

자기포화를 이용한 강자성체의 와전류검사장비 개발

Development of Eddy Current Testing System using Magnetic Saturation in Ferromagnetic Materials

성제중*[†], 신용훈*, 임태건*, 강석철*, 권영호*, 서동만**

Je-Joong Sung*[†], Young-Hoon Shin*, Tae-Gun Um*, Seok-Chul Kang*,

Young-Ho Kweon* and Dong-Man Suh**

초 록 플랜트, 산업용 설비로서 사용되어지고 있는 강관의 결함 검출을 위한 와전류검사장비를 개발하였다. 강관은 내부 불균일한 전자기적 특성을 포함하고 있는 자성체로서 와전류검사의 응답신호를 왜곡시키므로 이러한 전자기적 특성의 균일화를 위해 자기포화가 요구된다. 자기포화가 없을 경우 결함신호는 잡음신호와 구별되지 않았으나 약 0.62A의 전류가 코일에 가해졌을 때 자기포화되어 결함을 검출 할 수 있었다. 자기포화형 탐촉자는 헬름홀츠 코일을 적용하여 제작하였고 내부 대역 통과필터를 이용하여 직류자기장으로 야기되는 잡음신호를 최소화 하였다. 개발된 장비를 이용한 현장시험 결과 1m/sec의 이송속도에서 관통홀($\phi = 2.0\text{mm}$) 결함을 정확히 검출 할 수 있었다.

주요용어 : 강관, 자기포화, 헬름홀츠 코일, 대역 통과필터, 와전류검사

Abstract An eddy current testing system was developed for detection of flaws in the ferromagnetic steel tubes. Because the eddy current signals from the ferromagnetic steel tubes could be distorted easily due to an irregularity of magnetic permeability, magnetic saturation is required to suppress this variation of magnetic fields. A magnetic saturation probe with the Helmholtz coil was designed for the inspection of the steel tubes. The bandwidth pass filters were adapted to minimize the noise from the DC magnetization. When using the designed test probe, the flaw signals could be discriminated from the noise. The system was tested at the production line and showed a capability of detecting flaws, like a drilled hole of the diameter of 2.0 mm at the moving speed of 1 m/sec.

Keywords: steel tube, magnetic saturation, Helmholtz coil, bandwidth pass filter, eddy current testing

1. 서 론

와전류탐상은 다른 비파괴시험법에 비하여 비접촉식으로 빠르게 결함의 위치와 크기를 알아낼 수 있어 튜브생산업체의 자동생산라인에 설치되어 사

용되고 있다[1]. 그러나 화력발전소의 열교환기용 동합금 튜브와 같은 비자성체의 와전류검사는 현장에서 많이 적용되고 있지만 플랜트, 산업용 설비에 사용되고 있는 강관, 탄소강 같은 강자성체(ferromagnetic materials)는 불균일한 전자기적 특

성으로 일반적인 와전류 검사가 불가능하므로 현장 적용이 어렵다. 따라서 이러한 전자적 특성의 영향을 제거시켜 검사가 가능하도록 하기 위해서는 자기포화(magnetic saturation)가 필요하다.

강자성체의 와전류 검사를 위해 자기포화 시키는 방법으로 영구자석, 솔레노이드, 전자석 등을 적용할 수 있는데 이중 헬름홀츠 코일을 이용한 전자석이 일정범위에서 가장 빠르고 균일하게 자기장을 발생하고 유지시키므로 강자성체의 검사에 적절하다[2].

헬름홀츠코일을 이용하여 직류자기장발생 장치를 만들어 전류를 흐르게 하면 대상체는 자기포화 상태에 이르게 되고, 이때 그 강자성체는 비자성체처럼 취급되어 상대투자율(μ)의 값이 1 이라고 가정될 수 있다[3]. 따라서 비자성체의 경우와 유사하게 와전류검사를 수행할 수 있다. 그러나 직류자기장을 발생시키게 되면 검사신호에 잡음이 발생하게 되는데 이는 적절한 대역통과필터 등을 이용하여 필터링이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 외국에서도 극히 한정적인 회사에서만 검사장비를 생산하고 있는 자기포화를 이용한 강자성체의 와전류 검사장비를 개발하였다.

