

강편 빌레트의 건식 자분 탐상

김구화*, 임종수*, 이의완**

* 포항산업과학연구원, 계측연구팀

** 경북대학교 물리학과

요 약 본 연구는 강편 빌레트의 표면 결함을 검출하기 위한 건식 자분 탐상에 관한 것으로 자분 탐상능을 대상체에 흘리는 자화 전류, 대상체의 온도, 자분의 총 분사량 등에 대하여 평가하였다. 선재 제품의 등급에 따라 필요로 하는 몇 가지 강종을 선택하여 강종별 자기적 특성을 평가하였으며, 이를 입력 자료로 하여 유한 요소법에 의한 자기 해석을 행하였고, 그 결과를 직류 자화 전류에 의한 누설 자속 측정 결과와 비교 분석하였다. 교류 자화 전류에 의한 건식 자분 탐상능을 직류 자화 전류에 의한 탐상능과 비교하여 강종 및 자화 전류의 유형에 따른 자화 전류치를 결정하였다. 직류 자화 전류에 의한 자분 탐상 결과를 유한 요소법에 의한 계산과 비교하였고, 빌레트의 표면과 표면 결함 부위에서 측정된 누설 자속으로 비교 결과를 평가하였다. 각 강편재의 경우 직류 자화 전류에 의한 표면 자장은 그 형상에 의한 영향으로 코너 부위에서는 면 중앙의 표면 자장치에 비해 30% 정도였으며, 교류 자화 전류에 의해서는 그 비율이 70% 정도였다. 교류 자화 전류는 코너로부터 면중앙으로 10mm 되는 영역을 제외하고는 전 면에서 균일한 표면 자장을 발생하였다. 대상체의 온도에 따른 자분의 흡착은 대상체의 온도 150℃까지는 큰 변화가 없으나 자분의 고착에 있어서 60℃ 이상의 고온체에 대해서는 용착 용매로 메틸렌 크로라이드를 사용하는 것이 부적합하였다. 자분의 총분사량은 자분 탐상능에 상당히 큰 영향을 미침을 확인하였고 이에 대한 정량적 평가를 행하였다.

1. 서론

제철소에서 빌레트를 압연하여 철강재에서 큰 비중을 차지하고 있는 선재를 생산하는 데 있어 빌레트의 표면에 발생하는 결함은 주로 제강 공정에서 생성되는 것이다. 이러한 표면 결함이 있는 빌레트를 그대로 압연할 경우 최종 제품인 선재에 치명적인 표면 결함이 발생하게 되므로 빌레트의 표면 결함을 탐상하여 압연 전단계에서 미리 제거해 주어야 한다. 현재까지 개발된 빌레트 표면 결함 탐상 기술은 자분탐상¹⁻³⁾, 초음파 탐상^{4,5)}, 열탐상^{6,7)}, microwave를 이용한 탐상⁸⁾ 등 여러

가지가 있으며, 탐상 및 결함 제거를 자동화하기 위하여 CCD 카메라, 레이저 등을 이용하기도 한다. 또한 자분 탐상의 치명적인 약점인 결함 크기의 정량화를 위해 여러 가지 방법이 시도되고 있다.

빌레트 표면 결함의 탐상을 위하여 다양한 탐상법과 자동화가 시도되어 왔으나 자분 탐상은 그 적용의 용이함과 탐상의 정확성 면에서 이점이 많기 때문에 여전히 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. 또한 이에 대한 연구도 선진국에서는 체계적으로 수행되어 왔으나⁹⁻¹¹⁾ 국내의 경우 산업체에서 자분 탐상이 많이 이용되고 있는 것에 비해 그 연구는 미약한 상태이다. 따라서

본 연구는 빌레트의 표면 결함 탐상을 위한 자분 탐상에 있어서 직류 자화 전류에 의한 자분 탐상능 평가를 위해 수치 해석 소프트웨어(software)를 이용하여 계산한 누설 자속 계산 결과를 누설 자속 측정 결과와 연관하여 해석하였으며, 교류 자화 전류에 의한 탐상능과 자분 탐상의 몇 가지 인자에 대한 연구도 병행하였다.

2. 이론

자분 탐상 방법은 자성체를 포화 자화시켜 결함에 서 발생하는 누설 자속에 의해 자분을 흡착시키는 방법으로 이를 Fig. 1에 나타내었다.

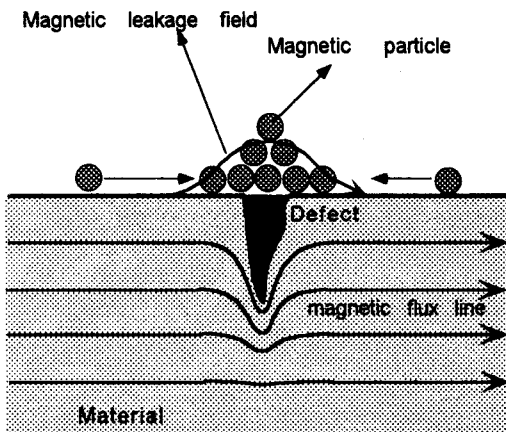


Fig. 1. The schematic diagram of magnetic flux leakage in magnetic materials by defect.

Fig. 1과 같이 탐상 대상체 표면에 흠이 존재할 경우 탐상 대상체 내부의 자속 분포 양상은 결함 주위에서 변하게 되며, 일부 자속은 결함 주위에서 탐상 대상체의 표면 밖으로 누설된다. 이렇게 누설된 자장에 의해서 자분이 흠이 없는 부분에 비해 월등히 많이 흡착되므로 쉽게 표면의 결함을 탐색할 수 있다. 자분 탐상에 있어서 누설 자속은 탐상 대상체 표면에 평행한 성분이 크게 기여하게 되므로, 이를 Fig. 2와 같이 x성분이라 할 경우 누설 자속은 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다¹²⁾.

$$H_x = 2s \tan^{-1} \frac{h(x+b)}{(x+b)^2 + y(y+h)} - 2s \tan^{-1} \frac{h(x-b)}{(x-b)^2 + y(y+h)} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 s는 자기 쌍극자의 자기 전하 밀도이며, h는 결함의 깊이, 2b는 결함의 폭을 나타낸다. 실제로 자분 탐상에서 결함 부위의 자분 흡착을 정확한 수식으로 표현하는 것은 여러 인자들의 복잡한 상관성을 가지고 있으므로 사실상 불가능하다. 자분의 입도는 중력, 누설 자속에 의한 자력, 점성력(viscous forces), 영상력(image forces), 자분 입자 서로간의 힘 등에 영향을 미친다. 자분 서로간의 작용은 중요한 인자 중의 하나인데, 이는 자분의 형상, 자화 정도, 표면장력, 단위 부피당 자분의 수에 의존한다.

