

# Lorentz force 형태의 EMAT센서 개발에 관한 연구

정영재\*, 김일수\*\*, 권영섭\*\*\*, 권욱현\*\*\*\*

## A Study of Development for EMAT sensor of an Lorentz force type

Jung Young-Jag\*, Kim Ill-Soo\*\*, Kueon Yeong Seob\*\*\*, Kwon Wook Hyun\*\*\*\*

### Abstract

One of the areas in the continuous casting process that up to this point, has not been definitively instrumented is a method of reliably locating the part of a continuously cast strand that remains liquid for a period after the outer portion has solidified. To solve the problem, Electromagnetic Transducers(EMAT) which operate across an air gap without the need for a coupling medium has been developed. The system was designed to employ a through transmission technique which enhanced the signal-to-noise ratio. The Al  $75 \times 75mm$  and  $75 \times 100mm$  simulators with 2, 4, 8, 16, 32 mm hole respectively has been produced in order to verify the developed EMAT system and to measure to liquid core in continuous casting strand. The system developed can be employed for the optimization of torch cutting speed and for the final cut length of the bloom as well as calculation of average bloom temperature.

Keywords : EMAT(초음파 탐촉자), Molten steel(용강), Continuous casting process(연주공정), Elongated Spiral(ES).

## 1. 서론

철강 산업에 있어서 고품질의 제품과 안정적인 작업, 설비의 효율성 증대를 위해서는 많은 숙련된 작업기술 및 운전기술이 요구된다. 제강공장에서 정렬된 레들(ladle)에

담겨 이송된 용강(molten steel)은 턴디쉬(tundish)를 통하여 주형에 주입되어 slab으로 성형된다. 턴디쉬, 몰드(mould) 하부물 등에는 각종 센서 및 제어장치가 연결되어 연주공정은 대부분 자동적으로 운전되고 있다. 연주공정 중의 응고점은 제품 품질등에 상당한 영향을 미친다.

\* 목포대 대학원  
 \*\* 목포대  
 \*\*\* POSCO 기술연구소  
 \*\*\*\* 서울대

하지만, 현재까지 응고점 검출을 단지 제한적으로 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 (simulation) 결과를 기초로하여 응고점을 예측하였다.

EMAT를 이용하는 초기의 연구는 각 mode의 초음파의 송수신에 대한 기본 연구를 비롯하여 주로 결함을 검출하는 방향으로 진행되었다. 용접부 내에서의 결함검출에 대한 연구가 미국의 NIST 등을 중심으로 수행되었고, 독일의 Izfp와 미국의 Rockwell International Science Center (RISC)에서는 길이가 긴 튜브에서의 초음파 송수신 및 결함검출에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 또한 미국의 Iowa 주립대학 및 일본의 오사카대학<sup>1-4)</sup>을 중심으로 압연판재의 texture 및 plastic anisotropy의 측정에 대한 연구를 비롯하여 잔류응력의 측정에도 EMAT가 적용되고 있다. EMAT는 압전형 탐촉자에 비하여 전자기적 에너지를 역학적 진동에너지로 바꾸어 주나, 전환효율이 크게 낮기 때문에 압전형 탐촉자와 비슷한 수준의 S/N(Signal/Noise)비를 얻기는 매우 어렵다. 최근 들어 시험체 내에 진행되는 초음파의 파장과 시험체의 두께와의 관계로부터 정의되는 음향공진 진동수를 이용하여 시험체 내에서의 초음파의 진행속도와 감쇠를 측정할 수 있는 장비와 기술이 개발되어 EMAT의 최대 약점인 낮은 전환효율 및 S/N의 문제가 상당히 극복되었다<sup>5)</sup>. 한편 고온상태에 있는 재료에 대한 초음파 탐상법 이용에 관한 연구는 미국, 일본, 유럽을 중심으로, 시험체의 재질을 평가하기 위해 연구가 진행되고 있다. 특히 현재 일본의 신일본제철, Mitsubishi사, Hitachi사 등에서 1000℃의 철강 소재의 결함 탐상시스템 개발에 많은 관심을 갖고 있다.