직류전원공급장치가 연결된 헬름홀츠 코일을 와전류검사 탐촉자에 부착하여 자기포화형 탐촉자를 개발, 제작하고 이 탐촉자를 고대역 필터가 포함된 와전류검사장비에 적용하여 주파수변화에 따른 결함신호 크기와 직류전류의 변화 즉, 자기포화 정도에 따른 결함신호 크기를 측정함으로써 검사를 위한 적정 주파수와 자기포화도를 선정하였다. 선정된 요소들이 적용된 장비를 실제현장에 적용하였고 우수한 성능을 나타낼 수 있었다.

2. 이론

2.1. 강자성체의 임피던스 특성

비자성체의 경우는 와전류반응장(H_e)은 검사코일의 자장에 반대방향으로 형성되어 순수자속밀도(H_0)에 영향을 미치고 이것은 검사코일의 쇄교자속(magnetic flux linkage)을 감소시킨다. 쇄교자속이 감소하므로 자화된 검사코일의 유도리액턴스($X_L = \omega L_0$)가 작아진다. 따라서 ωL_0 는 ωL_1 로, R_0 는 R_1 으로 이동하게 된다.

반대로 강자성체의 경우, 전류 반응장은 강자성

체의 자화를 유도한다. 이것은 검사코일의 쇄교자속을 증가시키므로 검사코일의 X_L 가 커진다. 따라서 ωL_0 는 ωL_2 로, R_0 는 R_2 로 이동하게 된다. Fig. 1은 비자성체 및 강자성체와 검사코일 사이의 거리(lift-off)가 변할때의 임피던스 특성을 나타낸다 [4,5].

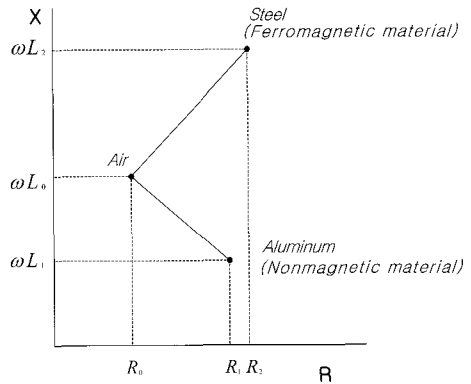


Fig. 1 Lift-off variation of coil impedance for ferromagnetic and nonmagnetic materials

검사코일의 자장이 상대적으로 약할 경우, 이러한 약한 자기장은 임피던스변화에 민감하게 반응하므로 유도된 와전류내부에서 결함 및 강자성체의 특성에 의한 미세한 변화도 검사코일의 쇄교자속에 상대적으로 큰 변화를 야기할 수 있다. 반대로 검사를 시작할 때 검사코일의 자장을 상대적으로 크게 하면 강자성체가 포화되어 와전류의 작은 변화는 신호에 오직 미소한 변화만을 야기시킨다. 즉, 자성체는 응답신호를 왜곡시키므로 직류전류가 흐르는 별도의 헬름홀츠 코일을 이용하여 자기포화시켜 와전류검사를 수행해야한다. 자성체를 직류자기장을 이용하여 자기포화 시키면 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 불균일한 자기모멘트가 일정한 패턴을 유지하게 된다.

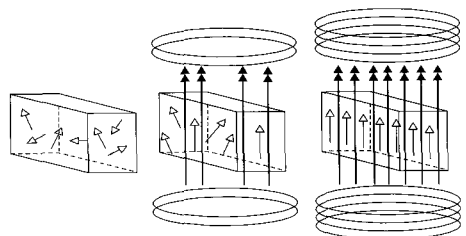


Fig. 2 Magnetization process by the Helmholtz coil

2. 헬름홀츠코일에 의한 자기장 생성 방법

헬름홀츠 코일은 일반적으로 솔레노이드 보다 넓은 공간에서 균일한 자기장을 생성시키기 위하여 사용되며 구조 및 자기장세기 계산식은 다음 Fig. 3 및 식 (1)과 같다[6].

