

연주빌렛의 비파괴 검사를 위한 초음파 센서의 응용

신병철, 권정락*

Ultrasonic Transducer Application for Nondestructive Testing
of Continuous Cast Billets

Byoung-Chul Shin and Jeong-Rock Kwon*

요 약

제철소에서 생산되고, 활용되는 빌렛은 두 종류로 나누어, 밀도가 높은 강편 빌렛과 밀도가 낮은 연주 빌렛이 있다. 강편 빌렛은 밀도가 높고 표면이 매끄러워, 비교적 탐상이 용이하였으나, 연주 빌렛은 밀도가 낮고, 표면이 거칠어 탐상이 어려웠다. 연주 빌렛의 탐상도 가능케하기 위하여 초음파 탐촉자의 재질 및 치수등을 개선하고자 하였다.

주요 실험 결과로는, 초음파의 발신용 부분과, 수신용 부분이 서로 나뉘어 있는 분할형 탐촉자를 채택하였으며, 탐촉자의 치수는 탐상체의 치수와 밀접히 관계됨을 알았다. 예로써, 폭/두께가 각각 160mm인 연주 빌렛의 경우, 압전소자의 길이가 21mm, 폭이 8.5mm, 두께가 0.95mm, 인 것 두장이 나란히 내장된 탐촉자가 가장 적당하였다. 소자의 두께에 의존하는 이 때의 중심 주파수는 2.25MHz 였으며, 두 장의 압전소자간 각도에 의존하는 초점거리는 70mm 이었다.

Abstract

Steel wires are made by elongating hot billets. If the billets have internal or surface defects, the wire can be broken during elongation process. After testing surface defect, we are testing internal defect by ultrasonic transducers. POSCO is producing two kinds of billets, hot rolled billet and cast billet. Hot rolled one is denser than cast billet. Because of the low density and rough surface, ultrasonic testing is difficult for the cast billet.

Size of the transducer was related with the size and density of the billet. A transducer having 21mm long, 8.5mm wide and 0.95mm thick piezoelectric ceramic plate was best for 160mm x 160mm cast billet. Center frequency of the transducer was 2.25MHz and the focus distance was 70mm.

1. 서론

철사를 만들기 위해선 길이 20m 폭, 두께 16cm인 빌렛을 먼저 만든다음, 이를 가열하여 늘여준다. 이 경우 빌렛의 내외부에 흠이 있으면, 가열하여 늘리는 도중 철사가 끊어지는 사고가 발생하여, 수리하는 동안 작업중단과 함께, 작업중이던 철사 및 빌렛은 폐기처분된다. 이러한 사고를 사전에 방지하고자 빌렛의 내외부 흠을 검사하고 있다. 표면흠의 검사 공정을 거친 후에 내부흠의 검사를 행하게 되는데, 내부흠은 초음파를 이용하고 있다.

동의대학교 재료공학과

(Department of Materials Engineering, Dong-Eui University)

* 가스안전공사 가스안전기술연구센터

(Gas Safety Research Center, Korea Gas Safety Corporation)

<접수일자 : 1995년 12월 7일>

포항제철소에서 생산되고, 활용되는 빌렛은 두 종류로 나누어, 밀도가 높은 강편 빌렛과 밀도가 낮은 연주 빌렛이 있다. 강편 빌렛은 밀도가 높고 표면이 매끄러워, 비교적 탐상이 용이하였으나, 연주 빌렛은 밀도가 낮고, 표면이 거칠어 탐상이 어려웠다[1]. 이러한 문제점을 해결하고자 초음파 탐촉자를 개선하여 연주 빌렛의 탐상도 가능하도록 시도하였다.

