

Size를 갖는다.

고온에서의 철은 결정 구조는 처음 FCC 구조를 갖고 온도가 더 내려가면 BCC 구조로 바뀐다. 이 결정구조를 상(Phase)라고 하고 전자를 Austenite ( $\gamma$ 철), 후자를 Ferrite( $\alpha$ 철)이라고 하며,  $r$ 에서  $\alpha$ 로 변화를 금속적 변태(Metallurgical Transformation)라고 한다<sup>1)</sup>.

이 철은 양자 모두 Curie 온도(철의 경우 768°C) 이상에서 존재하고 Electron의 Spin은 정렬되어 있지 않아서 자기적으로는 상자성(Paramagnetic)이다. Paraamagnetic  $\alpha$ 철은 Curie 온도에서 전자의 Spin이 정렬되어 강자성(Ferromagnetic)  $\alpha$ 철로 변화하고 이 변화를 자기적 변태(Metamagnetic Transformation)라고 부른다. 금속의 변태과정에서  $r$  Phase와  $\alpha$  Phase가 섞여있는 Mixed State가 존재하는데  $r$ 와  $\alpha$ 의 비율을 변태율이라 정의하며 이 변태율을 정확히 열연공정상에서 측정 하는 것이 매우 중요하다. 이 변태율 측정을 위해 현재 사용되고 있는 온도측정에 의한 방법은 금속의 Transformation Kinetics를 알려주는 직접적인 변수는 아니어서 정확하게 금속의 변태율을 측정할 수가 없었다.

본 연구에서는 금속의 변태율을 제조 공정의 On-Line 상에서 정확히 측정하기 위해 와전류 탐상(Eddy Current Testing) 방식의 변태율변화의 전자기적 측정방법의 원리 및 적용방법 등을 검토하고<sup>2)</sup> 상온에서 변태율이 각각 다른 표준시편 및 Eddy Current Probe를 설계제작 하고 측정을 하였다.

금속의 변태율의 변화는 와전류시험의 출력과 상관관계를 가지며 따라서 전자기적 방법에 따른 On-Line 측정 가능성을 제시하였다.

## 2. 와전류 탐상 변태율 측정의 적용 이론

도체의 교류자계를 인가하면 도체내에 유기된 전계로 인해 전류가 유기되는데 이 전류에 의한 자계가 다시 외부자계에 영향을 주어 전체회로의 Impedance가 변화한다. 이에 관한 기본식은 다음과 같이 표시할 수 있다<sup>3)</sup>.

Basic Field Equation을 Max well 방정식에서 유도하면 (1)과 같다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = j\omega \sigma \mathbf{A} - \mathbf{J}_s \quad (1)$$

2차원 문제에서는 식 (2)로 표시되고

$$\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}_z}{\partial y^2} \right) = -\mathbf{J}_s + j\omega \sigma \mathbf{A}_z \quad (2)$$

측대칭 문제에서는

$$\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial^2 \mathbf{A}_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial \mathbf{A}_\theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \mathbf{A}_\theta}{\partial z^2} - \frac{\mathbf{A}_\theta}{r^2} \right] = -\mathbf{J}_s + j\omega \sigma \mathbf{A}_\theta \quad (3)$$

과 같다.

위의 식과 경계조건을 고려하여 Vector Potential  $\mathbf{A}$ 를 구하면 전체 System의 등가 Impedance는 다음과 같이 표현된다.

$$Z = \frac{j\omega}{\mathbf{J}_s} \oint \mathbf{A} d\mathbf{l} \quad (4)$$

일반적으로 Test 시편이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 Impedance 변화는 다음과 같이 표시된다<sup>4)</sup>.

$$\Delta Z = f(\text{센서 구조}, \mu, \sigma, \omega)$$

와전류 탐상자 구조와 인가 주파수 및 도체형상이 동일한 경우 도체의 결정구조를 와전류 방법으로 측정하기 위해서는  $\mu$ (투자율) 및  $\sigma$ (도전율)과의 상관관계가 있어야 한다.