또한, 1985년에 일본의 Kawasaki제철<sup>6)</sup>은 스웨덴 MPC사에서 개발한 EMMA 시스템이 연주공정에서 응고점을 검출할 수 있는지를 확인하기 위하여 최초로 일련의 실험을 실시하였다. 이 목표를 달성하기 위하여 몇 개의 리벳을 용융된 slab에 삽입한 리벳방법을 이용하여, 리벳 응고부분 길이 및 slab두께 측정, 그리고 응고점 검출 가능성을 검증하였다. 또한 EMAT 측정방법을 이용하여 액체코어의 위치를 정확하게 측정할 수 있도록 steel mill 조건하에서 실험하였다. EMAT 신호는 차트레코더에 오실로스코프로 기록하였다. 하지만 EMMA 시스템 신호로부터 파생된 파형은 단지 리벳이 고체인 상태에서 발견되었으나, EMMA 시스템의 S/N 비가 낮아서 신호증가 및 소음 감소의 필요성을 제기하였다. 최근 후주의 BHP<sup>7)</sup>에서는 bloom의 절단길이 예측 및 생산성을 향상시키기 위

하여 스웨덴에서 개발한 EMMA 시스템을 이용하여 400 × 630 mm bloom에 일련의 실험을 실시하였다. 또한 이 시스템은 토치절단 속도 예측 및 시뮬레이션으로부터 계산한 bloom 길이를 비교 및 분석하기 위해 bloom이 완전히 응고된 마지막 워드드로얼(withdrawal) 롤에 설치하였다. 하지만 응고점을 검출하고 이 결과를 온라인으로 적용하고 있다는 논문이 발표되었으나 그 성공 여부에 관하여는 언급하지 않았다. 따라서 본 연구는 개발된 EMAT를 이용하여 초음파 속도와 온도사이의 관계를 기초로 through transmission을 이용하여 응고점을 측정하였으며, 실험실에서 실제 쇳물을 대상으로 하여 실험할 수 있도록 구조물과 기하학적인 형상이 같도록 실험장치를 구성하여 실제 적용 가능성을 검토하였다.

## 2. EMAT sensor의 구조

EMAT의 원리<sup>8-9)</sup>는 1939년 이래, 끊임없이 연구개발되어 오고 있다. 힘은 자기장의 응용과 전도체내의 전류의 유도에 의하여 전기전도체내에서 발생되어진다. 전도체는 시험되는 연주 slab이고, 표면층은 slab안으로 발생하는 force 펄스에 의한 초음파 주파수에서 진동하도록 제작되었다. 이것은 나중에 slab의 표면층에서 상응하는 표면전류 펄스를 유도하는데 이용된다. 표면전류의 생성과 자기장은 slab의 표면층에서 전자기 힘을 생성하며, force 펄스는 Fig. 1에서 보는바와 같이 slab의 표면에서 한번 또는 그 이상 반사되고, slab를 통하여 전파되는 파(wave)들을 발생시킨다. EMAT는 자기장 B와 와전류 I를 조합하여 slab의 금속 표면가까이의 Lorentz 힘 F를 생성한다.

