

음향횡파를 이용한 고체내부의 영상검출 개선에 관한 연구

正會員 文 建*

A Study on the Improvement of Image Detection in the Solid-subsurface Using the Acoustic Shear Wave

Gun MOON* *Regular Member*

要 約 본 연구에서는 음향파의 입사각을 횡파임계각도 이상으로 하여 횡파를 발생시키고 이를 이용하여 종래방식보다 고체내부에 존재하는 미소결함의 검출한계를 개선시키는 방법을 연구분석하였다. 실험을 위하여 중심주파수 3MHz인 반사형 음향현미경 시스템을 구성하였고 서로 다른 깊이에 임의의 결함을 갖는 시료를 제작하였으며 defocus 깊이를 변화시키면서 실험하였다. 실험결과 고체내부 Rayleigh파장의 3배정도 깊이에 존재하는 1mm 크기의 결함을 검출할 수 있었다.

ABSTRACT On this study, I studied and analysed the method improving the detectable depth of the very small defect in solid-subsurface using the shear wave. The acoustic shear wave could be generated by the transducer of which incident angle is wider than shear wave critical angle. For this experiment, I constituted the acoustic reflect microscope system of which center frequency is 3 Mhz, and detected the defects existing different depths in the sample using the method varrying the defocus depth. In the experiment results, the 1mm small defects which existed in three times depth of Rayleigh wave length could be detected.

I. 서 론

1936년 소련의 Sokolov는 음향파에 의한 영상 처리의 가능성을 제시하였으며 2차 세계 대전시 SONAR의 개발 이후 음향 영상처리 분야에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1),2)} 특히 미국의 Zenith Radio사와 Stanford대학에서는 음향파를 집속시켜 음향강도를 증가시킬 수 있는 음향 렌즈를 제작하였고 이를 이용한 음향현미경 시스템(Scanning acoustic microscope system)을 개발하였다.³⁾ 그러나 이 시스템은 주로 표면의 영상처리에 중점을 두었기 때문에 고체의 내부깊

은 곳에 대한 영상처리에는 부적합하였다. 그 이유는 분해능을 향상시키기 위해 동작주파수를 높이면 주파수의 자승에 비례하는 음향감쇠가 매우 증가하고 빔폭을 작게하기 위하여 개구면 각을 크게하면 Snell의 법칙에 의하여 역시 침투깊이는 매우 제한되기 때문이다.^{4),5)} 그러므로 본 연구에서는 분해능과 결함 검출한계를 향상시킬 수 있는 방법을 연구하였다. 종파보다 더 깊은 곳에 초점을 형성시키는 횡파를 여기시키고 이를 이용하여 영상처리 한후 종래의 방법으로 얻어진 영상과 비교분석 하였다.

* 濟州大學校 通信工學科
National CHEJU University Telecommunication Dept.
論文番號 : 91 - 117 (接受1991. 5. 22)

II. 고체내부 결함검출 한계

2.1 종파에 의한 검출 한계

음향렌즈의 기하학적 구조와 광학이론으로 종파와 횡파의 고체내부의 초점 깊이를 산출하여 이 결과를 실험으로 검출한계 및 가능깊이를 밝혀보기로 한다. 실험에 사용한 음향렌즈의 개구면 반치각은 30도 이므로 최대 defocus 가능한 깊이는 다음과 같이 구할 수 있다.⁶⁾

$$\begin{aligned} \text{Maximum defocusable depth : } Of \\ = 16 \times \cos 30^\circ = 13.3(\text{mm}) \end{aligned}$$

여기서 실험에 사용한 결합용액 물의 종파속도 (V_0)는 1.5(km/s)이고 알미늄 시료에서 종파속도 (V_L)은 6.42(km/s)이므로 Snell 법칙을 이용하여 알미늄에서의 종파 임계각(θ_c)을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_c &= \sin^{-1}(\sin 90^\circ \times V_0 / V_L) = \sin^{-1}(0.2336) \\ &= 13.5^\circ \end{aligned}$$

그러므로 음향렌즈에서 종파의 발생범위는 중심에서 양쪽으로 각각 13.5°범위로 한정된다. 종파 발생 유효각 범위내에서 입사각을 등분한점에서의 입사각이 $\theta = 6.75^\circ$ 인 경우 고체내부의 종파의 초점깊이와 굴절각은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{0.1} &= \sin^{-1}(\sin \theta \times V_L / V_0) \\ &= \sin^{-1}(6.42 / 1.5 \times \sin 6.75^\circ) = 30.3^\circ \end{aligned}$$

