와류탐상에 의한 금속의 변태율 측정

위 상 봉* 한 민 구
서 울 대 학 교 전 기 공 학 과

Eddy Current Testing to Measure Transformation Ratios in Metal

Min-Koo, HAN. Sang-Bong, WEE.
Dept of Electrical Eng, Seoul National University

ABSTRACT

Eddy Current Sensor to Measure the $\gamma-\alpha$ Transformation Ratio of Metal is Designed and Implemented.

Experimental Results Regarding to Impedance Variation due to $\gamma-\alpha$ Transformation Ratio of Metal Under Room Temperature are Reported. It Was Found That the Impedance of Metal is Increased With Increasing $\gamma-\alpha$ Ratio.

1. 서론

재철소의 열연공정의 제어에는 rolling 중에 일어나는 금속의 상변태에 관한 정확한 Data를 필요로 한다.[1] 균일한 철판을 제조하거나 우수한 기계적 특성의 철을 만들기 위해서는 냉각조건 및 냉각 Process의 정밀한 제어가 요구되고 있다. 현재는 금속의 상변태에 관한 Data를 온도측정에 의한 간접적인 방법을 사용하고 있는데 온도는 금속의 Transformation Kinetics를 알려주는 직접적인 변수는 아니기 때문에 오차가 많다. 이러한 관점에서 금속의 전자기적 특성에 기초를 둔 와전류 탐상[2]을 변태율 측정에 적용하기[7]위해 실제 와전류 센서를 제작하고 고온에서의 철의 변태율 변화를 근사시킬 수 있는 시편을 제작하여 상온에서 측정하고 그 측정 가능성을 확인 하였다.

2. 기본이론

금속의 상에서 γ phase는 전자기적 성질이 Paramagnetic 이고 α phase 는 Curie Temperature 이하에서는 Ferromagnetic[3] 이다. 즉 Cooling 조건에서는 쇳물에서 철판이 되는 과정에서Paramagnetic γ phase로 그리고 약 768 °C 근방의 Curie Temperature 이하에서 Ferromagnetic α Phase로 변화한다. 그러므로 Transformation은 전자기적으로 검출이 가능하다

3. 와전류 탐상이론

도체에 시변 외부자계를 인가하면 도체내에 유기된 전계로 인해 전류가 유기되는데 이 전류에 의한 자계가 다시 외부자계에 영향을 주어 전체회로의 Impedance가 변화한다. 이에 관한 기본식은 아래와 같다.[4] [5]

Basic Field Equation을 Maxwell방정식에서 유도하면

$$\frac{1}{\mu}\nabla^2\vec{A} = j\omega\sigma\vec{A} - J_S \quad -(1)$$

2D - Ploblem 에서는

$$\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial^2\vec{A_z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vec{A_z}}{\partial y^2}\right) = -J_S + j\omega\sigma\vec{A_z} \quad -(2)$$

Axial Symmetry - Ploblem 에서는

$$\frac{1}{\mu}\left[\frac{\partial^2\vec{A_\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial\vec{A_\theta}}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2\vec{A_\theta}}{\partial z^2} - \frac{\vec{A_\theta}}{r^2}\right] = -J_S + j\omega\sigma\vec{A_\theta} \quad -(3)$$

과 같다.

위의 식과 경계조건을 고려하여 Vector Potenial $\vec{A}$ 를 구하면 전체 System 의 Self Impedance는 다음과 같이 표현된다. $Z = \frac{j\omega}{J_S}\oint\vec{A}\,dl$ $\quad -(4)$

일반적으로 Test 시편이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우의 Impedance 변화 ΔZ는 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta Z = f(\text{Geometry, 센서구조, } \mu, \sigma, \omega) \quad (5)$$