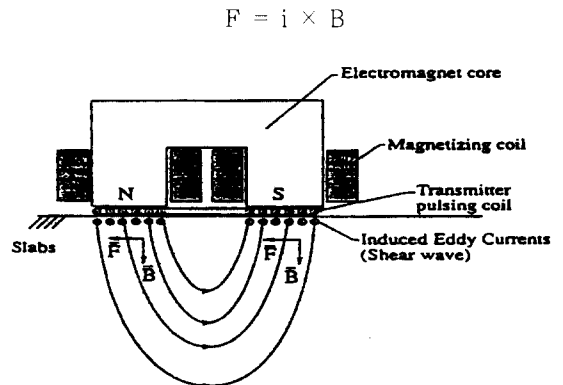


Fig. 1 Basic principle of EMMA echo sensor

코일에서 전류필스의 형상, 전자석 및 전류 코일의 형태, 크기, 위치를 변화시킴으로, slab에서 사용하려고 선택했었던 표면(Rayleigh)파, 종파 또는 횡파와 같은 초음파들을 발생시킬 수 있다. 수신파는 위에서 설명한 송신기와 같이 작동하는 전자기 초음파에 의하여 탐지되어지며, 자기장하에서 표면층의 초음파 움직임은 그때 수신기 코일에서 기전력을 유도하는 전류를 발생시킨다. 코일 기전력은 수신기 아래에 초음파들에 의존한다. 초음파의 속도는 온도에 의존하기 때문에 송신기측에서 수신기측으로 움직이는 초음파 필스의 시간은 금속 내부 온도영역의 함수이다. 이 전송시간을 측정하므로써 평균온도 측정에 EMAT 센서사용이 가능하다.

액체 및 기체에서는 전단파가 통과하지 않는다는 특징 때문에 연주공정에 응고점 검출 및 평균온도를 측정하기에 전단파가 가장 적합하다. 특히 머쉬존(mush zone)이라 불리는 액체와 고체사이에 용융금속의 천이지역에서는 액체에 점성이 포함되지 않는 한 신호가 전송되지 않는 특징을 갖고 있다. 또한 전단파의 속도는 온도상승에 감소하므로 연주공정에 응고점을 검출하는데 EMAT가 가장 적합<sup>(10)</sup>하다. 수백도 이상의 고온 분위기에서 탐촉자의 파손이 발생할 가능성이 있으므로 정밀한 설계 및 제작이 필요하다. 이것을 해결할 방법으로는 크게 2가지의 방향이 있는데 첫번째는 탐촉자 내부에 냉각수를 순환시켜 강제 냉각시키는 방법이고, 두번째는 용융점이 높고 산화가 잘 발생되지 않는 텅스텐이나 몰리브덴 또는 백금코일을 이용하고, 큐리포인트가 높은 코어를 이용한 전자석을 쓰는 방법이다. 본 연구에서는 첫번째의 방법을 선택하여 탐촉자를 제작하고 실제상태에서 탐촉자 내부온도를 측정하여 필요할 경우에는 두번째의 방법을 도입하여 혼합된 방법을 적용하였다.

EMAT 센서의 구조는 와전류를 결정하는 Elongated Spiral(ES) 코일과 정자기장을 발생시키는 나비둠 permanent magnetic 코어로 구성되어 있다. 응고점 측정에 사용된 센서의 elongated spiral 코일 크기는 각각 0.08 mm, 0.2 mm, 0.45 mm이다. 하나의 탐촉자에는 송신용과 수신용탐촉자가 함께 들어 있는데, 각 탐촉자는 5×5×10 mm의 나비둠 영구자석 4개씩 포함하고 있으며, 각각의 코일은 0.08 mm, 0.45 mm의 magnetic core를 총 43회 감아서 사용하였다. 제작된 탐촉자는 고온로의 구조와 필요한 전자기파의 모우드를 고려하여 through transmission 방식으로 재료의 한면에서는 송신을 그리고 반대면에서는 수신이 이루어지도록 제작하였

다. EMAT는 측정하고자 하는 시험편에 elongated spiral 코일에 고주파신호를 보내어 전자기파로 시험편에 보내기 때문에 시험편과의 접촉이 되지 않은 상황에서도 초음파를 발생시킬 수는 있지만, 최대한으로 접촉을 하는 구조로 센서를 만들어야 신호의 크기를 높일 수 있다.

