

자기누설탐상시스템에서 배관의 잔류자화가 결함신호에 미치는 영향

서강* · 정현원 · 박관수

부산대학교 전기공학과, 부산시 금정구 장전동 산30번지, 609-735

노용우 · 유휘룡 · 조성호 · 김동규

한국가스공사 연구개발원 배관연구센터, 경기도 안산시 상록구 일동 638-1, 426-790

(2005년 12월 2일 받음, 2005년 12월 19일 최종수정본 받음)

자기누설탐상시스템은 지하에 매설된 배관에서 발생하는 부식이나 크랙 또는 기계적 변형을 탐지하기 위한 방법으로 비파괴검사 방법의 하나이다. 지하 매설 배관은 Nd 자석에 의해 착자가 되고, 배관에 부식이 발생했을 경우 배관의 단면적이 작아지게 되어 자기누설이 발생하며, 발생한 자기누설을 홀센서로 검출하여 부식의 유무, 크기, 모양 등을 판별하게 된다. 지하 매설 배관은 자기누설탐상시스템을 이용하여 정기적으로 검사하기 때문에 처음 검사하는 배관이 아닌 경우는 자기누설탐상시스템의 착자 시스템에 의해서 검사 이후에 잔류자화가 존재하게 된다. 이렇게 배관에 존재하는 잔류자화에 의해서 자기누설탐상시스템에 의한 착자 정도가 변화하게 되어 검출 신호에 영향을 준다. 검출된 결함신호에는 결함에 대한 정보뿐만 아니라 잔류자화에 대한 정보도 포함되어 있기 때문에 결함신호로부터 결함의 크기와 모양을 판정하기 위해서는 잔류자화에 대한 정보를 제거하거나 보정 해주어야 한다. 따라서 본 논문에서는 배관의 잔류자화의 영향을 배관의 잔류자화 방향과 크기에 따라 해석하고, 실험을 통하여 확인하고 분석하였다. 또한 잔류자화에 의한 영향을 보정하기 위한 방법을 제시하였다.

주제어 : 비파괴검사, 자기누설탐상방법, 유한요소법, 가스관검사, 착자

I. 서 론

현재 지하에 매설되어 있는 배관은 전 세계에 수십만 km에 달하고 있다. 대부분의 배관은 가스 또는 에너지수송용으로 사용되어지고 있으며, 이러한 배관들은 정기적인 검사를 통하여 유지, 보수하고 있다. 직접적으로 확인할 수 있는 방법으로는 지하 또는 수중에 매설된 배관을 검사하기 어려움이 많아 비파괴 검사 방법을 사용하고 있다. 비파괴 검사 방법에는 광학, 초음파, 자기적인 방법 등이 사용되고 있다. 배관의 길이가 길고 가스관의 내부나 외부의 결함을 모두 검사할 수 있어야 하기 때문에 광학, 초음파를 이용한 검사 방법의 경우는 센서시스템에 사용하는 전원이 많이 필요하게 되어, 배터리의 용량이 매우 커야하고, 이에 따라 전체 시스템이 커지게 되어 검사의 구간이 길어지면 검사하기에 어려움이 많다. 또한 배관의 외부를 검사하기가 어렵다는 단점이 매우 커야하고, 이에 따라 전체 시스템이 커지게되어 검사의 구간이 길어지면 검사하기에 어려움이 많다. 또한 배관의 외부를 검사하기가 어렵다는 단점도 있다. 그러나 자기적 방법의 비파괴 검사 중 자기누설 탐상방법은 내부 또는 외부의 결함에 의해 배관의 단면적이 줄어들게 되어 자기누설이 커지게 되고 이러한 자기누설을 센서로 측정하여 결함의 유무와 크

기, 모양 등을 판정하는 방법이다. 따라서 다른 종류의 비파괴 검사보다 자기누설탐상 방법이 지하 매설 배관 검사에는 가장 적합하다. 이렇게 자기누설탐상방법을 이용하여 배관의 결함을 탐지하도록 개발한 것을 MFL(Magnetic Flux Leakage) PIG(Pipeline Inspection Gauge)라고 한다[1-4]. 이 PIG는 자기누설로 결함의 유무, 크기, 모양 등을 판별하고, 결함의 내·외부 판별을 위해 와전류 센서(Eddy-Current Sensor)를 추가로 장착하여 자기누설탐상법의 문제점을 보완하였다. 자기누설 탐상 방법은 Nd 자석으로 가스관을 자기 포화시킨 후 부식으로 인해 결함 부근에서 발생하는 누설자속을 홀센서를 이용하여 검출한다[5, 6].