그림 1에서 선분 OC를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} OC &= (\tan 6.75^\circ) \times of = 0.7111 \times 13.8 \\ &= 1.62(\text{mm}) \end{aligned}$$

그러므로, 초점거리 $f_1(\cos 30.3^\circ)$ OC=2.77(mm)가 된다. 마찬가지로 방법으로 1/4 입사각이

$\theta = 3.4^\circ$ 인 경우 초점깊이(f_2)를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_2' &= \cot \{ \sin^{-1}(V_L / V_0 \times \sin \theta_1) \\ &\quad \times (\tan \theta_1) \times Of \} \\ &= (\cot 14.7^\circ) \times (\tan 3.4^\circ) \times 13.8 \\ &= 3.12(\text{mm}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 f' 를 구하는 일반식은 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} f' &= \tan(\theta_1) \times DF / \{ \tan(\arctan(V_L / V_0 \\ &\quad \times \sin(\theta_1)) / \text{SQR}(1 - (V_L / V_0 \times \sin(\theta_1))^2) \} \end{aligned} \quad (2)$$

그림 1의 중앙은 (2)식을 시뮬레이션하여 얻은 것으로 고체내의 종파 초점깊이를 밝힐 수 있다. 종파의 최대 초점깊이는 defocus를 13.8(mm)로 하였을 때에 최대로되며 (2)식을 이용하여 계산 결과 3.25(mm)가 된다. 그러나 실제로는 이 깊이까지는 검출이 되지 않는 것은 defocus깊이를 증가 시키면 내부결함 반사신호의 S/N비가 떨어지기 때문이다. 최대 검출 가능깊이는 실험에 의해 defocus 5.5(mm) 경우에 1.28(mm)가 된다. 알미늄의 Rayleigh 파장은 $\lambda_R = 0.97(\text{mm})$ 이므로 위 결과를 환산하면 다음과 같다.

$$f' = 1.28 / 0.97 = 1.32(\lambda_R)$$

이 깊이는 Atalar가 종파 렌즈를 이용하여 검출한 최대 검출 깊이 1.5배 비하여 다소 떨어지는 값이나 실제 실험에서 결함검출하여 본 결과로는 초점 밑의 결함영상도 검출되었으며 이 깊이는 초점깊이의 약 10%-15%정도가 됨을 알 수 있었다. 이 결과는 Atalar에 의해 발표한 최대 검출 깊이인 Rayleigh파의 1.5배 검출 깊이가 본 연구의 종파의 초점 깊이와 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 1은 defocus를 최대인 13.8(mm)로 한 경우의 알루미늄 내부의 종파와 횡파의 분포와 침투깊이를 시뮬레이션한 결과이다(중앙부분). 그림에서 보는 것과 같이 초점부근에 에너지가 집중되고 있음을 확인할 수 있다.

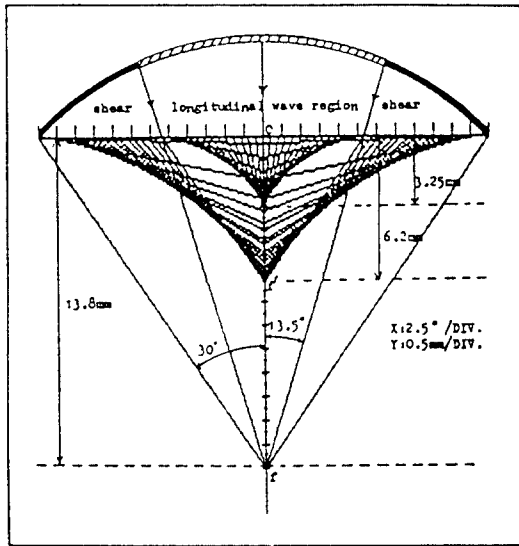


그림 1. 종파와 횡파의 에너지 분포와 침투깊이.
Fig 1. Energy distribution and penetration depth of longitudinal and shear wave.

2.2 횡파에 의한 검출 한계

앞서 Atalar는 주로 종파에 의한 내부결함영상 검출로 검출 가능깊이를 정하였으나 본 연구에서는 렌즈의 범위를 종파와 횡파를 동시에 발생시킬 수 있도록 개구면 각을 넓게 설계하였으며 횡파의 속도가 종파보다 느리므로 분해능이 향상되고 고체 내부 결함검출 한계가 개선됨을 입증하고자 한다. 그림 1은 음향렌즈의 최대 defocus 깊이(13.8mm)에서 종파와 횡파의 초점깊이를 동시에 나타낸 것이다. 그림에서 렌즈의 검은 부분이 횡파를 발생시키는 유효 각(13.5°~29.6°)이 된다.