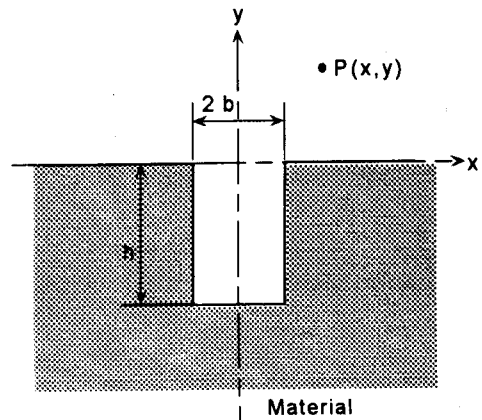


Fig. 2. The schematic diagram of dipole model and geometry.

외부의 자장(H)이 있을 경우 그 자장에 의한 구형에 가까운 자분에 미치는 힘 F_m 은^{10, 12)}

$$F_m = a \mu_0 V(H \cdot \nabla)H, \dots\dots\dots(2)$$

$$\left[a = \frac{\mu_r - 1}{1 + N(\mu_r - 1)} \right]$$

로 주어지며, 여기서 N은 자분 입자의 반자장 계수에 관련된 상수이고, μ_0 는 진공 중에서의 투자율, μ_r 은 자분 입자의 비투자율, V는 자분 입자의 체적을 나타낸다. 자분이 구상형일 경우 위 식(2)는 자분에 작용하는 힘이 자장의 크기, 자장의 공간적인 기울기, 자분의 크기, 자분의 비투자율의 곱에 비례하는 것을 나타내고, 결함이 없는 부분에 대해서는 자장의 공간적 기

울기 성분이 미약하므로 자분의 흡착이 거의 발생하지 않으며, 결합 주위에서는 누설 자장에 의한 자장의 공간적 기울기 성분이 크므로 자분의 흡착이 쉽게 된다.

3. 빌레트 시편의 자기 물성 측정

피탐상체인 빌레트 소재의 자기물성은 자분 탐상에 있어서 가장 기본이 되는 자료로서 자화 전류의 결정을 위하여 필수적이다. 특히 자분 탐상의 대상체는 자기장의 세기에 따른 자속 밀도 특성이 비선형성을 보일 뿐만 아니라 비가역적인 자기 이력 특성을 지니고 있어, 탐상에 필요한 자화 전류를 쉽게 추정하기는 어렵다. 특히 탄소(C)나 크롬(Cr), 실리콘(Si) 등의 불순물이 철(Fe)에 다량 포함되어 있는 빌레트의 경우는 이들이 빌레트의 자기적 물성에도 영향을 미치므로 자기적 물성은 강종에 따라 상당한 차이가 있게 된다. 또한 빌레트의 자기 물성에 따라 자화 전류도 큰 차이를 보이게 되므로 본 연구에서는 임의로 선택한 대상 강종에 대한 자기 물성을 측정하여 FEM(finite element method) 계산을 위한 기본 물성 자료로 사용하였으며, 그 대상 강종은 Table 1과 같다.

Table 1. Compositions and products of materials used in characterization of magnetic property

Materials	Products	Compositions
SUJ2	Bearing	C:<1.02, Cr:<1.40, P,S:<0.015
SWRCH45F	CHQ	C:<0.48, S:<0.04, P:<0.020
SCM435	Structure	C:<0.38, Cr:<1.20, Mo:<0.30
SWRS80BC	Piano wire	C:<0.85, Cr:<0.26, P,S:<0.015
SAE9254D	Spring	C:<0.57, Cr:<0.65, Si:<1.6

Table 1과 같이 여러 강종에 대하여 상온의 자기 물성을 측정한 결과 자기적 특성은 Fig. 3과 같이 강종에 따라 상당한 차이를 보이고 있으며, 축통전에 사용되는 자화 전류는 자기 물성에 의존하므로 일정 크기의 결합을 탐상하기 위한 기준 자화 전류의 값도 강종별로 많은 차이가 있을 것이 예상된다. Fig. 3의 자기 물성으로부터 SCM435와 SUJ2의 강편재는 비교적 낮은 자화

전류에서도 탐상능이 좋을 것으로 예상되지만 SAE 9254D와 같은 강종은 동일한 탐상능을 갖기 위해 높은 자화전류가 필요할 것으로 예상된다. 이는 다음에 FEM (finite element method)을 이용한 누설자속 계산 결과와 비교하여 정량적으로 논하고자 한다.

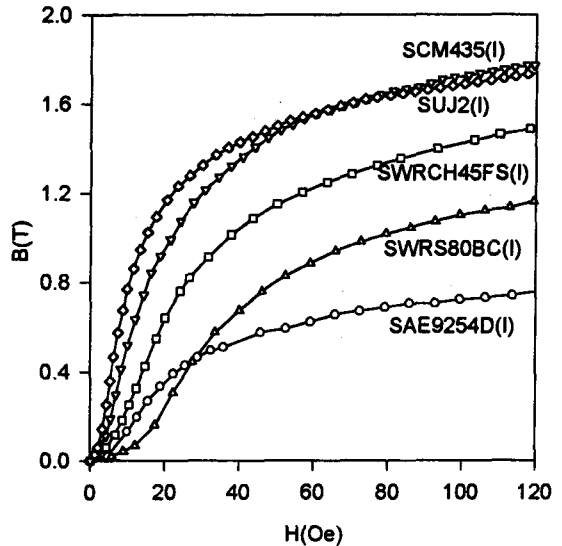


Fig. 3. Initial magnetization curves of materials used in this study('I' means ingot cast material).

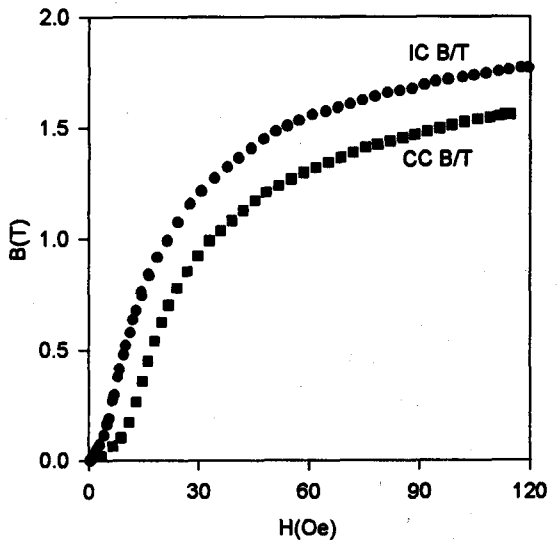


Fig. 4. Initial magnetization curves of continuously cast and ingot cast billets of SCM435.

