

渦電流探傷法(I)

정 용 무

한국원자력연구소 증기발생기 검사실

Eddy Current Testing(I)

Yong Moo Cheong

Korea Atomic Energy Research Institute

머리말 이번 호부터 해설란을 통하여 非破壞檢查 技術에 대한 연재를 시작한다. 앞으로 非破壞檢查 技術 각 분야에 대해 다룰 예정이며 우선 1차적으로 渦電流探傷法에 관해 3회에 걸쳐 게재하기로 한다. 특정한 非破壞檢查의 전문가가 아니더라도 쉽게 이해할 수 있도록 가급적 수식은 배제하고 기초적인 이론을 소개할 것이며 특히 현장 적용에 중점을 두어 記述하고자 한다. 본 원고에서는 원거리 渦電流探傷法(remote field eddy current testing) 이나 펄스 渦電流探傷法(pulsed eddy current testing)과 같은 특수 渦電流 技術은 제외하였으며 본 연구실에서 내부 교육용으로 사용하는 “渦電流探傷法 Level I 과정”과 미국금속학회에서 발행한 Metal Handbook, 9th ed., Vol. 17, “Non-destructive Evaluation and Quality Control” 및 기타 관련 기술 자료들을 참고하였으나 일일이 명기하지는 않는다.

1. 渦電流探傷法の 개요

渦電流探傷法은 電磁氣 誘導 檢查의 일종으로서 電磁氣 誘導의 원리를 기초로 하여 電氣傳導性 磁性 材料 또는 非磁性 材料의 다양한 물리적, 구조적, 또는 금속학적인 특성을 측정하거나 구분, 확인하는 데 사용된다. 기본적으로 渦電流探傷法은 材料의 電氣傳導度 및 磁氣透磁率의 변화를 측정하는데 이를 원하는 용도와 관련지음으로서 다음과 같이 이용될 수 있다.

1) 缺陷의 探知 및 평가

2) 금속의 합금성분, 熱處理 상태 등의 판별, 異材의 검출 등의 材質 檢查

3) 크기, 박막의 두께 측정, 도체와의 거리 변화 측정 등의 크기 檢查

4) 형상 변화를 판별하는 形狀 檢查

渦電流探傷法도 다른 非破壞檢查 방법과 마찬가지로 간접적인 측정법이므로 탐상 장비에 나타나는 출력을 우리가 원하는 구조적, 물리적 특성 또는 시험체의 건전성과 주의깊게 연관지어 주어야하며 결과의 재현성도 요구된다.

2. 渦電流探傷法の 장단점 및 要素 技術

渦電流探傷法の 장점으로는

- 1) 응용 범위가 다양하여서 缺陷 크기, 材質 변화 등을 동시에 검사하는 것이 가능하다.
- 2) 非接觸 方法으로서 검사 속도가 빠르고 자동화에 적합하다.
- 3) 특히 表面 및 表面下 缺陷의 검출 능력이 우수하다.
- 4) 검사 결과를 기록할 수 있으며 결과의 재현성이 우수하다.
- 5) 소모품비 등 유지비가 저렴하다.

또한 단점으로서

- 1) 시험체 내부에 깊숙히 위치하고 있는 缺陷의 검출이 곤란하다.
- 2) 검사 목적이외의 材料的 因子の 영향에 의한 잡음이 검사에 방해가 되는 경우가 있다.
- 3) 검사 결과에서 직접적으로 缺陷 등을 판별하기가 곤란하며 경험을 갖춘 有資格者가 판정해야 한다.

渦電流探傷法은 자체의 電磁氣場에 의하여 渦電流가 발생하며 발진 코일이 수신 코일을 겸하거나 별도의 수신 코일로 시험체의 電氣傳導度 및 磁氣透磁率의 변화를 감지하는 방식이다. 특히 非磁性 材料에 대하여서는 電氣傳導度에 의한 효과만이 2차 電磁氣場 誘導에 관련되나 磁性材料에 대해서는 磁氣透磁率에 의한 효과가 電氣傳導度 효과를 능가하므로 일반적인 渦電流探傷 방법으로는 좋은 결과를 얻을 수 없으며 磁性 효과를 상쇄하기 위해서는 磁氣飽和 探觸子를 사용하기도 한다.