통상 초음파 검사시 초음파가 피검체에 들어갈때의 표면에서 반사파가 발생하고, 다시 피검체의 끝까지 갔다가 되돌아 오는 배면 반사파가 일정 시간 후 잡힌다. 이 두 피크간의 시간차에 피검체내에서의 음속을 곱하면 결국 피검체의 두께(x2)를 나타낸다. 이 경우 피검체 내에 일정 크기 이상의 결함이 있다면 이 결함에서 초음파가 반사 하게 되어 표면 반사파와 배면 반사파 사이에 결함에 의한 반사파가 잡히는 것이 일반적이다.

강편 빌렛의 경우 별 문제가 없었으나, 연주 빌렛의 탐상시엔 몇가지 문제점에 의하여 탐상이 곤란하였다. 즉 신호 피크의 크기와 노이즈의 크기가 서로 유사하여 신호 피크의 구별이 쉽지 않았다. 이의 원인을 찾는 과정에서 강편 빌렛과 연주 빌렛의 차이점 위주로 하여 두 가지로 원인을 압축하였다. 첫 번째는 연주 빌렛은 쇳물이 노즐을 거쳐 곧바로 굳어지는 공정으로 제조 되어, 대형 분괴(ingot)를 압연하여 제조된 강편 빌렛에 비하여 밀도가 낮다는 점이었다. 실제로 강편 빌렛의 밀도가 $7.808 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 인 반면, 연주 빌렛의 밀도는 $7.765 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 으로 낮았다. 압연과정을 거치지 않은 연주 빌렛은 밀도도 낮지만, 기포나 결함등이 함유되어 초음파의 산란이 심해져서, 결국 되돌아 오는 초음파의 세기는 약화되기 마련이다. 이 경우엔 되돌아 오는 초음파의 세기를 높여줄 필요성이 있다. 본 연구에서는 강편 빌렛용 초음파 탐촉자를 개선하여 연주 빌렛의 탐상도 가능하게 하기 위하여 탐촉자 내부에 내장되는 압전소자의 재질 및 치수를 조정하여 반사되는 초음파의 세기를 증진시키고자 하였다.

2. 실험 방법

분할형 탐촉자의 구성은 그림1과 같으며, 각각의 구성품의 제작 방법은 아래와 같다. 탐촉자 케이스는 물파의 접촉이 필수적이므로, 녹이 슬지 않아야 한다. 따라서 알루미늄이나, 스테인레스로 하였다. 압전소자의 앞부분은 압전소자에서 나오는 초음파가 피검체에 들

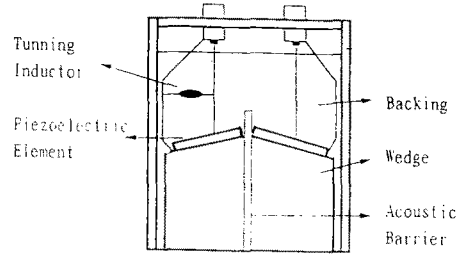


Fig. 1. Cross-section of dual type ultrasonic transducer.

어 가기전에 거치는 곳으로써 통상 아크릴 수지, 알루미늄, 폴리스티롤 등이 쓰이는데, 이들 재료의 고유 음향 임피던스(밀도 x 재질내의 음속)는 보통 $4 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$ [Maryl] 정도이다[2]. 본 연구에서는 3.17 Maryl의 음향 임피던스를 갖는 아크릴 수지를 사용하였다. 수신 및 발신 되는 초음파가 외피에서 반사되는 것을 방지하기 위하여 흡음재를 두겹게 씌워주는 방식[3]을 대신하여, 외피의 내벽에 오일을 주고, 에폭시로 메꾸어 주었다. 압전소자의 후면에는 뒤로 나오는 초음파를 흡수하기 위한 에폭시를 채워 넣었다. 에폭시의 음향 임피던스 ($2 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$)는 압전소자의 음향 임피던스 ($30 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$)와 큰 차이를 보여, 경계면에서의 음파 반사가 심할 것을 우려하여 텅스텐 분말을 섞었다.

