

## 누설자속법을 이용한 박강판의 결함탐상

임종수

포항산업과학연구원 센서계측연구팀, 경북 포항시 남구 효자동 산 32번지, 790-600

손대락

한남대학교 물리학과, 대전광역시 대덕구 오정동 133번지, 306-791

(2000년 11월 2일 받음, 2000년 11월 22일 최종수정본 받음)

박강판의 내부에 존재하는 개재물성 결함을 검사하기 위해 누설자속법을 이용하여 탐상하는 시스템을 개발하였다. 연자성 코어의 보자력을 이용한 차등형 플럭스게이트 자력계를 제작하였다. FEM 소프트웨어를 이용하여 전자석을 설계하였으며, 3축 이동이 가능한 누설자속탐상장치를 제작하여 냉연강판을 검사한 결과 개재물성 결함을 검사할 수 있음을 알았다. 누설자속값을 디지털화하여 2차원 이미지로 처리한 결과 냉연강판에 존재하는 개재물성 결함 이외의 결함을 일부 구분할 수 있음을 알았다.

### I. 서 론

#### 1.1. 연구배경

스틸 2 피스 캔은 D&I(Drawing and Ironing)법의 발전으로 가공측면에서 소재의 절감 및 대량생산으로 인한 생산성 향상에 힘입어 식음료용 can의 주종을 이루고 있다. 그러나 제관공정시 불량률이 발생하는 경우가 있다. 이러한 불량은 주로 일련의 제관공정 중에서 아이어닝 후 두께를 채결하기 위한 확관시 플랜지 크랙(flange crack)이 발생하는 것이다(Fig. 1). 플랜지 크랙의 주된 원인으로는 박강판 내부에 존재하는 비금속개재물이며 일반적으로 이것은 제강공정에서 유입되는 것으로 알려져 있다. 현재 이러한 내부개재물에 대한 검사는 일정 면적의 박강판에 대한 자분탐상이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 그러나 자분탐상의 특성상 개재물 크기의 정량화 및 분포 파악에는 한계가 있는 실정이다. 본 연구에서는 이 자분탐상 대신에 자기센서를 이용한 누설자속탐상을 통해 개재물 평가의 정량화를 시도하고자 하였다.

#### 1.2. Flange Crack의 발생 원인

2 피스캔(piece can)의 생산에 있어 다양한 공정을 거친 후 최종공정인 네킹(necking)과 플랜징(flanging) 공정에서 불량률의 대부분이 발생한다. 이러한 불량률의 원인으로는 제관기에 의한 것과 박강판 자체의 재질에 의한 것으로 구분할 수 있는데, 기기에 의한 것으로는 트리밍(trimming) 상태의 불량에 의한 것이 주된 원인이며 재질에 의한 것

으로는 비금속 개재물(non-metallic inclusion, NMI)에 의한 것이 주된 요인이다. 비금속개재물의 조성은 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> 등으로 구성된다는 것이 알려져 있다[1].

비금속개재물에 대한 Kawasaki 제철소의 小石想一等의 연구[2, 3]에 의하면 Al-killed 박판에 대해 X선 사진에 따른 개재물의 형상은 偏平, 壓壞, 分壞 및 球狀型의 4가지로 분류할 수 있다. 가공변형에 따라 표면 crack을 발생하는 것은 표층에 존재하는 개재물에 의해 좌우되고, 偏平 개재물은 crack발생이 어렵게 깊이 존재하고 球狀型개재물은 crack발생이 용이한 표층에 존재한다. 개재물의 조성은 특정한 형상에 따라 일정한 조성을 보이는 데 비해 偏平개재물은 다양한 조성의 혼합조직이다.



Fig. 1. Example of flange crack.

**1.3. 자분탐상 (Magnetic Particle Inspection: MPI)**

대상재료에 자기장을 인가시켜 자화시킴으로써 B-H 곡선상의 포화상태로 만들면 시료의 표면 또는 표면 하부에 존재하는 개재물 등의 결함에 의해 자속이 외부로 누설된다. 자분탐상은 이 누설자속에 의해 대상재료 표면에 자분(magnetic particle)이 모이는 현상을 이용한다. 표면에 형광물질이 입혀진 자분의 응집상태를 형광렌프 하에서 관찰하면 결함의 존재 및 형태를 육안으로 판별할 수 있다. 누설자속탐상(MFLT: Magnetic Flux Leakage Testing)은 기본적으로 자분탐상과 그 작용원리가 동일하나 결함에 의해 누설되는 자속의 크기를 자기센서를 이용하여 측정한다는 점에서 차이를 보인다. 따라서 자동화 및 정량화가 용이하다는 잇점이 있다. 최근에 이러한 누설자속을 이용하여 D&I용 소재의 박강판에 대해 개재물 탐상이 가능하다는 결과가 보고되었다[4-7].