渦電流探傷法을 적용하기 위하여서는 다음과 같은 技術要素들을 고려하여야 한다.

- 1) 電磁氣 誘導 現象
- 2) 誘導 코일 설계 이론 및 응용
- 3) 誘導 코일 주변에 電磁氣場 현상에 대한 경계 조건 문제, 특히 渦電流 分布, 導體의 表皮 效果, 및 電磁氣場 力學에 대한 解

- 4) 缺陷에 의한 渦電流 信號 임피던스 변화를 이론적으로 예측
- 5) 정밀도가 높은 측정을 위한 장비의 개선
- 6) 금속 공학 및 금속 가공
- 7) 신호 기록 및 화면을 개선

3. 渦電流探傷의 역사

渦電流探傷法の 기초가 되는 磁氣場 또는 電磁氣場 분야에 대한 이론은 19세기에 이미 완성되었다. 초기에 과학자(Coulomb, Ampere, Faraday, Oersted, Arago, Maxwell, Kelvin) 들은 1775년부터 약 1900년까지 사이에 電磁氣場에 대한 이론을 완성하였으며 특히 Arago는 非磁性, 電氣傳導性 平板에 磁石을 근접시킬 때 磁石의 진동이 급격히 억제되는 것을 발견하였다. 또한 그는 平板을 회전시킬 때 磁石이 平板에 이끌리는 힘이 작용한다는 것도 알아냈다. 실제로 Arago는 반복되는 磁場의 변화가 平板에 渦電流를 발생시키며 이에 의한 磁性이 平板과 磁石을 이끄는 힘으로 나타난다고 설명하였다. 이러한 원리를 이용한 간단한 예는 현재에 자동차 속도계, 또는 전기계량기 등이 있다.

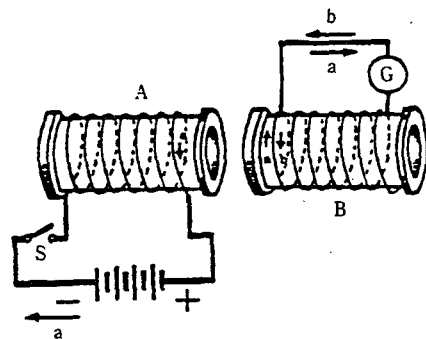


Fig. 1. Induced current electromagnetic technique.

Oersted는 電流가 통하고 있는 傳導體 주위에 磁場이 존재한다는 사실을 알아냈으며 磁場의 방향은 電流가 흐르는 방향에 대해 수직인 것을 발견하였다. 한편 Ampere는 두 導線에 서로 반대 방향으로 電流가 흐를 때 導線 근처에 발생하는 磁場이 서로 상쇄되는 현상을 발견하였는데 이러한 현상을 이

용한 것이 바로 현재의 渦電流探傷法 差動法의 원리이기도 하며 非誘導性 정밀 저항을 만드는 데에도 응용되고 있다.

電磁氣 誘導 現象은 1831년 Faraday에 의해 발견되었는데 Fig.1에 보인 바와 같이 코일 A는 스위치 S를 통하여 축전지에 연결되어 있고 2차 코일 B는 galvanometer G에 연결되어 있을 경우를 생각해 보자. 스위치 S가 닫혀져서 코일 A에 전류가 화살표 a의 방향으로 흐른다면 순간 電流가 코일 B에 화살표 a방향으로 흐를 것이며 어떠한 경우에도 코일 A에 흐르는 電流가 변화할 때에만 코일 B에 電流가 발생한다는 사실을 알 수 있다. Fig. 1에서 코일 B에 誘導된 起電力은 다음과 같이 표현된다.

$$E = \frac{N}{K} \frac{\Delta\Phi}{\Delta T}$$

여기서 E=平均 誘導 電流

N=코일 B의 권선수

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta T}$ =코일 B에 영향을 끼치는 磁束의 變化率

$$K=10^8$$

1864년 James Maxwell은 “電氣와 磁氣에 관한 논문”(“A Treatise on Electricity and Magnetism”)을 발표함으로써 電磁氣場에 대한 고전적 이론을 확립하였으며 여기서 “電磁氣場의 Maxwell 방정식”이라 불리는 유명한 방정식이 현재까지도 모든 電磁氣 現象을 波動의 입장에서 記述하는 수학적 기초가 되고 있다. 1879년 Hughes는 渦電流를 이용하여 금속의 傳導度, 磁氣透磁率 및 온도의 차이를 측정하였는데 당시에 渦電流探傷法과 같은 技術이 필요하지 않았으며 이론도 개발되지 않았기 때문에 별로 진전이 없었다.