### 3. EMAT sensor의 성능실험

EMAT의 구동을 위해서는 와전류 발생용 코일에 burst형의 필스를 가해주기 위한 gated amplifier, 그리고 수신된 신호의 증폭 및 filtering을 위한 수신기가 필요하다. Gated amplifier와 수신장치로는 미국 RITEC사의 RAM 10000이 이용되었다. RAM 10000은 burst의 크기와 시간을 임의로 조절하여 주파수의 특성이 우수한 강력한 필스를 EMAT에 가할 수 있으며, superheterodyne 방식으로 신호를 수신하므로 신호의 S/N을 크게 높일 수 있다. 개발된 EMAT sensor를 이용하여 응고점 검출 여부를 확인하기 위하여 각각 75 × 75 mm 와 75 × 100 mm의 Al시험편에 각각 2, 4, 8, 16, 32 mm hole을 가공하였다. Fig. 2은 제작한 시험편을 나타낸다.



Fig. 2 Photograph of specimen used for experiment

실험은 먼저, 방향특성 측정용 EMAT와 검출용 센서의 두 개의 micrometer를 이용하여 블록의 양쪽면의 중심에 정확히 고정시킨다. 정확한 고정을 위해서는 탐촉자와 시험편에 위치 표시 mark를 미리 표시해 놓는 다음 모든 전자기기와 송수신 장비를 작동시켜, 검출된 신호를 digital oscilloscope의 memory에 저장한다. 그 다음엔 oscilloscope에 저장된 신호의 도달시간, 진폭, 그리고 주파수 측정 결과를 PC에 보내며, 저장된 결과를 plotter로 그린다. EMAT의 사용주파수를 변화시키며 실험을 계속 수행하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 EMAT의 성능실험

제작된 EMAT는 본 실험에서 0.2 MHz 에서 0.2 MHz 간격으로 2 MHz까지 변화시켜 초음파를 발생시키고 수신용 EMAT로 신호를 받는다. Fig. 3은 1 MHz의 고주파 신호를 사용하여 초음파를 발생하고 75 × 100 mm Al 시험편을 통과하여 얻은 초음파신호를 나타낸다.

첫번째 고주파 신호(A)는 수신 EMAT에서 받아들여진 고주파 노이즈이고, 두 번째 신호(B)는 초음파로 시험편을 통과하여 수신된 신호이다. (C)와 (D)는 각각 초음파가 Al 시험편의 표면에서 반사되어 왕복한 신호이다. EMAT의 성능은 elongated spiral 코일의 굵기를 어떻게 선정하느냐 또는 코일을 감는 방법에 따라 달라진다. 전기저항과 민감도 등을 고려하여 적절한 굵기의 코일을 선정하면, 전기적신호(고주파 펄스)를 역학적 신호(초음파)로 잘 변환시켜주고 또한 역학적 신호를 전기적 신호로 잘 변환시켜 준다. 대개의 경우 EMAT의 elongated spiral 코일은 송신용 코일이 수신용 코일에 비하여 굵은 코일을 사용한다.

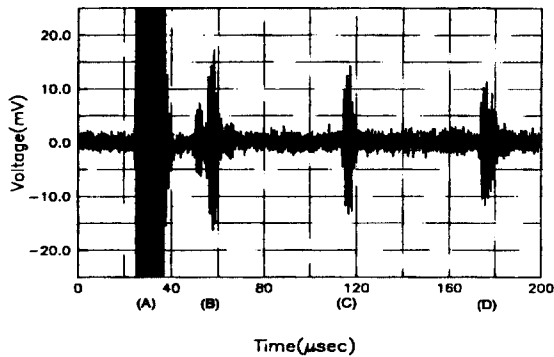


Fig. 3 Change of voltage versus time

### 4.2 Lift-off의 영향에 관한 실험

EMAT를 이용한 초음파 발생 실험장치는 장치 구성요소중에 가장 중요요소 중에 하나인 시험편에 좌우된다. 즉 시험편의 특성(두께, 재질, 전기학적 특성)에 의존하여 초음파 발생정도가 결정된다. 이러한 면에서 초음파의 발생요인으로 lift-off의 변화 실험은 꼭 필요한 요소이다. Figs. 4 ~ 9는 0.6 MHz와 1.0 MHz를 이용하여 lift-off