자기누설탐상 시스템에서 결함을 검출하는 중요한 요소는 탐상신호로부터 결함의 신호를 분리해 내는 데 있다. 또한 결함감지능력의 척도는 센서의 감지상황에서 발생하는 각종 영향에 대한 해석과 분석이 필요하다. 지하 매설 배관은 자기누설탐상시스템을 이용하여 정기적으로 검사하기 때문에 처음 검사하는 배관이 아닌 경우는 자기누설탐상시스템의 착자 시스템에 의해서 검사 이후에 잔류자화가 존재하게 된다. 이렇게 배관에 존재하는 잔류자화에 의해서 자기누설탐상시스템에 의한 착자 정도가 변화하게 되어 검출 신호에 영향을 준다. 그 결과 부식의 깊이 판정에 있어 정확도를 저감시키고, 결국은 자기누설탐상 시스템의 결함감지능력을 저감시킨다. 이것은 검출된 결함신호에는 결함에 대한 정보뿐만 아니

*Tel: (051) 510-2976, E-mail: kalam@pusan.ac.kr

라 잔류자화에 대한 정보도 포함되어 있기 때문이다.
따라서 결함신호로부터 결함의 크기와 모양을 판정하기 위해서는 잔류자화에 대한 정보를 제거하거나 보정해주어야 한다.

II. MFL PIG의 원리와 구조

2.1. 자기누설탐상법의 원리

자기누설탐상법이란 검사하고자 하는 대상물체를 외부에서 자기장을 인가하여 착자시킨다. Fig. 1과 같이 자기회로를 형성하여 자기이력곡선에서의 포화영역까지 가스관을 착자시키게 되면 대상물체는 자화되고 결함이 있을 경우는 결함 부위의 단면적이 줄어들게 되어 자기저항은 증가하고, 외부로 자기누설이 발생하게 된다. 이렇게 외부로 발생하는 자기누설을 자기센서로 측정하게 되는 것이다.

2.2. MFL PIG의 구조

MFL PIG는 자기누설탐상시스템을 가스관에 적용한 것으로 가스관을 착자시키기 위해 Nd 자석을 사용하고, 자기효율을 높이기 위한 백요크와 가스관의 내벽에 밀착하여 PIG가 진행해야함으로 브러쉬를 이용하여 자기회로를 형성 하였다. 이렇게 형성된 것을 원주방향으로 16개를 위치시켰다. 그리고 브러쉬와 브러쉬 사이에 홀센서를 위치시켜 누설자속을 검

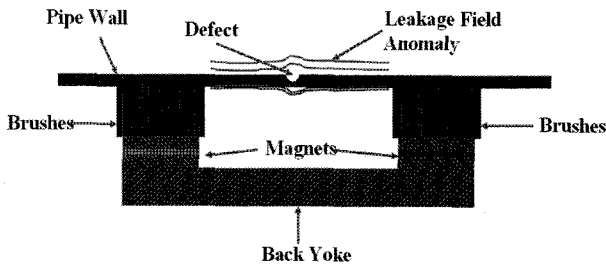


Fig. 1. Principle of MFL.

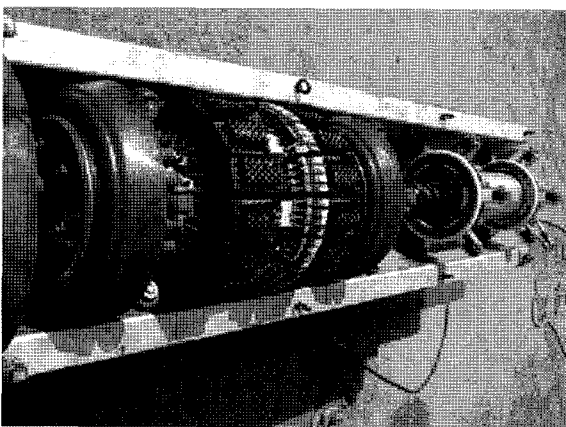


Fig. 2. Photograph of MFL PIG.