빌레트는 제조 공정에 의해 크게 강편재와 연주재로 나누어 지는데 강편재의 경우는 연주재에 비해 상대적으로 서냉되는 공정을 거치게 되며 Fig. 4와 같이 연주재에 비해 높은 포화 자속 밀도를 지니며 투자율도 연주재에 비해 크므로 동일한 크기의 결함에 대해 더 작은 자화 전류로도 같은 탐상능을 얻을 수 있을 것으로 추정된다.

한편 교류 자화 전류를 사용할 경우는 자기 이력 곡선의 자기적 성질을 고려해야 하므로 강종별 자기적 특성 값을 아래 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Retentivities(B_r), coercive forces(H_c) and saturation magnetic flux densities(B_s) of materials

Materials	B_r (T)	H_c (Oe)	B_s (T)
SUJ2	1.1	6.0	1.7
SWRCH45F	0.82	13.5	1.4
SCM435	0.78	7.5	1.7
SWRS80BC	0.67	20.5	1.2
SAE9254D	0.44	11	0.7

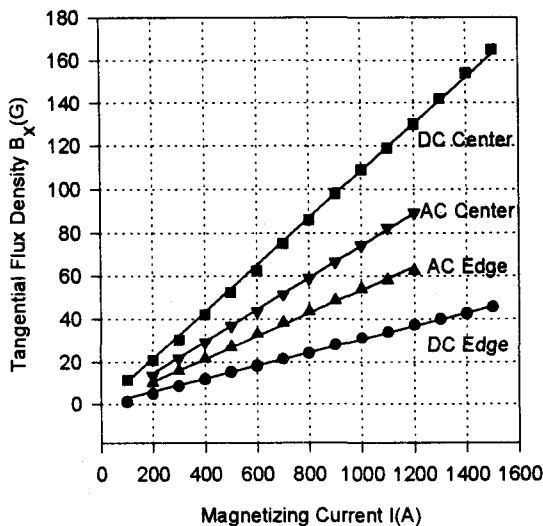


Fig. 5. Temperature dependence of initial magnetization curve of SCM435.

온도에 따른 자기 물성의 실험 결과 Fig. 5와 같이 상온에서 150 °C 까지는 포화 자속 밀도가 10 % 이내로 큰 차이를 보이지 않고 있으므로 자화 전류의 온도에 따른 보상에 대해 별도의 고려를 하지 않아도 무방할 것으로 생각되며, 이는 온도에 따른 자분 탐상능을 실험한 결과와도 잘 일치한다.

4. 누설 자속 계산

본 연구에서는 Torr Corp.의 QuickField라는 수치 해석 S/W를 이용해 직류 자화 전류에 대하여 2차원 모델의 누설 자속을 계산하였다. 모델에서 대상재의 형상은 40 x 40 mm² 단면에 폭 0.2 mm, 깊이 1 mm인 홈을 면중양에 형성시켜 lift-off(자기센서와 대상체간의 거리) 1.3 mm와 0.4 mm에서 누설 자속을 계산하였다. 단, 본 자기 설계 해석은 2차원에 한정하므로 빌레트의 길이 방향으로 긴 결함을 대표하며, 직류 자화 전류에 한정된다.

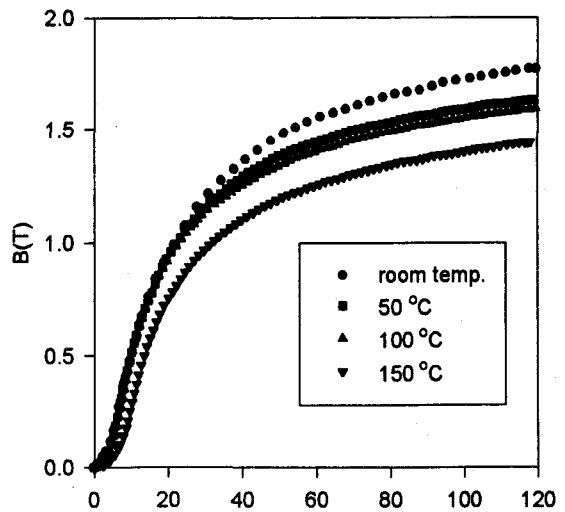


Fig. 6. Magnetic flux densities at face center and near corner of square billet by DC and AC magnetizing current flows through a billet. (lift-off : 1.3 mm)

자기 설계 해석 결과는 직류 자화 전류에 따라 빌레트 외부에서의 표면 자장(결함이 없는 경우 빌레트 표면에서의 자속 밀도)은 Fig. 6과 같이 강종에 상관없이 자화 전류에 대하여 선형적으로 비례함을 알 수 있었다.

자속 밀도는

$$\text{빌레트 내부 : } B = G_1 \mu \frac{Ir}{2\pi a^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{빌레트 외부 : } B = G_2 \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \dots\dots\dots (4)$$

와 같이 근사적으로 주어지며 빌레트 외부에서는 빌레트의 표면으로부터 일정한 거리에서 강중에 상관없이 자화 전류와 형상에 의한 인자에만 관계한다. 위 식에서 B는 자속 밀도, I는 자화 전류, G₁, G₂는 대상체의 형상에 의한 인자, μ는 투자율, μ₀는 진공 속에서의 투자율, a는 대상체의 반경, r은 대상체 축으로부터의 반경을 나타낸다. 축통전에 의한 직류 자화 전류로 대상체를 자화시킬 경우 각빌레트 내부의 경우는 자속 밀도의 분포가 환봉의 경우와는 달리 심한 왜곡이 발생하며, 빌레트의 면 중앙 부위는 코너 부위에 비해 상대적으로 잘 자화된다. 따라서 직류 자화 전류를 사용할 경우 면 중앙의 표면 자장은 코너부의 표면 자장보다 큰 값을 가지게 된다.