는 것이 일반적인 경우 거의 불가능하기 때문이다. 이러한 문제에 대한 초기의 접근은 1960년 대에 러시아의 Zatsopin과 Shcherbinin이 쌍극자(dipole) 모델을 이용하여 시도되었으며[8,9] 실험결과를 정성적으로 설명하는 데 매우 유용하다는 것이 입증되었다. 그러나 기본적인 현상에 대한 몇 가지 가정에 대한 근본적인 이해는 Edwards와 Palmer[10]에 의해 이루어졌다. 결함의 형상이 복잡하거나 대상체 내부에 존재하는 결함의 경우 상기의 모델을 적용하는 것이 곤란하며 이 경우 일반적으로 FEM을 이용한 수치해석을 통해 그 경향을 파악하는 것이 일반적이다[11,12]. 이상의 시도는 정지된 물체에 대한 해석이며 움직이는 물체에 대한 해석은 시간의존적인 맥스웰방정식을 풀어야 한다. 아직 이에 대한 일반적인 접근은 거의 시도되어 있지 못하고 제한적인 경우에 한해 upwinding이라는 기법을 사용한 FEM 기법으로 시도되었다[13].

**II. 이론적 배경**

**2.1. 자기탐상의 기본원리**

강자성체의 표면이나 표면 직하부에 있는 국소적인 결함은 누설자속법을 이용하여 탐상이 가능하다. 대상물체에 자기장을 가하면 대상물체의 자기투자율에 따라 물체 내부에 자속선이 발생한다. 강한 외부자기장을 사용하여 강자성체를 자기포화 상태로 만들었을 경우 이 강자성체의 내부에 결함이 존재하면 이 결함을 주변으로 Fig. 2와 같이 누설자속이 발생한다.

**2.2. 누설자속의 이론적모델**

누설자속탐상의 이론적인 해석은 초보적인 수준을 벗어나지 못하고 있다. 그 이유는 강자성체의 자화곡선(B-H curve)이 강한 비선형성(non-linearity)을 가지고 있으며 대상을 기술하는 기본 수식이 2차편미분방정식인 Maxwell 방정식으로 주어지므로 이 둘을 합할 경우 수식해를 구하

**III. 정지탐상대의 제작**

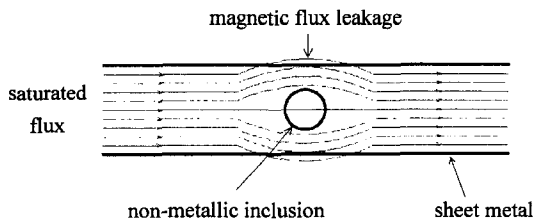
**3.1. 전자석의 설계**

D&I 소재인 박강판은 저탄소강으로서 이 소재의 자기적 특성을 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 이용하여 측정된 결과 고유자속밀도( $B_i = \mu_0 M$ )의 포화값이 2.15 Tesla이었다. 이렇게 하여 얻은 자기적 특성을 고려하여 전자석을 설계하였다. 자화요크(yoke)는 순철(순도 99.9%이상)을 사용하였으며 2 mm 직경의 구리선을 200회 감았다. 전원은 최대 10 A를 출력할 수 있는 300 W급의 양극성 직류선형직류전원(bipolar linear dc power supply)을 제작하여 사용하였다. 전자석의 구조는 박강판을 포화 자화시킬 수 있게 하기 위하여 IBM-PC 상에서 상용의 유한요소법(有限要素法; FEM : Finite Element Method)을 이용한 수치계산 소프트웨어(Torr사의 QuickField)를 이용하여 설계하였다.

**3.2. 자기탐상대의 제작**

센서의 제작과 동시에 제작된 센서의 실제 탐상 능력을 평가하고 시료의 개재물 분포에 대한 정성적, 정량적인 평가를 하기 위해 정지탐상용 자기탐상대를 제작하였다(Fig. 3).