출할 수 있도록 하였다. 홀센서 모듈은 모듈 1개당 axial, radial 그리고 circumferential 방향을 측정할 수 있도록 각각 3개씩이루어지며 1개의 와전류 센서가 추가되어 총 10개의 센서로 구성되어 있으며, 총 64개의 모듈이 존재한다. 따라서 자기장의 각 성분을 측정하는 홀센서는 각각 192개로 총 576개이며, 와전류 센서는 64개이다. Fig. 2는 실제 제작한 MFL PIG를 나타낸 것으로 앞쪽에 있는 것이 자기누설탐상 시스템이고 뒤쪽에 있는 것은 PIG가 가스관을 지나가면서 검출한 신호를 저장하는 저장 시스템이다.

III. 자기누설탐상법에 의한 배관 착자

자기누설탐상시스템의 탐상 신호는 자기 누설을 홀센서로 측정하는 것으로 가스관의 자기저항의 변화를 해석하고, 자기 분포를 해석하면 홀센서에서 측정되는 신호를 해석할 수 있다. 따라서 3차원 유한요소법을 이용하여 자기누설탐상시스템의 탐상 신호를 해석하였다.

3.1. 지배방정식

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자기장(static magnetic field)에서 성립하는 Maxwell 방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$B = \mu_0 (H + M) \tag{2}$$

$$B = \nabla \times A \tag{3}$$

여기서 μ_0 는 진공에서의 투자율(permeability), A 는 자기 벡터 포텐셜이다. 비선형 현상이 없는 문제에서 자화량은 자화율 χ 로서

$$M = \chi H \tag{4}$$

와 같이 표현되지만 해석 영역내에 비선형 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우에는 자화량은 자기장의 세기나 자속 밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지수로 남겨두어야 한다. 일반적으로 자화량 M 은 외부의 자기장이 제거되면 사라지는 가역항(reversible component : χH)과 외부의 자기장이 제거되어도 사라지지 않고 자발자화 특성을 갖는 비 가역항(irreversible component : M)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$M = \chi H + M \tag{5}$$

식 (5)를 식 (2)에 대입하면

$$H = \nu B - \nu_r M \tag{6}$$

와 같은 식을 얻는다. 여기서 $v=1/\mu$, $\mu=\mu_0\mu_r$, $v_r=1/\mu_r$, $\mu_r=1+\chi$ 이다.

이것을 식 (1)에 대입 하면 식 (6)의 관계로부터

$$\nabla \times (v \nabla \times A) = J + v_r \nabla \times M \quad (7)$$

회전에 의한 벡터 관계식과 coulomb 계이지로부터 식 (8)과 같은 지배방정식을 얻는다.

$$-(\nabla \cdot v \nabla) A = J + v_r \nabla \times M \quad (8)$$

속도에 의해 발생하는 와전류의 전류밀도 로 나타내면

$$J_s = \sigma V \times B \quad (9)$$

로 나타낼 수 있고, 매질을 고려하면 B 와 H 는

$$B = \mu H \quad (10)$$

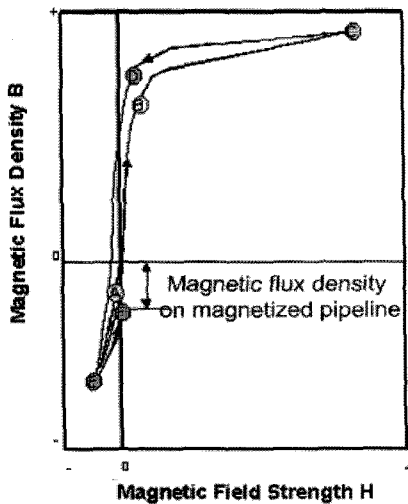
로 나타낼 수 있고, 식 (10)을 식 (3)에 대입하여 H 에 대하여 풀면

$$H = \frac{1}{\mu} \nabla \times A \quad (11)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (11)을 식 (1)에 대입하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (12)를 영구자석에 의한 보자력 H_c 를



(a) Hysteresis Loop of pipe

Fig. 4. Effects of magnetization.

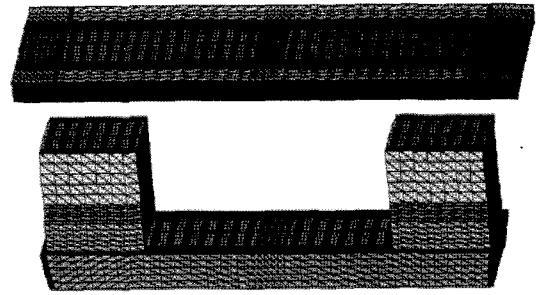


Fig. 3. Mesh of Analyzed MFL.