금속 내에 傳導 電流를 계산하기 위해서는 미분 방정식 형태인 Maxwell 방정식을 특정한 경계 조건에 대해서 풀어야 하는데 주로 軸對稱 형태에 대한 문제이므로 Bessel function을 이용하여 解를 구하는 경우가

많다. 이러한 解析的인 解는 특히 發電, 送電, 誘導 加熱, 渦電流探傷 분야에서 널리 응용된다. 두께 측정을 위한 渦電流探傷 장비가 1920년대 중반에 Kranz에 의해 개발되었으며 1930년대에 Farrow는 1차 송신 코일, 2차 수신 코일 및 직류로 磁氣 飽和된 솔레노이드를 사용하는 渦電流探傷 裝備를 개발하여 직경이 6.4-85mm인 튜브를 주파수 500, 1,000, 4,000Hz에서 검사하였다. 이 장비는 balance회로, 고주파 증폭기, 주파수 변별기, 저주파 펄스 증폭기 및 필터 등으로 구성되었다.

1940년대 초에 Forster와 Zuschlag가 본격적인 와전류탐상 장비를 제작, 판매한 이래로 사용목적에 따라 다양한 장비들이 시판되고 있으며 특히 1980년대 이후 개인용 컴퓨터 또는 work station급 컴퓨터를 사용한 디지털 渦電流探賞 裝備가 현장에서 사용되는 추세이다.

4. 渦電流探傷의 原理

渦電流는 공학적으로 금속의 加熱, 誘導 硬化, 非破壞 檢査 등에 이용되고 있는데 예컨대 渦電流에 의한 加熱 現象은 導體에 渦電流가 흐를 때 발생하는 I²R손실에 의한 열을 이용하는 것이며 원하는 가열 속도를 얻기 위하여 비교적 높은 電流를 가한다. 반면에 非破壞 檢査를 위한 過電流는 이러한 열손실과 그에 따른 온도 변화를 최소화하기 위하여 비교적 낮은 電流 레벨에서 작동되며 缺陷이나 그밖에 크기 변화에 의한 電氣的 變化를 감지하기 위한 계측 장치가 필요하다. 渦電流 探傷이나 誘導 加熱 모두 表皮 效果를 고려하여 적정 주파수를 선정해야 하는데 여기서 表皮 效果란 渦電流 密度가 금속의 표면에 집중되고 깊이 방향에 대해서 지수 함수적으로 감소하는 현상을 의미한다.

渦電流探傷의 기본 원리는 Fig. 2에 보인 바와 같이 電磁氣 誘導에서 시작한다. 코일에 교류가 흘러갈 때 1차 電磁場이라 부르는 交流 電磁場이 형성되며 傳導性 시험체

를 1차 電磁場 내에 놓으면 시험체 내에 誘導 電流 즉 渦電流이 형성된다. 여기서 交流 I_p 는 코일 주변에 1차 磁氣場 ϕ_p 를 발생시키고 ϕ_p 에 의해 誘導된 渦電流 I_e 가 導體 내에 생성되며 渦電流 I_e 에 의해 磁氣場 ϕ_e 가 1차 磁氣場 ϕ_p 에 반대 방향으로 생성된다. 이 때 ϕ_e 의 크기는 渦電流 I_e 크기에 비례한다. 시험체 내에 생성되는 渦電流는 導體의 物性 變化, 예컨대 電氣傳導度, 磁氣透磁率, 또는 기하학적인 구조 등이 渦電流 I_e 를 변화시키는 원인이 되며 특히 導體 내에 형성된 渦電流의 폐회로 경로 중에 缺陷이 존재할 때 渦電流 경로가 변화하므로 渦電流 密度가 변화한다. I_e 가 변화할 때 ϕ_e 도 변화하며 이에 따라 ϕ_p 가 변화함으로써 코일에 흐르는 電流를 변화시킨다. 이러한 코일 電流의 변화를 감지하여 우리가 관심있는 缺陷 또는 材料의 특성과 연관지어 적당한 출력 장치에 연결한 것이 渦電流探傷의 원리이다. 코일에 誘導된 電流는 인가된 電流, 주파수, 및 코일 상수들에 직접 비례하며 여기서 코일 상수는 인덕턴스, 직경, 길이, 두께, 권선 수, 및 core 材料 등이다.