압전소자용 세라믹스는 일반적인 PZT 세라믹스에 4mol% Mn을 첨가한 재료를 사용하였다. PbO, ZrO₂, TiO₂, MnO₂ 분말 50g을 증류수 50cc 및 10mm 직경의 지르코니아 볼 50g과 함께 200cc 부피의 플라스틱 병에 넣어 12시간 볼 밀링하였다. 이를 꺼내어 건조시킨 다음 800℃에서 2시간 하소하여 유발로 분쇄하였다. PVA가 하소분말의 1wt%가 되도록 물에 녹여 만든 수용액과 하소분말을 같은 무게 만큼 넣고, 같은 무게의 지르코니아 볼과 함께 2차 볼 밀링하였다. 이를 건조하여 325Mesh 체를 통과시킨 후, 직경 30mm의 원형 금형에 넣고 $10,000 \text{ N/mm}^2$ 의 압력으로 가압 성형하였다. 이를 같은 조성의 PZT분말로 만든 도가니에 넣어 PbO 휘발을 억제 시키며, 1250℃에서 1시간 소성하였다. 소성된 세라믹 소자를 저속의 다이아몬드 휠을 이용하여 적당한 크기로 절단하였다.

본 초음파 센서는 압전진동자의 두께진동 모드를 이용하여 종파를 만들어 금속내부로 초음파를 발사하므로, 두께를 변화시켜 중심주파수를 바꾸어 테스트하였

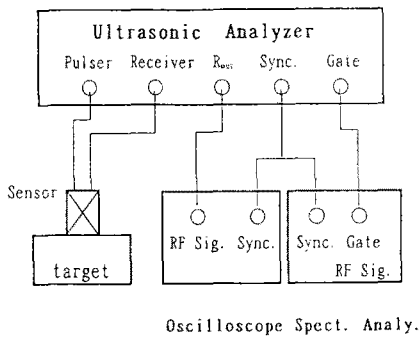
다. 통상, 공진하는 주파수와 진동자의 두께는 아래와 같이 反比例하므로, 고주파 용은 두께를 얇게하였고 저주파 용은 두껍게 하였다.

$$\frac{\lambda}{2} = t \quad \text{이므로}$$

$$f_r = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{2t}$$

fr: 공진 주파수 [Hz or /s]
 V: 매질내에서의 음속 [m/s]
 t: 진동자의 두께 [m]

압전소자의 특성평가는 Impedance/Gain Phase Analyzer (HP 4194A)와 d₃₃-meter (Channel)를 사용하였다. 제작 완료된 초음파 탐촉자의 특성 평가는 Ultrasonic Analyzer (Panametrics 5052UA), Spectrum Analyzer (HP 3585B) 와 디지털 오실로스코프 (HP



Oscilloscope Spect. Analy.

Fig. 2 Configuration for ultrasonic characteristic measurement.

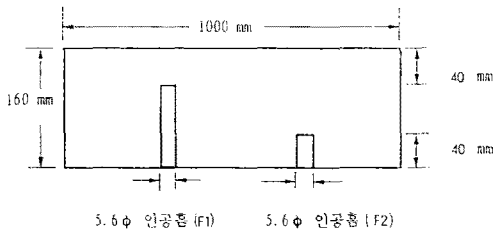


Fig. 3. Sample billet having 2 tunnels for sensor calibration.

54510B)를 사용하여 그림2에 도시한 바와 같이 pulse echo 방법으로 측정하였다. 제철소 현장에서의 온라인 테스트는 연주빌렛을 절단하여 그림3과 같이 직경 5.6mm의 인공홀을 만든 시험편에 센서 6-8개가 끼워지는 탐상기 홀더를 올려 놓고 행하였다. 표면이 거친 연주 빌렛의 효율적인 탐상을 위하여 탐촉자와 피검체의 간격 (수막)을 0.1mm 이던 것을 0.5mm로 하여 탐상을 시도 하였다. 제철소내 현장 시험시의 탐상 신호 분석은 동경계기 SM-5000를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