적용하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A - H_c \right) = J \quad (13)$$

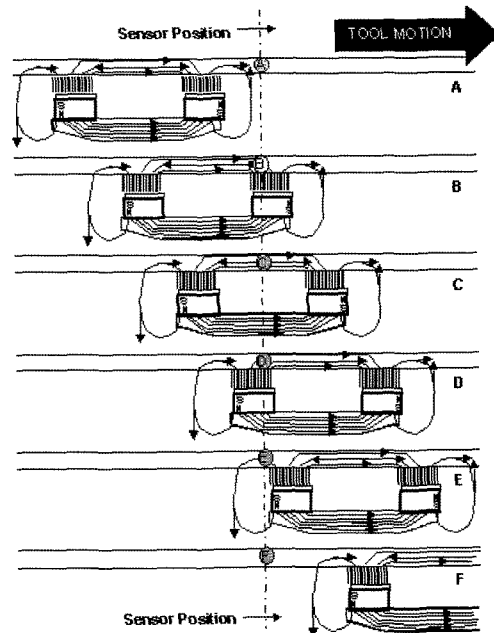
로 나타낼수 있다. 식 (13)에 식 (8)의 속도에 의한 와전류 J_s 를 적용하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A - H_c \right) = J - \sigma V \times \nabla \times A \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다.

3.2. 유한요소 정식화

해석영역을 고정 경계조건과 자연경계조건으로 나누고 고정 경계에서 고정경계조건을 만족시키며 한번 미분 가능한 가



(b) Magnetic Fields according to position of MFL PIG

중합수 W 를 식 (8)에 곱한 후 전체 영역에서 적분하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\int_{\Omega} W\{(\nabla \cdot v \nabla)A + J + v_r \nabla \times M\} d\Omega = 0 \quad (15)$$

Green 정리와 경계조건으로부터

$$\int_{\Omega} \{-v \nabla W \nabla \cdot A + W J - v_r \nabla W \times M\} d\Omega = 0 \quad (16)$$

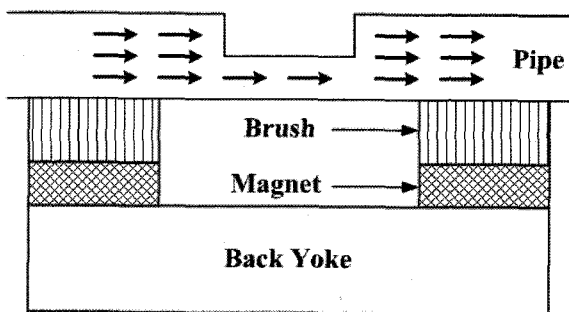
를 얻는다.

$$[K_n][A] = [f] + [f_m] \quad (17)$$

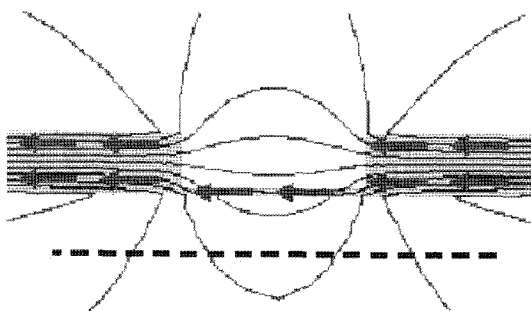
해석영역을 Fig. 3과 같이 유한개의 요소로 나누고 이를 식 (17)처럼 행렬식으로 나타낼 수 있다. 이 행렬식에서 해를 구함으로써 요소내의 자기 벡터 포텐셜을 구할 수 있다. MFL을 이용한 NDT 시스템은 자기포화 곡선을 이용하는 비선형 문제이므로 오차가 일정값 이하로 될 때까지 식 (14)~(17)을 유한요소법으로 계속 반복 계산하여야 한다.

3.3. 배관의 착자

자기누설탐상 시스템에 의한 배관의 착자는 가스관을 축방향으로 착자시키는 시스템이므로 축방향 착자의 가능성이 있으며, 또한 브러쉬의 윗부분에서는 방사방향의 필드가 생성이 되므로 방사방향의 착자의 가능성도 내포하고 있다. Fig. 4는



(a) Diagram of the axial component magnetization



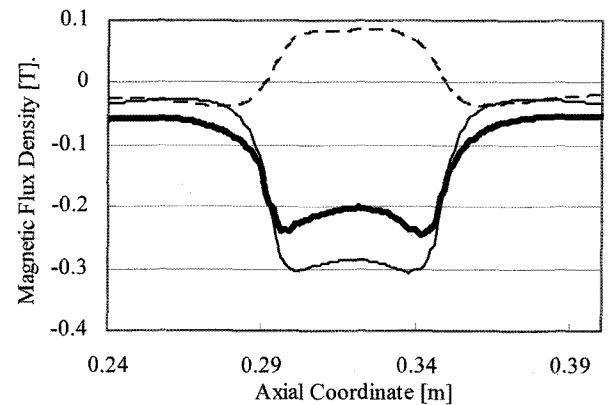
(b) Flux line of the axial component magnetization

Fig. 5. Effect of the axial component magnetization.