앞에서 언급한 변태율의 정의에서 우리가 측정하고자 하는 Metallurgical Transformation은 Magnetic Transformation과 일치하지 않는다. 따라서 변태율을 Permeability( $\mu$ )의 변화로 측정하기 위해서는  $\gamma \rightarrow \alpha$  Transformation이 Curie 온도 이하에서 일어난다는 조건 즉 Metallurgical Transformation이 Magnetic Transformation과 동시에 일어난다는 가정이 필요하다. 실제로 냉각 Process 과정에서는 이 가정이 일치하며 Strip Mill의 경우는 완전히 일치하나 Platemill의 경우는 정확히 일치하지는 않는 것으로 보고되고 있다. 특히 Mn이나 Cr같은 원소가 첨가되는 경우 Curie 온도가 변화하는데 이런 경우의 변태율과의 상관관계는 향후 더 연구가 이루어져야 할 분야이다. 따라서 어느 경우에도 Magnetic Transformation 온도는  $r \rightarrow \alpha$  Transformation 온도와 같거나 그보다 낮기 때문에  $r \rightarrow \alpha$  Transformation은 Eddy Current Probe로 검출이 가능할 것으로 판단된다. 금속의 결정구조 변화에 따른 (도전율)변화는 이론적으로 명확히 규명되어 있지는 않으나 실험적으로 변화하는 것이 알려져 있고 Grain Size 및 온도에 따른 영향도 있을 것으로 생각되나 투자율 변화에 비해서는 상대적으로 미소한 변화일

것으로 생각된다. 따라서 위와 같은 여러 조건을 고려할 때 변태율( $r \rightarrow \alpha$  Transformation)은 와류탐상 방법이 가능할 것으로 예상되었다.

### 3. 와전류 Probe 및 표준시편 제작

#### 3.1 와전류 Probe 제작

L Type의 와전류 Probe를 시편(4 cm×15 cm)에 맞추어 제작하였다. Core는 공심인 경우와 측정감도를 높이기 위해서 Ferrite Core를 삽입한 경우 양자를 고려하여 제작하였다. Ferrite Core는  $H_2C_2$  재질을 사용하였고 동선 굵기는 0.2 mm Turn수는 200 T로 하였다.

Probe 형태는 차후의 Computer Simulation 할 경우를 고려하여 Axial Symmetry 구조인 원형 Solenoid로 하였다. 그림 1은 제작된 Probe 외형도이다.

#### 3.2 표준시편 제작

일반철의 경우 Curie 온도 부근의 고온에서만  $r$  Phase 철이 존재하고 상온에서는 존재하지 않으므로 상온에서  $r$  Phase로 존재하는 것이 가능한 Stainless Steel의 표준 시편을 제작하였다.

변태율은 Ni과 Cr의 함량 및 온도를 조절하여 변화시켰고 제작된 시편은 광학현미경으로 관측하여 변태율을 측정하였다. 표 1. 은 표준시편의 화학 조성 및 광학적으로 측정된 변태율이고 그림 2은 철강 표면을 화학 부식시킨 뒤 착색하여 광학 현미경으로 관찰한 사진이다. 그림에서처럼 흰색은  $r$  Phase (FCC 구조)이고, 흑색 부분은  $\alpha$  Phase (BCC 구조)인데  $\alpha$ 량이 증가함에 따라  $\alpha$ (흑색) 면적비가 증가함을 알 수 있다. 1번 시편은 실제 와전류 탐상을 한 경우 측정위치에 따른 오차가 커서 측정부위를 세분화 한 경우로 실제로 광학현미경 관측 결과 각각 다른 변태율을 갖고 있는것이 확인되어서 와류탐상에 의해서도 상당히 정확한 값을 측정할 수 있을 것으로 생각되었다.

### 4. 실험 및 결과

#### 4.1 실험장치 및 등가회로

와전류 측정장치와 이 장치의 식(4)에 따른 등가회로를 표시하면 그림 3과 같다.