기구부의 구동과 누설자속량의 측정을 효율적으로 제어하고 관리하기 위해 컴퓨터를 사용하여 능동적으로 제어하는 시스템을 구축하였으며 동작제어와 자료수집은 컴퓨터의 확장 슬롯에 장착되는 보드형태의 모터 제어기와 자



**Fig. 2.** Generation of magnetic leakage flux due to the non-metallic inclusion.

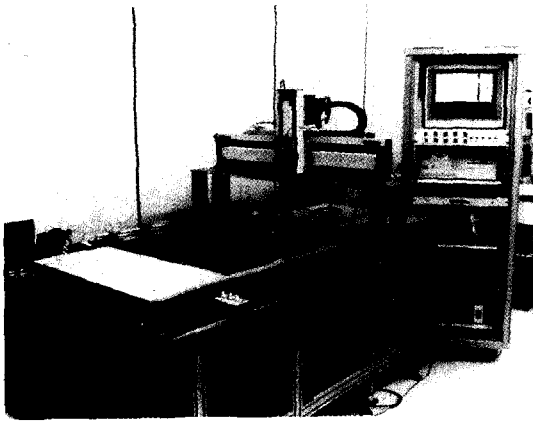


Fig. 3. Picture of magnetic leakage testing bed.

료수집 보드(A/D board)를 사용하였다. 따라서 누설자속의 측정, 측정된 누설자속 데이터의 화면 표시 및 파일의 관리, 동작 제어를 위한 모터 축 제어 등 모든 사항이 컴퓨터에 의해 통합적으로 관리가 가능하며 동작제어 및 자료수집 보드가 컴퓨터와 버스(bus) 형태로 연결되어 있어 고속제어가 가능하게 하였다.

누설자속량 즉 자기센서로부터 출력되는 아날로그 신호는 National Instrument 사의 16 bit A/D 보드인 AT-MIO-16X 에 의해 디지털 값으로 변환되어 컴퓨터에 입력되고 누설자속 값과 위치에 대한 정보가 동시에 기록된다. 모터 축에 엔코더(encoder)를 설치하고 엔코더 펄스신호를 AT-MIO-16X의 카운터(counter)로 연결하였으며 적절한 카운터 조작을 통해 일정거리 간격으로 데이터를 샘플링 할 수 있도록 하였으며 고속의 데이터 샘플링을 위하여 인터럽트(interrupt) 방식을 사용하였다. 동작 제어기는 Parker 사의 AT6400을 사용하였다.

자기탐상대는 강판 하부에 놓인 전자석을 통해 강판을 자기포화 상태로 만듦으로써 비금속개재물로부터 누설자속을 유도한다. 강판을 자기장과 평행한 방향(이하 X-방향)으로 정속이동이 가능하도록 하고 자기센서는 이에 수직인 방향(이하 Z-방향)으로 이동이 가능하도록 구성한다. 자기센서는 강판 상부의 일정한 높이에 고정시킨다. 3축의 위치 조정 기능은 컴퓨터 및 스텝모터(step motor)에 의해 S/W 상에서 자동으로 제어된다.

자장을 이용한 측정장치라는 특수성 때문에 가능한 한 모든 구성품을 비자성체인 알루미늄(AL7075)과 스테인레스 스틸로 구성하였다. 시험 시편은 슬라이딩 판 위에 놓이며 클램핑에 의해 시편의 한쪽이 고정된다. 클램핑 부는 X축 구동부에 고정되어 X축과 평행하게 움직이게 되므로

X축은 시편의 이송축이 된다. 자기센서는 Z축 구동부에 설치되어 상하방향 즉 Z 방향으로 움직일 수 있으며 Z축 전체가 Y축 구동부에 고정 설치되어 자기센서는 Y방향과 Z 방향의 두 방향으로 이동가능하다. 장착 가능한 최대시편의 크기는 1000L×600 W(mm)이다.

기본적으로 강판 상부의 일정한 높이의 2차원 평면 상에서 등간격에 따른 누설자속신호를 A/D 변환기를 사용하여 디지털 값으로 읽어들이고 이것을 2차원의 신호처리를 통해 이미지화하여 그래픽 화면상에서 개재물 등의 불량 판정을 행하도록 하였다. 2차원 이미지 처리를 행함으로써 단순 1차원 처리에 비해 정밀 판정이 가능하다. 또한, 폭방향에 대한 자기장의 불균일을 신호처리를 통해 어느 정도 줄일 수 있다. 그리고 영상정보를 사용함으로써 개재물이 아닌 표면크랙 등에 의한 신호를 일정부분 구분할 수 있다.

그리고 이미지 출력은 PCX 파일로 작성하여 Adobe사의 PhotoShop을 사용하여 그래픽으로 출력하였다.

### 3.3. 표준시료의 제작

개재물의 크기에 따른 누설자속의 정량화를 위해 일정한 크기의 개재물에 해당하는 결함을 갖는 표준시료를 제작할 필요가 있다. 그러나 0.28 mm 두께를 갖는 강판의 내부에 수십  $\mu\text{m}$  크기의 개재물과 동일한 형태의 내부결함을 제작하는 것은 지극히 어려운 일이므로 내부개재물성 결함의 제작 대신에 방전가공법(EDM : Electro-Discharge Maching)을 사용하여 표면결함을 제작하였다.

