

이진락^o, 백기남
산업과학기술연구소 제어연구부

A study on the metallurgical transformation detector

Lee jin-rak^o, Peak ki-nam
Control Department of

Research Institute of Industrial Science & Technology

1. 서론

최근에는 제철공정에서의 전자기적인 시험법을 이용한 비파괴, 비접촉방식 재질측정이 많이 적용되고 있는데 그 사례로는 선재공정에서의 열간 표면용 탐상, 냉연공정에서의 경도측정, 열연공정에서의 변태율측정, 연주공정에서의 용탕높이측정 등이 있다. 그리고 연주슬라브나 빌렛트 주조공정에서의 자기고반장치(BMS)도 전자기이론을 응용한 예로 들 수 있다. 그중에서도 열연공정에서의 on-line 변태율 측정기술은 와전류 방식 센서를 이용하여 냉각중인 철의 내부 미세 결정조직 변화를 직접 측정하는 기술으로써 최근 각종 제철소에서 실용화에 박차를 가하고 있는 중요 기술이다. 종래 열연공정에서의 재질 제어는 강종별로 마무리 압연온도, 권취온도, 냉각패턴을 테이블화하여 미리 정해두고 냉각을 시키고 있으나 이 방법으로는 지속적인 품질향상에 한계가 있다. 우선 광고온계의 자체오차, 주위분위기(먼지, 물, 연기)에 따른 측정오차 등이 존재하고 또 철의 표면온도 측정만으로 내부 조직변화를 정확히 예측하기 어렵다. 따라서 현재의 열연공정에서의 획기적인 품질향상을 위해서도 냉각도중 철의 내부의 금속 조직학적인 변화를 직접 측정하는 "on-line 변태율 센서"의 개발이 시급히 요구된다. 변태율센서의 실용화가 되면 센서의 출력정보를 귀환(feedback)하여 냉각수량을 제어하는 on-line 재질제어가 가능하게 된다. Fig. 1 은 열연공정에서의 온도측정에 의한 재질예측방법과 변태율 측정에 의한 재질예측방법의 개념비교(a) 및 현장적용블럭도(b)를 나타낸다.

본 연구에서는 고온가열 후 냉각중인 철의 내부 결정조직 변화후이를 on-line 으로 측정하는 고온 변태율 센서 개발 연구를 수행하였다.

2. 이론적인 고찰

철은 고온에서 용융하여 쇳물상태에서 서서히 냉각시키면 철원자의 결정구조가 변화하면서 고체의 철이 형성되는데 최종적으로 생성된 철의 상온에서의 결정구조는 다결정(polycrystal)으로써 냉각조건 및 불순물 조성에 따라 서로 다른 grain size를 갖는다. 고온에서의 철은 액체상태에서 고체상태로 변화하면서 철 원자가 결정구조를 이루는데 결정구조는 처음 FCC(face centered cubic)구조를 갖고 온도가 더 내려가면서 BCC(body centered cubic)구조로 바뀐다.

이 결정구조를 phase 라고 하고 전자를 austenite(감마철), 후자를 ferrite(알파철)이라고 하며, 감마에서 알파로 변하는 것을 metallurgical transformation(금속적 변태)라고 한다. 이 철은 돌다 curie temperature(철의 경우 섭씨 768도)이상에서 존재하고 electron spin은 정렬되어 있지 않아서 자기적으로는 paramagnetic이다.

Paramagnetic 알파철은 curie 온도 부근에서 electron spin 이 정렬되어 ferromagnetic 으로 변화하고 이 변화를 magnetic transformation(자기적 변태)이라고 한다. 따라서 최종적인 철강제품은 금속학적인 면에서 ferromagnetic 알파철이 된다. Fig. 2 는 열연공정에서의 철의 변태과정을 나타낸 그림이다.

