열연공정의 온라인 변태율 측정장치

김 상영, 강 명구
포스코 기술연구소

On-line measurement of metallurgical transformation in hot-rolled steel

Sang-Young Kim, Myoung-Koo Kang
Technical Research Laboratories, POSCO

ABSTRACT - The mechanical properties of a hot rolled steel is mostly governed by a cooling control on the run out table. During the cooling control, the hot rolled steel performs a metallurgical transformation(austenite → ferrite) which can be measured with a magnetic flux detector. The magnetic flux detector consisting of exciting and detecting coil can estimates the metallurgical transformation by measuring the variaion of permeability in steel. We developed the method of detecting the magnetic property of hot rolled steel and processing the measured signal, which makes possible to measure on-line metallurgical transformation.

1. 서론

철강의 성질과 강도는 성분과 그 조직에 의하여 결정된다. 철강 공정의 열간압연은 그림.1에 보인 것처럼 연주, 분괴공장의 슬랩(slab)을 가지고 가열로, 조압연기, 사상압연기와 권취기로 구성되는 일련의 과정을 수행하면서 이루어진다. 이러한 열간압연과정 동안 철강의 조직은 사상압연기(finishing mill)와 권취기(down coiler) 사이에 놓이는 수냉구간에서 결정된다. 제어냉각 과정은 열연강판이 수냉구간을 통과할 때 물의 양을 조절하여 철의 내부조직을 변화시킨다. 철은 성분과 압연된 정도에 따라서 다르지만 약 770 °C 근처에서 금속학적 변태(오스테나이트 조직, γ → 페라이트 조직, α)를 한다. 이러한 금속학적 변태온도는 철의 큐리온도(약 768 °C)와 거의 일치한다. 금속 변태율 센서는 큐리온도의 근처에서 열연강판의 자기적 성질변화를 측정하여 금속학적 변태율을 계산하는 방법으로 그림.2에 도식적으로 나타내었다.[1]

일본에서는 1980년대 초반부터 변태율 센서의 개발연구를 수행하여 80년대에는 개발된 센서를 열연공장에 현장적용 연구를 추진하고 있다. 이러한 변태율 센서의 실용화가 이루어지면 센서의 출력정보를 궤환(feedback)하여 냉각수량을 제어하는 온라인 재질제어가 가능하게 된다. 본 연구는 변태율 측정 센서의 이론과 현장 적용의 방법에 관한 것이다.[1],[4]

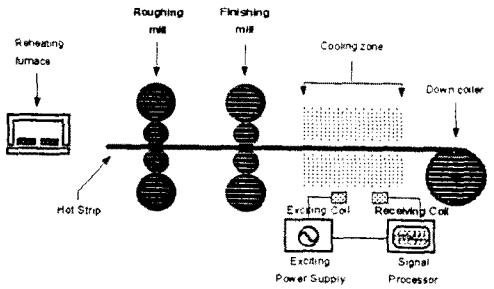
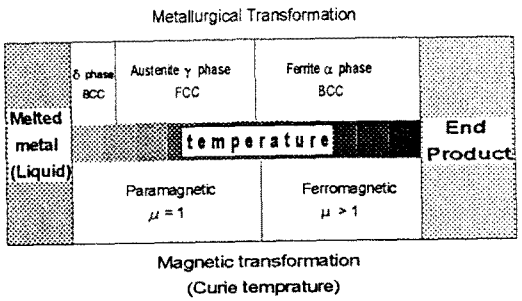


Fig.1 Block diagram for measuring metallurgical transformation in hot rolled process



$$Transformation\ rate(\%) = \frac{Volume\ of\ \alpha\ phase\ in\ metal}{Total\ volume\ of\ metal} \times 100$$

Fig.2 Drawing of metallurgical transformation($\gamma \rightarrow \alpha$) of hot rolled steel

2. 재료의 자기적 성질을 측정

그림.3와 같이 z축상으로 residual magnetization이 존재하는 half infinite한 전도체를 고려하자. 이때 원통좌표에서 (r_o, l)에 위치한 delta-function type 코일에 의한 vector potential은 다음과 같은 미분방정식을 만족시킨다.[2][3]

$$\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial A^2}{\partial r^2} - \frac{A}{r^2} - i\omega\mu\sigma A + \mu_o I\delta(r-r_0)\delta(z-l) = 0 \quad (1)$$