여가서 알루미늄의 횡파속도 $V_s=3.04(\text{km/s})$ 가 되므로 횡파의 임계각을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_{sc} &= \sin^{-1}(V_o/V_s) = \sin^{-1}(1.5/3.04) \\ &= \sin^{-1}(0.4934) = 29.6^\circ \end{aligned}$$

횡파 발생 범위는 13.5°(종파 임계각)~29.6°(횡파 임계각)이므로 최대 초점깊이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_s &= \sin^{-1}(\sin 13.5^\circ) \times 3.04/1.5 \\ &= \sin^{-1}(0.2334 \times 2.66) \\ &= \sin^{-1}(0.4730) = 28.2^\circ \end{aligned}$$

윗식을 이용하여 횡파에서의 초점깊이를 구하는 식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} f' &= \tan(\theta_i) \times DF / \tan(\arctan(V_s/V_o \\ &\quad \times \sin(\theta_i) / \text{SQR}(1-V_s/V_o \times \sin(\theta_i)^2))) \end{aligned} \quad (3)$$

최대 초점깊이는 defocus 깊이(DF)가 13.8(mm)인 경우에 6.2(mm)가 되며 이 깊이를 Rayleigh 파장으로 환산하면 6.4(λ_R)가 된다. 이것을 횡파의 검출한계로 정의할 수 있으나 실제로 내부 결함검출은 최대 defocus 깊이(DF=13.8mm)에서는 S/N비의 저하로 결함검출이 어려우므로 결함검출 가능한 S/N 비가 되는 defocus 깊이 이내에서 이루어지고 있다.

DF=5.5mm에서의 횡파의 초점깊이는 다음과 같이 된다.

$$f'(DF=5.5\text{mm})=2.5(\text{mm})=2.5/0.97=2.6(\lambda_R)$$

여기서 본 음향렌즈의 검출한계 깊이는 Rayleigh 파장의 6.4배까지이나 실제 검출가능 깊이는 횡파의 초점깊이로는 Rayleigh 파장의 6배(DF=5.5mm)가 됨을 알 수 있었다.

그림 1은 변환자의 구조와 입사각(13.5°~29.6°)에 따른 알루미늄시료의 내부에서 종파와 횡파의 에너지 분포를 동시에 시뮬레이션한 결과로써

에너지 밀도가 초점 부근으로 집중이 되며 깊이도 종파보다 횡파가 훨씬 깊이 침투되어 있음을 보여주고 있다. 에너지의 80% 이상이 침투깊이의 반을 넘어서 초점 부근에 집중되고 있음을 확인할 수 있다.

불과 알루미늄을 사용한 경우 입사 음향 세력을 기준으로하여 입사각에 따라서 종파의 변환효율은 25% 정도이고 횡파의 변환효율은 40% 정도가 되므로 횡파가 고체내부 결함검출에 종파보다 더 큰 세력으로 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.

8), 9), 10)

이와 같이 여러가지 시뮬레이션과 이론식을 고찰할 때 음향 현미경에 의한 내부 결함검출 가능 깊이는 종파보다 횡파쪽이 더 크며 이 횡파를 이용하면 내부 결함영상의 검출 한계도 향상시킬 수 있고 낮은 S/N비에서도 결함검출을 가능케 한다.

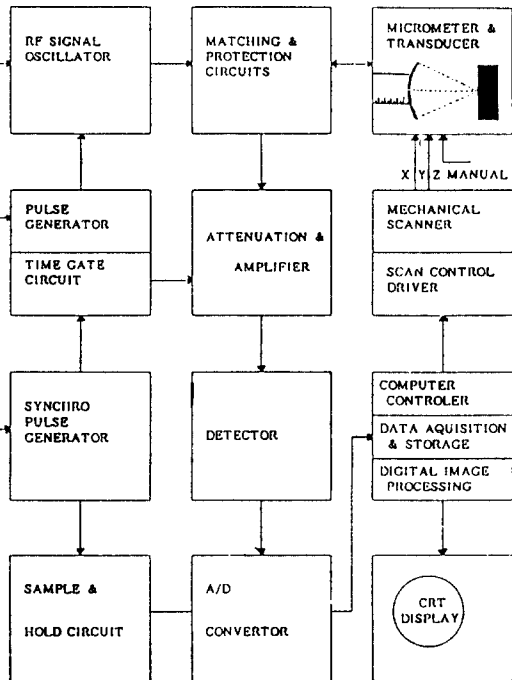


그림 2. 시스템 구성도
Fig 2. System block diagram.