## IV. 플럭스게이트 자기센서의 설계 및 제작

### 4.1. 센서부 설계 및 제작

센서부는 크게 코아와 코어를 지지해 주는 포머(former), 그리고 코아 주위에 감겨있는 코일로 나눌 수 있다. 센서의 원리는 피상보자력을 측정하여 외부자기장을 측정하는 플럭스게이트의 원리[14, 15]를 도입하였으며, 센서의 구조는 본 연구에 적합하게 설계하였다. 센서코어는 고주파(~100 kHz)까지 각형성(squareness)이 우수한 VITROVAC® 6030을 사용하였으며, 광포화법(photo-lithography)과 습식식각법(wet etching)을 이용하여 코아의 길이가 5 mm이고, 폭이 1 mm인 형태로 제작하였는데, 그 공정은 코아재질 청소, 감광막 도포, 가볍게 구움, 자외선 노출, 감광막 현상, 식각의 순으로 행하였다. 감광막으로는 SHIPLEY Microposit 1400-23을 사용하였고 도포



Fig. 4. Shape of sensor core (thickness of 25 μm).

조건은 500 rpm으로 10초동안 회전시켜 두번을 행하였다. 이를 80 °C에서 10분간 말린 다음 자외선을 20초동안 노출 시켰다. 또한 노출된 부분의 감광막을 SHIPLEY MIF-312CD-27의 현상액에 넣어서 제거하고 노출된 코어를 염화제 2철의 식각용액에 넣어 습식식각하였다. 이런 공정으로 제작한 코어의 모양을 Fig. 4에 보였다.

일반적으로 자속이 통과하는 코어의 단면적보다 코일환의 단면적이 크므로 발생하는 공기자속(air flux)의 양에 비례하여 자기센서의 특성이 둔화되므로 이 양을 최소화하여야 할 필요가 있다. 이를 수식으로 나타내면

$$\Phi_t = A_c B + A_L \mu_0 H \quad (1)$$

과 같은데, 여기서  $\Phi_t$ 는 코일안을 통과하는 총자속이고,  $A_c$ 는 코어의 단면적(0.025 mm<sup>2</sup>),  $A_L$ 은 코일을 감았을 때 자속이 통과하는 단면적,  $\mu_0$ 는 공기중에서의 투자율을 나타낸다. 공기자속의 양을 적게 하기 위하여 코일환의 단면적을 적게 하는 것이 좋다. 포머를 Fig. 5과 같이 설계하였다. 본 연구의 경우 식(1)의 첫째항(코어에서 탐지하는 플럭스)과 둘째항의 비는 약 7이 된다.

본 연구에서 사용한 코일은 직경이 0.1 mm인 구리선을 사용하였고, 감은 수는 약 150 회이다. 감은 수를 결정하기 위해서는 고려되어야 할 사항이 코어의 자기소거인자(demagnetizing factor)이다. 회전타원체에서  $r \gg 1$ 의 경우 자기소거인자는

$$N_1 = \frac{1 - N_t}{2}, \quad r > 1 \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서  $N_t$ 는 두께방향의 자기소거인자이고,  $N_r$ 는 길이 또는 폭방향의 자기소거인자이다.  $r$ 은 길이 또는 폭을 두께로 나눈 값을 의미한다. 이를 본 연구에서 사용한 코어의 모양과 비교하면  $r$ 은 200이므로 위의 근사를 적용할 수 있고  $N_t$ 는 0.9922이고, 따라서  $N_r$ 는 0.0039이다. 본 연구에서 사용한 코어는  $\mu_r$ 의 값이  $H = 0.4$  A/cm인 경우 약 15000이므로 코어내부의 자장이 적어도 0.4

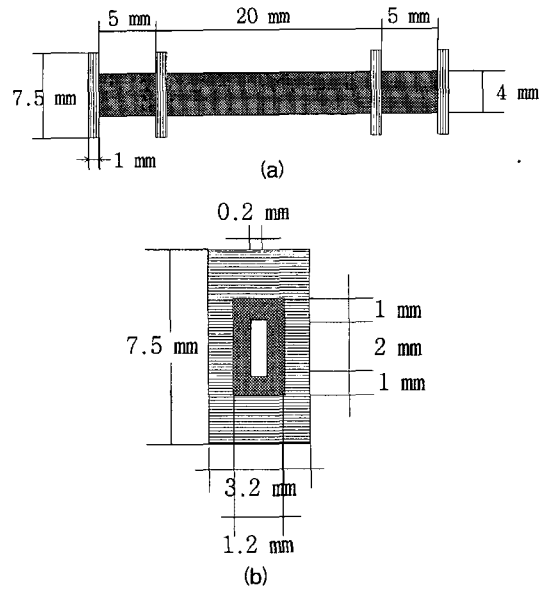


Fig. 5. Shape of sensor coil former (a) Front view (b) Side view.