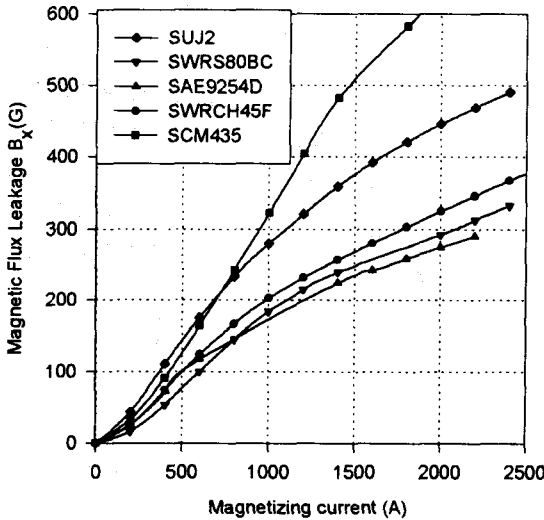


Fig. 7. Calculated results of magnetic flux leakage according to the DC magnetizing current. (material cross-section : 40×40mm², defect size : 0.2 mm(width) × 1mm (depth), lift-off : 0.4mm)

한편 빌레트의 면 중앙에 위치한 세로 터짐에 의한 누설 자속을 lift-off 0.4 mm에서 자화 전류를 변화시키면서 계산하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7은 결합의 중앙

에서 누설 자속의 빌레트 표면에 대한 접선 방향 성분의 최대치를 나타낸다. 자화 전류에 따른 누설 자속의 크기는 표면 자장과는 달리 강중에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있고, 이는 강중에 따른 자기 물성 측정 결과와 유사한 경향성을 보임을 알 수 있다. 본 연구에서는 위 누설 자속의 계산 결과를 토대로 강종별 자화 전류를 결정하였는데 이에 대한 정량적인 값은 아래에서 논 하겠다.

5. 누설자속 측정

결합에 의한 누설 자속은 자분을 흡착시키는 직접적인 힘이므로 이를 측정하여 누설 자속의 계산 결과와 비교 분석하였다. 측정에 사용한 재료는 SCM435 강편재로 비교적 자화가 쉬운 강종이며, 측정 기기는 LakeShore사의 Model 410 Gaussmeter이고 lift-off는 1.3 mm로 고정하였다.

축통전 직류 및 교류 자화 전류 800 A에 따른 표면 자장은 Fig. 6에서 보인 바와 같이 빌레트 면 중앙의 경우 직류 자화 전류에 의한 표면 자장에 비해 60 Hz의 교류 자화 전류에 의한 표면 자장이 약 33% 작은 값을 알 수 있었고, 따라서 면 중앙에 위치한 표면 결합의 탐상에는 직류 자화 전류가 유리함을 알 수 있다. 반면 직류 자화 전류를 사용하여 정사각형 단면을 갖는 대상체 표면의 결합을 탐상할 경우 면 중앙과 코너 부위의 표면 자장은 큰 차이(약 3.5배)가 있으므로 전면에 대한 균일한 탐상이 불가능하다. 따라서 전면에 대한 균일한 탐상을 위해서는 교류 자화 전류가 유리함을 알 수 있다. 직류 자화 전류의 경우는 면 중앙과 코너 부위(정사각형 모서리에서 면 중앙 쪽으로 2.5 mm 지점)의 표면 자장 차이가 크지만(코너/면 중앙 : 약 30%) 교류 자화 전류의 경우는 두 경우의 차이가 크지 않다(코너/면 중앙 : 약 70%). 상기와 같은 자화 전류의 유형에 따른 표면 자장의 경향성은 현재까지 알려진 결과²⁾와는 차이가 있었다. 직류 자화 전류에 대해 면 중앙 부위와 코너 부위의 표면 자장차가 큰 차이를 보이는 것은 앞에서 설명한 바와 마찬가지로 탐상 대상체가 원형이 아닌 정사각형에 가까운 모양이므로 대상체 내부 및 외부에서 자속 밀도의 왜곡이 발생하기 때문이다. 그러나 교류 자화 전류를 사용할 경우는 교류에 의한 표피 효과(skin effect) 때문에 자화

전류는 대상체의 표피에 한정되어 흐르게 되어 상대적으로 대상체의 형상에 의한 영향을 적게 받게 되어 직류에 비해 면 중앙부과 코너 부위의 표면 자장에는 큰 차이가 없다. 한편 Fig. 8에서 알 수 있듯이 교류 자화 전류의 경우 정사각형의 모서리에서 약 10 mm 떨어진 면 표면 자장 차이는 거의 없고, 160 각 강편재(한 변이 160 mm 이고 모서리에서의 곡률 반경이 20 mm인 빌레트)의 경우는 곡률 반경이 20 mm이므로 교류 자화 전류를 사용할 경우 면 중앙과 코너의 표면 자장이 거의 일정할 것으로 예상되며, 이는 160각 강편재에 대한 측정 결과와 잘 일치하였다.

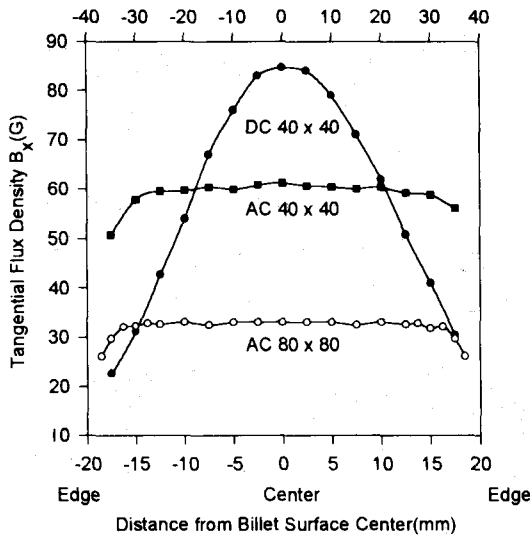


Fig. 8. The surface magnetic field with different magnetizing current types. (magnetizing current level : 800 A, lift-off : 1.3 mm, material cross-section : 40 × 40, 80 × 80 mm² (depth), lift-off : 0.4 mm)

결함에 의한 누설 자속의 직류 및 교류 자화 전류에 대한 의존성은 동일한 결함, 동일한 자화 전류값에 대하여 직류와 교류의 자화 전류 형태에 따라서 누설 자속의 크기도 상당한 차이를 보였으며, 직류 800 A의 자화전류에 대해 폭 0.2 mm, 깊이 0.6 mm인 면 중앙의 세로 터짐 결함의 경우 누설자속은 표면 자장보다 약 30 G가 높는데 비해, 교류 자화전류의 경우는 약 10 G가 높아서 상대적으로 면 중앙에 위치한 표면 결함의 탐상에는 직류 자화 전류를 사용하는 것이 유리함을 확인하였다. 한편 Fig. 6으로부터 동일한 표면 자장값

을 가지는 직류와 교류의 자화 전류에 대하여 면 중앙에 위치한 동일 결함에 의한 누설 자속을 측정된 결과 직류에 의한 누설 자속이 교류에 의한 값보다 약 1.5배 높은 것으로 나타났다. 이는 교류 자화 전류에 의한 누설 자속의 실효치(rms : root mean square)값을 측정 한 데서 비롯된 것으로 생각되나 교류 자화 전류를 사용할 경우 누설 자속의 최대치(peak value)가 실제 자분 탐상에 영향을 미칠지 아니면 실효치가 영향을 미칠지에 대한 연구를 먼저 수행하여야 할 것으로 생각 된다. 이를 위해서는 대상체의 형상에 의한 인자를 제거하기 위하여 환봉의 대상체를 이용한 탐상능의 평가 부터 행해야 하므로 이에 대한 해석은 아직 정확히 행하지 못하였다.