III. 실험 및 고찰

3.1 시스템 구성

본 연구를 위하여 구성된 반사형 음향현미경 영상처리 시스템 구성도는 그림 2와 같다. 주요 구성 요소는 (1)신호발생장치 (2)음향변환자 및 수조 (3)데이터 Acquisition (4)반사신호 수신장치 (5)음향영상처리장치 (6)주사장치(scanner)로 되어 있다.

먼저 음향변환자에 time-gate 회로에서 RF 신호를 인가하여 피에조 효과에 의한 음향파를 발생시키고 time gate 회로에서 1차 반사신호만을 검출하고 검파기에서 포락선 검파한 후 A/D 변환하여 영상처리 한다.

사진 1(a)는 음향변환자에 의해 여기된 신호와 1,2차 반사신호를 보여주고 있으며 (b)펄스파형은 1차 반사신호파만을 검출하기 위한 Time gate 펄스파형이고 (c)신호는 1차 반사신호만이 검출된 출력파형을 보여주고 있으며 (d)파형은 2차 반사신호파를 포락선 검파한 출력파형이며 이파를 A/D 변환하여 영상처리하면 음향영상을 얻게된다.

3.2 1차 반사신호 검출

중심주파수 3MHZ에서 제작된 음향변환자는 기본주파수 외에 기수배의 고조파에서도 동작가능하다. 실험에서는 기본주파수 $f_1=2.907(Mhz)$ 이고 제3고조파 주파수 $f_3=10.224(Mhz)$ 이다.

사진 1은 변환자에 Tone burst 신호를 인가하고 초점거리에 반사체를 두었을때 반사되어오는 신호를 검출하여 time-gated 한후 포락선 검파한 파형을 보여준다.

3.3 내부 결함검출

먼저 Altar가 발표한 검출 깊이의 개선 방법을 요약하면 다음과 같다.

(1) 렌즈의 개구면 각을 종파 임계각 부근으로 한다.

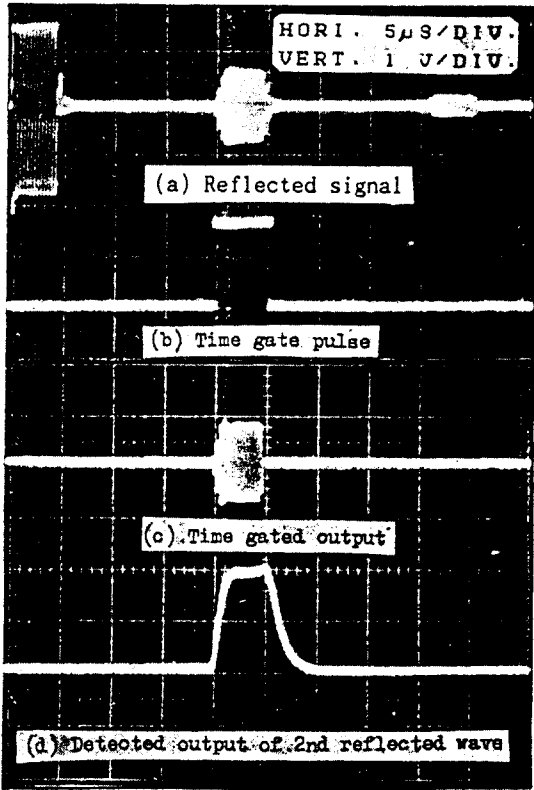


사진 1. 1차 반사신호와 검출파형
1st reflected signal and detected wave.

- (2) pulse time gating 방식으로 1차 반사신호를 검출하여 S/N비를 개선한다.
- (3) 결합 용액의 음향 임피던스가 높은 것을 사용하여 음향감소를 줄인다.
- (4) 저주파수를 사용한다.¹¹⁾

본 연구에서는 Atalar가 시도한 위의 (2)와

- (4)항은 그대로 채택하였고 그외에 새롭게 시도된 방식은 다음과 같다.
- (1) 렌즈의 개구면 각을 종파와 횡파가 동시에 발생할 수 있도록 크게하여 제작하였다.
- (2) 검파 신호와 Sampling pulse의 overlap은 검파신호와의 중심점에서 조금 벗어난 하강되는 부분에 맞추었다. 이것은 표면 반사파보다는 내부영상 반사파에 맞추어서 S/N비가 개선되는 효과를 준다.
- (3) 디지털신호 영상처리 과정에서 반사신호 전

압 분포도를 분석하여 내부영상 신호전압 구간을 선별 처리하므로 해상도의 개선을 가져왔다.