A/cm가 되어야 한다는 사실을 근거로 하면 코어를 충분히 포화시키기 위하여 외부에서 인가해야 하는 자장은 24 A/cm정도가 된다. 한편 전자회로에서 전력 증폭기를 사용하여 코일에 전류를 흘려주게 되는데 전류증폭기에서 발생할 수 있는 최대 전류치는 150 mA 정도이므로 5 mm의 길이로 된 코어에는 적어도 80회 이상을 감아야 한다. 그러나 외부자장이 인가되면 코어를 충분히 포화시키지 못할 경우도 있으므로 본 연구에서는 코일을 약 150회 감았다.

#### 4.2. 센서 구동전자부의 설계 및 제작

두 센서의 위치가 박강판의 표면에 대하여 수직방향으로 나란히 배열함으로써 넓은 영역에 걸쳐 발생하는 백그라운드 자장을 자기소거하게 하였다. 그리고 두 센서에 의해 측정된 신호를 차등증폭기에 입력하고, 차등증폭기의 출력을 S/H(Sample & Holder)에 입력하여 주기적으로 측정된 신호를 전압으로 출력하게끔 회로를 구성하였으며, 이의 개략도를 Fig. 6에 나타냈다. 발전기에서 나온 전압 파형을 기준전압과 비교하여 펄스(pulse)신호를 만들고, 이 비교기의 출력을 이용하여 탐상대의 컴퓨터에 연결되어 있는 AT-MIO-16X의 트리거 신호로 사용하였다. 자기센서의 한쪽 코어 부분을 개재물에 의한 누설자속이 형성된 곳에 위치시키면 다른쪽 코어는 거의 자장을 감지하지 못한다. 이 두 신호를 차등증폭기의 두 입력으로 사용하면

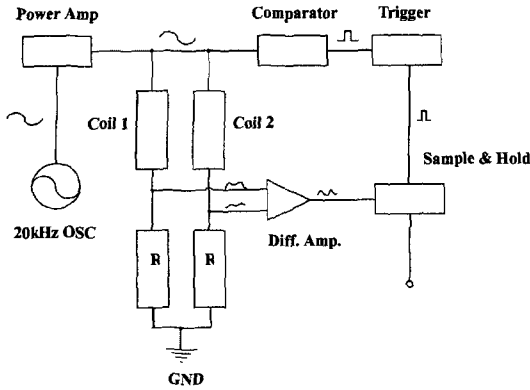


Fig. 6. Schematic diagram of the signal processing circuit for differential type flux-gate magnetometer.

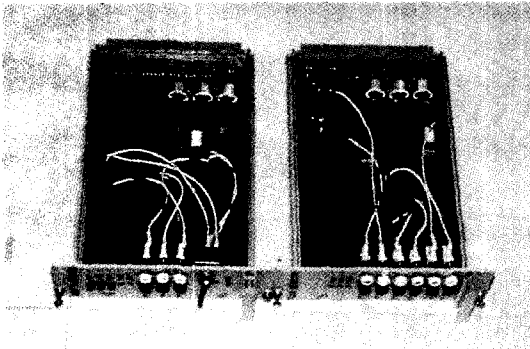


Fig. 7. Pictures of the controller for fluxgate magnetometer.

두 센서가 감지하는 자장의 차이를 전압의 신호로 출력할 수 있다. 자화곡선에서 자장의 변화에 해당하는 부분의 정보를 얻기 위해 S/H와 트리거 신호를 사용하였다.

이렇게해서 제작된 플럭스게이트 구동전자부를 Fig. 7에 보였다.

## V. 정지탐상 실험결과 및 고찰

### 5.1. 자화전류의 크기에 따른 누설자속의 변화

전자석에 의한 누설자속의 크기가 적당한 값으로 설계되었는지를 확인하기 위해 전자석에 흐르는 자화전류의 크기에 따른 누설자속의 크기를 측정하였다. Fig. 8은 냉연강판 시료의 탐상에서 찾은 개재물성결함에 대해 1 mm 상부에서 누설자속의 크기를 측정한 뒤 누설자속의 피크값의 차이를 전자석에 인가한 자화전류의 크기에 따라 측정된 결과이다. 2차원 컴퓨터 모의시험에 의한 결과에서  $20 \times 100 \mu\text{m}$ 의 모의결함에 의해 누설되는 자속의 크기가 1 kA-turns의 경우 10 Gauss 정도에 이르는 것을 미루어