한편 누설 자속 측정 결과와 수치 해석을 이용한 계산을 비교하면 800 A의 직류 자화 전류에 대하여 lift-off 1.3 mm에서 면 중앙 표면 자장의 경우는 약 82 G로 잘 일치되어 있었고, 폭 0.2 mm, 깊이 0.9 mm의 SCM435 강편재의 면 중앙에 위치한 결함에 의한 누설 자속은 측정치가 120 G, 계산치가 125 G로 측정 오차 범위 내에서 잘 일치하므로 임의의 강종에 대한 자화 전류를 설정하기 위해 대표적인 강종을 설정하여 자분 탐상을 하여 자화 전류를 결정 한 후 임의의 강종에 대한 자기 물성값을 이용한 누설 자속 계산 결과를 비교함으로써 자화 전류를 유추하여도 무방함을 확인하였다.

6. 강종별 자화 조건

강종별 자기적 성질에 큰 차이가 있으므로 강종별 자화 전류를 도출하기 위하여 대표적인 강종으로 SCM 435 강편재를 선택하여 방전 가공으로 인공 결함을 제작하여 자분 탐상을 행하였다. 이를 비교의 표준으로 삼아 각 강종에 대한 누설 자속 계산 결과로부터 강종별 자화 전류를 유추하였다.

SCM435 강편재에 대한 직류 자화 전류값에 따른 건식 자분 탐상능은 Fig. 9와 같으며, 이는 길이 10 mm, 깊이 0.15, 0.3, 0.6, 0.9 mm인 결함이 왼쪽에서부터 순서대로 배열되어 있다. 이것으로부터 자분의 총 분사량이 11.4 mg/cm²일 때 0.6 mm 깊이 이상의 선상이나 터짐 결함을 탐상하고자 할 경우 40×40 mm²의 빌레트에 필요한 자화 전류치는 약 500 A 이상이면 충분하며, 0.3 mm 깊이 이상의 경우는 약 900 A 이상의

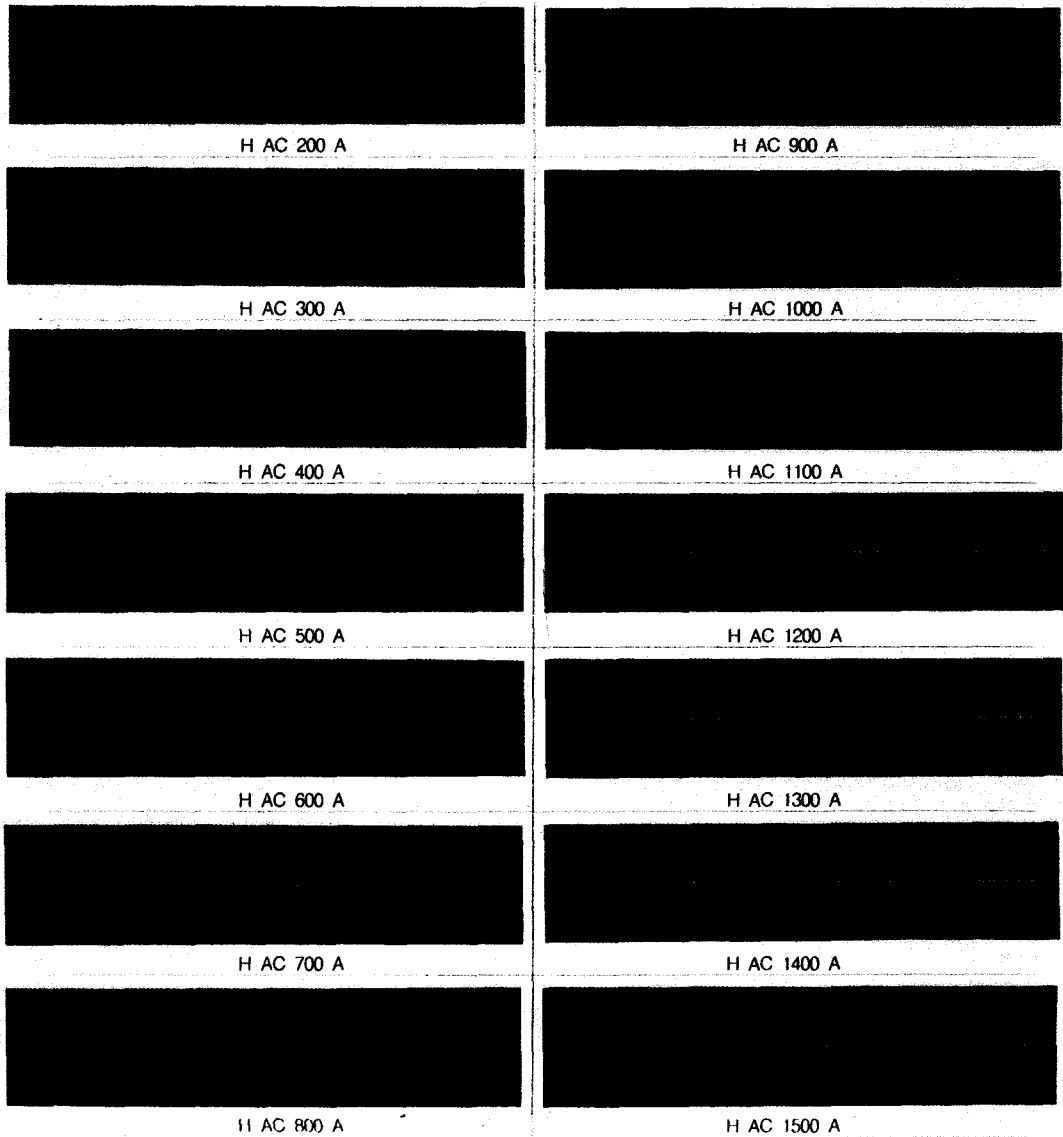


Fig. 9. Detectability of dry magnetic particle inspection by the DC magnetizing current. (magnetizing current : direct current, amount of magnetic particle applied : 11.4 mg/cm²)

자화 전류가 요구된다. 그러나 동일한 탐상 대상체에 대하여 교류 자화 전류를 사용할 경우 직류 자화 전류와 유사한 탐상능을 얻기 위해서는 Fig. 10에서 보인 바와 같이 직류 자화 전류치의 약 1.5 배의 교류 자화 전류를 통전하여야 한다. 만약 빌레트의 표면 흠 검출 기준을 0.3mm로 설정한다면 직류 자화 전류가 900 A인 경우 Fig. 6에서 보인 바와 같이 빌레트의 면 중앙에서 표면 자장은 1.3 mm의 lift-off에서 약 100 G(표면자장이 100

G에 해당하는 교류 자화 전류치 : 1300 A)이다.