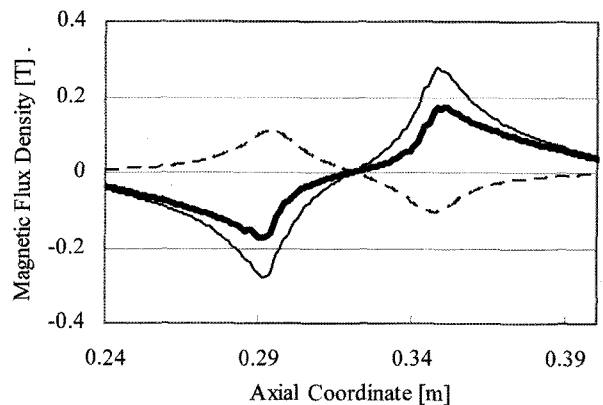
자기누설 탐상 피그가 한 지점을 지나갈 때 그 지점에서의 자기장의 변화를 나타내는 것이다. 자기누설 탐상 피그가 지나가기 전의 위치인 Fig. 4(b)의 A지점에서는 Fig. 5(a)의 A 필드가 배관에 발생한다. 그리고 점차적으로 피그가 이동함에 따라 B→C→D→E→F로 필드가 변화한다. 결국 가스관에는 F에서 발생하는 필드가 존재하게 된다. 첫 번째 검사이후 두 번째로 배관을 검사할 경우는 A보다 낮은 F에서 시작하게 되므로 가스관의 포화 레벨이 낮아져 신호의 크기가 줄어든다.

IV. 착자의 영향에 의한 결함 신호

MFL PIG에 의한 배관의 착자는 축방향과 방사방향의 두 가지 경우에 대해 생각할 수 있다. 그 이유는 MFL PIG는 횡방향으로 착자시키는 시스템이나 피깅 이후에 배관에서의 지속의 방향이 축방향과 방사방향으로 발생함으로 두가지 모두를 고려해야 한다.



(a) Axial component of defect signal



(b) Radial component of defect signal

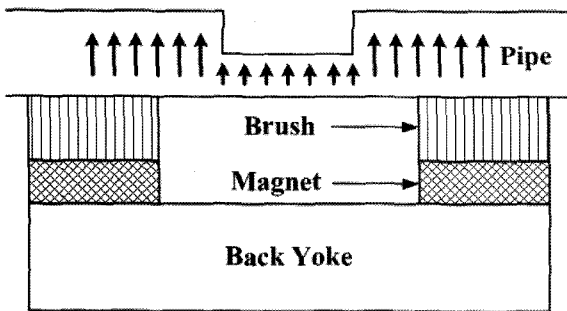
Fig. 6. Defect signal with the effect of the axial component magnetization (— : Original Defect Signal, - - : Remanent magnetic flux density, — : Mixed Signal).

4.1. 축방향 착자에 의한 영향

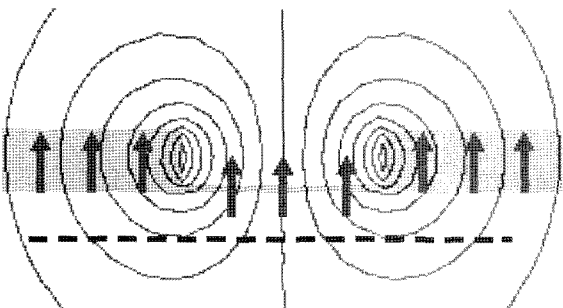
Fig. 5는 축방향 착자에 의한 영향에 대해 나타낸 것이다. MFL PIG의 착자 시스템은 축방향으로 착자시키는 시스템으로 축방향에 의한 착자가 매우 크게 나타난다. Fig. 5(a)는 축방향 착자의 개요도로 착자의 방향이 가스관과 MFL PIG의 축방향으로 착자됨을 보여주고 있으며, (b)는 축방향 착자에 의한 자기장 분포를 보여주고 있다. Fig. 5(b)의 점선을 따라 결합신호를 추출하면 Fig. 6과 같다. 잔류자화가 MFL PIG가 착자시키는 방향과 반대의 방향으로 존재하여 Fig. 6의 굵은 선과 같은 형태로 순수 결합 신호보다 신호가 작게 나타나게 된다.