이상과 같이 새로운 실험방법을 통하여 Atalar에 의해 검출한 Rayleigh 파장의 1.5배보다 두배나 개선된 Rayleigh 파장의 3배 깊이까지 검출하는 성과를 얻었다.

사진 2는 원형 알미늄 내부에 깊이를 틀린 위치에 결함을 만들은 시료로써 표면에서 보았을 때 윗쪽부분의 결함 위치는 표면에서 가까운 곳에 결함이 있고 아래쪽에 갈수록 깊은곳에 결함이 있다. 결함의 깊이는 0mm ~ 3mm로 골고루 분포된 것이다. 사진 2(a)는 defocus 0.5mm로 한 경우의 결함영상을 검출한 것이며 이때에 1mm 깊이에 있는 결함까지 검출되고 있는 사진 2(b)는 defocus 5.0mm로 한 경우로써 3mm 깊이에 있는 결함까지 검출되고 있음을 보여 주고 있다.

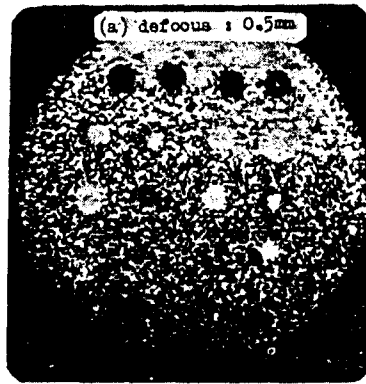
사진 2(c)와 (d)는 동전과 IC 내부를 비파괴로 내부 영상을 검출한 것으로 (c)는 100원 동전의 앞면을 grinding하여 표면을 매끄럽게 한후 음향파를 주사하여 반대면의 "100"이라는 숫자를 검출하여 영상화한 것이며, (d)는 1.5mm 깊이에 존재하는 IC 내부의 영상을 비파괴 검출한 것으로 분해능이 횡파의 한파장 정도로 매우 우수하며 높은 주파수를 사용하면 파장이 짧아지므로 분해능이 더욱 향상될 수 있다.

IV. 결 론

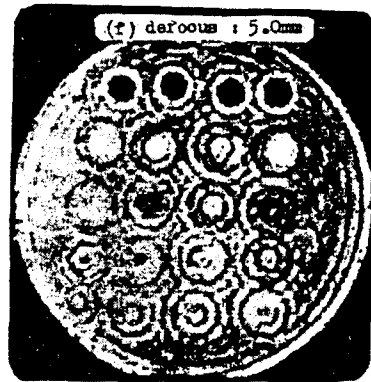
본 연구에서는 중심 주파수 3MHZ인 구면형 음향렌즈를 설계하여 반사형 음향현미경 시스템을 구성하였고 이 시스템을 이용하여 지금까지 발표된 내부결함 검출한계보다 더 깊은 곳의 결함을 검출하기 위한 새로운 방식을 연구하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 내부 결함 검출깊이를 향상시키기 위한 본 연구에서 실험 방법 및 결과

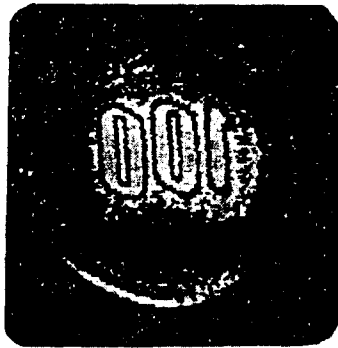
1) defocus 깊이를 결함검출 가능한 최저



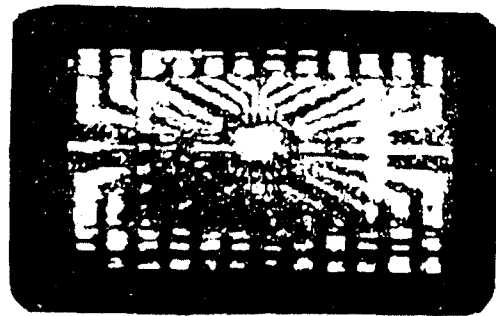
(a) 알미늄 내부영상(defocus = 0.5mm)



(b) 알미늄 내부영상(defocus=5.0mm)



(c) 동전 뒷면 음향영상



(d) IC 내부의 비파괴 음향영상

사진 2. 고체내부의 비파괴 영상
Non destructive detection images in solid interior.

