

## 자기비파괴검사의 원리

### Principles of Magnetic Nondestructive Testing

신 영 길(학술제3분과 위원장)  
 E-mail: ykshin@kunsan.ac.kr

#### 1. 서론

이 강좌에는 한국비파괴검사학회의 각 학술분과에서 담당하여 고정 컬럼을 신기로 하였던 바, 학술제3분과에서는 전자자기비파괴검사 및 평가에 관련된 내용을 다룰 것이고 앞으로의 게재 내용은 분과회의를 거쳐 결정될 것이다. 전자자기비파괴검사의 대표적인 예는 자기비파괴검사와 와전류비파괴검사를 들 수 있는데, 이 방법들은 물리나 전기전자계열에서 다루는 전자기 이론에 근거하고 있기 때문에 해당 계열의 전공자가 아닌 분들은 그 이론을 접할 기회가 흔하지 않을 것이고, 그 결과 이 두 탐상법이 제한적으로 사용되고 있는 것이 아닌가 하는 안타까운 생각이 든다. 우선, 이번 첫 회에서는 자기비파괴검사에 대해 관심은 많으나 이론적 배경이 약해 사용이 망설여지는 분들을 위하여 가능한 한 이해하기 쉽도록 원리를 설명 드리고자 한다.

#### 2. 자기비파괴검사의 원리

자기비파괴검사라고 하면 자분탐상법(magnetic particle testing)과 자속누설(magnetic flux leakage) 탐상법을 들 수 있는데 이들은 모두 강자성체의 검사에 적용되는 방법으로, 결함을 찾는 방법이 자분을 뿌려 누설자속이 있는 부위에 자분이 집적되는 것을 보고 판단하느냐 아니면 자속에 민감하게 반응하는 센서를 사용하여 측정된 누설자속신호로 판단하느냐의 차이만 있을 뿐, 강자성체를 자화시켜 결함 때문에 발생하는 누설자속을

이용하는 것은 마찬가지이다. 일반적으로 주요 검사절차는 전처리, 자화, 자분 적용 및 지시 관찰 혹은 누설자속 측정, 기록, 탈자 등으로 구성된다.

##### 2.1. 피검사체의 자화

관련 서적[1-5]들을 보면 다양한 자화방법이 소개되고 있고 원형자화, 선형자화 같은 용어가 사용되고 있는데 이들을 쉽게 이해하기 위해서는 두 가지 사전지식이 필요하다. 한 가지는 자석과 관련된 사항이고, 다른 한 가지는 자화전류에 의해 발생하는 자계, 자속과 관련된 내용이다.

영구자석이나 요크와 같은 전자석을 사용하는 경우에 자속(magnetic flux,  $\phi$ )은 자석의 외부에서는 N극에서 나와 S극으로 들어가는 방향으로 흐르고 자석의 내부에서는 S극에서 N극으로 흐른다. 막대자석의 N극 쪽에 나침반을 가져가면 같은 극 사이에서는 척력이 작용하므로 나침반의 N극은 막대자석의 S극 방향으로 향하게 된다. 따라서 막대자석의 N극에서 나온 자속이 나침반의 S극으로 들어가고 나침반의 N극을 통해 나온 자속은 막대자석의 S극으로 들어가게 된다. 즉, 어떤 자석에서건 외부로 자속이 흘러나오는 곳이 N극이고, 들어가는 곳은 S극이 된다. 관련 서적에서 흔히 자력선이란 용어가 사용되는데 이는 철가루를 사용하여 자속을 가시화한 선이라고 생각할 수 있다. 사족이지만, 나침반의 N극이 가르키는 방향을 북쪽이라 하는데 그렇다면 지구상의 북극이라 부르는 곳은 실제로는 지자기의 S극에 해당된다는 의외의 사실을 받아들일 수 있을 것

이다. 자속이 흐르는 방향에 수직인 단위면적당 자속을 자속밀도(Magnetic flux density,  $\vec{B}$ )라고 부르는데 자속밀도는 양 극 근처에서 가장 높고, 따라서 자력도 가장 크므로 자분이 양 극으로만 몰리게 된다[2].