사용된 주요 부분의 재질 특성을 측정한 결과는 아래와 같다. 탐촉자의 핵심인 압전소자의 특성은 그림4의 주파수/임피던스 곡선으로 부터 표1과 같이 정리된다. 기존의 PZT-4, PZT-5와 비교하였으며, 제조번호는 PUT-2M으로 하였다. 초음파의 수신시 발생하는 전압과 직결되는 압전전압계수 (g₃₃)가 26에서 40 (x 10⁻³Vm/N)정도로 향상된 것을 특징으로 한다. 한편 펄스 전압이 인가 되었을때 순간적으로 압전소자의 떨림에 의하여 발생된 초음파는 압전소자 양면에서 발생한다. 이중 피검체가 있는 방향으로 나가는 초음파는 유효하지만, 반대 면에서 발생하는 초음파는 곧바로 흡수 시켜야 하므로 흡음재를 사용하였다[4]. 음향 임피던스의 향상을 목적으로 텅스텐 분말을 혼합하였다[5, 6].

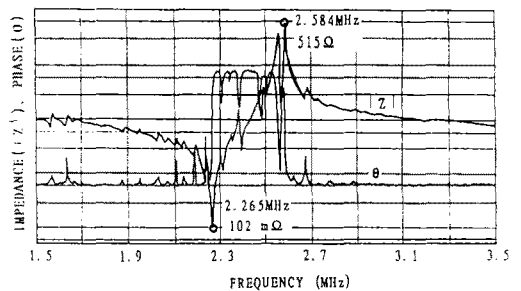


Fig. 4. Impedance-frequency curve of piezoelectric element PUT-2M.

Table 1. Characteristics of piezoelectric transducer materials.

Material	K ₃₃ ^T	d ₃₃ (p C/N)	g ₃₃ 10 ⁻³ Vm/N	k _t (%)	p 10 ³ Kg/m ³	v m/s	Za 10 ⁶ Kg/m ² s	reference
PZT-4	1300	289	26.1	51	7.5			5
PZT-5	1700	374	24.8	49	7.75	4350	33.7	5
PUT-2M	390	150	40.5	52	7.70	4295	33.1	present

혼합 비율에 따른 음향 임피던스의 결과는 표2에 정리하였으며, 그중, 예폭시:팅스텐의 무게비가 1:4인 경우가 6.9 Maryi로 가장 적합하였다. 텅스텐을 더 많이 혼합할 경우, 전기 저항이 감소하여 쇼트가 발생하는 위험이 있었기 때문에 더이상 그 함유량을 증가시키지 못하였다.

사용된 탐촉자 구성품의 치수와 그 결과는 다음과 같다. 압전 소자의 두께방향 진동 모드를 이용하는 본 연구에서는 압전 소자의 두께를 변화시켜 중심주파수를 바꾸어 주면서, 최적의 조건을 도출하여 보았다. 표3에 나타낸 바와 같이 두께를 2.0mm, 0.95mm, 0.52mm로 만들어 각각 1MHz, 2.25MHz, 4MHz의 중심 주파수를 갖도록 하였다. 여기서 탐촉자에서 가까운 결함에서 발생하는 결함 반사파 F1이 스크린의 50%가 되도록 gain을 조절한 후 그 순간의 배면 반사파의 크기 B1을 측정하였다. 센서의 위치를 이동시켜 앞서의 1차 결함 보다 더욱 깊숙히 만들어 놓은 2차 결함에서 발생하는 2차 결함 반사파 F2를 측정하고 그 순간의 배면 반사파 B2를 측정하였다 [그림 5]. 측정 결과, 탐촉자의 주파수가 4MHz인 경우 노이즈가 심하였다. 또 1MHz의 경우 노이즈는 현저히 감소하였으나, 배면 반사파 (B1, B2)가 50%가 되지 못하여 안정적인 탐상에

불리하였다. 또한 탐상 가능한 최소 결함의 크기가 커지는 단점도 있었다. 따라서 연주 빌렛의 탐상에는 2.25MHz의 중심주파수를 갖는 초음파 탐촉자가 적합한 듯하다.