식(1)은 도체가 선형적하고 등방성이며 동질임을 가정한 수식이며, 그림.3에서 나타낸 바와 같이 세 영역으로 나누어 방정식의 해를 구하고, 경계조건에 맞추어 상수를 결정함으로써 얻어진다. 그림.3의 경계조건은 다음과 같다.

$$A^I(r,l) = A^{II}(r,l) \quad (2)$$

$$\frac{\partial A^I}{\partial z}(r,l) = \frac{\partial A^{II}}{\partial z}(r,l) - \mu_0 I\delta(r-r_o) \quad (3)$$

$$A^{II}(r,0) = A^{III}(r,0) \quad (4)$$

$$\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial A^{II}}{\partial z}(r,0) = \frac{1}{\mu}\frac{\partial A^{III}}{\partial z}(r,0) \quad (5)$$

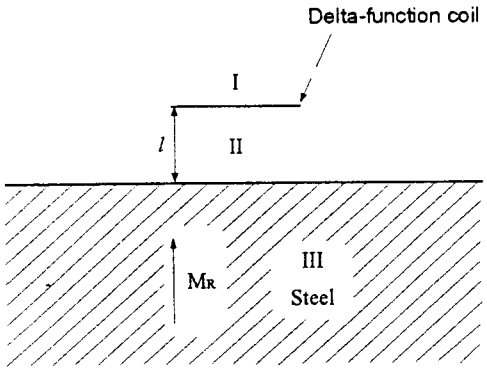


Fig.3 Deta-function coil above a ferromagnetic conducting half space with the residual magnetization directed along z-axis

코일에 의한 자화력의 크기가 작다면 영역 I에서의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$A^I(r,z) = \frac{1}{2}\mu_0 I r_0 \int_0^\infty da J_1(ar_0)[\exp(al) + \frac{a\mu - a_1\mu_0}{a_1\mu_0 + a\mu}\exp(-al)]\exp(-az)J_1(ar) \quad (6)$$

여기서 μ는 전도체의 reversible permeability이다. 이때 코일의 임피던스는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$Z = i\pi\mu_0\omega r_0^2 \int_0^\infty da J_1^2(ar_0)[1 + \frac{a\mu - a_1\mu_0}{a_1\mu_0 + a\mu}\exp(-2al)] \quad (7)$$

식(7)의 코일에서 측정되는 임피던스의 변화는 전도체의 자기투자율 μ, 전기전도도 σ와 리프트오프 l에 따라서 값이 달라지는 것을 나타내어 준다. 금속의 온도변화에 의한 전기전도도 σ의 변화는 자기투자율 μ의 변화보다 매우 적은 양이므로 무시될 수 있다. 그러므로 식(7)의 임피던스 변화로 검출코일에서 측정된 유기전압의 크기는 센서와 열연강판 사이의 거리(리프트오프)와 자기투자율에 따라 변화한다.

3. 실험 및 측정결과

그림.4는 실험장치의 블록도이다. 교류전압 발진용 전원장치(Power supply)는 파형 발생기(Fuction generator)에서 정현파 신호를 받아서 안정적으로 교류전류를 발진용 코아의 코일에 공급하도록 설계되었다. 검출용 코일에서 검출된 신호는 신호증폭시(Receiving Amplifier)에서 전압을 필터링하여 오실로스코우크로 신호를 보내준다. 이러한 오실로스코우프에서 받은 신호는 프린터에 직접 연결해서 출력하거나 GPIB를 통한 컴퓨터와 연결해서 신호를 검출할 수 있다.[1]