등가회로로 생각하면

$$Z_0 = R + j\omega L \quad (\text{시편이 없는 경우})$$

$$Z = R + R' + j\omega(L + L') \quad (\text{시편이 있는 경우})$$

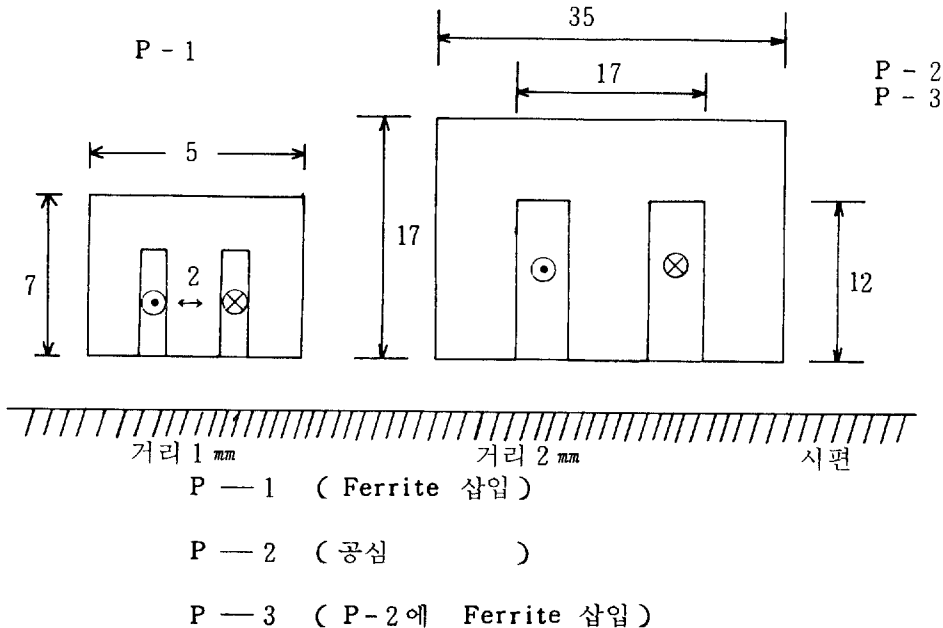


그림 1 와전류 Probe 외형도  
Fig. 1 Diagram of Eddy Current Probe.

표 1. 시편의 조성 및 변태율

Table 1. Elements and Transformation Ratio of test pieces.

시편번호	변태율( $\alpha$ )	C	Si	S	Ni	Cr	Mo	N	Fe	
1	A	35.9	0.02	0.87	0.004	6.55	19.71	5.94	0.23	Bal
	B	33.5								
	C	39.0								
2	51.4	0.01	1.04	0.004	5.50	20.85	6.09	0.24	Bal	
3	63.7	0.01	0.90	0.004	3.93	19.82	5.84	0.24	Bal	
4	86.5	0.03	0.98	0.004	3.17	20.25	5.92	0.21	Bal	
5	98	0.02	0.94	0.005	1.01	19.50	5.83	0.22	Bal	