진동자의 크기는 아래 식에서 알 수 있듯이 초음파의 원거리 음장에 있어서, 분산각에 영향을 미친다[7].

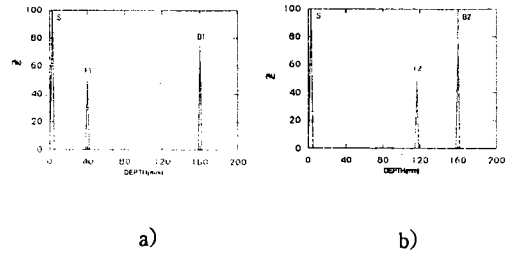


Fig. 5. 2.25MHz ultrasonic echos for sample billet having 40mm and 120mm deep holes.

The hole diameter is 5.6mm.

- (a) Echo of 40mm deep whole (F1) and back echo at that moment (B1),
- (b) Echo of 120mm deep whole (F2) and back echo at that moment (B2),

Table 2. Acoustic impedance of backing materials according to mixing ratio.

Mixture	Weight Ratio (w/o)	Density (g/cm ³)	Velocity (m/s)	Acoustic Impedance (10 ⁶ kg/m ² s)
Cemedine Epoxy / W Powder	1 : 2	2.242	1618	3.6
Cemedine Epoxy / W Powder	1 : 4	3.752	1692	6.3
Moulding Epoxy / W Powder	1 : 2	3.636	1697	6.2
Moulding Epoxy / W Powder	1 : 4	3.952	1748	6.9
Moulding Epoxy / W Powder	1 : 6	5.270	1699	8.9

Table 3. Echo height for reference block of Fig. 3.

Frequency MHz	Piezoelectric			F1 %	B1 %	F2 %	B2 %
	length mm	width mm	thickness mm				
4.00	21	5	0.52	50	7	-	10
2.25	21	5	0.95	50	20	20	20
2.25	21	6.5	0.95	50	40	20	55
2.25	21	8.5	0.95	50	75	45	100
1.0	21	6.5	2.0	50	40	20	40

즉, 진동자가 넓을수록 초음파 빔이 퍼지지 않고 곧바로 나가므로 두꺼운 대상을 탐상할 때 유리하다.

$$\sin \varphi = 1.22 \frac{\lambda}{d} = 1.22 \frac{V}{fd}$$

- φ: 빔의 分散 半角 [°]
- λ: 초음파의 파장 [m]
- d: 원판형 진동소자의 직경 [m]
- V: 탐상대상물내에서의 초음파 전달 속도 [m/s]
(鋼내에서의 종파 음속 = 5900 m/s,
횡파 음속 = 3230 m/s)
- f: 초음파의 주파수 [Hz or 1/s]

따라서 비교적 두꺼운 160mm 두께의 대상물 진단을 위해 압전소자의 폭은 넓을수록 유리하다고 예상하였다. 실제 제작 후 직경 5.6mm의 인공홀을 대상으로 측정된 결과 (표. 3)에 의하면, 가급적 넓은 것이 결함 및 배면 반사파가 강하여 유리 하였다. 따라서 스테인레스 재질의 센서 외피 두께를 얇게 하면서 가급적 압전소자의 너비를 넓히도록 시도하였다. 그러나 8.5mm를 넘기는 것은 곤란하였다. 왜냐하면, 160mm폭의 빌렛을 탐상하는데, 각 면에 4개씩 총 8개의 센서를 홀더에 끼워 넣어 탐상해야 하고 각 탐촉자 사이사이에서 음향 임피던스 매칭용 수막형성을 위하여 물이 흘러나와야 하므로, 탐촉자 1개의 치수는 정해진다. 따라서 압전소자의 길이는 21mm가 최대였고, 두장의 압전소자가 나란히 삽입되고, 각 압전소자 사이에 고무로 차단벽을 설치 해야 하므로 최대 폭은 8.5mm로 제한 되었다. 향후 8개의 탐촉자를 잡고 있는 홀더의 설계를 개선한다면, 각 탐촉자의 크기를 늘릴 수 있을 것으로 예상된다.