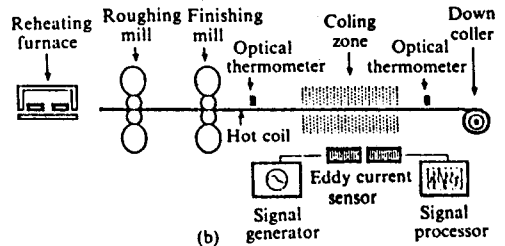
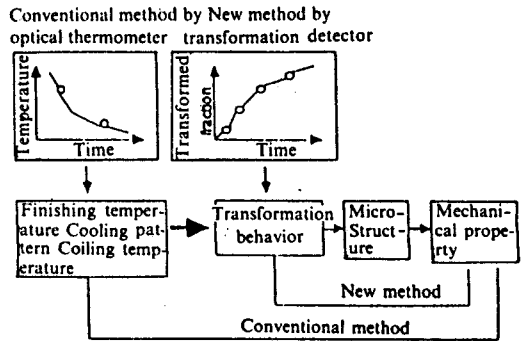


Fig. 1. 열연공정에서의 재질예측방법 비교(a) 및 적용블럭도(b)

금속의 변태율(transformation ratio or transformed fraction)은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{변태율}(\%) = \frac{\text{알파 phase의 체적}}{\text{금속의 전체체적}} * 100 \quad (1)$$

즉 금속의 전체 체적속에 들어 있는 알파 phase 결정조직의 체적비율을 말한다. 철은 고온에서는 100% austenite phase 이므로 변태율이 영(zero)이고 상온에서는 100% ferrite phase이므로 변태율이 100% 인데 고온에서 저온으로 냉각되는 도중에 100% austenite phase의 철이 점차적으로 ferrite phase로 변화하게 된다.

와전류 탐측자의 구조와 인가주파수 및 도체형상이 동일한 경우 도체의 결정구조를 와전류 시험으로 측정하기 위해서는 투자율(μ) 및 도전율(σ)과의 상관관계가 있어야 한다. Fig. 2 에서 보면 우리가 측정하고자 하는 금속학적인 변태 (γ - α transformation) 는 상자성

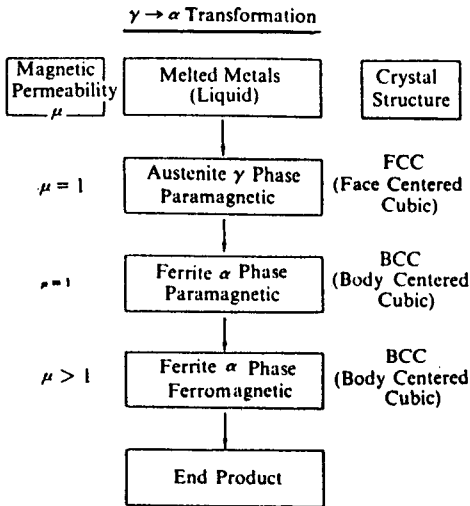


Fig. 2. 열간압연공정에서의 (γ - α) 변태의 도식도

체에서 강자성체로 변화하는 자기적인 변태(magnetic transformation)와는 다르다. 와전류 탐촉자로 측정하는 자기변태(magnetic transformation)은 다음과 같다.

$$\text{자기변태율}(\%) = \frac{\text{ferromagnetic } \alpha \text{ phase의 체적}}{\text{금속의 전체 체적}} * 100$$

$$\mu \text{ phase의 체적} - \text{paramagnetic } \alpha \text{ phase체적} = \frac{\text{ferromagnetic } \alpha \text{ phase의 체적}}{\text{금속의 전체 체적}} * 100 \quad (2)$$

식(2)에서 paramagnetic α phase의 체적이 영(zero)이면 식(1)에서 정의하는 변태율과 동일한 식이 된다. 따라서 변태율을 투자율(μ)의 변화로 측정하기 위해서는 금속적변태(γ - α transformation)가 자기적 변태(magnetic transformation)와 거의 동시에 이루어진다는 가정이 필요하다.

실제 제철공정에서는 strip mill의 경우는 완전히 일치되고, plate mill의 경우는 정확히 일치되지는 않는 것으로 보고되고 있다. 그리고 망간(Mn), 크롬(Cr) 같은 원소가 첨가되는 경우는 전자의 자전(electron spin)이 일정한 방향으로 배열하는 온도(curie temperature)가 변화하는데 이런 경우의 금속적 변태와 자기적 변태의 상관관계는 아직 명확하게 알려져 있지 않다.

그런데 어느경우라도 자기적 변태의 온도는 금속적 변태 온도와 같거나 그보다 낮기 때문에 금속적 결정구조변태(감마 알파 변태)를 eddy current probe로 검출이 가능할 것으로 판단된다. 금속의 결정구조 변화에 따른 도전율(σ)의 변화는 이론적으로 명확히 규명되어 있지는 않으나 실험적으로 변화하는 것이 알려져있고 grain size 및 온도에 따른 영향도 있을 것으로 생각되나 투자율(μ)의 변화에 비해서 상대적으로 미소한 변화일 것으로 생각된다.