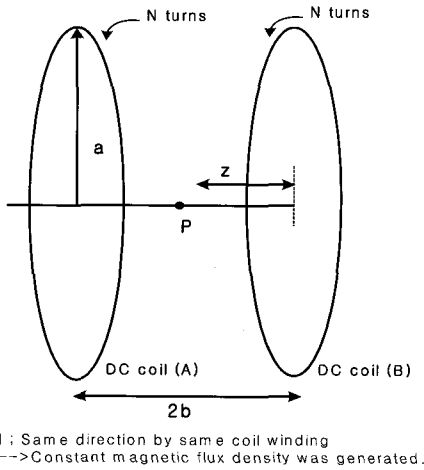


Fig. 3 Helmholtz coil for the magnetic saturation

Fig. 3과 같이 두 개의 평행한 링 모양의 코일포머(비자성체로 된 코일지지 틀)에 반경 a인 코일을 감고 두 코일간의 간격 2b를 코일의 반경 a와 동일하게 구성하면(a=2b) 중심부 p에는 균일한 자기장이 생성된다. 각각의 코일에 같은 방향으로 전류 I가 인가 될 때 코일의 한쪽 끝 중심상에서 z만큼 떨어진 지점에서의 자속밀도는 다음과 같다.

$$B_z(z) = \frac{N\mu_0 I a^2}{2} \left[\frac{1}{(z^2 + a^2)^{3/2}} + \frac{1}{[(2b-z)^2 + a^2]^{3/2}} \right] \quad (1)$$

B_z : Magnetic flux density [mT]

N : Turns of coil

μ_0 : Magnetic permeability of free space

$$(\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]})$$

a : Radius of Coil [mm]

I : Current [A]

$2b$: Distance between DC coil (A) and (B). [mm]

헬름홀츠 코일의 중심에서 자기장은

$$H = 0.7154 \frac{NI}{2b} \quad (2)$$

H : Magnetic field intensity [A.T/m]

로 주어진다. 헬름홀츠 코일은 솔레노이드와 비교하면 같은 권선수와 같은 전류에 대하여 낮은 자기장이 생성되나 솔레노이드 보다는 넓은 범위에서 균일한 자기장이 생성된다.

3. 와전류검사장비 개발

3.1. 장비개발

와전류검사장비는 신호발생기, 위상검출기, 위상제어기, 신호증폭기 등으로 구성되었다. Fig. 4는 와전류 검사장비의 아날로그 회로의 구성도이다. 헬름홀츠 코일이 부착된 탐촉자의 내부에 브릿지회로가 연결되고 브릿지회로는 주파수발생기로부터 신호가 제공된다. 검사자가 사용주파수를 설정하여 탐촉자에 신호를 인가한다.

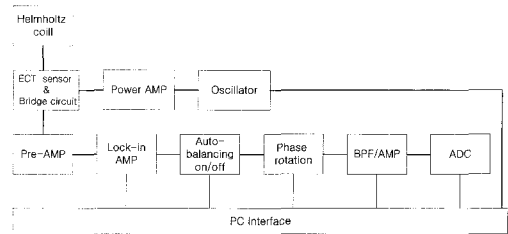


Fig. 4 Block diagram of applied circuit

브릿지회로에는 10Hz에서 1MHz까지의 정현파와 전류증폭기를 통과하여 최대 20V 크기의 신호가 인가된다. 신호발생기회로는 정현파의 주파수를 저주파수대와 고주파수대로 선택할 수 있도록 하였다. 그리고 브릿지회로에서 발생하는 코일의 신호는 증폭기를 거쳐서 위상검출기에 인가된다. 위상검출기에서 와전류신호의 위상을 검출하고 위상을 회전할 수 있는 프로그램이 내장되어 있는 원칩 마이크로프로세서로 입력된다. 위상조정이 된 신호는 디지털로 변환되어 컴퓨터에 저장되고 화면에 디스플레이된다. 개발된 와전류검사장비는 온라인으로 생산되는 튜브류의 와전류검사용으로 개발되었다.

3.2. 자기포화 시스템 제작

헬름홀츠 코일을 제작하기 위하여 검사코일(AC 코일)의 앞뒤에 지름이 53mm인 코일 포머를 평행하게 부착하고 자체저항 $0.09 \Omega/m$, 직경 0.5mm인 코일을 균일한 간격으로 약 1100~1300회 감았다. 감겨진 코일을 에폭시를 이용하여 차폐하고 양단은 직류전원공급장치와 연결하였다. 제작된 헬름홀츠 코일은 0.62A의 전류가 인가되었을 때 전기저항은 38.6Ω 이었고, 시편의 검사부위가 동일한 직류자기장내에 위치할 수 있도록 외삽형 코일의 관통부와 중심을 맞추어 부착되었다. 아래 Fig. 5는 헬름홀츠 코일이 부착된 자기포화형 탐촉자의 외형이다.