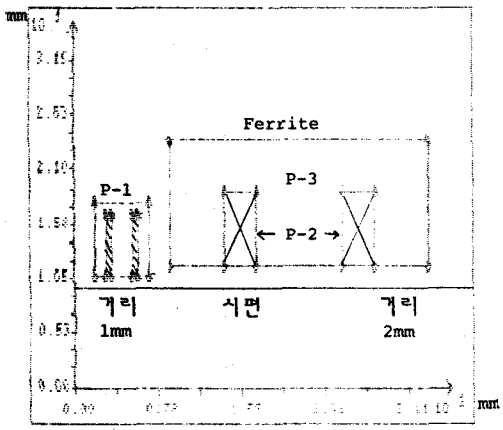
4. 와전류 Probe 제작

와전류 Probe는 실제 열연공정에 사용될 경우 Curie 온도 부근에서 사용됨으로 공심 Solenoid 형태

로 해야 할것으로 추정되나 실제 연구실에서 측정시 상온에서 측정하는 경우 측정감도를 높이기 위해 Ferrite Core를 삽입해서 설계하였다. Ferrite는 TDK의 H_7C_1 Core를 사용하였다.

Probe는 제작된 시편 Size가 작아서 가능하면 End Effect를 줄이기 위해 한개는 지름 8mm의 소형으로 제작하여 Epoxy로 Molding 하였고 다른 1개는 25mm 크게 제작하여 공심인 경우와 비교가능하게 하였다. 그림1은 제작한 와전류 Probe 외형도이다.

그림1. 와전류 Probe 와형도



P-1 Probe (Ferrite 유, 5 X 7 원통형)
P-2 Probe (Ferrite 무, 22 X 12 원통형)
P-3 Probe (Ferrite 유, 35 X 17 PQ Core)

5. 시편제작

일반철의 경우 Curie 온도 근방의 고온에서는 γ (Austenite) Phase 가 존재하지만 상온에서는 존재하지 않으므로 상온에서 변태율의 변화가 가능한 Stainless Steel의 시편을 의뢰하여 제작하였다. 변태율은 Ni과 Cr 의 함량으로 조절하였고 제작된 시편은 광학현미경으로 관측하여 변태율을 측정하였다.

표 1. 시편의 조성 및 변태율

%	C	Si	S	Ni	Cr	Mo	N	Fe
18	0.02	0.87	0.004	6.55	19.71	5.94	0.23	Bal
38	0.01	1.04	0.004	5.50	20.85	6.09	0.24	Bal
48	0.01	0.90	0.004	3.93	19.82	5.84	0.24	Bal
80	0.03	0.98	0.004	3.17	20.25	5.92	0.21	Bal
98	0.02	0.94	0.005	1.05	19.50	5.83	0.22	Bal

6. 실험 및 고찰

와류탐상 Probe를 시편위에 놓고 등가 Impedance L 및 R을 HP 4262A LCR Meter로 측정하였다. 주파수는 120Hz,1KHz,10KHz 로 가변시키며 각각 측정하였다. Probe는 공심인 경우와 ferrite core 를 사용한 경우 그 각각에 대해 측정하였다.

그림 2는 직경 8mm 와전류 Plobe-1에 의한 시편 측정의 임피던스 Diagram으로 시편이 없는 경우 (Air)와 도전율이 큰 구리 (Cu), 100%γ철과 변태과정에 있는 시편 그리고 100%α철에 대해 측정주파수 1KHz에서의 측정결과이다. Nonmagnetic 인 Cu와 γ철은 공기의 리액턴스가 일정한선의 하부에 존재하고 중간 변태율 시편과 100% 철은 선의 상부에 존재한다. α-18에서α-98 시편은 같은 분위기에서 조정된 시편으로 량이 증가함에 따라 임피던스가 X축, Y축 둘다 증가함을 보이고 있다. α량이 작은 부분에서 보다 큰 임피던스 값의 변화를 보이고 있다.

α-98 시편과α-100 시편은 거의 같은 임피던스를 갖을 것으로 예상되었으나 그림에서와 같이 상당한 크기의 차이를 나타내고 있으며 이는α- 100시편은 Fe가 99% 이상으로 Fe에 의해서만 α Phase를 형성하나α-18 ~α-98 시편은 Ni-Cr에 의한α Phase도 형성함으로서 Microscopic한 투자율 효과가 다르고 다른 원소의 조성 및 냉각조건 Grain Size 등의 차이에 따른 (도전율)의 차이에서 기인하는 것으로 생각된다. γ철은 대량생산되는 스텐레스 철판을 시편으로 한 경우로서 역시α-18 ~α-98 시편과는 다른 화학조성과 냉각조건을 갖고 있으므로 해서 다른 δ 를 갖고 있는것으로 추측된다.