의 영향 실험(양쪽 모두 lift-off, 수신기 고정과 송신기 lift-off 그리고 수신기 lift-off 와 송신기 고정)의 결과를 나타낸다. Fig. 4는 송수신기의 양쪽 모두에 lift-off를 변화시키고, 0.6 MHz로하여 Fig. 3에 보여진 신호의 진폭(B)를 측정할 것이다. Fig. 4에서 보듯이 신호의 크기는 lift-off가 커짐에 따라 진폭이 감소함을 알 수 있다. 1.0 MHz 사용주파수를 사용하여 송·수신기의 양쪽 모두 lift-off 변화시킨 조건하에서 실험한 결과를 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 6은 0.6 MHz 주파수를 수신기 고정, 송신기를 lift-off 조건하에서 실험한 결과를 나타낸다. 진폭의 세기는 거리에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 송신기를 고정시키고, 수신기를 lift-off 조건하에 0.6 MHz 주파수를 통과시킨 후 얻은 진폭의 크기를 나타낸다. Fig. 7은 lift-off 거리와 진폭의 세기는 함수관계가 있다는 것을 보여 준다. 송신기 고정, 수신기를 lift-off 조건하에 1.0 MHz 주파수를 시험편에 통과시켜 얻는 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 진폭은 lift-off 증가함에 따라 감소하는 것을 Fig. 8로부터 알 수 있다. Fig. 9는 1.0 MHz 주파수를 이용하여 수신기 고정, 송신기 lift-off 조건하에서 실험한 결과이다. 전기적 상호작용이 lift-off가 적을 때 큰 반면에 lift-off가 큰 영역에서는 전자기적 상호작용이 크게 줄어들어 진폭이 감소함을 알 수 있다. 이것은 전자기적 상호작용이 lift-off가 큰 영역에서는 전자기적 상호작용이 줄어들음을 나타낸다. 본 연구에서는 제작된 EMAT 센서가 생산공정상에 적용되기 위해서는 응고되어 나오는 제품과 EMAT는 어느 정도 거리를 유지해야 할 것이다. 따라서 어느 정도 거리를 유지해도 측정이 가능 하느냐는 매우 중요한 문제이다.