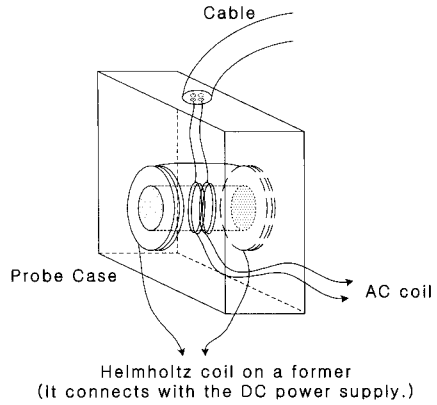


Fig. 6 Inner structure of the magnetic saturation type probe

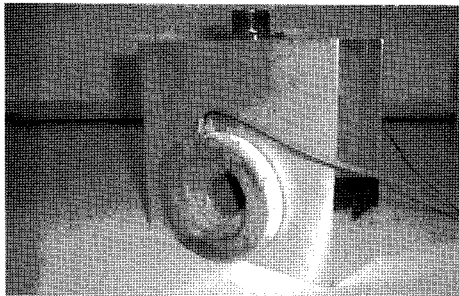


Fig. 5 External structure of the magnetic saturation type probe

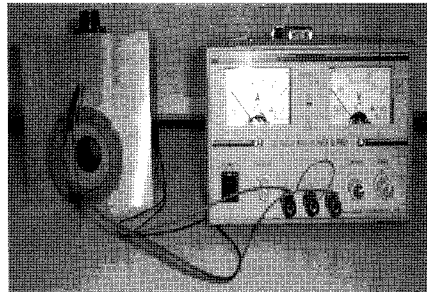


Fig. 7 Magnetic saturation system with eddy current testing probe

Fig. 6은 자기포화형 탐촉자의 내부도이며 전류의 세기에 따라 일정한 자기장을 발생하는 헬름홀츠 코일(DC 코일)사이 에 와전류검사를 수행하기 위한 AC 코일이 수평으로 부착되어 있음을 보여준다. 제작된 탐촉자는 내경이 25.7mm이고 공진주파수 325kHz 일때 임피던스가 $5.5\sim 5.6 \Omega$, 인덕턴스가 24.7~ 27mH이다.

Fig. 7은 자기포화형 탐촉자와 직류전원공급장치로 구성된 광관의 자기포화 시스템이다.

4. 적용성 검증 및 고찰

4.1. 검사환경 설정

4.1.1. 인공결함 시편 제작

사용된 시편은 HRS 2종으로 외경이 21.7mm, 두께가 2.3mm, 길이가 1000mm이다. Fig. 8에서 보인

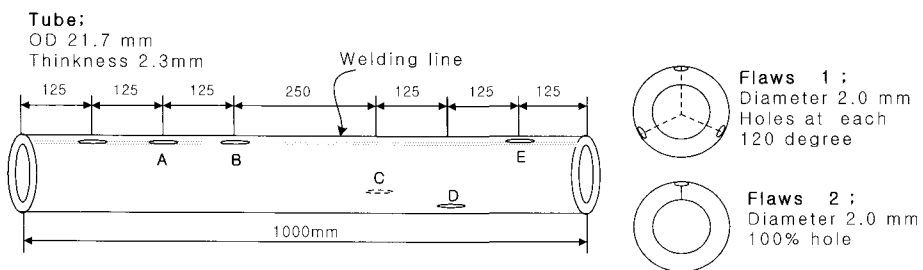


Fig. 8 Schematic diagram of test tube with artificial flaws

바와 같이 시편의 용접부위에 125 mm 간격으로 결합 A, B를 가공하였다. 또한 방향에 따른 검출능을 보고자 결합 C, D, E를 120도 방향으로 가공하여 모두 5개의 결합을 시편에 가공하였다. 인공결함으로서 관통홀은 모두 드릴링 가공되었고 크기는 직경 2.0 mm이다.

4.1.2. 실험장치

최적 주파수 및 자기포화도 선정을 위해 개발된 와전류 검사장비를 사용하였다. 개발된 Raynar 1000-S는 운전가능 주파수가 100 Hz~700 kHz이며 최고 검사속도는 1.5 m/sec이고 직류자기장의 영향을 최소화하기 위해 고대역 및 저대역 통과필터가 포함되어있다. 70 kHz의 주파수를 적용하여 sampling rate는 8 kHz, gain은 30dB로 설정하고 시험편을 약 0.8 m/sec로 이동시키면서 실험하였다. 현장 적용에서는 1 m/sec의 속도로 이송장치를 이용하여 검사를 수행하였으나 최적 주파수 및 자기포화 선정을 위한 실험에서는 숙련된 검사자가 수동으로 시편을 이동시키면서 실험데이터를 획득했다.