상온에서의α-18~α-98 시편의 측정결과로 볼때 재철소의 열연공정상에서 Curie 온도 부근의α- Transformation 변화에 따른 와전류 센서 출력은γ철 시편과α-100 시편 사이를 직선으로 연결하는 Phase Diagram 상에 나타날것으로 생각되며 변태율 변화에 대한 출력추이는 상온에서의 시편추이와 유사할 것으로 전망된다.

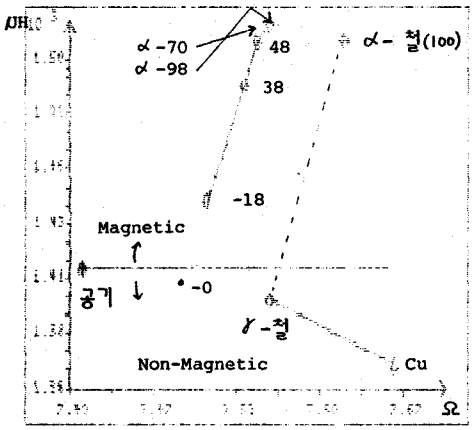


그림2. 시편의 Phase Diagram.Probe-1 f=1KHz

그림3은 공기, 구리, 철, α-48, α-100 시편에 대서 와전류센서의 주파수를 120Hz, 1KHz, 10KHz 로 변화시키면서 측정한 Data를 도표로 나타내었다. 120Hz에서 δ (도전율) 에 의한 효과는 거의 없어서 정자계(Magnetostatic Field) 효과만 나타나고 주파수가 증가함에 따라 등가저항 성분이 증가하고 있다 따라서 와전류 탐상에서 리액턴스와 저항성분 중 한 성분만으로 측정할 경우 측정 주파수가 증가함에 따라 저항성분을 이용하는것이 S/N비가 좋을것으로 사료된다. 10KHz 에서 Cu의 저항성분 보다 나머지의 γ, α-48, α-100의 저항 성분이 더 높은 것은 Cu가 도전율이 다른시편에 비해 월등히 큼에도 불구하고 Permeability 차이에 따른 와전류문제의 고유한 특성으로 생각된다.

그림3. 주파수에 따른 변화 (P-1) 120Hz,1KHz,10KHz

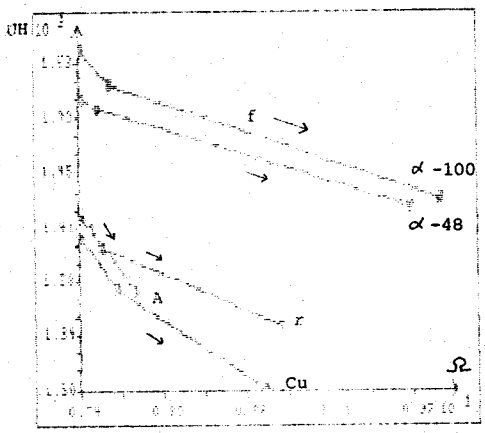


그림4에서는 와전류센서가 공심인 경우와Ferrite 를 사용한 경우의 Phase Diagram으로서 주파수 1KHz 에서 공기, Cu, γ, α-100 시편에 대해 측정한 것이다. 공심 Solenoid Type에 비해 ferrite Core를 삽입한 경우 측정감도가 10배 정도 높으며 따라서 상온에서의 와전류탐상은 Ferrite Core를 사용하는 것이 좋을것으로 생각된다. 단 이경우는 와전류 Probe 설계시 Analytic한 해는 구하기 어렵고 비교적 정확한 수치해석 방법을 도입해야 할것이다. [6]