3. 실험장치

Fig. 3은 본 연구에서 설계 제작한 온라인 변태율 측정 시스템의 주요부분을 나타낸다. 실험장치의 정면(a) 및 측면(b), 변태율 센서 및 센서이송로봇(c), 시편수냉장치(d), 센서냉각용 오일순환장치(e), 시편 가열로 및 시편이송로봇(f) 등을 나타낸다. 본 장치는 시편 가열용 전기로, 시편 이송로봇, 시편 수냉장치, 변태율 센서 및 센서이송로봇, 센서 냉각용 오일순환장치, 센서 여자용 신호발생장치, 센서출력 신호 계측 및 처리장치, 냉각수 및 공압 제어장치 등 크게 8개 부분으로 구성되어 있다.

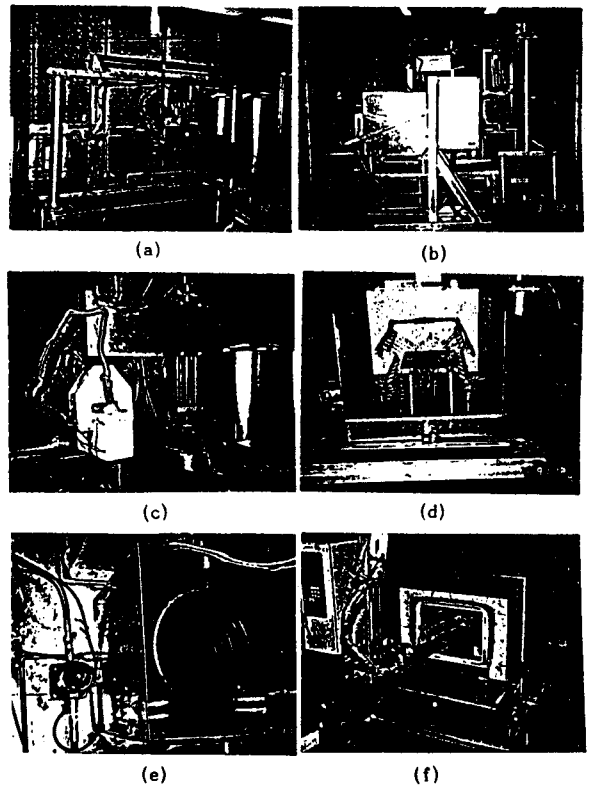


Fig. 3 변태율 측정 실험장치

전기가열로는 최고가열온도 1280도, 내용적 250mm * 350mm * 600mm, program controller부착형으로 전후이동(400mm) 가능하게 제작되었고, 시편이송로봇은 좌우(1500mm), 상하(300mm), 전후(150mm), 집털기능을 갖추고 있고, 시편 수냉장치는 상하, 좌우 네곳에 각 6개의 노즐이 부착되어 있고, 변태율 센서는 자속여자용 코일과 자속검출용 코일 및 페라이트 코어로 구성된 eddy current probe와 내열 및 자기비차폐성 세라믹 상자로 구성되어 있으며 좌우, 상하 이동이 가능하게 되어 있고, 센서 냉각용 오일순환장치는 오일펌프, 환형동파이퍼, 열회수용 물통으로 구성되고, 센서 여자용 신호발생장치는 45Hz-5KHz, 1000VA의 사양을 갖추고 있어 본 실험장치로는 열연 시편을 대상으로 다양한 온도 패턴으로 가열 및 냉각 시뮬레이션을 할 수 있고 냉각 도중 온라인 변태거동 측정 실험도 가능하다.

4. 실험 및 결과

본 연구에서는 개발된 변태율 측정시스템을 이용하여 열연시편을 대상으로 약 1200도 가열후 시편냉각장치에서 수입을 조절하여 여러 가지 냉각패턴으로 냉각되는 도중의 온라인 변태거동 측정 실험을 행하였고, 냉각된 시편의 기계적인 재질(기계경도, 인장강도, 항복강도) 시험을 행하여 기계적인 재질과 측정인자(온도추이, 변태거동출력신호)와의 상관관계를 분석함으로써 궁극적으로 측정된 변태거동신호로부터 기계적인 재질을 예측하는데 그 목적을 두고 있다.