피검사체에 자속이 발생되도록 하기 위해서 주로 사용하는 것은 전류이다. 원형자화, 선형자화라는 용어는 자속이 발생하는 모양에 따라 붙여진 명칭이다. 전류가 흐르는 도선 주위에 발생하는 자계(magnetic field intensity,  $\vec{H}$ )의 크기와 방향을 정량적인 벡터로 나타낸 것이 Biot-Savart의 법칙이다[6]. Fig. 1과 같이 진공중에 전류가 흐르는 도선의 극히 일부, 즉 미소선전류,  $I d\vec{l}$ 로 인해 거리 R만큼 떨어진 점 P에서 발생하는 미소자계,  $d\vec{H}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \times \hat{R}}{4\pi R^2} \quad (1)$$

여기서  $d\vec{l}$ 은 미소선전류가 흐르는 방향을 나타내고,  $\hat{R}$ 은 source가 위치한  $I d\vec{l}$ 에서 점 P로 가는 거리벡터의 방향만을 나타내는 길이 1인 단위벡터이다. 벡터곱의 크기는 두 벡터의 크기와 사잇각의 sine을 취해 곱한 것이고, 방향은 앞 벡터의 방향에서 뒷 벡터의 방향으로 오른나사를 돌리듯이 회전시켰을 때 나선의 진행방향이 된다. Fig. 1의 경우 점 P에서의 미소자계는 지면 안으로 들어가는 방향이 된다. 만약 점 P가 도선의 왼쪽에 있었다면 미소자계는 지면에서 나오는 방향이 되었을 것이다.

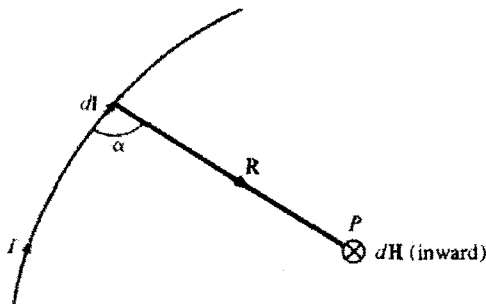
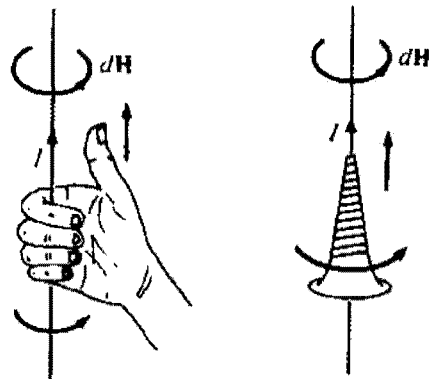


Fig. 1 미소선전류  $I d\vec{l}$ 로 인한 점 P에서의 미소자계 [6]

점 P가 전류가 흐르는 도선의 여러 위치에 있는 경우의 결과들을 종합해 보면, 자계의 방향은

Fig. 2 (a)에 보인 바와 같이 오른손 엄지손가락이 전류의 방향을 가르킬 때 나머지 손가락들이 굽은 방향과 같다는 것을 알 수 있다. 따라서 축통전이나 전류관통봉을 사용하게 되면 원형자장이 발생하고, 코일에 전류를 흘리게 되면 선형자장이 형성된다는 것을 이해할 수 있을 것이다.

자계는 식(1)과 같이 매질의 영향이 전혀 반영되지 않고 오직 전류에 의해서만 결정된다. 매질의 영향은 자속에 반영되는데, 자계와 자속밀도 사이에는  $\vec{B} = \mu\vec{H}$ 의 관계가 성립한다. 여기서  $\mu$ 는 매질의 투자율이라고 하는데 물질이 자화되기 용이한 정도를 나타내며 강자성체일수록 큰 값을 갖는다. 이에 대해서는 다음 절에서 따로 다룰 것이다. 어쨌든 이 관계식은 자계와 자속밀도가 같은 방향을 가리킨다는 것을 나타내므로, 자속도 자계와 같은 방향이 됨을 알 수 있다. 이러한 이유 때문에 자계(혹은 자장)와 자속이 구별없이 사용되는 경향이 있는데, 외부전류가 흐르지 않는 경우라면 자계보다는 자속이 더 적절한 표현이라고 생각한다.