그림4. Ferrite 유무에 따른 변화, P-2,P-3,f=1KHz

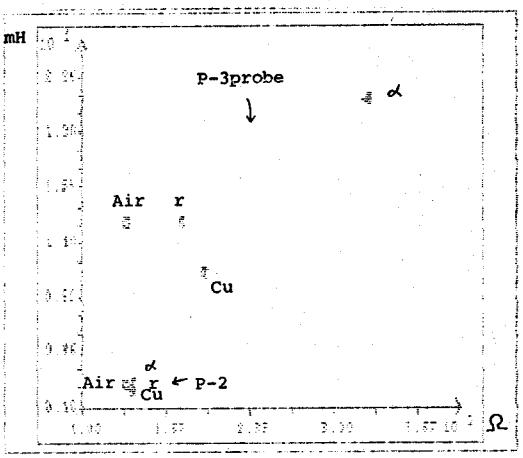
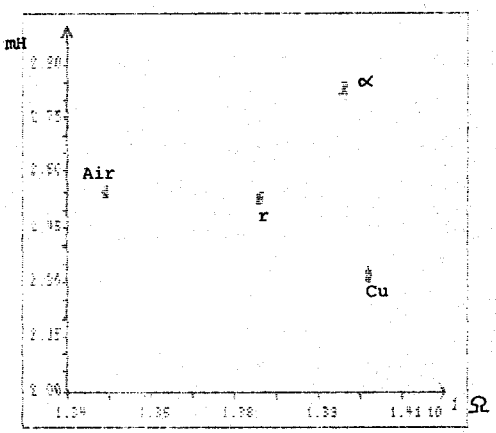


그림5. (P-2) 공심 Probe에 의한 출력, f=1KHz



7. 결 론

가. 상온에서의 금속의 변태율 변화에 따른 와전류 탐상을 함으로서 고온에서의 변태율의 ON-Line 측정 가능성을 제시하였다.

나. 변태율 변화의 추이는 변태율이 적은 부분에서 측정감도가 우수하였다.

다. 금속의 경우 α-Phase 양이 같아도 화학적 조성이 다르면 Microscopic 한 관점의 μ 와 σ 가 다르므로 센서 출력이 다르게 측정되었다.

라. 고온에서의 변태율 측정의 정밀도를 향상시키기 위해서는 냉각 과정에서의 금속조성 변화에 따른 σ(도전율) 변화에 대한 미시적 연구가 필요하다.

마. Curie 온도부근에서는 Ferrite는 사용이 불가능할것으로 전망되고 공심 Solenoid 형태로도 Probe Size를 증가하고 입력전류를 증가시키면 변태율의 측정이 충분히 가능할 것으로 전망된다.

바. 시편은 불순물 함량 및 상호조성비에 따라 μ 와 σ 에 변화를 주는것으로 판단됨으로 어떤 불순물이 어느정도 μ 또는 σ 에 영향을 주는가에 대한 연구가 필요할것 같다.

사. 와전류 탐상을 금속에 적용하는 경우 출력변화에 영향을 주는 인자는 금속체의 물성 (결정구조, 화학조성), 표면상태 (Crack, 피막두께), 구조 및 센서의 구조등 매우 다양한 특성을 갖고 있어서 금속,기계,항공 및 자동화분야등에서 매우 다양한 용도로 사용될 수 있을것으로 전망된다.

8. Reference

1) Kazuo MIYAGAWA, "Non-Destructive Evaluation of Metallugical Properties of Steel Products" (Japan) 非破壊検査. 第31卷 第1号, PP11~19 昭和57年1月.

2) GIRGIS A. GIRGIS and AWAD BASTAWROS, "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.

3) J.K.WATSON, "APPLICATIONS OF MAGNETISM" WILEY INTERSCIENCE PUB, PP 150-170, 1980

4) R.C. McMaster, "A New Eddy Current Nondestructive Test, "Met. Eng. Quart., Vol. 6, PP.32-49, 1966.

5) Nondestructive Testing Handbook, Vol 4, E M Testing, 1986.

6) Hagemaier, D.J. "Eddy Current Impedance Plane Analysis." Materials Evaluation. Vol. 41, No.2 (1983) : PP 211-218

7) Morita, "EUROPEAN PATENT" Application Number : 85106293.5