Fig. 4는 실험에 사용된 냉각시편(a)과 인장시험 및 경도시험용 시편을 나타낸다. Fig. 5는 다양한 냉각패턴(냉각수 압력율 0 - 2.7 kgf/cm² 까지 변화)에서의 변태거동 측정실험 결과를 나타내고, Fig. 6는 공행시 변태거동과 온도추이 특성을 나타내고, Fig. 7(a), (b), (c), (d)는 냉각수 압력, 변태시간, 기계적인 재질간의 상관관계를 나타내는 실험결과를 나타낸다. Fig. 7(c), (d)의 실험결과로부터 변태율 센서로 측정된 변태시간으로부터 기계적인 재질(인장강도, 항복강도, 경도)을 예측 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 강종별로 반복되는 실험을 통해 다양한 냉각패턴 별로 변태거동특성에 따른

기계적인 재질특성을 테이블화 해두면 측정된 변태출력신호로부터 재질을 보다 정확히 예측할 수 있고, 역으로 원하는 재질을 얻기위한 냉각패턴을 설정할 수도 있다.

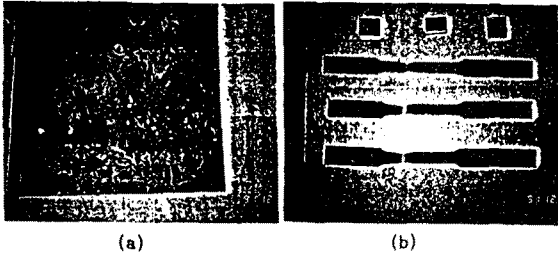
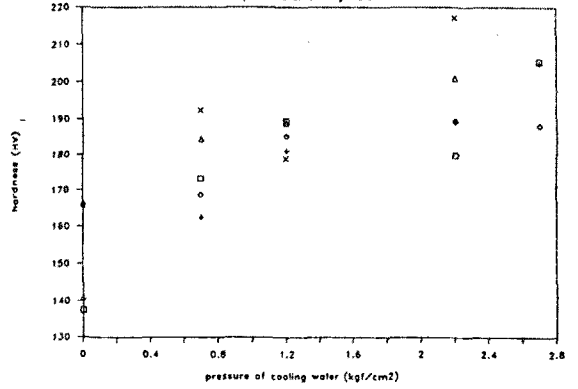


Fig. 4 냉각시편(a) 및 재질시험용 시편(b)

characteristics of hardness (HV)
vs. pressure of cooling water



(b)

TREND OF TRANSFORMED FACTOR

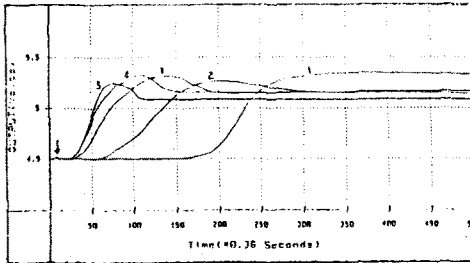
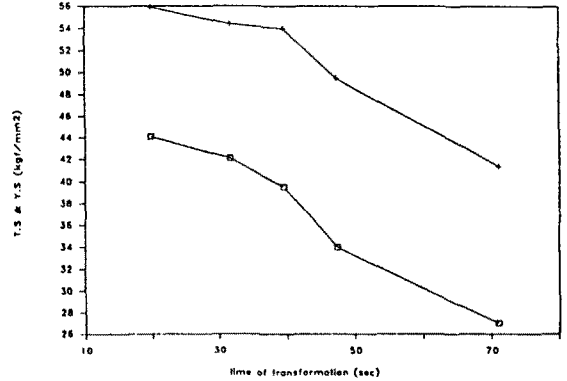


Fig. 5 냉각패턴에 따른 변태거동 특성

characteristics of T.S & Y.S
vs. time of transformation



(c)