(a) 오른손 법칙 (b) 오른나사 법칙 [6]

Fig. 2 미소자계,  $d\vec{H}$ 의 방향 결정법

### 2.2. 투자율과 초기자화곡선, 자기이력곡선

앞서 투자율에 대한 언급이 잠깐 있었는데, 투자율은 엄밀히 말해서 자속밀도와 자계간의 비(B/H)를 의미하며 자계가 변하면 그 비도 변화하므로 직선으로 나타나지는 않는다. 재료투자율, 최대투자율, 실효투자율, 초기투자율 등 몇 가지 투자율이 정의되어 있다[1].

재료투자율은 원형자화와 같이 자속의 경로가

모두 재료내에 있는 경우에 측정된 B와 H의 비로 정의되는데, Fig. 3(a)와 (b)는 비교적 낮은 재료투자율을 갖는 강자성체의 초기자화곡선과 재료투자율의 변화를 보인 것이다. 외부 자계에 전혀 노출되지 않은 경우의 자속밀도, 0에서 출발하여 자계의 강도가 점차 커지면 이에 대응하는 자속밀도도 점차 커지며 Fig. 3(a)에서 실선으로 나타낸 것과 같이 증가하게 된다. 어느 정도 이상이 되면 자계의 강도가 커지더라도 자속밀도가 더 이상 증가하지 않게 되는데 이를 포화상태에 이르렀다고 한다. Fig. 3(b)에서는 재료투자율이 자계의 세기가 증가함에 따라 어떤 초기값에서 출발하여 최대값을 지나 감소하다가 포화상태가 되었을 때 1로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 자기비파괴검사에서는 자화의 정도를 초기자화곡선의 무릎점 근처로 선택하는데 그림에서 볼 수 있듯이 이 점 근처에서 최대투자율이 발생된다. 실효투자율은 코일을 이용한 선형자화

에서 정의되는데 재료가 있을 때 측정된 B와 재료가 없을 때 측정된 H의 비를 말하며, 초기투자율은 탈자상태의 재질에 최초로 자계를 가한 경우의 투자율을 말한다. 투자율의 종류에 대한 언급이 없이 투자율이라는 용어가 사용될 때는 대개 최대투자율을 의미한다.

자기포화된 상태(a)에서 자계의 세기를 0으로 줄여도 이에 따른 자속밀도는 Fig. 4에 보인 것처럼 0이 되지 않고 잔류자속밀도라고 불리는 값(b)을 갖게 되어 자석과 같은 성질을 띠게 된다. 바로 이 점을 이용하여 피검사체를 자화시켰다가 자계를 제거한 후에 자분을 적용하거나 누설자속을 측정하는 것을 잔류법(residual method)라 한다. 이에 비해 자계를 계속 적용하여 자화시키고 있는 상태에서 검사하는 것은 연속법(active method)라 한다. 이어서 자계의 방향을 바꿔 반대방향으로 증가시키면, 즉 전류의 방향을 반대로 하여 증가시키면, 자속밀도가 0이 되는데(c) 이때의 자계의 강도를 항자력이라 한다. 반대방향의 전류를 더욱 증가시키면 자속밀도가 음의 값으로 포화된다(d). 다시 전류의 방향을 바꿔 증가시키면 (e), (f)를 거쳐 (a)점으로 다시 돌아오는데 이를 자기이력곡선이라 한다.

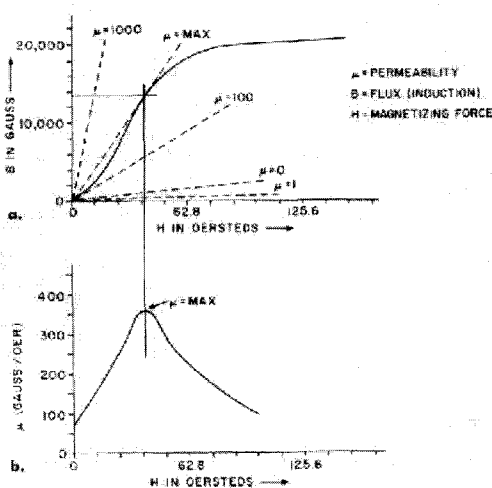


Fig. 3 (a) 초기자화곡선, (b) 재료투자율 변화 [2]

### 2.3. 누설자속의 발생

자화된 강자성체내의 결함은 어떻게 누설자속을 발생시키는 것일까? 이에 대한 가장 간단한 답은 강자성체와 결함의 자기저항 차이에서 찾을 수 있다.