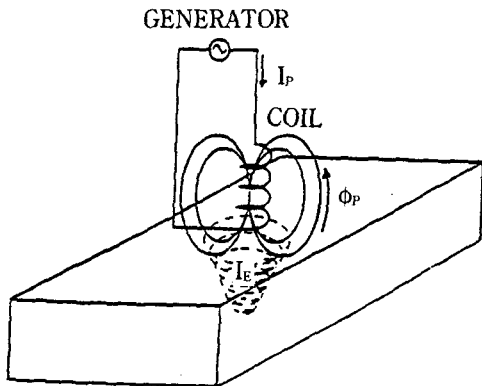


Fig. 2. Generation of eddy current in a test object.

여기서 주의할 점은 Fig. 3에 보인 바와 같이 I_p , ϕ_p 의 방향과 誘導된 渦電流 I_e 의 방향이 반대라는 점과 誘導된 渦電流는 코일이 감겨있는 면과 동일한 면에 발생한다는 점이다. 한편 渦電流 密度는 시험체 표면에

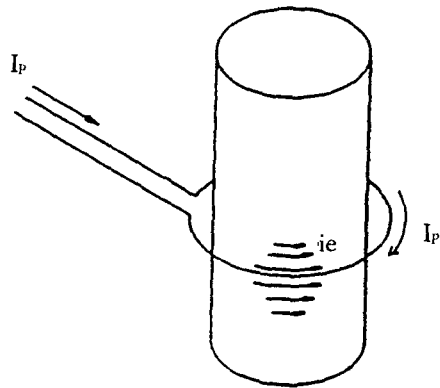


Fig. 3. Induced current flow in cylindrical part.

서 최대이며 시험체 내부로 들어감에 따라 지수함수적 감소 곡선에 따라 감소하는데 보통 지수함수 곡선을 표현할 때 횡축(Y축)에는 강도 또는 크기를, 종축(X축)에는 시간이나 거리를 표현한다. 보통 강도가 37%가 되는 위치를 곡선의 "knee"라고 부르는데 이것은 초기에 X방향으로 조금 이동할 때 Y값은 100%에서 37%로 크게 변화하고 그 이후에는 X방향으로 이동함에 대해 Y값이 완만하게 변화하기 때문에 두 영역을 구분하는 의미이다. 이러한 논리를 渦電流探傷에 적용시켜서 시험체의 渦電流 密度에 대한 용어를 만들어 냈다. 즉 시험체 표면에서의 渦電流 密度를 100%로 볼 때 渦電流 密度가 37%로 감소하는 깊이를 "標準 浸透 깊이"라고 칭하며 Fig.4에 시험체 표면에 평행한 磁場 成分과 관련된 상대적인 渦電流 密度 曲線을 보였다.

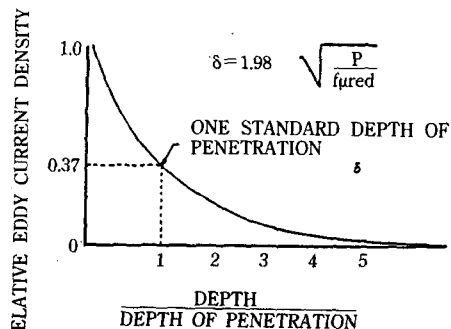


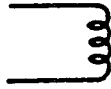
Fig. 4. Relative eddy current density.

5. 시험 코일의 구조

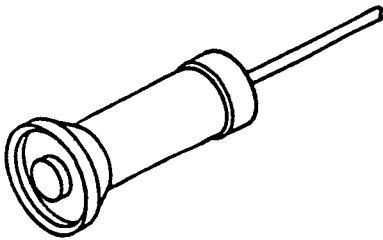
渦電流探傷用 코일은 대개 probe 코일, bobbin 코일, encircling 코일 등으로 나눈다.