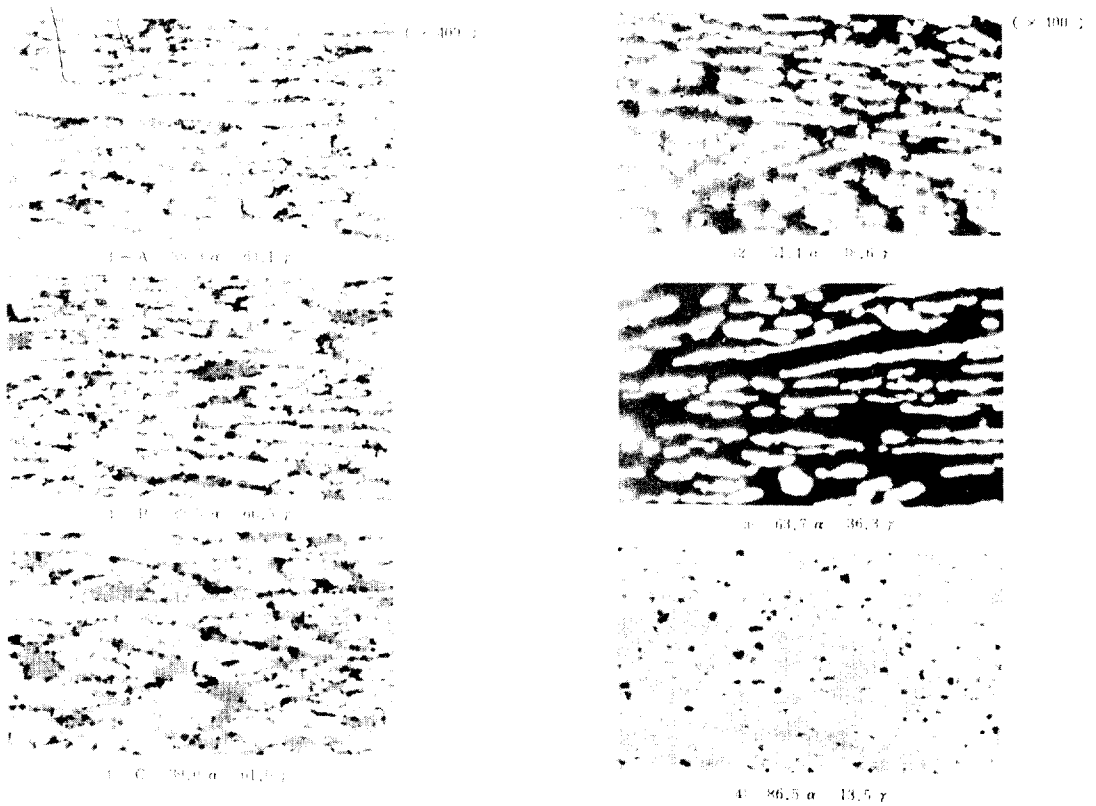
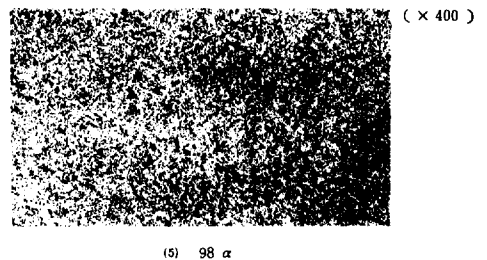


그림 2 시편의 광학현미경 사진  
Fig. 2 Microscope Photography of Test Piece.

\*강 표면을 화학부식시켜서 착색하여 광학현미경 관찰 흰색은 Austenite(FCC 구조)이고, 갈색부분은 Ferrite(BCC 구조)임.



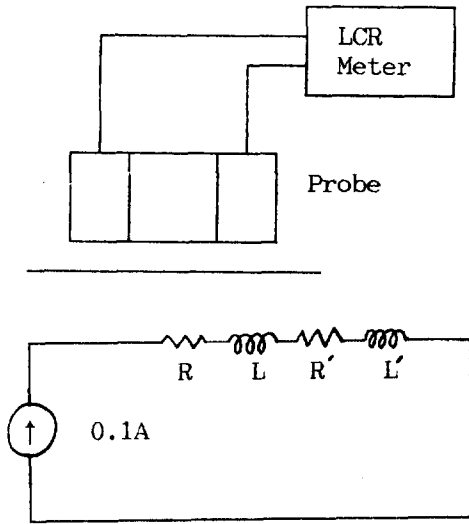


그림 3 와전류측정장치 및 등가회로  
 Fig. 3 Eddy Current Testing System and Equivalent Circuit.

$$\Delta Z = Z - Z_0 = R' + j\omega L' \quad (\text{Impedance 변화량})$$

로 표시된다.  
 본문에서는 Impedance 변화를 X축은 저항성분 (R)로 Y축은 Reactance(μH)로 표시하였다.