그림 6은 상기 분할형 탐촉자의 에코우 파형(a) 및 주파수 스펙트럼을 분석한 결과이다. 스펙트럼 곡선의 정점에서 -6dB되는 점 까지의 주파수 범위를 band width로 한다면 이는 약 52%가 되었다 [표4].

목표로 하는 피검체의 전체 두께는 160mm이고 연주빌렛의 결함은 주로 빌렛의 중심에서 발생하고 있다.

따라서 탐촉자의 초점거리는 80 (±10)mm 정도가 적당하여 상기 탐촉자내 두 장의 압전소자 각도 (평행시 0°)를 0, 1, 2, 4° 등으로 하여 초점거리를 조정하여 보았으며, 그중 2°로 조정된 경우가 적당하였다. 이를 확인 하고자, 주파수 2.25MHz, 압전소자 너비 8.5mm, 압전소자간 각도 2°인 탐촉자를 가지고, 피검체의 두께를 달리하면서 배면 반사파의 크기가 탐상기 (USD10; Kraut-Kramer) 스크린의 50%를 유지하도록 감쇠기 값(attenuation; dB)을 조작하고, 그 감쇠기 값을 두께에 따라 그림 7에 도시 하였다. 피검체의 두께가 70mm 일때 가장 최저치를 기록하여, 상기 탐촉자의 초점거리가 70mm 임을 알 수 있었다.

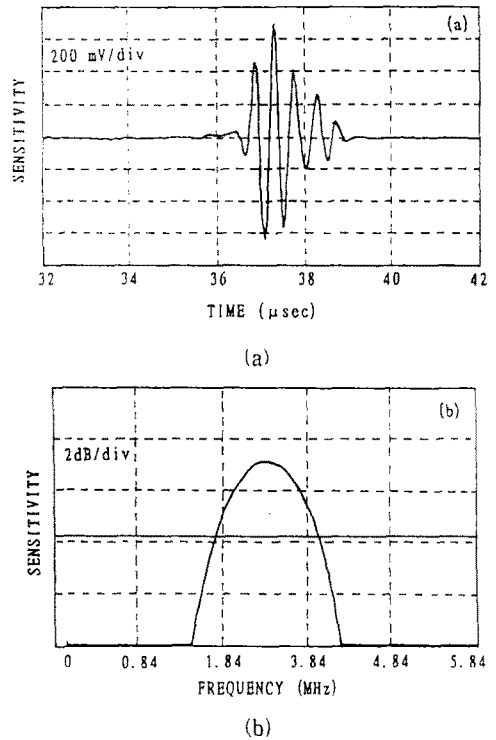


Fig. 6. (a) Back echo signals of dual type ultrasonic sensor for 85mm thick standard block. Measurement condition: E=2, PRF=1KHz, Att.=10dB, damping=50Ω
(b) Frequency spectrum of the back echo.

Table 4. Characteristics of dual-type ultrasonic sensor estimated according to ASTM-E1065.

Peak Freq.	Center Freq.	Lower Freq. (-6 dB)	Upper Freq. (-6 dB)	Bandwidth (-6 dB)
2.348 MHz	2.355 MHz	1.748 MHz	2.963 MHz	51.6%

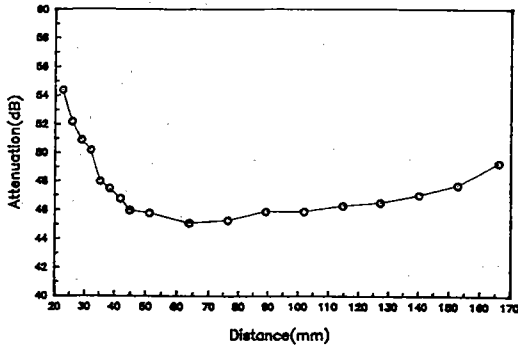


Fig. 7. Distance amplitude correction curve of the ultrasonic sensor.