4.2. 방사방향 착자에 의한 영향

Fig. 7은 방사방향 착자에 의한 영향에 대해 나타낸 것이다. MFL PIG의 착자 방향은 축방향으로 착자시키는 시스템이지만 브러쉬와 연결되는 배관 부분은 방사방향으로 착자가 되므로 방사방향의 착자에 의한 영향도 고려하여야 한다. Fig. 7(a)는 방사방향 착자의 개요도로 착자의 방향이 가스관과 MFL PIG의 방사방향으로 착자됨을 보여주고 있으며, (b)는 방사방향 착자에 의한 자기장 분포를 보여주고 있다. Fig. 7(b)의 점선을 따라 결합신호를 추출하면 Fig. 8과 같다. 잔

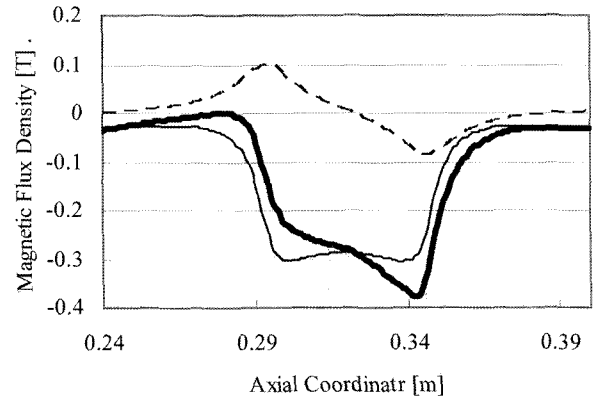


(a) Diagram of the radial component magnetization

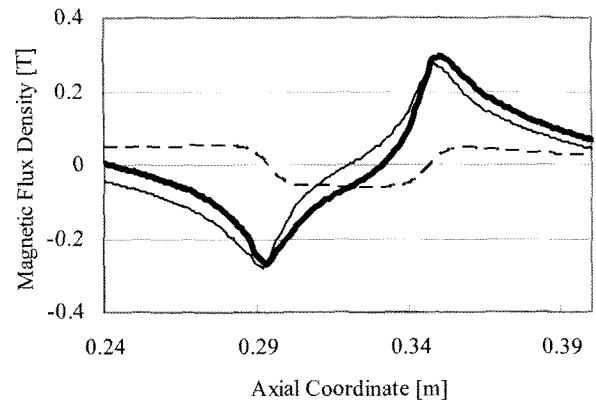


(b) Flux line of the radial component magnetization

Fig. 7. Effect of the radial component magnetization.



(a) Axial component of defect signal



(b) Radial component of defect signal

Fig. 8. Defect signal with the effect of the radial component magnetization (— : Original Defect Signal, - - : Remanent magnetic flux density, — : Mixed Signal).

류 자화가 MFL PIG가 브러쉬의 윗부분의 착자 방향으로 존재하여 Fig. 8의 굵은 선과 같은 형태로 순수 결합 신호에서 단순히 크기의 변화만 생기는 것이 아니라 전체 신호의 왜곡이 발생하게 된다.

4.3. MFL PIG의 검출신호

MFL PIG의 착자 정도와 결합 신호를 검출하여 분석할 용도로 임의적으로 배관에 결함을 제작하였다. MFL PIG에 의한 배관의 착자 정도는 가우스 메타(Gauss Meter)를 이용하여 측정하였으며, 배관의 포화정도과 잔류자화를 측정하였다. 실험은 같은 방향으로 MFL PIG를 6번 이동하며 측정하였다. 실험을 통하여 MFL PIG에 의해 배관에 발생하는 자속밀도를 측정된 것을 Fig. 9에 나타내었다. 배관이 최초로 착자가 되었을 때에 발생하는 자속밀도는 1.2 T였으나, 점차 피킹 횟수가 늘어남에 따라 착자 정도가 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 세 번째 이상부터는 0.8 T로 거의 일정한 값을 유지함을 확인할 수 있다. Fig. 10은 MFL PIG가 지나가고 나서