실제 자분이 흡착되는 영역은 약 0.4 mm 정도의 lift-off가 될 것이므로 누설 자속의 계산 결과와 비교하기 위하여 폭 0.2 mm, 깊이 1 mm의 결함에 의해 발생하는 누설 자속을 고려하면 Fig. 7에서 알 수 있듯이 약 280 G가 된다. 따라서 폭 0.2 mm, 깊이 0.3 mm의 표면 결함을 탐상하기 위한 강종별 자화 전류는 Fig. 7로부터 아래 Table 3과 같이 유추할 수 있다.

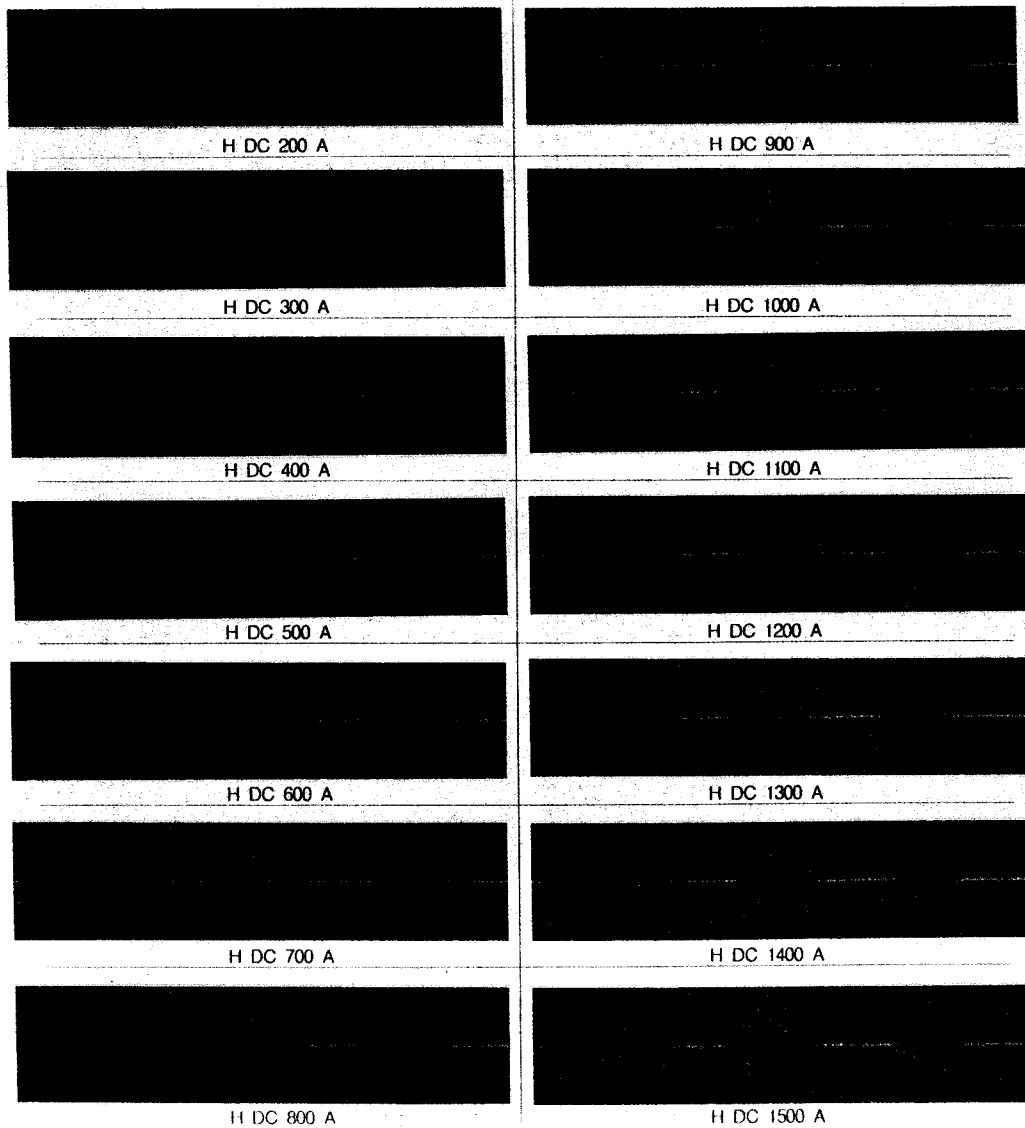


Fig. 10. Detectability of dry magnetic particle inspection by the AC magnetizing current. (magnetizing current : alternating current, amount of magnetic particle applied : 11.4 mg/cm²)

Table 3. Required magnetizing current according to materials

Materials	DC (A) (Calculated)	AC (A) (DC x 1.48)
SCM435	900	1332
SUJ2	1000	1480
SWRCH45F	1600	2368
SWRS80BC	1800	2664
SAE9254D	2100	3108

7. 빌레트 온도에 따른 탐상능

본 연구에 사용한 자분은 POSCO 선재 공장에서 현재 사용중인 자분으로 자분의 평균 입도는 320 μm이고, 백색 비형광 자분이다. 한편 이 자분의 수지(polymer)가 녹는 온도는 약 150 °C이며, 형상은 임의형이고, 자분 하나의 입자안에 평균 입도가 100 μm인 철분이 불균일하게 내포되어 있다. 모든 비파괴탐상에는 대상체의 조건에 따라 탐상 방법이 한정되는 경우가 많은데