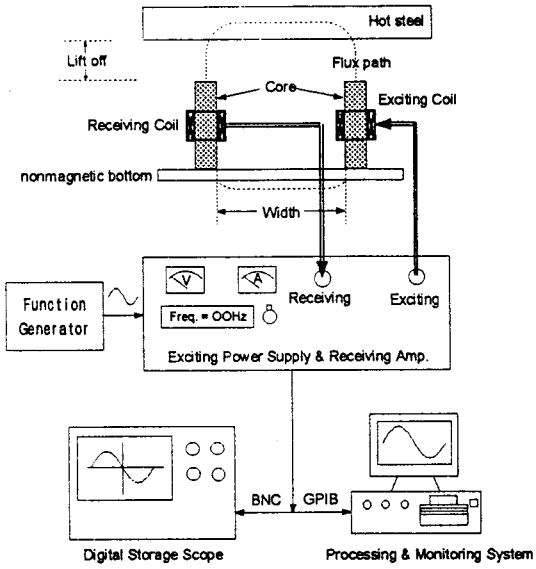


Fig.4 Block diagram of experimental setup

자속의 변화로 측정하는 장치에서 발진용코아의 코일에 일정한 자속을 발생시키기 위해서 정전류를 공급해야 한다. 그림.5는 교류전류를 일정하게 유지하기 위한 회로도이다.

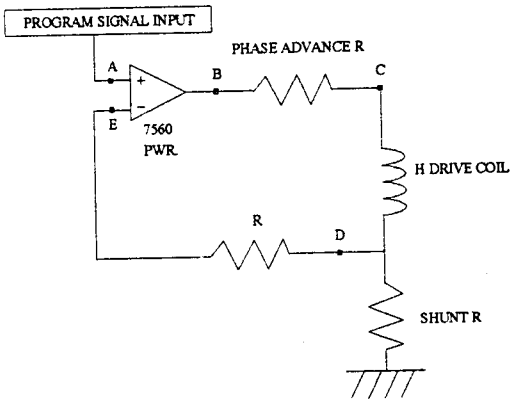


Fig. 5 Circuits for generation of constant current

시험편에 인가하는 코일(H drive coil)에 일정한 전류를 가하기 위하여, shunt저항에 전압을 측정하고 이 전압으로 전류를 계산하여 7560 Power의 전압을 조정하였다. 또한 정전류가 이상적으로 이루어지도록 C점에 Phase advance용 R을 사용하여 위상이 A점보다 +90°되게 선택하였다. A점과 E점의 위상을 동일하게 하여, Hamonic distortion이 최소가 되는 이상적인 정전류 구동의 회로를 만들었다.

그림.6은 측정주파수가 600 Hz와 50 Hz에서 페라이트 조직으로 된 스테인레스(STS430)의 리프트오프를 변화시키면서 측정된 전압

신호를 나타내어 준다. 변태량이 일정한 시험편인 경우에도 리프트오프가 커짐에 따라서 측정된 전압이 줄어들고 있다. 일본 특허[4]에서는 그림.4에 보인 수신기를 2 개로하여 각각에서 받은 정보를 가지고 리프트오프와 변태율을 분리시킬려고 시도하였다. 그러나 리프트오프와 변태율은 식(7)에 보는 것처럼 복잡하게 관련되어 변태율과 리프트오프를 분리시켜 동시에 두 양을 알기가 어렵다.

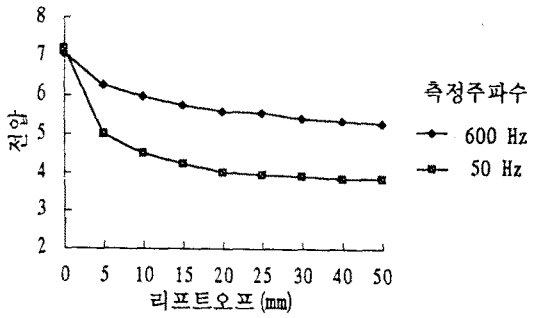


Fig.6 Variation of measured voltage versus lift-off by using the setup of Fig.4 and STS430.