4. 결론

철사를 제조하기 위한 중간재인 빌렛의 내부흠을 탐상하기 위하여 초음파 탐촉자를 제작하였다. 피검 대상으로서의 연주 빌렛은 쇠물이 노즐을 통하여 나오면서 응고된 것이므로, 압연과정을 거친 강편 빌렛에 비하여 상대적으로 표면이 거칠고, 밀도가 낮아 초음파 탐상이 어려웠다. 연주 빌렛의 탐상을 위하여 표면이 거친 단점은 수막을 현재의 0.1mm 에서 0.5mm 로 늘려주므로써 해결하였으나, 이경우 초음파의 발신 및 수신 효율이 감소하여 탐촉자의 재질을 개선하였다. 밀도가 낮은 단점은 빔 폭을 늘려 대처하였다.

상기의 목적으로 진행된 연구 결과의 주요 데이터로서는 160mm 두께를 가지며, 표면이 거친 연주 빌렛의 탐상에는 중심주파수 2.25MHz이고, 수신용과 발신용으로 분리된 두 장의 압전소자는 각각의 폭이 8.5mm이고, 평행한 상태에서 2° 정도 중심으로 기울어진 상태로 조립되는 것이 가장 적당하였다. 위와 같이 제작된 초음파 탐촉자의 주파수 대역폭은 52% 였으며, 초점거리는 70mm 였다.

현재까지의 연구 결과의 향상을 위해선 8개의 센서를 잡고 있는 홀더의 설계 개선을 통하여 진동의 흡수가 용이하게하여 안정된 수막을 얻을 수 있도록 하는 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

References

[1] I. Ochiai and H. Ohba, "Effect of soaking

treatment of continuously casted bloom on manganese segregation of high-carbon steel wire rod", J. Iron & Steel Institute of Jpn, V.75, No. 7, 1217-1223 (1989).

- [2] 노용래, 임종인, 편신히, "광대역 분할형 초음파 센서", 대한민국 실용신안 출원 93-27229호, (1993).
- [3] Bernd Granz, and Georg Koehler, "Ultrasonic Sensor", US Patent 91-5,056,069 (1991).
- [4] N.D. Patal and P.S. Nicholson, "Influence of effective diameter and piezoelectric and dielectric properties on performance of ultrasonic transducers", Ultrasonics V.29, 389-392 (1991).
- [5] G. Kossoff, "The effect of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers", IEEE Trans. Sonics, SU-13, No. 1, 20-30 (1966).
- [6] M.G. Grewe, T.R. Guruaja and R.E. Newnham, "Acoustic properties of particle/polymer composites for ultrasonic transducer backing applications", IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, V.37, 506-514 (1990).
- [7] 한치현, 이용, 한기수, 하기수, 원승환, 이의중, "초음파 탐상검사", P.20-24, 도서출판세진사, (1996)

著 者 紹 介



신 병 철

1988년 KAIST, Ph.D., 1990년 Pennsylvania State Univ. MRL, 1992년 東京大學 先端科學技術研究 Center, 1996년 포철 산업과학 기술연구소, 현재 동의대학교 재료 공학과



권 정 락

1958년생, 1978년 3월~1982년 2월 경북대 사대 물리교육과, 1985년 3월~1987년 2월 한국과학기술원 재료공학과(석사), 1987년 3월~1991년 8월 한국과학기술원 재료 공학과(박사), 1982년 3월~1995년 9월 (주)포스콘 기술연구소(책임연구원), - 센서/계측 관련 연구, 1995년 10월~현재 한국가스안전공사 기술 연구센터(제품연구부장), - 가스용품개발, 안전장치, 압력용기진단(비파괴)