Fig. 9는 본 연구를 위한 실험 장치이다.

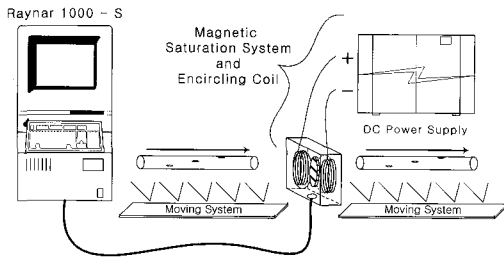


Fig. 9 Schematic diagram of eddy current system at a real field

4.1.3. 최적 주파수 및 자기포화정도 선정

적용 주파수는 표준침투깊이가 강관의 두께를 초과하도록 설정하였다. 사용한 강관의 상대투자률(μ_r)은 60, 저항률(ρ)은 14.5 $\mu\Omega m$ 이다. 그러나 자기포화 되었다고 가정하고 식 (3)을 이용하여 계산되어진 주파수는 약 51kHz이며 충진율은 71%를 유지하였다.

$$\delta = K\sqrt{\frac{\rho}{f\mu_r}} \quad (3)$$

- δ = Standard depth of penetration [inch]
- $K = 1.98$
- ρ = Resistivity [$\mu\Omega cm$]
- f = Frequency [Hz]
- μ_r = Relative permeability

권선수가 1000회인 헬름홀츠코일에 0.78A의 전류가 흐를때 식 (2)에 의한 중심 자기장은 약 20,000A.T/m 이므로 검사체는 자기포화되었다고 가정할 수 있다. 이때 검사주파수를 변화시켜가며 결합에 의한 신호크기를 측정하였다. Fig. 10은 전류 0.78A를 인가시켜 자기포화되었다고 가정되었을 때 10kHz에서부터 300kHz까지 주파수를 변화시켜가며 기준결함으로 설정한 결합 B의 신호를 측정하여 나타낸 것이다. 약 70kHz에서 결합신호가 가장 크게 발생하였음을 알 수 있다. 또한 Fig. 11에서는 적정한 자기포화도를 선정하고자 검사주파수 10, 30, 50, 70, 150, 250kHz 에서 전류를 0.0A에서 0.78A까지 변화시켜가며 결합 B신호를 측정하였다. 인가전류가 작을 때는 결합신호가 작게 나왔으나 전류가 증가됨에 따라 점차적으로 결합신호의 크기가 증가했다. 특히 인가전류 0.62A에서 가장 결합신호가 크게 발생하였다가 완만하게 줄어들음을 알 수 있다. Fig. 12은 전류 0.62A가 인가되었을 때 그리고 Fig. 13은 전류 0.78A가 인가되었을 때 검사주파수를 10, 30, 50, 70, 150, 250kHz로 변화시켜가며 결합 A, B, C, D, E의 신호를 측정한 것이다. Fig. 12, 13에서 보여진바와 같이 전류 0.62A가 인가되었을 때 결합신호 값이 전류 0.78A가 인가되었을 때 보다 전체적으로 크게 나왔고 이로서 적정 자기포화점이 존재한다고 생각되었으며 강관검사를 위한 자기포화점을 전류 0.62A가 인가하였을 때라고 판단하였다. 그리고 Fig. 12, 13 모두 약 50kHz에서 가장 높은 신호를 나타냄을 알 수 있는데 이 값은 식 (3)에 의해 계산되어진 이론적 검사주파수인 51kHz와 매우 유사함을 보여준다. Fig. 12, 13의 결과에서 결합 A의 신호는 크게나왔고 결합 E는 신호가 작게 나왔는데 이는 검사자의 수동검사로 인하여 가장 먼저 검출되는 결합 A는 이송속도가 빠르고 마지막 결합 E는 이송속도가 느렸기 때문에 발생한 크기의 차이이다. 동일속도로 검사체를 이동시킬 경우 결합 A, B, C, D, E 모두 일정한 크기로 측정되리라 생각된다.

