.5S for the cylindrical side drill holes of several size at 60 mm depth in the HHA specimen.

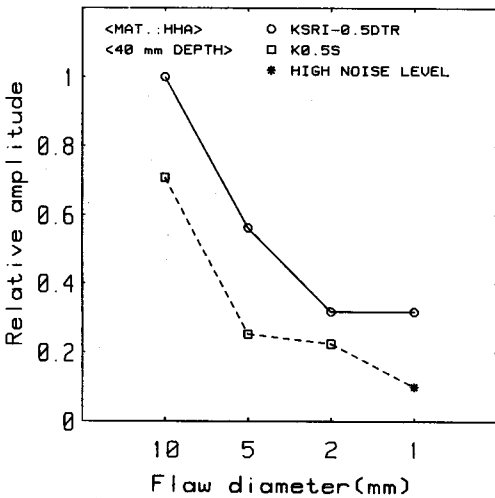
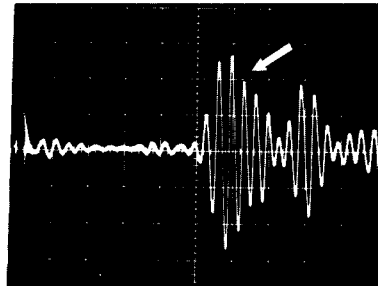


Fig. 9. Relative echo amplitude of the KSRI-0.5DTR and the KO.5S for the cylindrical side drill holes of several size at 40 mm depth in the HHA specimen.

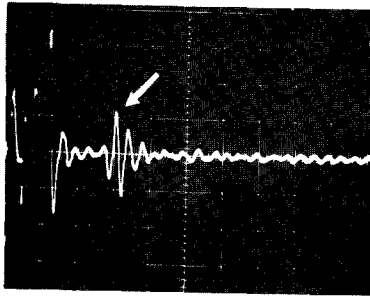
Fig. 11a와 Fig. 11b는 HHA 시편의 40mm 깊이의 $\phi 10$ mm 결함에 대한 KSRI-0.5DTR과 KO.5S를 각각 시험한 결과로서 KSRI-0.5DTR의 echo' 신호의 크기가

7dB 정도 큼을 보이고 있으며 주신호(main bang)의 길이가 KO.5S를 사용한 경우 매우 길어서 표면근처의 결함 검출이 불가능한데 반하여 KSRI-0.5DTR은 검출 영역에 걸치지 않아 표면 가까운 결함 탐지에 용이하게 사용될 수 있음을 나타낸다.

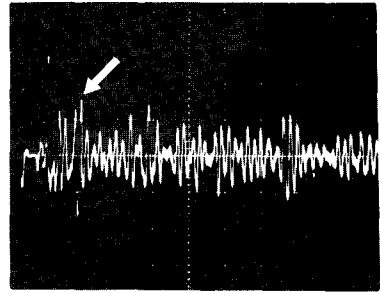
Fig. 12a는 위에서 기술한 HHA 시편의 40 mm 깊이의 $\phi 1$ mm 결함에 대한 KO.5S를 사용하여 시험한 oscillogram으로 잡음 신호의 크기가 결함으로 신호의 70%가 되어 신호해석이 어려우나 KSRI-0.5DTR을 사용한 경우는 Fig. 12b에 보이는 바와 같이 잡음 신호가 거의 보이지 않는다. 이는 KSRI-0.5DTR이 KO.5S에 비하여 S/N 비가 크게 개선되었음을 나타낸다.



(a)



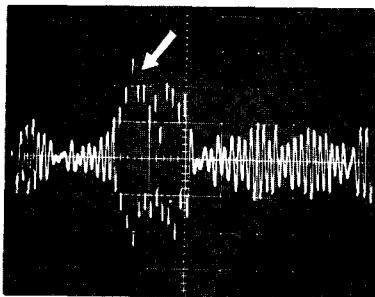
(b)



(b)

Fig. 11. Oscillograms of echo responses tested using (a) the KSRI-0.5DTR and (b) the KO.5S for the cylindrical side drill holes with 10mm diameter at 40mm depth in the MNA specimen.

Fig. 12. Oscillograms of echo responses accompanied by noise signal tested using (a) the KSRI-0.5DTR and (b) the KO.5S for the cylindrical side drill holes of 1mm diameter at 40mm depth in the MNA specimen.



(a)

비교우위에 있는 중심주파수 0.5MHz의 단일형 초음파 변환기와 성능을 비교하였다.

그 결과 조대 입도를 가진 초음파의 고산란, 고감쇠 소재를 검사하는데 있어서 개발된 초음파 변환기가 감도 및 S/N 비 특성 즉 결함 검출 능력이 기존의 초음파 변환기에 비하여 크게 개선되었음을 확인하였다.

4. 논의 및 결론

본 연구에서는 미세조직의 입도가 조대하여 초음파의 산란 및 감쇠가 심한 소재에서 S/N 비 및 감도 특성의 향상을 위한 초음파 변환기의 설계 원리를 고찰하여 종파의 초음파를 이용하고 가능한 낮은 진동수를 이용하되 결함 검출능을 고려하여서 분리형으로 설계되어야 한다는 결론을 얻었다. 이에 따라서 초음파를 이용한 비파괴 시험에 있어서 특히 취약한 부분인 조대 입도 소재의 깊은 부위 검사를 위한 종파를 이용하는 중심주파수 531KHz의 저진동수 분리형 초음파 변환기를 제작하고 기존의 초음파 변화기 중 성능이

References

1. R. T. Beyer and S. V. Letcher, Academic press, New York and London, Vol. 32, 242-243, (1969).
2. K. Sharman, A. K. Govil, Ind. J. Tech. Vol. 18, 197-202(1980).
3. R. T. Smith, R. W. B. Stephens, Appl. Mat. Res, Vol. 5, 41(1964).
4. H. B. Huntigton, J. Acous, Soc. Am, Vol. 22, 362 (1950).
5. E. P. Papadakis, J. of Applied Physics, Vol. 34, No. 2, 265-269, Feb. (1963).
6. E. P. Papadakis, J. of Applied Physics, Vol. 35, No. 2, 1474-1482, May (1965).