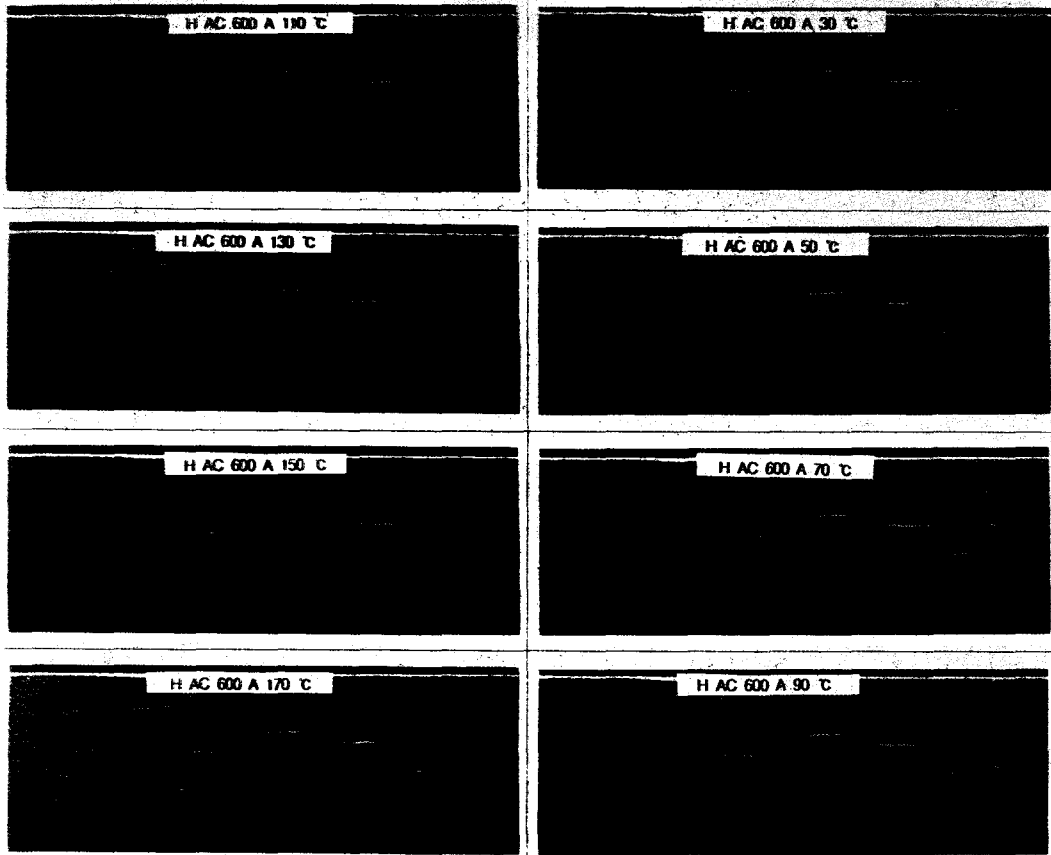


Fig. 11. Attachment of dry magnetic particles on billet surface according to the material temperature. (material : PSPC32SI)

그 대상체의 조건에서 중요한 인자들 중의 하나가 대상체의 온도이다. 건식 자분 탐상을 행할 경우 빌레트의 온도가 상승함에 따른 자기 물성의 변화는 미세하므로 Fig. 11과 같이 온도 150°C 정도까지는 자분의 흡착에는 별 차이가 없음을 알 수 있었고 170°C에서 약간 끈적끈적(sticky)하여 빌레트의 표면에 들러붙기 시작하고, 이러한 현상은 탐상에 있어서 자분의 유동성을 저하시켜 탐상능을 저하시킨다. 또한 탐상 후 공기로 빌레트 전면에 붙어 있는 결합 지시외의 자분을 제거할 때 효과적으로 제거되지 않으므로 연마실에서 결합을 연마 제거하기 위하여 결합 지시를 관측하는데 있어서 그 효율을 저하시키게 된다. 따라서 본 연구에 사용한 자분은 150°C 이상의 고온재에 대한 결합의 탐상에는 적합하지 않음을 알 수 있다.

한편 선제 공장의 탐상 공정상 건식 자분 탐상을 행

할 경우 반드시 동반해야 하는 공정은 대상체의 표면에 흡착된 자분을 용착시키는 것인데, 현재 주로 사용하는 용착 용매는 메틸렌 크로라이드(methylene chloride; MC)이다. 그러나 MC의 끓는점이 40°C이므로 이 온도 이상의 고온재에 대해서는 탐상능이 저하되며, 이로 인한 선제 제품의 품질 저하 또한 심각하다. 따라서 본 연구에서는 고온 빌레트에 대한 MC의 용착 정도를 평가하기 위하여 대상체의 온도 및 MC분사량에 따른 탐상능을 분석하였다. MC의 분사량을 임의의 값으로 고정시킨 상태에서, 빌레트의 온도가 60°C까지는 자분이 잘 고착되어 있으나 그 이상의 온도에 대해서는 고착되지 않았고, MC분사량을 단위 시간당 빌레트 표면에 분사되는 양은 상기의 경우와 동일하게 하고 분사 시간을 늘려 다량으로 증가시킬 경우 82°C까지, MC를 단위 시간당 분사되는 양을 증가시

켜 집중적으로 분사시킬 경우 105°C까지 자분 고착이 가능함을 알 수 있었다. 그러나 MC를 다량으로 집중 분사할 경우 이미 흡착된 자분의 형상을 변화시켜 구형의 허위 지시(false indication)가 형성되며, 미세한 표면 결함에 흡착된 자분이 제거되는 문제점이 발생하므로 고온재에서 자분의 용착에 대한 연구는 더 진행되어야 할 것으로 판단된다.

8. 자분 조건에 따른 탐상능

자분 탐상에 있어서 중요한 인자 중의 하나가 자분의 분사량(건식)이나 자분의 농도(습식)이므로 본 연구에서는 건식 자분의 분사량에 대한 연구를 행하였다.

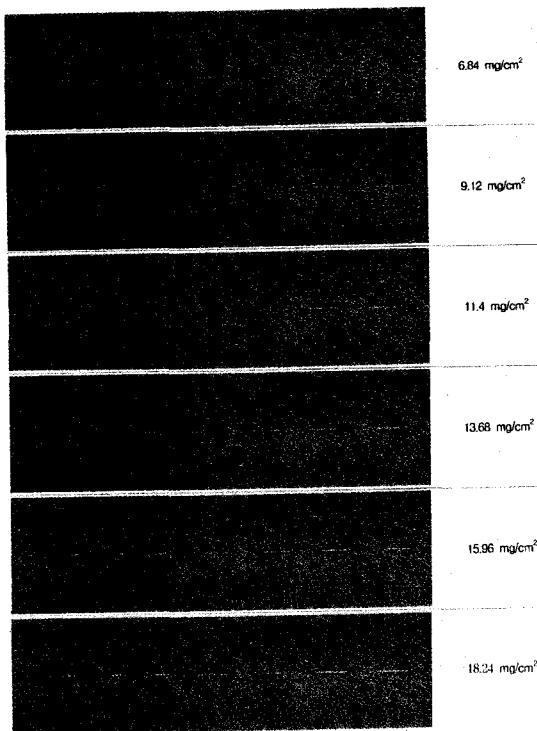


Fig. 12. Detectability of dry magnetic particle inspectiZon by the amount of the applied magnetic particles.