따라서 Fig. 10, 11, 12, 13를 통하여 인가전류 0.62A에서 자기포화되고 검사주파수 50~70kHz를 사용하였을 때 검사체의 불균일한 자력이 제거되고 최적의 검사를 수행할 수 있다고 판단하였다.

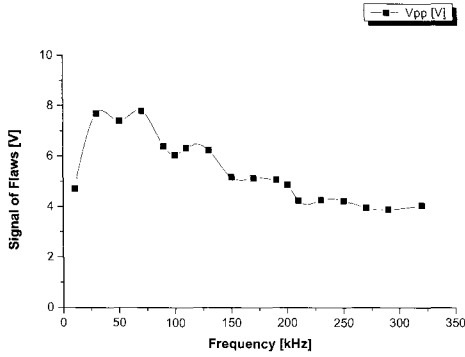


Fig. 10 The flaw B signals at each frequency when the steel tube is magnetically saturated

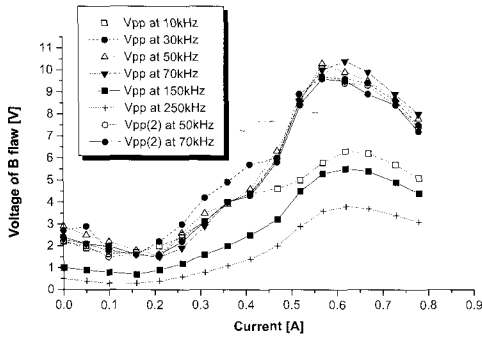


Fig. 11 Comparison of the flaw B signals for determining a proper magnetic saturation point from 0.0A to 0.78A

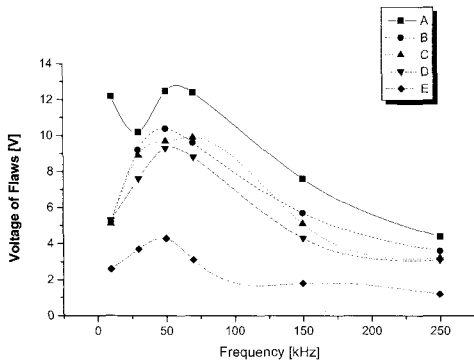


Fig. 12 Comparison of the flaw signals at 0.62A

그리고 Fig. 14는 헬름홀츠 코일에 0.62A의 전류가 흐를 때 이론상으로 얻어진 헬름홀츠 코일의 직류자기장 세기분포이며 코일의 반지름과 동일한 위치인 중간부분($z=13.3\text{mm}$)에서 상대적으로 균일한 자기장이 분포됨을 알 수 있다.

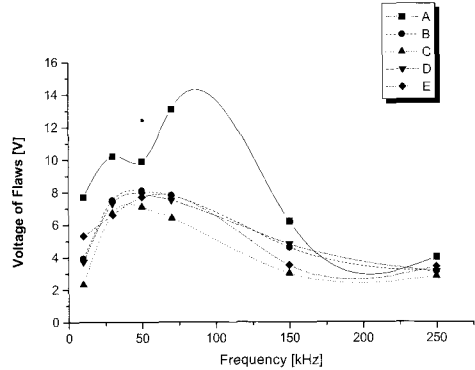


Fig. 13 Comparison of the flaw signals at 0.78A

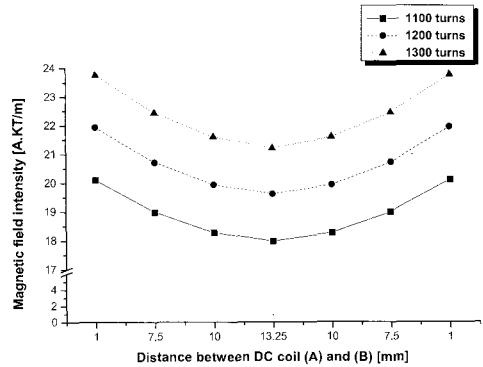


Fig. 14 Magnetic field intensity distribution generated by helmholtz coil when using 0.62A for magnetic saturation