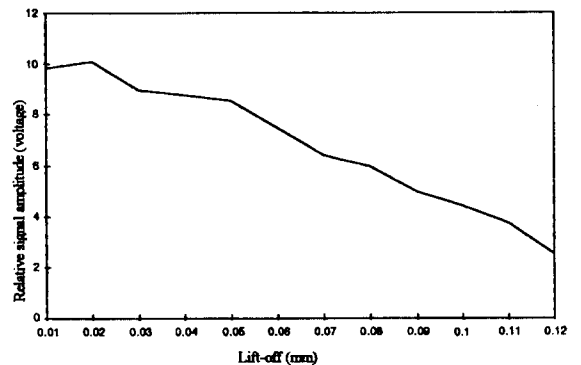


Fig. 4 Signal amplitude of both side lift-off for 0.6MHz

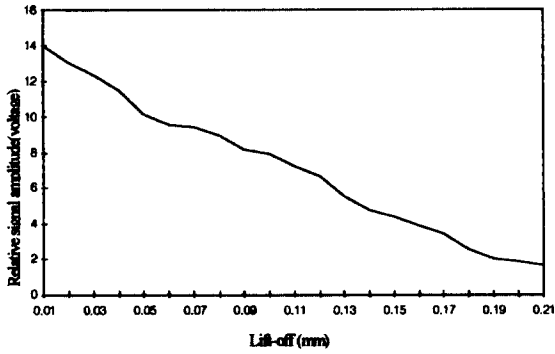


Fig. 5 Signal amplitude of both side life-off for 1 MHz

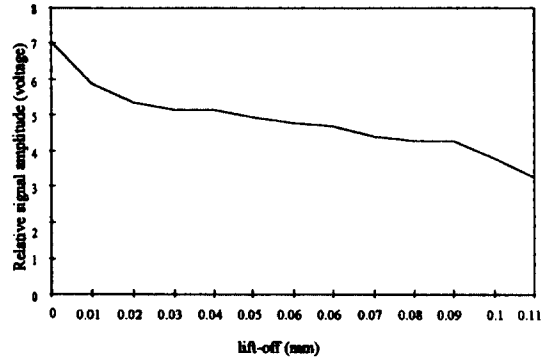


Fig. 8 Signal amplitude of sender fixed and receiver life-off for 1 MHz

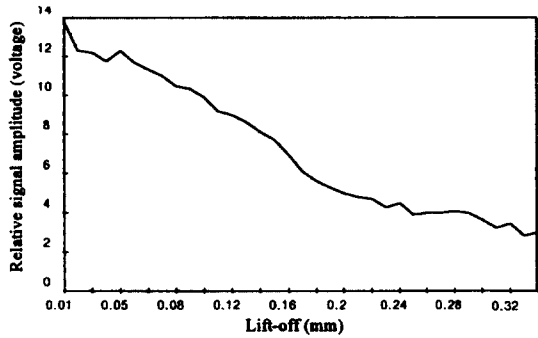


Fig. 6 Signal amplitude of receiver fixed and sender life-off for 0.6MHz

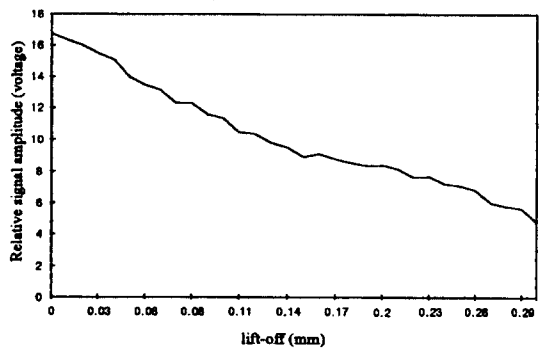


Fig. 9 Signal amplitude of receiver fixed and sender life-off for 1 MHz

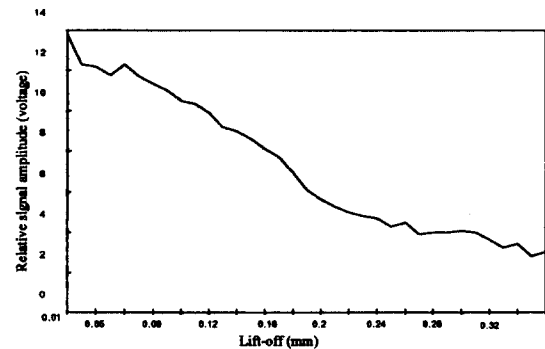


Fig. 7 Signal amplitude of sender fixed and receiver life-off for 0.6 MHz

#### 4.3 Hole크기 변화에 따른 초음파신호의 측정

Fig. 10은 직경이 2, 4, 8, 16, 32 mm hole에 의한 신호의 진폭변화를 보여주고 있다. 직경이 2 mm hole에 1 MHz의 고주파 신호를 사용하여 초음파를 발생하고 시험편을 통과하여 얻은 초음파 신호로써 측정된 hole의 진폭은 15.6830로 측정되었다. 같은 주파수를 직경이 4 mm hole에 통과시킨 후 신호의 진폭이 1.5045정도 줄어들었으나, 수신 펄스의 파형과 모양은 일치하는 것을 알 수 있다. 1 MHz의 주파수에 직경이 8 mm 시험편을 통과하여 얻은 초음파 신호의 진폭은 7.089238로 측정되었다. 진폭은 줄어들었으며 수신펄스의 파형과 모양은 변하지 않는다는 것을 알 수 있다. 직경이 16 mm인 시험편