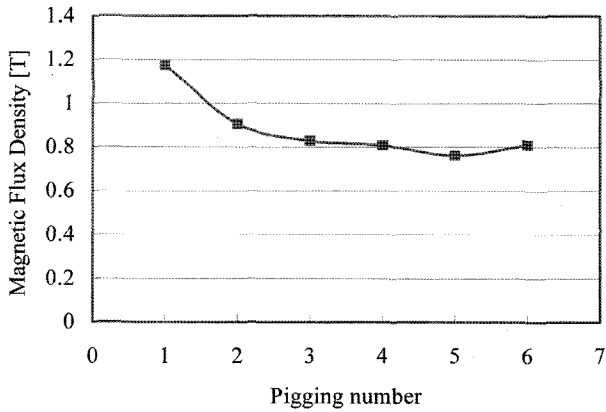


Fig. 9. Magnetization level of pipeline according to pigging number.

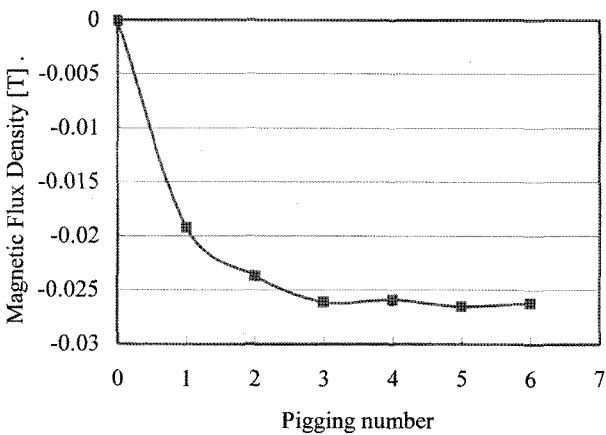
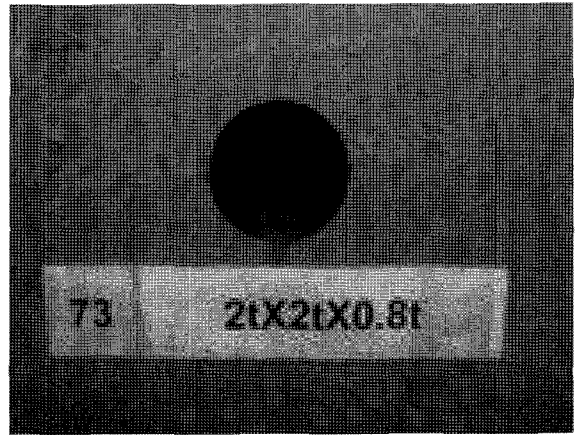


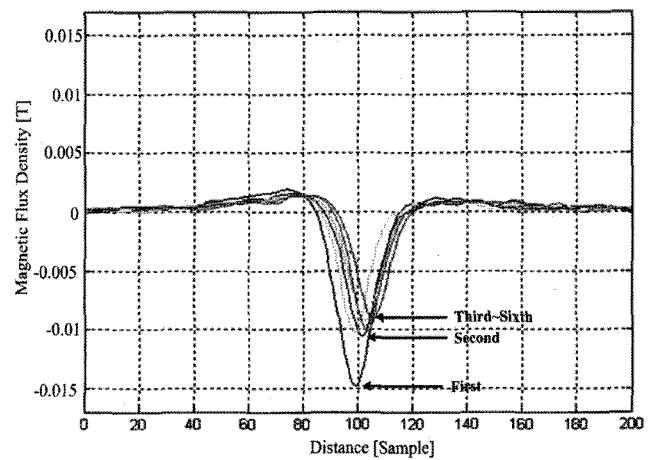
Fig. 10. magnetic flux density of magnetized pipeline according to pigging number.

의 배관에서 잔류 자화에 의해 발생하는 자속밀도를 측정 한 것이다. 최초로 실험하기 전의 배관에서 발생하는 자속밀 도는 PIG에 의해 착자되지 않았으므로 발생하는 자속밀도는 0 T이고, PIG에 의해 착자가 되면서부터 그 횟수에 따라서 발생하는 자속밀도가 증가함을 확인할 수 있으며, 세 번째 이 후부터 0.026 T로 일정하게 측정되었다.