4.1.4. 잡음제거 필터 선정

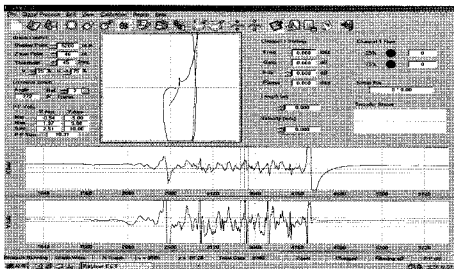
자기포화를 위해 생성시키는 직류자기장의 영향으로 검사부위의 자기장에는 미세한 변화가 발생하여 검사신호에 잡음으로서 나타나게 된다. 따라서 이러한 잡음을 제거하기 위하여 결함신호와 자성변화에 대한 신호필터링이 이루어져야한다. 고대역 통과필터를 포함하지 않은 장비를 사용하여 sampling rate가 8kHz 일 때 관통홀($\phi=2.0\text{mm}$) 결함신호의 1주기는 약 0.05초였다. 따라서 관통홀 결함신호는 약 350Hz 대역에 분포함을 알 수 있었고

같은 방법으로 떨림신호와 직류자기장의 발생시 생성되는 신호는 약 2Hz~10Hz 대역에 분포함을 알 수 있었다. 실험결과를 바탕으로 고대역통과필터의 차단주파수는 10Hz, 저대역통과필터는 1kHz로 선정하였다.

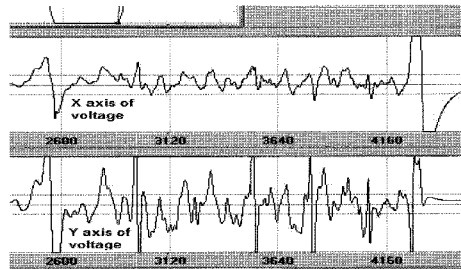
4.2. 결과 및 고찰

결과화면에서 상단은 lissajous graph이고 아래 두 개의 strip chart는 결합신호의 중 첫 번째는 허수부(X_D), 두 번째는 실수부(R)의 값을 나타낸다.

Fig. 15는 전류를 0.52A를 인가하였을 때 결함 A, B, C, D, E에 대한 와전류검사 결과이다. 결합으로 판단되는 유사신호들이 검출되었으나 노이즈와의 구별이 용이하지 않았다. 강자성체가 가지고 있는 불균일한 자장으로 인하여 검사코일의 자기장에 영향을 받았다고 생각되어진다.



(a) Display screen for the eddy current signals



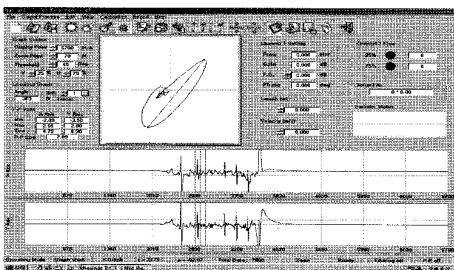
(b) Enlarged screen of strip chart

Fig. 15 Results obtained by the eddy current testing at 70kHz when using 0.52A for a proper magnetic saturation. It is difficult to detect the flaws.

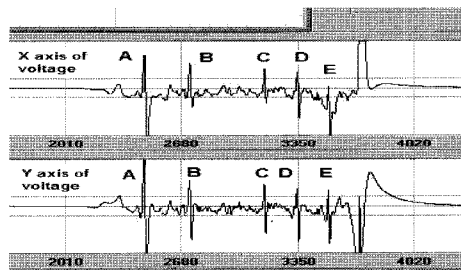
Fig. 16은 전류를 0.62A인가하여 검사체가 자기포화되었다고 판단되었을 때의 결과로서 왼쪽 피크 2개는 용접부에 평행하게 위치한 결함 A, B 신호이고 오른쪽 3개는 120도 간격으로 위치한 결함 C, D, E 신호이다. 결합신호와 노이즈는 명확히 구별되었고 원주방향의 위치변화에 상관없이 결합신호가 검출되었다.

4.3. 현장 적용 결과

Fig. 17은 개발된 자기포화시스템이 포함된 와전류검사장비를 현장에 설치한 그림이다. 보다 정밀하고 빠른 검사를 위하여 자동이송장치를 구성하였다. Fig. 18는 현장에서 제작한 시편을 약 1m/sec로 이동시키면서 획득한 실험자료이다. 전류 0.62A를 인가시켜 자기포화시키고 선정된 최적주파수 50kHz 이용하여 와전류검사를 수행하였으나 현장



(a) Display screen for the eddy current signals



(b) Enlarged screen of strip chart

Fig. 16 Results obtained by the eddy current testing at 70kHz when using 0.62A for a proper magnetic saturation. The flaws were showed obviously.