4. 현장 온라인 시스템 구성

열연공장에서의 온라인 변태율 센서를 활용하기 위해서는 보다 빠른 신호처리 뿐만 아니라 측정 신호처리의 방법에 있어서도 단순화를 해야한다. 그림.7은 그림.4의 측정시스템을 열연강판의 아래에 설치하고 신호를 받아서 처리하는 과정을 모사하였다. 그림.7의 A는 열연강판을 사상압연기 스탠드 사이의 거리(L)의 2배가 되는 거리로 열연강판을 길이방향의 폭으로 나눈 것을 나타낸다. 사상압연기 각 스탠드 사이에서는 정상파가 압연중에 형성되고, 정상파가 냉각구간에서 진행파로 바뀐다. 사상압연기 각 스탠드 사이에 형성된 정상파의 파장은 스탠드 사이 거리의 2배가 된다.

$$\lambda = 2L \qquad (8)$$

여기에, λ는 각스탠드 사이에 형성된 정상파의 파장이고, L은 사상압연기 스탠드 사이의 거리이다. 냉각설비를 통과하는 고온 열연강판은 각 스탠드 사이에서 형성된 정상파가 진행함으로 같은 파장을 가지고 진행한다. 따라서 고온 열연강판의 진동주기는 정상파의 파장에 열연강판의 속력을 나눈 값이 된다.

$$T = \frac{2L}{V} \qquad (9)$$

여기서, V는 열연강판의 이송속도이고 T는 변태를 측정하는 최소의 단위시간이다. 이러한 단위시간은 열연강판의 이송중 롤러에 열연강판이 최소의 위치로 한번 내려올 수 있는 시간이다. B는 열연공정 수냉구간의 롤러사이에서 변태율 센서로 검출된 신호이다. 측정된 신호는 열연강판의 변태율이 같은 경우에도 진동에 의한 리프트오프의 변화로 B에 보인 것처럼 측정되는 신호는 변화된다. 그림.6에 보인 것처럼 리프트오프가 큰 경우에는 작은 유기전압 값을 나타내고, 리프트오프가 작은 경우에는 큰 유기전압 값을 나타낸다. 제7도의 C는 최대전압 측정기로 단위시간 동안 측정된 신호의 최대값을 구하고, 이러한 최대전압을 그림.7 D에서 변태율의 값으로 계산된다. 열연강판이 냉연구간에서 최소의 위치(롤러와 접촉)에 올 경우의 리프트오프는 일정하므로 측정된 전압신호로 변태율을 계산하는 것이 가능하다.

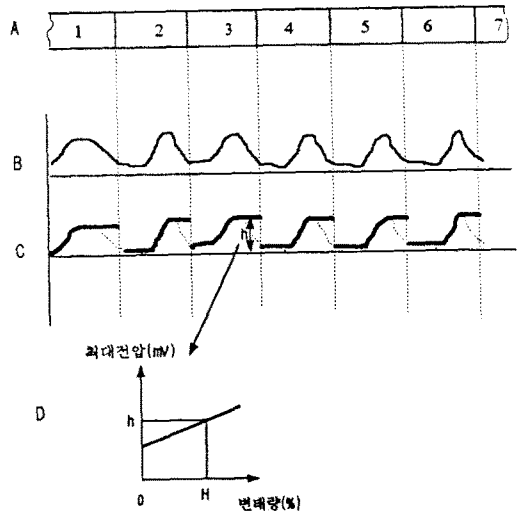


Fig.7 Signal processing of metallurgical transformation in hot-rolled process

5. 결론

제철공정의 열연공장에서 금속의 재질을 제어하는 목적으로 제어냉각 과정을 수행하는데, 이러한 제어냉각 과정동안 온라인으로 변태율을 측정할 수 있는 시스템을 제안하였다. 자성을 띤 도체 주이에 놓인 코일에서 측정되는 임피던스변화는 리프트오프와 도체의 자기투자율에 커게 의존한다. 리프트오프가 증가함으로써 측정된 신호는 감소하였다. 현장 온라인 시스템에 적용하기 위하여 이러한 리프트오프의 변화를 계산하여야 한다. 본 시스템은 측정단위 시간동안 리프트오프가 최소인 위치의 측정신호(최대값)를 가지고 변태율을 계산하였고, 리프트오프 변화에서 오는 효과를 제거하여 쉽고 정확한 변태율을 측정을 하였다.

참고문헌

1. "Magnetic flux leakage 센서의 제작에 관한 연구", 포항종합제철, 기술연구소, 1996.4-1996.10
2. "와전류 탐상용 탐촉자 개발", 1차년도 보고서, 과학기술처, 1984
3. Jack Blitz, "Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing", 1991
4. "강철재의 변태량 및 평탄성의 온라인 측정장치", 1984, 특허 공고번호 90-5481