전기회로에서 전기저항이 있듯이 자기회로에서는 자기저항이 존재한다. 도체에서 Ohm의 법칙은  $V = RI$ 로 표현되며 V, R, I는 각각 전압(기전력), 전기저항, 전류를 나타낸다. 여기서 전기저항은 전류의 흐름을 방해하는 정도로 재질 및 형태에 의해 결정된다. 넓은 축극장에서 수비수들을 제치는 것과 좁은 복도에서 같은 수의 수비수를 제치는 것은 저항의 정도가 다를 것이며(즉, 저항은 단면적(S)에 반비례), 그런 수비가 길게 이어진다면 저항도 커질 것이다(즉, 저항은 길이( $l$ )에 비례). 또한 재질이 얼마나 전기를 잘 통하는지를 나타내는 전도도( $\sigma$ )에는 반비례할 것이므로 전기저항은  $R = l/\sigma S$ 로 표현된다.

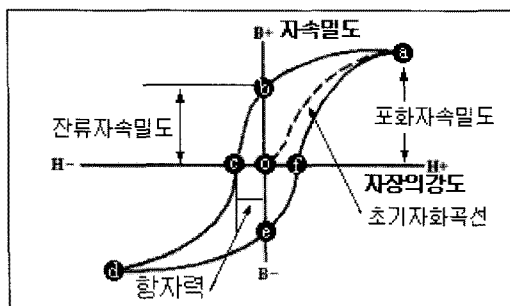


Fig. 4 자기이력곡선

마찬가지로, 자기회로에서 Ohm의 법칙에 대응되는 법칙은  $F = R_m \phi$  로  $F, R_m, \phi$  는 각각 기자력, 자기저항, 자속을 나타내며, 자기저항은 자속의 흐름을 방해하는 정도로  $R_m = \ell / \mu S$  로 표현된다. 여기서는 전도도( $\sigma$ ) 대신에 투자율( $\mu$ )이 사용되었는데, 투자율은 강자성체일수록 상자성체에 비해 수백, 수천 배로 매우 커진다. 따라서 비자성 공간뿐인 결함의 자기저항은 강자성체인 피검사체의 자기저항에 비해 매우 커진다. 그 결과, 자속은 자기저항이 적은 강자성 피검사체 내부로만 흐르려고 하는데 만약 결함이 존재한다면 결함의 큰 자기저항 때문에 자속이 결함부위를 통과하지 못하고 Fig. 5에 보인 것처럼 결함부위를 우회하게 된다. 이렇게 우회하는 자속은 결함이 있는 면의 반대쪽 면으로 누설자속을 발생시킬 수도 있다.

강자성체의 자화가 최대투자율이 나타나는 지점 이상이 되면 투자율이 낮아지므로 강자성체내의 우회로의 자기저항은 점점 커지며 따라서 결함이 있는 면 쪽 공간으로 누설되는 자속도 점차 많아진다. 자화가 포화점에 도달하면 자성체내의 우회로는 자속으로 가득하게 되어 자기저항은 증가하고 결함부의 자기저항과 차이가 적어지게 되어 결함공간으로 누설하는 자속은 급격히 증가한다. 하지만 이때는 결함이 없는 정상부위에서 누설되는 자속도 많아지게 된다[4].

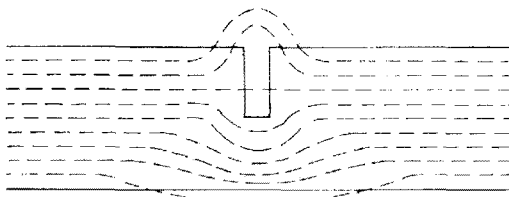


Fig. 5 결함부에서의 자속의 우회 및 누설 [3]

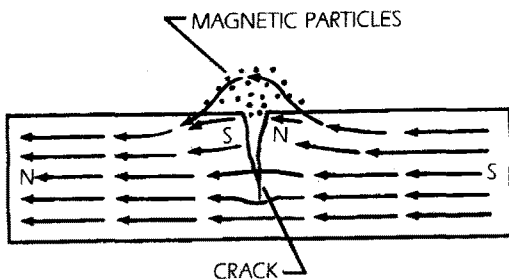


Fig. 6 자분의 집적 [2]