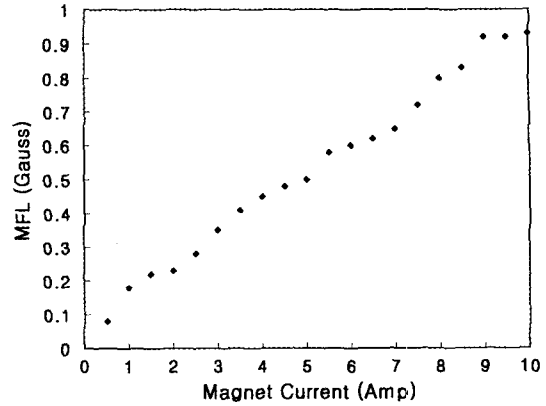


Fig. 8. MFL(peak-to-peak) vs. magnetizing current.

실제의 시료가 3차원의 성격을 지니므로 그것에 비해 수 배이상 신호가 작아짐을 알 수 있다. 그러나 실제 결함시료의 경우 누설자속측정을 위해서는 충분한 자화력을 가지고 있음을 알 수 있었다.

자화전류의 크기에 따른 실시료에 대한 2차원 탐상의 결과를 Fig. 9에 보였다. 전류가 2A에서 8A로 증가됨에 따라 누설자속의 크기가 증가하므로 개재물성 결함의 신호가 명확해짐을 분명히 알 수 있다.

### 5.2. 센서의 높이(Lift-Off)에 따른 누설자속의 변화

자기센서가 강판으로부터 높아짐에 따라 누설자속의 최대값이 감소함은 이미 앞에서 살펴본 바 있다[8-10]. 신호대 잡음비를 증가시키기 위해서는 높이가 낮은 것이 바람직하나 높이가 낮아지게 되면 높이의 사소한 차이가 신호입장에서는 큰 오차를 발생하므로 높이를 일정하게 유지하는 것이 더욱 큰 문제가 되며 또한 센서 한 개가 대응할 수 있는 면적이 작아지는 문제가 있다. 따라서 높이에 따른 누설자속의 크기를 파악함으로써 높이에 대한 최적의 조건을 설정할 필요가 있다. 이것은 최종적으로 센서의 검출감도에 의해 결정된다. 7A의 자화전류를 인가한 상태에서 사용하여 탐상한 결과로부터 누설자속의 피크간(peak-to-peak) 크기를 높이(Lift-off)의 함수로 Fig. 10에 보였다. 그림에서 볼 수 있듯이 높이에 대한 탐상결과는  $1/(\text{높이})$ 에 의존함을 보여준다. 쌍극자 모델에 의거한 Zatsepin 등의 이론에 의하면 누설자속의 피크간 크기의 높이에 대한 의존성은  $1/(\text{높이})^2$ 에 의존한다. 이론과의 차이에 대해서 다음과 같은 원인이 예상된다. 첫째 쌍극자 모델에 의한 Zatsepin 등의 이론이 과연 개재물성 결함에 대해 적용할 수 있느냐 하는 점이며 또 다른 한 가지는 자기센

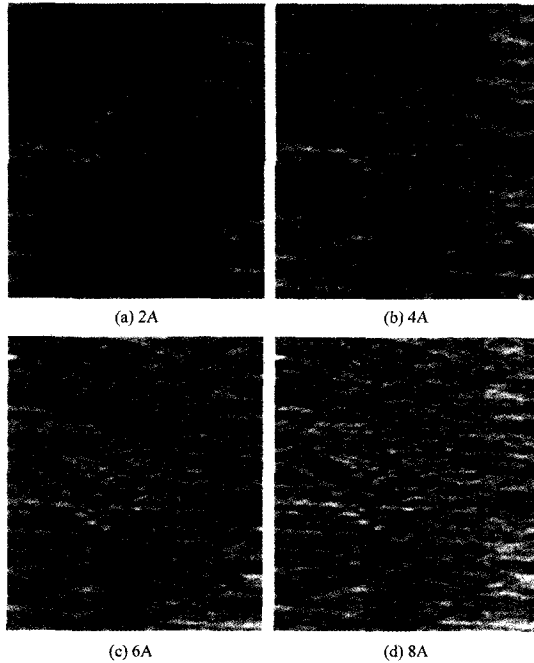


Fig. 9. Results of MFL testing with different magnetizing current.

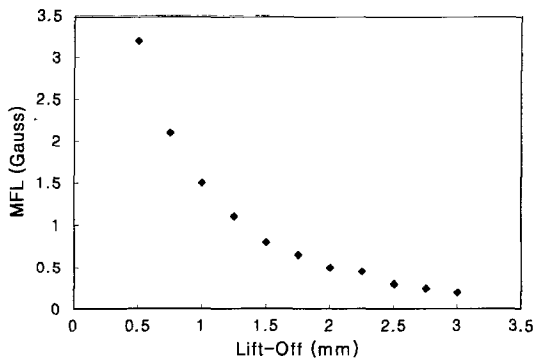


Fig. 10. MFL(peak-to-peak) vs. lift-off.