피깅의 횟수에 따른 배관의 착자 정도와 잔류 자화량은 세 번째 피깅에서 일정한 값을 유지하게 되며, 이에 따른 결함 부위에서의 검출 신호는 Fig. 11과 같이 나타난다. Fig. 11는 대표적인 결함 신호를 나타낸 것으로 결함의 형태는 (a)와 같 고, 크기는 $2t \times 2t \times 0.8t$ (길이×폭×깊이, t 는 배관의 두께)이 다. 배관이 이와 같은 결함을 가질 때 결함신호는 (b)와 같으 며, 실험횟수에 따라 0.015→0.01→0.008 T로 그 검출신호의 크기도 감소한다. 신호의 크기는 결함의 크기 판정에 있어서 결함의 깊이 판정에 사용되며, 결함신호에서 최대값에서 최소 값을 뺀 크기(amplitude)를 이용한다. 따라서 2-6번째 피깅한 경우의 데이터에서 1.5~1.6배의 값을 곱해서 최초의 결함 신 호 크기로 보정하여 결함의 깊이를 판정할 수 있다. 또한 배



(a) Photograph of metal loss ($2t \times 2t \times 0.8t$)



(b) Defect signal according to pigging number

Fig. 11. Detecting signal of magnetization pipeline.

관의 착자 정도뿐만 아니라 착자의 방향이 축방향 착자의 영 향이 매우 크며, 방사방향 착자의 경우 그 영향이 노이즈 레 벨과 비슷하여 신호의 크기 변화나 왜곡에는 영향을 미치지 못한다는 것을 Fig. 11(b)를 통하여 확인할 수 있다.

V. 결 론

자기누설탐상시스템에서 결함감지능력의 척도는 센서의 감 지상황에서 발생하는 각종 영향에 대한 해석과 분석이 중요 하다. 본 논문은 각종 영향중에 배관을 착자시키는 시스템이 기 때문에 발생하는 배관의 잔류 자화에 의한 영향을 해석하 고 실험을 통하여 검증하였다. 배관을 착자시키는 방향을 축 방향과 방사방향으로 구분하여 각각에 대한 영향을 해석하고 분석하였다.

결함부위에서의 MFL은 피깅의 횟수에 반비례하여 그 크기 가 작아지고 세 번째 피깅 이후부터 일정한 값을 유지함을

확인하였고, 피깅횟수에 따른 배관의 착자에 의해 발생하는 자속밀도도 확인하였다. 또한 결함 부위의 검출 신호를 비교하여 결함 판정에 있어 사용되는 신호의 크기를 보정하는 방법이 횟수에 따른 크기의 배수 관계임을 확인하였다.

차후 착자에 의한 영향을 신호의 크기만으로 보정하여 깊이 추정에 사용하는 것이 아니라 결함 신호에서 착자의 영향을 제거하여 신호를 보정하는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

- [1] H. Haines et al., Pipeline & Gas Industry, 49(1999).
- [2] J. Bruce Nestleroth, Steven W. Rust, and David A. Burgoon, The NACE International Annual Conference and Exposition CORROSION 96 **44**, 1(1996).
- [3] S. Mandayam, L. Udpa, S. S. Udpa and W. Lord, NDT&E International **30**, 297(1997).
- [4] K. S. Ryu, D. L. Atherton, and L. Clapham, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, 2693(2002).
- [5] G. S. Park, P. W. Jang, and Y. W. Rho, Journal of Magnetism **6**, 31(2001).
- [6] G. S. Park and E. S. Park, IEEE Trans. Magn. **38**, 1277(2002).

Effects of the Remanent Magnetization on Detecting Signals in Magnetic Flux Leakage System

Kang Seo, Hyun Won Jeong, and Gwan Soo Park*

Dept. of Electric Engineering, Pusan National University, Jangjun-Dong, Pusan 609-735

Yong Woo Rho, Hui Ryong Yoo, Sung Ho Cho, and Dong Kyu Kim

Pipeline Research Center, Korea Gas Corporation R&D Division, Ansan 425-790

(Received 2 December 2005, in final form 19 December 2005)

The magnetic flux leakage (MFL) type nondestructive testing (NDT) method is widely used to detect corrosion and defects, mechanical deformation of the underground gas pipelines. The object pipeline is magnetically saturated by the magnetic system with permanent magnet and yokes. Because of the strong magnetic field enough to saturate the pipe, there could be distortion of the sensing signals because of the magnetization of the pipeline itself. To detect the defects precisely, the sensing signals are need to be compensated to eliminate the distortions coming from the media hysteresis. In this paper, the magnetizations of the pipeline in MFL type NDT are analyzed by Preisach model and 3D FEM. The distortions of the sensing signals are analyzed.

Key words : nondestructive testing (NDT), magnetic flux leakage (MFL), finite element method (FEM), pipeline inspection, corrosion