4.2 실험 및 고찰

와류탐상 Probe를 시편위에 놓고 등가 Impedance L 및 R 성분을 HP 4262A LCR Meter로 측정하였다. 주파수는 120Hz, 1KHz, 10KHz에서 각각의 시편에 대해 측정하였다. Probe는 공심인 경우와 Ferrite Core를 삽입한 경우 각각에 대해 측정하였다.

LCR Meter의 입력전류는 외부 Impedance에 따라 자동적으로 조절되어 0.1A로 일정하였고 이 크기의 전류에서 철은 포화되지 않는 것으로 생각되었다. 그림 4는 직경 5mm 와전류 Probe-1에 의한 시편 측정의 Impedance 변화도로 시편이 없는 경우 (Air)와 도전율이 큰 구리(Cu), 100% α철과 변태율이 각각 다른 스텐레스 시편 그리고 100% r인 스텐레스 철에 대해 측정주파수 1 KHz에서의 측정결과이다. 그림에서 보면 Nonmagnetic인 Cu와 r철은 공기의 Inductance가 일정한 선의 하부에 존재하고 Magnetic인 중간 변태율 시편과 100% α철은 선의 상부에 존재한다.

α-34에서 α-98 시편은 같은 분위기에서 조성된

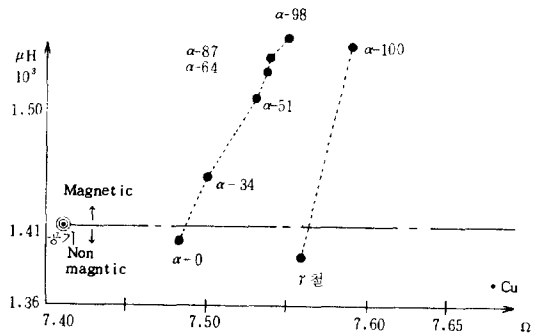


그림 4 P-1 Probe f=1HKz 에서 시편에 대한 Impedance 변화도  
 Fig. 4 Impedance Variation of Testing on P-1 Probe at f=1HKz.

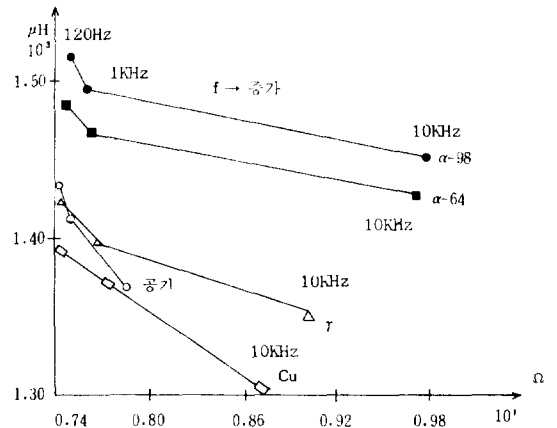


그림 5 P-1 probe(공심)의 주파수에 의한 변화 (120Hz→1KHz 10KHz)  
 Fig. 5 Output on P-1 Probe (Air Solenoid) With Frequency Variation.

시편으로 α량이 증가하면 Inductance 성분과 저항 성분 양자가 모두 증가하며 α량이 적은 부분에서 보다 큰 임피던스 값의 변화를 보이고 있다. α-34에서 α-98시편의 변화곡선에서 α량의 변화는 투자율 변화 및 도전율 변화에 영향을 주고 있음을 알 수 있고 도전율 변화는 투자율 변화보다 상대적으로 작은 값을 가짐을 알 수가 있었다.