서가 측정하는 자기장은 점장(point field)을 보여주는 것이 아니라 자기센서가 유한한 면적을 가지고 있기 때문에 이 센서의 면적에 걸친 자기장의 평균값을 측정한다는 것이다. 이상에 대한 엄밀한 해석은 3차원 전자기장 해석을 컴퓨터로 수행함으로써 접근할 수 있으나 본 연구에서는 수행하지 않은 관계로 향후과제로 남는다.

### 5.3. D&I 용 박판소재의 누설자속탐상결과

앞에서 설명한 탐상기준 및 그래픽 처리 기준에 따라 탐상한 결과의 전형적인 경우를 보면 Fig. 11과 Fig. 12와

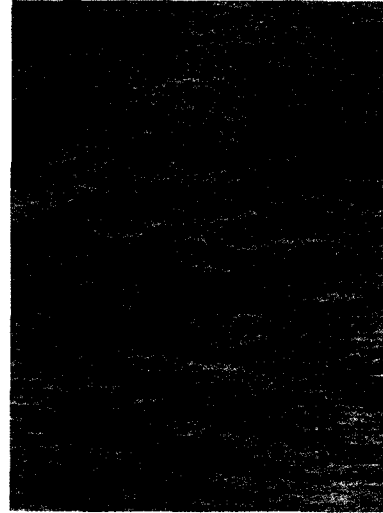


Fig. 11. Result of MFL testing for A63610 of which scan area was  $45 \times 60$  cm ( $t = 0.32$  mm, listoff = 0.4 mm,  $I_{mag} = 7$  A).



Fig. 12. Result of MFL testing for A28732 of which scan area was  $30 \times 60$  cm ( $t = 0.28$  mm, listoff = 0.4 mm,  $I_{mag} = 7$  A).

같다. 센서의 높이(Liftoff)는 0.4 mm, 주사(scan)속도는 1 cm/sec 및 자화 전류의 크기는 7 A로 고정할 경우 개재 물성 결함을 충분히 판별할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 11의 경우에는 눈에 띈 만한 결함이 보이지 않는 반면, Fig. 12에는 중앙 부근에 4개 이상의 이상 부위가 보인다.

그러나 강판 표면에 대한 육안관측 결과 특별한 표면결합이 존재하지 않으므로 개재물성 결합이 있을 것으로 예상하였으며, 결합유무의 판단은 MFL측정 후 관측된 부분의 단면을 SEM으로 확인하였다. 즉 강판의 특성에 의해 개재물성 결합이 있는 경우와 없는 경우를 명확히 판별할 수가 있었다.

상기의 연구 결과 누설자속 탐상은 안정적이고 재현성 있는 결과를 줄 수 있으며 결합의 유무 판단이 가능하며 정량화의 가능성이 있음을 쉽게 알 수 있다. 특히 그림 12의 경우 중앙 좌측 부위에서 검출된 결합신호의 양상은 다른 나머지 결합과는 달리 그 신호가 반전되어 있음을 볼 수 있다. 이것은 다른 나머지 결합신호가 개재물에 의한 것인데 반해 이것은 표면의 국소부위가 외부로 돌출되어 나온 것에 기인하는 것이다. 표면의 육안 관찰 결과 이것은 강판의 표면에 깊이 수  $\mu\text{m}$  정도의 압흔이 존재함으로써 발생하는 것으로 판명되었다. 따라서 누설자속 탐상에 의해 결합의 종류판별이 일부 가능함을 알 수 있다. 냉연재의 다른 표면결합에 대해서도 동일하게 예상할 수 있을 것으로 예상된다. 즉 표면크랙, 스크래치(scratch), 덴트(dent) 등이 모두 누설자속을 발생하게 되며 이것들은 일반적인 경우 내부개재물과 분리가 될 수 없으나 특정한 경우에 대해서는 그 형상의 판별이 가능할 수 있을 것이다.

## VI. 결 론

박강판 내부에 개재물성 결합이 존재할 경우 2피스칸의 가공중에 플렌지 크랙이 발생할 수 있다. 이러한 개재물성 결합을 탐상하기 위해 일반적으로 자분탐상이 사용되어 왔으나 작업성 및 정량화 등에 문제가 있다.