5.1. Probe 코일

표면 코일, probe 코일, 평면형 코일, pancake 코일 등이 모두 같은 용어로 혼동되어 사용되며 Fig.5에 표면을 走査하는 전형적인 probe 코일의 형태를 보였다.



Coils shown schematically like this



Actually look like this

Fig. 5. Probe coil

Probe 코일은 대개 특정한 시험체의 구조에 잘 맞도록 제작되며 복잡한 형상의 시험체를 검사하는 데 사용되기도 한다. 예를 들어 연필 모양으로 제작된 probe 코일은 (pencil coil) stud나 너트의 나사 부분이나 turbine wheel의 serrated area 또는 turbine blade hole을 檢査하는 데 사용된다. 특별히 높은 분해능이 요구되는 경우에는 코일 차폐 장치를 probe coil에 첨가하기도 한다.

高分解能 코일을 사용할 경우 檢査 對象 面積을 모두 走査하기 위해 시험체 표면을 조심스럽게 走査해 나가야 하는 데 이 작업은 오랜 시간이 소요되기 때문에 통상 대형 시험체에 대한 probe 코일 검사에서는 특별히 관심있는 제한된 영역만을 검사하는 것이 보통이다. Probe 코일은 항공기의 fastener

나 fastener hole에 있는 龜裂을 검사하기 위해 널리 사용되는데 fastener hole이나 볼트 구멍, 리벳 구멍 등을 검사하는 경우 코일은 나선형으로 회전하면서 일정한 비율로 구멍밖으로 인출되어 나온다. 이러한 기법을 "spinning probe"라고 부르며 구멍 안에서 나선형 走査를 한다.

5.2. 外插型(Encircling) 코일

Encircling 코일, O.D. 코일, "feed-through coil", 또는 外插型 코일 등이 모두 같은 용어로 혼동되어 사용되며 Fig.6에 보인 것처럼 시험체의 외부를 둘러싼 코일 형태를 갖는다.

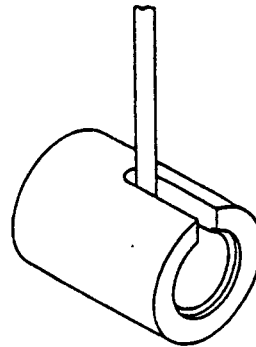
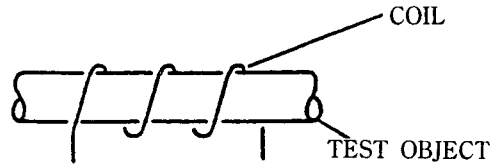


Fig. 6. Encircling coil

外插型 코일은 관 모양 또는 bar 모양의 시험체를 검사하는 데 주로 사용되며 검사 속도가 비교적 빠르다. 外插型 코일은 probe 코일에 비해 빠르게 다량의 시험체를 검사할 수 있는 반면에 검사 감도는 떨어지는 편이며 渦電流가 시험체의 단면에 대해 작용하므로 원주 방향의 龜裂 또는 缺陷을 탐지하기가 힘들다. 또한 시험체가 外插型 코일 내에서 중심이 잘 맞지 않으면 일정한

探傷 感度を 유지할 수 없기 때문에 일반적으로 표준시험편 내에 人工 缺陷에 대해 여러번 修正 信號를 수집하여 再現性을 유지하며 이러한 절차에 의해 探傷 感도와 코일과 시험체의 중심 위치를 보증할 수 있다.

은 결선 방식에 따라 다르게 분류될 수도 있다. 이에는 絶對法(Absolute), 差動法(Differential), 및 混合法(Hybrid)이 있으며 Fig. 8에 코일 결선 방식에 대해 보였다.

5.3. 内插型(Bobbin) 코일

内插型 코일, bobbin 코일, I.D. 코일, 内面 코일 등이 모두 같은 용어로 혼동되어 쓰이며 管 모양의 시험체를 内面에서 검사하는데 사용된다. 内插型 코일은 管의 内面に 길고 휘기 쉬운 케이블 또는 압축 공기 등으로 코일을 삽입한 뒤 일정한 속도로引出하면서 시험체로부터의 渦電流 信號를 얻는다. 작동 원리는 外插型 코일과 동일하며 Fig.7에 전형적인 内插型 코일을 보였다.