자분의 분사량에 대한 탐상능은 Fig. 12와 같이 분사량에 따라 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. Fig. 12에서 표면 결함은 왼쪽에서부터 길이 3 mm의 각각 다른

깊이(깊이에 대한 정량적인 평가는 행하지 않았음)의 결함 4 개와 길이 10 mm, 깊이 0.15, 0.3, 0.6, 0.9 mm의 결함이 순서대로 놓여 있다. 교류 820 A에서 자분의 분사량이 6.84 mg/cm²이하일 경우 폭 0.2 mm, 깊이 0.9 mm 이하의 표면 결함은 탐상할 수 없었으며, 폭 0.2 mm, 깊이 0.3 mm 이상의 표면 결함을 탐상하기 위해서는 자분의 분사량을 적어도 12 mg/cm²이상으로 해주어야 한다. 같은 폭에 깊이 0.15 mm의 표면 결함을 검출하기 위해서는 자분의 분사량을 약 18.24 mg/cm²이상으로 증가시켜야 하고, 이의 경우는 짧은 길이의 표면 흠도 잘 탐상할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 12의 분사량에 따른 탐상능 결과는 빌레트의 표면 방향이 중력 방향(지구 중심 방향)에약 135°C가 되게 놓고 자분을 분사한 결과이며, 약 45°C가 되게 놓고 분사할 경우 중력에 의해 자분의 흡착도가 상당한 차이를 보이게 되는데 이는 건식 자분을 사용할 경우 피할 수 없는 문제 중의 하나이다. 따라서 빌레트의 상면과 하면의 탐상능이 불균일하고 하면은 상면에 비해 상대적으로 탐상능이 저하된다.

9. 결론

본 연구에서는 자분 탐상을 행함에 있어서 몇 가지의 중요한 인자들에 대한 탐상능을 평가하였으며, 특히 빌레트의 표면 결함을 탐상하기 위한 적정 조건들에 대해 연구하였다. 강종별 자화 전류는 강종의 자기 물성에 따라 상당한 차이가 나타남을 확인하였고, 대상체를 자화시키는 방법에 있어서 직류와 교류의 축통전을 비교하여 각각의 장단점을 분석하였다. 각 빌레트의 경우 대상체 전 표면에 대하여 균일한 탐상을 하기 위해서는 교류 자화 전류를 사용하는 것이 유리한 반면, 면 중앙에서 직류와 교류의 동일 표면 자장을 얻기 위해서는 교류 전류를 직류 전류에 비해 약 1.5배 증가시켜야 함을 확인하였다. 한편 온도에 따른 자분의 흡착도는 대상체의 자기 물성이 온도에 따라 150°C까지는 큰 차이가 없는 것과 같이 그 차이도 미세하였고, 자분의 용착에 있어서 60°C 이상인 고온재의 경우 현재 주로 사용하고 있는 메틸렌 크로라이드를 대체할 수 있는 새로운 자분의 용매를 사용해야 할 것으로 생각되며 이에 대한 연구는 보다 세밀하게 진행되어야 할 것으로 판단되었다. 탐상능의 건식 자분 분사

량에 대한 의존성을 연구한 결과 분사량은 탐상능에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

참고 문헌

1. Laurence C. Wong, *Materials Evaluation*, Vol. 46(1988), pp. 1548-1556.
2. W. Bartholome, K. Reinshagen and G. Gross, *Iron and Steel Engineer*, Vol. 48(1971), pp. 61-71.
3. 大満 康弘, 埴 健三, 關根 和喜, 大石 邦雄, 荒卷 廣美, 非破壞檢査, 第39卷(1990), pp. 599-606.
4. 水野 正志, 中瀬 久生, 香田 浩, 非破壞檢査, 第37卷(1988), pp. 861-868.
5. V. L. Siviryuk, and I. V. Gramotnik, *Soviet J. of NDT*, Vol. 27(1991), pp. 123-126.
6. Yngve Strom, *Iron and Steel Engineer*, Vol. 69(1992), pp. 29-33.
7. "Automatic Surface Inspection for Billets", *Steel Times*, Vol 212(1984), pp. 318.
8. D. H. Savidge, *Surface Inspection of Continuously-Cast Billets*, Commission of the European Communities, Report No. EUR 10158(1986).
9. Zhong Wei-Chang, *British J. of NDT*, Vol. 35(1993), pp. 68-74.
10. P. J. Blakeley, J. Simkin, and S. T. Brown, *IEEE Trans. Mag.*, Mag-21(1985), pp. 2420-2423.
11. Weng-Jay Lee, Song-Jau Tsai and Chang-Tsun Lin, *China Steel Technical Report*, No. 4(1990), pp. 156-162.
12. *Nondestructive Testing Handbook*, 2nd edition, Vol. 6, American Society for Nondestructive Testing, pp. 127-132(1989).

Dry Magnetic Particle Inspection of Ingot Cast Billets

Goo Hwa Kim*, Zhong Soo Lim* and Eui-Wan Lee**

* Research Institute of Industrial Science and Technology

** Department of Physics, Kyungpook National University

Abstract Dry magnetic particle inspection(MPI) was performed to detect the surface defects of steel ingot cast billets. Magnetic properties of several materials were characterized by the measurement of the B-H hysteresis curve. The inspection results were evaluated in terms of the magnetizing current, temperature, and the amount of magnetic particles applied to billets. Magnetic flux leakage near the defect site of interest was measured and compared with the results of calculation by the finite element method in the case of direct magnetizing current. Direct and alternating magnetizing currents for materials were deduced by the comparison of the inspections. Results of the magnetic particle inspection by direct magnetizing current were compared with those of finite element method calculations, which were verified by measuring magnetic leakage flux above the surface and the surface defects of the material. For square rods, due to the geometrical effect, the magnetic flux density at the edges along the length of the rods was about 30% of that at the center of rod face for a sufficiently large direct magnetizing current, while it was about 70% for an alternating magnetizing current. Thus, an alternating magnetizing current generates rather uniform magnetic flux density over the rods, except for the region on the face across about 10 mm from the edge. The attraction of the magnetic particle by the magnetic leakage field was nearly independent of the surface temperature of the billets up to 150 °C. However, the temperature should have been limited below 60 °C for an effective fixing of gathered magnetic particles to the billet surface using methylene chloride. We also found that the amount of applied magnetic particles tremendously affected the detection capability.

(Received: June 24, 1996)