실험의 경우 실험을 통하여 선정된 50kHz의 검사 주파수로는 정확한 신호가 나오지 않아 점차적으로 주파수를 증가시키면서 실험한 결과 70kHz에서 가장 우수한 결함신호를 보여주었다. 그리고 고대역 통과필터 10Hz와 저대역 통과필터 1kHz를 적용하여 떨림 신호 및 직류자기장에 의한 영향을 최소화 하였다.

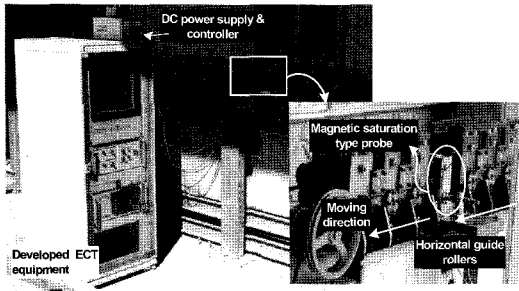


Fig. 17 Installed instrument at the production line

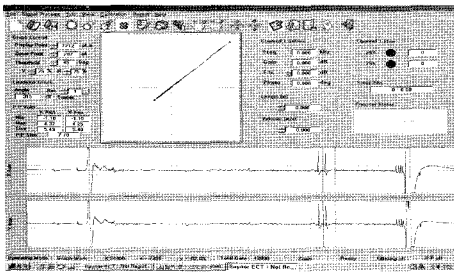


Fig. 18 Results obtained by the eddy current testing at 70kHz when using 0.62A

5. 결 론

본 연구에서는 헬름홀츠 코일을 이용한 자기포화형 탐촉자를 제작하고 신호필터링을 통하여 일반 튜브업체에서 많이 생산되어지는 강관의 와전류검사 장비를 개발하였다. 검사 설정값을 도출하기 위해 실험적인 연구를 하였으며 실제 현장적용을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 헬름홀츠 코일이 적용된 탐촉자를 개발하여 와전류 검사전에 강관을 자기포화시킴으로서 결함 신호와 잡음신호를 명확히 구별하였고 차단주파수가 10Hz인 고대역 통과필터, 1kHz인 저대역 통과필터를 부착하여 잡음신호를 최소화 하였다.

- (2) 전류 0.62A에서 인공결함시편이 자기포화된다고 판단되었다. 인가전류를 0.62A로 유지하고 인공결함시편을 검사하였을때 약 30, 50, 70kHz의 주파수에서 비슷한 크기의 결함신호가 발생하였으나 이론적인 적정주파수가 51kHz이기에 50~70kHz의 사용이 적절할 것으로 판단하였다. 따라서 자기포화되어 적절한 결함신호를 나타내는 검사환경은 인가전류 0.62A, 50~70kHz임을 알 수 있었다.
- (3) 강관을 검사하기위해 실제 현장에서 적용시킴으로써 약 1m/sec로 진행되는 작업 공정중에서 관통홀(φ =2.0mm) 결함을 정확히 검출할 수 있었다. 그러나 실험을 통하여 도출된 검사설정값인 인가전류 0.62A, 50~70kHz를 현장에 적용하였을 때 인가전류 0.62A, 70kHz에서 가장 명확하게 결함을 구별할 수 있는 신호가 검출되었고 이는 현장에서 발생한 환경적요인(노이즈 등)때문이라 생각된다.

참고문헌

- [1] 서동만, 박광희, 장지은, 성제중, 이승철, "온라인 와전류 검사장비 개발", 한국비파괴검사학회 추계학술발표회, pp. 421-428, (2000)
- [2] PHYWE series of publications, "Laboratory Experiments-Physics," PHYWE SYSTEME GMBH
- [3] Robert C. McMaster, Paul McIntire and Michael L. Mester, "Nondestructive Testing Handbook," second edition, ASNT, pp. 205-215, (1986)
- [4] Blitz. Jack, "Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing," Adam Hilger, pp. 97-99, (1991)
- [5] Donald J. Hagemaiier, "Fundamentals of Eddy Current Testing," ASNT, pp. 35-41, (1990)
- [6] John R. Reitz, Frederick J. Milford and Robert W. Christy, "Foundations of Electromagnetic Theory," forth edition, Addison-Wesley, pp. 201-214, (1993)