α-98 시편과 α-100 시편은 거의 같은 임피던스 값을 갖을 것으로 예상되었으나 실제 시험에서는 상당히 다른 값을 보이고 있으며 이는 α-100 시편은

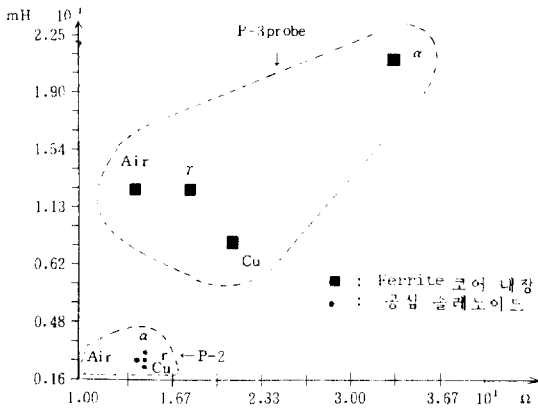


그림 6 Ferrite 코어사용 유무에 따른 변화, P-2(공심), P-3(Ferrite 내장),  $f=1\text{KHz}$   
**Fig. 6** Impedance Variation With Air Solenoid (P-2 Probe) and Ferrite Core (P-3 probe),  $f=1\text{KHz}$ .

Fe가 99% 이상으로 Fe에 의해서만  $\alpha$ Phase를 형성하나  $\alpha$ -34~ $\alpha$ -98 시편은 Ni-Cr에 의한 Phase도 형성함으로써 Microscopic한 투자율 효과가 다르므로 다른 원소의 조성 및 냉각조건 그리고 Grain Size 등의 차이에 따른 도전율의 차이에서 기인하는 것으로 생각된다.

$\alpha$ -0점은  $\alpha$ -98~ $\alpha$ -34의 연결선을 비자성체인 경우로 확장한 경우로서 Ni과 Cr로 조절하여 100%  $r$  철을 만든 경우 예상되는 출력점이다.

$\alpha$ -0(100%  $r$ ) 점이 시판되는  $r$ 철과 같은 비자성체이고 화학 조성도 거의 비슷한데 위와 같은 차이를 보이는 것도 다른 분위기에서 조성되어 도전율이 서로 다른 점에 기인하는 것으로 생각된다.

그림 5은 공기, 구리,  $r$ 철,  $\alpha$ -64,  $\alpha$ -98 시편에 대해서 와전류센서의 주파수를 120Hz, 1KHz, 10KHz로 변화 시키면서 측정된 Data를 도표로 나타내었다. 120Hz에서는 (도전율)에 의한 효과는 거의 없어서 정자계(Magnetostatic Field) 효과만 나타나고 주파수가 증가함에 따라 등가저항 성분이 증가한다. 따라서 와전류 탐상에서 인덕턴스 성분과 저항성분 중 하나만 측정할 경우 측정주파수가 높은 경우 저항성분을 기준으로 삼는 것이 S/N비가 좋을 것으로 사료된다. 10KHz에서 Cu의 저항성분보다  $r$ ,  $\alpha$ -64,  $\alpha$ -98 시편의 저항 성분이 큰 것은 Cu가 도전율이 다른 시편에 비해 월등히 큼에도 불구하고 투자율이 다른데 따른 와전류 문제의 고유한 특성으로 생각된다<sup>6)</sup>

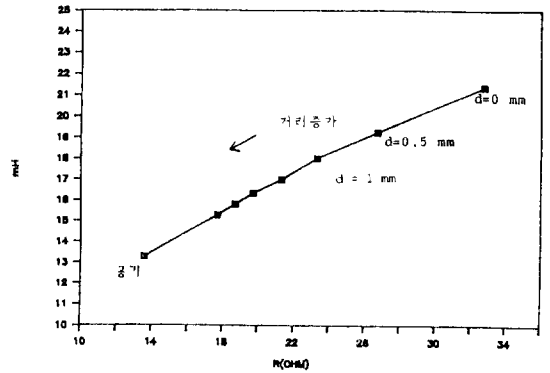


그림 7 probe와 시편사이의 거리변화에 따른 P-3의 출력,  $f=1\text{KHz}$   
**Fig. 7** Impedance Variation of P-3 probe with Distance between probe and Sample at  $f=1\text{KHz}$ .