본 연구에서는 자기센서를 이용한 누설자속탐상법을 사용한 탐상기를 개발하여 개재물성 결합이 탐상가능함을 보였다. 이를 위해 연자성 코어의 보자력을 사용한 차등형의 플럭스게이트센서를 제작함으로써 넓은 공간에 걸쳐 발생하는 자기잡음 하에서 개재물성 결합등으로부터 발생하는 미세한 자장성분을 측정할 수 있었다. FEM을 사용한 수치해석 소프트웨어를 사용하여 전자석을 설계하고, 일정 면적을 갖는 박강판의 일정한 높이에서 누설자속값을 측정할 수 있는 3축 이송가능한 누설자속탐상장치를 제작하여 강판에서 발생하는 누설자속을 측정할 결과 개재물성 결합을 평가할 수 있음을 알았다. 또한 누설자속값

을 2차원 영상정보로부터 판정함으로써 강판에 발생하는 개재물성 결합 이외의 결합을 일부 구분 가능함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 최원집, 남재복, 김영석, 배동수, "Two-piece can 加工 및 加工性 評價技術 開發", 연구결과보고서, 산업과학기술 (1989).
- [2] 小石想一, 入谷正夫, 長久薫, "X線透過試験による薄鋼板非金屬介在物の形態解析方法", 鐵と鋼, 67, S633(1981).
- [3] 小石想一, 荒木正和, 入谷正夫, 宮永弘泰, 長久薫, "冷延薄板の加工割れに及ぼす介在物形態の影響", 鐵と鋼, 67, S1182(1981).
- [4] 御園生一長, 藤井昭明, 田中裕, 西村康夫, "漏洩磁束探傷法による薄鋼板の内部欠陥検出", 非破壊検査, 32, 953 (1983).
- [5] Y. Matsuoka, Y. Nakamura, and Y. Naganuma, "Development of nonmetallic leakage flux method", Nippon Steel Technical Report, 49, 63(1991).
- [6] A. Takekoshi, M. Inaba, K. Iwanaga, H. Maki, S. Ando, and M. Yasuhisa, "Development of high level minute interior defect defecting system for light steel sheets", NKK Technical Review, 66, 10(1992).
- [7] 田邊英也, 松藤泰大, 四すじ淳一, 安藤靜吾, 西藤勝之, 稻葉 護, "漏洩磁束 探傷法による薄鋼板内部微小欠陥検出技術", 鐵と鋼, 79, 103(1993).
- [8] N. N. Zatsepin and V. E. Shcherbinin, "Calculation of the magnetostatic field of surface defects, I. Field topography of defect models", Defektoskopiya, 2, 385(1966).
- [9] V. E. Shcherbinin and N. N. Zatsepin, "Calculation of the magnetostatic field of surface defects, II. Experimental verification of the principle theoretical relationships", Defektoskopiya, 2, (1966).
- [10] C. Edwards and S. B. Palmer, "The magnetic leakage field of surface-breakibg cracks", J. Phys. D: Appl. Phys., 19, 657(1986)
- [11] "Nondestructive testing handbook", 2nd ed., eds. by R. C. McMaster, P. McIntire, and and M. L. Mester, Amer. Soc. for Nondest. Testing, 1986.
- [12] D. A. Lowther and P. P. Silvester, "Computer-aided design in magnetics", Springer-Verlag, Berlin (1986).
- [13] G. Katragadda, Y. S. Sun, W. Lord, S. S. Udpa and L. Udpa, "Velocity effects and their minimization in MFL inspection of pipelines - a numerical study", NDT & E International, Volume 30(1), 33(1997).
- [14] D. Son, "A new type of fluxgate magnetometer using apparent coercive field strength measurement", IEEE MAG-20, 3420(1989).
- [15] 최근하, 손대락, 조 욱, "자기장 차이 측정용 플럭스게이트 마그네토미터 제작", 한국자기학회지, 5(4), 304(1995).

## **Inspection of Non-metallic Inclusions in Thin Steel Sheets Using Magnetic Flux Leakage Method**

**Zhong Soo Lim**

*Sensor and Instrumentation Research Team, RIST, Pohang, 790-600, Korea*

**D. Son**

*Department of Physics, Hannam University, Taejon, 305-791, Korea*

(Received 2 November 2000, in final form 22 November 2000)

An MFL (Magnetic Flux Leakage) testing system has been developed in order to inspect the non-metallic inclusions in the thin steel sheets. We have made a differential type flux-gate magnetometer using the measurement of apparent coercive field strength of soft magnetic core. The specifications of the electromagnet was determined using FEM software, and MFL testing system with 3 axis degree of freedom was constructed. The feasibility testing for non-metallic inclusion was shown using the system. By digitizing MFL signal and using 2-D graphic display, we could identify various surface defects other than the inclusions.