- S/N비가 될 때까지 깊게하여 검출한다.
(재료에 따라 4~6mm)
- 2) 음향렌즈의 개구면 각을 횡파를 발생시킬 수 있도록 크게 한다.
 - 3) 음향 반사신호를 검파한 신호와 A/D 변환을 위한 sampling 펄스의 위치를 검파 신호의 최대치보다 조금 지연된 하강부에 일치시키므로 내부 영상신호 부분을 강조하여 S/N비 개선 효과를 얻었다.
 - 4) 영상 데이터는 검출깊이의 영상부분을 영상처리하여 콘트라스트를 높여 검출깊이를 판독한다.
 - 5) 지금까지 발표된 검출가능 깊이는 Atalar에 의해 Rayleigh파장의 1.5배까지 가능

하였으나 본 연구에서는 횡파를 이용하고 개선된 실험 방식으로 파장의 3.0배까지 검출하여 검출깊이를 두배까지 향상시켰다.

- 6) 비파괴로 IC내부(1.5mm)와 동전(두께 1.5mm)의 반대면의 형상을 검출하여 본 시스템이 우수한 비파괴 검사장비임을 확인하였다.

(2) 연구방향 제지

- 1) 동일 축상에 서로다른 깊이에 존재하는 내부결함을 층별로 분리하여 영상처리하는 방법
- 2) 내부영상의 질을 향상시키기 위하여 디지털 필터 방식에서 wave(velocity) 필터

방식을 적용하여 여러가지 음향반사파 중
에 특정과만을 검출하여 해상도와 검출깊
이를 향상시키는 기법등을 연구할 필요성
이 있다.

본 논문은 1990년도 한국과학재단에서 지원한 일반기초 연구사
업의 연구비로 연구되었음. (KOSEF901-0810-009-1)

참 고 문 헌

1. D. Bennett, "Special issue on acoustic microscopy",
IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, Vol. su-32,
2, pp.130-136, 1985.
2. F.Quate, "Acoustic microscopy recollection", IEEE
Trans. Sonics and Ultrasonics, Vol. su 32. No.2,
137-14, 1985.
3. M.Hoppe, "Application of scanning acoustic micro-
copy survey and new aspects", IEEE Trans. Sonics
and Ultrasonics, Vol.su-32 No.2, pp.289-300, 1985.
4. H.Bertoni, "Ray optical analysis of spherical focus-
ing transducer for acoustic microscopy", IEEE
Ultrasonic symposium, Vol.2, pp.715-719, 1985.
5. A.Atalar, "Acoustic reflection microscope", Ph.D.
dissertation, Standford Univ., pp.1-117, 1978.
6. H.Bertoni, "Ray-optical analysis of pherical focus-
ing transducer for acoustic microscopy", IEEE
Ultrasonic symposium, Vol.2, pp.715-719, 1985.
7. G.Kino, B.Khuri-Yakub, "Development of
transducers for NDE", Standford Univ., M.L.Re-
port, No.3018, pp.1 8, 1979.
8. B.Khuri Yakub, "Acoustic imaging of subsurface
defect in composites and samples with rough sur-
face", IEEE Ultrasonics Symposium, Vol.2, pp.
746-749, 1985.
9. I.Ishkawa, "An acoustic microscopy for subsurface
defect characterization", IEEE Tran. Sonics and
Ultrasonic, Vol. su 32, No.2, pp.325-331, 1985.
10. A.Atalar, "Pentration depth of the scanning
acoustic microscopy" IEEE Tranbs, Sonic and
Ultrasonics, Vol, su-32, No.2, pp.164-167, 1985.
11. D.Weglein, "Integrated circuit inspection via
acoustic microscopy" IEEE Trans, Sonic and
Ultrasonics, Vol, su-30, 1, pp.40-43, 1983.



文 建(Gun MOON) 正會員
 1947년 2월 9일생
 1965년-1969년 : 한국항공대학 통신공
 학과 졸업
 1969년-1972년 : 해군통신기술장교
 1980년-1988년 : 경희대학원 전자공학
 과(공학석사, 박사)
 1983년 : 전기통신 기술사
 1987년-1991년 : 새주대학교 통신공학과 조교수