TREND OF TRANSFORMED FACTOR & TEMPERATURE

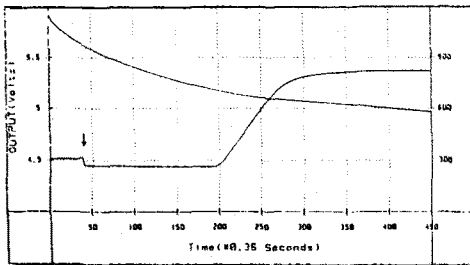
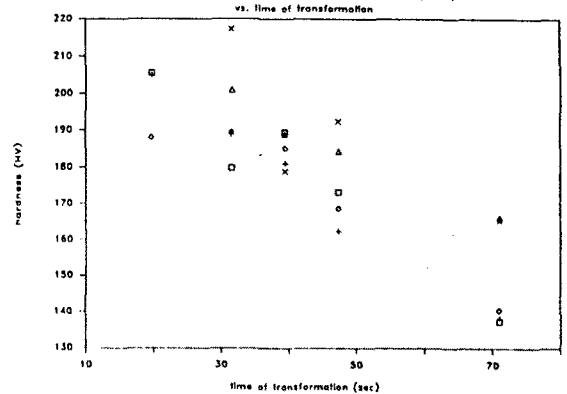


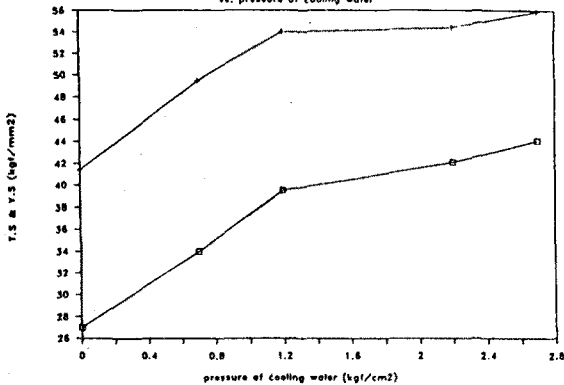
Fig. 6 공랭시 변태거동과 온도추이 특성

characteristics of hardness (HV)
vs. time of transformation



(d)

characteristics of T.S & Y.S
vs. pressure of cooling water



(a)

Fig. 7 냉각수 압력, 변태시간에 따른 재질특성

5. 결론

본 연구에서는 철을 1200도 정도 가열후 냉각시키면서 철내부의 금속학적인 조직변태거동을 on-line으로 측정하는 와전류 방식 온라인 변태율 측정 시스템을 설계 제작하였다. 열연 시편을 대상으로 가열 후 다양한 냉각패턴별로 냉각시키면서 온라인 측정실험을 행하여 측정된 변태거동 특성과 기계적인 재질특성(인장강도, 항복강도, 경도)과의 상관관계를 도출하였다. 실험 결과에 의하면 냉각속도가 증가할수록 시편의 강도와 경도는 증가하고, 변태시간이 길어지면 강도와 경도는 감소한다. 따라서 본 연구에서는 철의 열처리 냉각시 변태거동 시간을 측정함으로써 냉각된 철의 상온상에서의 기계적인 재질(인장강도, 항복강도, 경도) 등을 예측할 수 있다는 중요한 사실을 확인하였다.

6. 참고문헌

- 1) 이진락, A development of the metallurgical transformation detector using the eddy current method(II), 산업과학기술연구소 연구보고서, 1991.12.
- 2) 이진락, 백기남, 권영관, 이장우, 온라인 금속변태율 측정시스템 개발, 대한전기학회, '91추계학술대회논문집, 1991.11.
- 3) 이진락, A development of the metallurgical transformation detector using the eddy current method (I), 산업과학기술연구소 연구보고서, 1990.6.
- 4) 이진락, A development of the conversion table of the on-line hardness tester, 산업과학기술연구소 연구보고서, 1990.6
- 5) 이진락, 백기남, 와전류 방식에 의한 금속변태율 측정에 관한 연구, 대한전기학회 '89 추계학술대회논문집, pp.325-326.
- 6) 위상봉, Electromagnetic testing for the measuring of the physical properties in conductor and composite magnetics, 서울대학교 학원 박사학위논문, 1990.2.
- 7) Sang-Bong Wee, Han-Soo Kim, Min-Koo Han, Ki-Jang Oh, Jin-Rak Lee, Ki-Nam Peak, 'Noncontact on-line measurements of metal properties by eddy current sensors', Proceedings of the 28th SICE Annual Conference, Vol.2, 1989, pp.1133-1136.
- 8) 한민구, 위상봉, 김한수, 변태율의 전기적 측정방법에 대한 연구, 서울대학교 생산기술연구소, 1988.6.