누설자속이 많이 발생되게 하려면 자속의 흐름이 결함부위와 직각으로 만나 가장 격렬하게 흐름을 방해받아야 한다. 따라서 자기비파괴검사는 자화의 방향이 서로 직각되게 하여 최소한 두 번은 시행되어야 할 필요가 있다. Fig. 6은 자성체가 자화되어 자속이 왼쪽으로 흐를 때 결함이 존재하여 누설자속이 발생하고, 거기에 자분을 뿌렸을 때 자분이 결함부위에 집적되는 것을 형상화하여 보인 그림이다. 앞서 언급한 대로 누설자속이 공간으로 나가는 부위는 N극이고 공간에서 들어오는 부위는 S극이므로 결함은 마치 자석과 같은 역할을 하게 되어 자분을 끌어당기게 되므로 자분이 결함 주변에 집적된다.

#### 2.4. 탈자

피검사체를 자화시켜 검사를 하고 나면 잔류자속이 남아있는 경우가 발생되는데, 이것이 나쁜 영향을 주는 경우에는 반드시 잔류자속을 제거해 주어야 한다. 탈자의 원리는 적용하는 자계의 방향을 교대로 반전시키면서 반전시마다 자계의 세기를 서서히 줄여 잔류자속을 점점 0으로 감소시키는 것이다. Fig. 7에 탈자의 원리를 나타내었다. 교류 혹은 직류의 극성을 바꾸어 주는 방법으로 전류를 점점 감소시키면 자계의 세기도 점

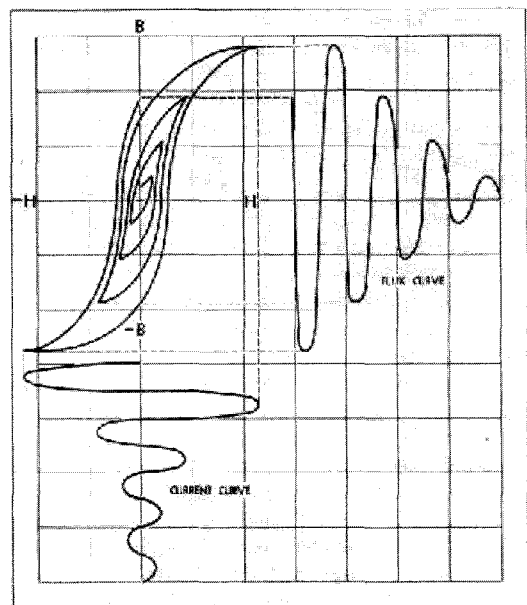


Fig. 7 탈자시 자속곡선 [1]

점 감소하게 되므로 자기이력곡선은 서서히 줄어들게 되고 따라서 잔류자속밀도도 점점 줄어들어 결국 0이 된다. 작은 부품의 탈자에는 교류를 사용하는 것이 편리할 때가 있다. 교류가 흐르는 코일내에 부품을 넣고 코일로부터 부품을 축방향으로 서서히 거리를 멀어지게 하면 쉽고 효과적으로 탈자를 시킬 수 있다[5].

### 3. 맺음말

자기비파괴검사의 원리를 전자기 이론을 접해 보지 않은 분들도 이해가 가능하도록 설명하려고 노력하였다. 성과가 얼마나 있을지는 모르겠지만 최소한 저자 자신에게는 많은 도움이 되었다. 보다 명확하게 설명드리기 위해 여러 참고서적을 찾아보면서 새삼 깨닫게 되는 것도 있었고, 미처 생각하지 못했던 것도 알게 되었다. 아무쪼록 이 장좌를 읽으면서 저자와 같은 경험을 하게 되기

를 바라며, 각각의 세부내용을 모두 다루지는 못하였으나 자기비파괴검사에 대해 좀 더 친숙해지고 활용을 계획하는 계기가 되었기를 바란다.

### 참고문헌

- [1] C. E. Betz, "Principles of magnetic particle testing," Magnaflux Corp. (1997)
- [2] NDT Handbook, Vol. 6 "Magnetic particle testing," ASNT (1989)
- [3] Jack Blitz, "Electrical and magnetic methods of NDT," Adam Hilger (1991)
- [4] 이의종, "자분탐상시험", 골드 (1995)
- [5] 이용, 비파괴검사의 기초, 제2권 "자분탐상 검사", 세진사 (1993)
- [6] M. N. O. Sadiku, "Elements of electromagnetics," Oxford university press (2001)