그림 6에서는 와전류 탐촉자가 공심인 경우와 Ferrite를 사용한 경우 출력 비교이다. 주파수 1KHz에서 공기, Cu,  $r$ ,  $\alpha$ -100 시편의 경우 Ferrite core를 사용하는 것이 측정감도가 10배 이상 높고 시편간의 출력변화의 차이도 크다. 따라서 상온에서의 와전류시험은 Ferrite Core가 내장된 탐촉자를 사용하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 단, 이 경우는 와전류 Probe 설계시 해석적인 해는 구할 수 없고 비교적 정확한 수치 해석 방법을 적용해야 할 것이다.

그림 7은 Probe와 시편의 거리를 0.5 mm 간격으로 이격시켜 가면서 측정된 Impedance 변화로 거리에 따라 지수함수적으로 감소하면서 Air상태(시편이 없는 경우)로 접근함을 알 수 있다. 따라서 가능하면 시편과 Probe를 밀착시키는 것이 측정시 보다 큰 출력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 15 mm정도 이격시키면 시편이 없는 상태인 Air 상태에 도달하였다.

### 5. 결 론

금속의 변태율을 와전류시험에 의해서 측정된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 금속의 변태율을 비접촉 방식으로 on-line 측정이 가능한 와전류 방법을 적용 표준시편과 비교한 결과 와전류 방법의 적용이 가능함을 확인하였다.

2) 변태율 변화에 와전류탐상 출력은 변태율이 작

은 부분에서 측정감도가 좋다.

3) 출력은 변태율이 증가함에 따라 인덕턴스와 저항성분 둘다 증가하였다.

4) 입력 주파수가 증가함에 따라 와전류탐상 출력의 변화폭이 증가하였다.

5)  $r \rightarrow \alpha$  Transformation에서 도전율의 변화는 투자율의 변화에 비해서는 상대적으로 작으나 주파수가 증가하는 경우는 무시할 수 없다.

6) 측정 감도를 증가시키기 위해서는 Ferrite를 사용하는 것이 필요하나 고온에서는 온도에 따른 효과를 고려해야 한다.

7) 본 연구에서 skin effect는 일반탄소강의 경우 0.2 mm 정도이므로 철판 두께의 영향은 무시할 수 있을 것으로 생각된다.

8) 와전류 탐상은 그 측정의 적용방법 측면에서 매우 다양하여 금속체의 비파괴 검사와 산업공정에서의 센서로서의 많은 적용 가능성을 갖고 있으므로 새로운 분야에 적용하는 많은 연구가 필요한 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- 1) Proceedings International Conference on steel Rolling vol. 2, pp 1286-1287, Tokyo Japan, 1980.
- 2) Nondestructive Testing Handbook, vol 4, E and M Testing, 1986.
- 3) 非破壊 検査(Japan) 第34卷 第4號 昭和60年 4月 pp. 242-251.
- 4) Hagemaiier, D. J "Eddy Current Impedance Plane Analysis," Materials Evaluation. vol. 41, no. 2 (1983);pp. 211-218.
- 5) 非破壊 検査(Japan) 第31卷 第1號 昭和57年 1月 pp. 11-19.
- 6) J.A. Tegopoulos, "Eddy Currents in Linear Conducting Media" 1985.
- 7) GIRGIS A. GIRGIS and AWAD BAST-AWROS, "Nondestructive Eddy Current Testing for the Measurement of Conductivity and Surface Buckling of Metallic Sheets," IEEE Trans Instrum. Meas., vol. IM-35, pp. 619-623, 1986.
- 8) R. Palanisamy and W. Lord, Finite Element Analysis of Eddy Current phenomena, Materials Evaluation October, pp. 39-43, 1980.
- 9) Jae-Yel Yi and Sekyung Lee, Proceedings of 11th world NDT Conference, 115 (1985).
- 10) R.C McMaster, "A New. Eddy Current Non-destructive Test," Met. Eng. Quart., vol. 6. pp. 32-49, 1966.
- 11) Sang-Bong Wee, Min-Koo Han and Han-Soo Kim "Numerical and experimental method for nondestructive Evaluation of the Transformed Fraction and Cracks in Metal by Eddy Current Probe," Proceeding of 3rd IEEE CEFC, Dec. 1988.