Probe 코일, 内插型 코일, 外插型 코일 등

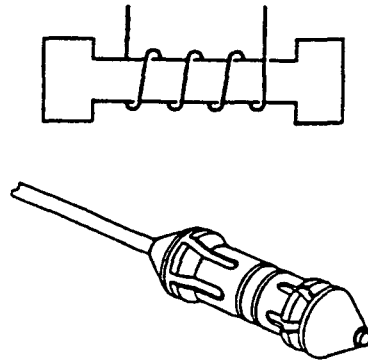


Fig. 7. Bobbin coil

		ABSOLUTE	DIFFERENTIAL
ENCIRCLING COILS	SINGLE		
	DOUBLE		
BOBBIN COILS			
PROBE COILS	SINGLE		
	DOUBLE		

Fig. 8. Coil configurations

5.4. 絶對法 코일

絶對法 코일은 직접적인 비교 대상 기준 또는 표준이 없이 측정하는 방식이다. 이 방법으로 電氣傳導度, 磁氣透磁率, 치수, 硬度 등을 측정할 수 있다.

5.5. 差動法 코일

差動法 코일은 둘 또는 그이상의 코일이 電氣的으로 연결되어 있으며 自己補償型 差動法("self-comparison differential")과 外部標準型 差動法("external reference differential")로 나뉜다.

自己補償型 差動法은 시험체의 한 부분을 기준하여 다른 부분을 검사하는 방법인 데 통상 두 코일을 반대로 결선하여 두 코일이 동일한 시험체 조건에 있을 경우에는 출력이 "0" 또는 아무런 신호가 나오지 않게 되며 두 코일 사이에 어떤 電氣的인 차이가 있을 경우에 渦電流 信號로 출력된다. 이 방법은 시험체 내에서 서서히 변화하는 현상, 즉 관벽두께, 직경, 電氣傳導度 등이 위치에 따라 완만하게 변화한다면 이들을 감지하기가 어려우며 두 코일 가운데 한쪽에서 신호의 차이가 발생할 경우에만 출력 신호가 감지되기 때문에 시험체의 온도 변화에 대해 매우 안정적이며 작은 缺陷, 예컨대 龜裂, pits, 또는 기타 국부적인 缺陷들을 쉽게 검출할 수 있다.

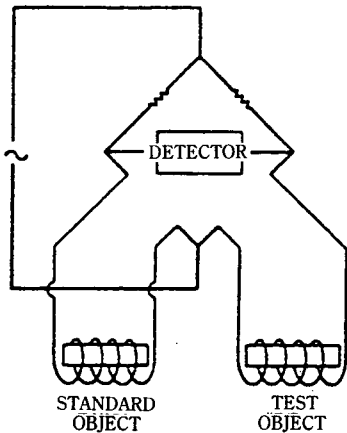


Fig. 9. External reference differential system

다른 差動法으로 外部標準型 差動法은 Fig.9에 보인대로 한 코일은 표준시험편에, 다른 코일은 시험체에 적용하여 그 신호의 차이가 발생할 경우에 출력이 발생한다. 이 방식은 특히 상대적인 電氣傳導度, 磁氣透磁率 또는 치수의 변화를 측정하는 데 효과적이다.

5.6. 混合法 코일

混合法 코일은 일반적으로 driver/pickup, 관통형(through-transmission) 또는 1차/2차 코일로 구성되며 Fig.10에 일반적인 混合法 코일 결선을 보였다. 수신 코일에 감지되는 전압은 발진 코일에 인가된 전류 및 주파수, 코일 상수, 시험체 특성에 따라 변화한다. Fig.10에는 外插型 코일로 원통형 시험체에 대해 전류를 인가하고 소형 probe 코일(평면형 코일)로 신호를 수신하는 배치이다.

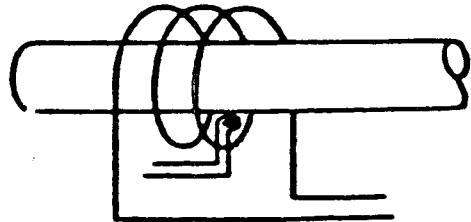


Fig. 10. Hybrid coil

다음호 2편에서는 過電流 코일설계, 코일과 시험체간의 반응, 過電流探傷 裝備등에 대해, 마지막 3편에서는 過電流探傷의 실제응용사례에 대해 소개할 예정이다.