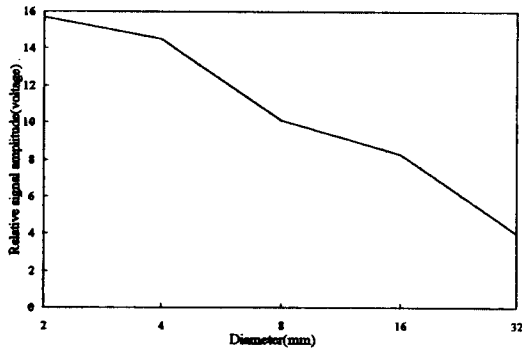


Fig. 10 Signal amplitude of hole diameter

에 1 MHz의 주파수가 통과할 때 얻은 초음파의 진폭값은 4.29535로 측정되었으며 수신펄스의 파형과 모양은 일치하는 것을 알 수 있다. 같은 주파수에 직경이 32 mm hole을 통할 때 얻은 신호의 진폭값은 1.03118로 측정되었다. 수신된 펄스의 파형과 모양은 hole직径의 변화에도 변화하지 않는다는 것을 Fig. 10을 통하여 알 수 있다.

## 5. 결론 및 고찰

연주공정에 응고점을 검출하기 위하여 EMAT 센서개발 및 절차의 정립을 위한 연구를 수행하였다. 연주공정의 구조와 필요한 전자기음파의 모우드를 고려하여 through transmission방식으로 한면에서는 송신을 그리고 반대면에서는 수신이 이루어지도록 elongated spiral 코일과 나비뿔 영구자석 코어를 이용하여 Lorentz-force 형태의 탐촉자를 개발하였다.

연주 bloom내 응고점 검출 기술개발의 타당성을 알아보기 위하여 Al 75 × 75 mm와 75 × 100 mm의 시험편에 직경이 2, 4, 8, 16, 32 mm hole을 제작한 다음 주파수가 0.6 MHz에서 1.0 MHz를 사용하고, 초음파 신호의 변화를 측정하였다. 시험편 hole직径의 증가에 대한 진폭의 크기는 감소함을 알 수 있었다. 또한, 현장적

용에 가장 중요한 요인인 lift-off의 영향 실험을 실시하여 진폭의 크기는 lift-off증가에 따라 감소함을 알 수 있었다.

결론적으로 제작된 탐촉자를 사용하여 일련의 실험을 통하여 연주 bloom내 응고점을 검출할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 앞으로 현장설치를 위하여 센서의 소형화 및 on-line시스템 구축으로 절단속도 및 연주의 절단 길이를 예측할 수 있어 실수를 감소와 불필요한 공정의 축소로 상당한 에너지와 시간을 절약할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

1. M. Hirao and H. Fukuoka: Journal of NDE, 1993, vol. 12, no. 1, pp. 27.
2. M. Hirao, N. Hara, H. Fukuoka and K. Fujisawa: J. Acoust. Soc. Am, 1988, vol. 84, pp. 667.
3. M. Hirao and N. Hara: Appl. Phys. Lett., 1987, vol. 50, pp. 1411.
4. M. Hirao, K. Aoki and H. Fukuoka: J. Acoust. Soc. Am., 1987, vol. 81, pp. 1434.
5. R. B. Thomson, S.S. Lee, and J.F. Smith: Ultrasonics, 1987, vol. 25, pp. 133.
6. F. Ichikawa: Kawasaki Steel Corp. Instrumentation & Analytical Science Research Center, Unpublished report, 1986.
7. BHP Research Laboratories: Newcastle and Melbourne Divisions.
8. M. R. Gaertner, W. D. Wallace and B. W. Maxfield: Physical Review, 1969, vol. 184, pp. 702.
9. M. R. Gaertner, W. D. Wallace and B. W. Maxfield: Physical Review, 1971, pp. 119.
10. C. R. Swaminathan and V. R. Voller: Metallurgical Transactions, 1992, vol. 23B, no. 10, pp. 651.