

자기 누설 비파괴 탐상 시스템에서 PIG의 주행속도가 검출신호에 미치는 영향

論 文
52B-10-1

Effects of the PIG Draft Velocity on the Defect Signals in MFL NDT System

朴相浩*·朴寬秀**
(Sang Ho PARK · Gwan Soo PARK)

Abstract - In this paper, dynamic characteristics of the magnetic flux leakage(MFL) type non-destructive testing(NDT) are analyzed. Effects of a sensor speed in MFL PIG system and remanent magnetization of the gas pipeline are analyzed by using 3 dimensional nonlinear finite element analysis including eddy current and hysteresis characteristics. Results show that the speed of the sensor reduces the magnitude of the sensing signals where as the hysteresis of the pipeline distorts the sensing signals.

Key Words : 자기 누설 탐상 시스템(MFL system), 비파괴 검사(NDT), 비선형 유한요소법

1. 서 론

한국가스공사에서는 전국으로 가스관을 통하여 도시가스를 공급하고 있다. 만약 이 배관들이 부식이나 사고등으로 인하여 가스가 누출되어 폭발할 경우 큰 재난이 일어나게 된다. 일례로 1995년 대구지하철 공사장에서 굴착 도중에 실수로 가스관에 구멍이 뚫려서 지하철 공사장으로 유입, 폭발함으로써 사망자 101명 부상자 146명의 인명피해와 건물파손 227동, 차량파손 147대의 상수도, 통신시설, 전기시설 파손등 큰 재산피해를 입었다. 만약 대구지하철 공사장 사고의 가스관 보다 큰 규모의 가스관에서 가스가 누출되어 폭발할 경우 대구 지하철 공사장 가스폭발사고 보다 큰 사고가 일어날 수 있다. 전국의 모든 곳에 가스를 공급하고 가스관을 관리하는 한국가스공사에서는 가스 사고를 방지하기 위하여 Canada BJ사 등에 가스관 검사비용으로 매년 수십억원에서 백억원 이상의 비용을 지불하고 있다. MFL(magnetic flux leakage, 자기누설탐상) PIG는 가스관의 부식등으로 인한 결함을 비파괴로 검출하는 장치[1-6]로써 이것을 국산화 할 경우 외화를 절약할 수 있고 또한 이것을 상업화하여 외국의 가스관 검사함으로써 큰 외화를 획득할 수 있다. 이에따라 한국가스공사와 여러 대학이 1999년부터 MFL PIG 국산화하고자 연구 진행 중이다. 자기 누설 탐상(MFL: magnetic flux leakage) 방법은 가스관을 요크와 영구자석을 이용하여 자기시스템으로

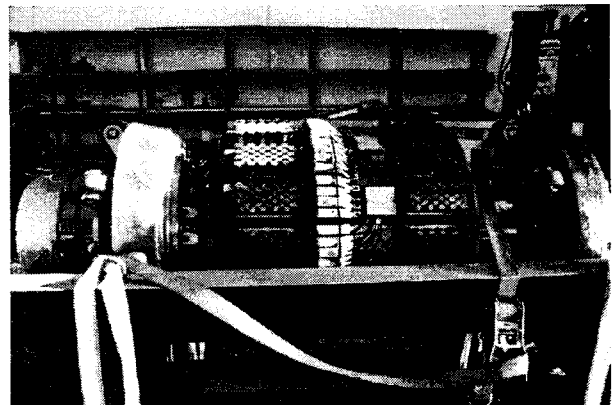


그림 1 MFL PIG
Fig. 1 MFL PIG

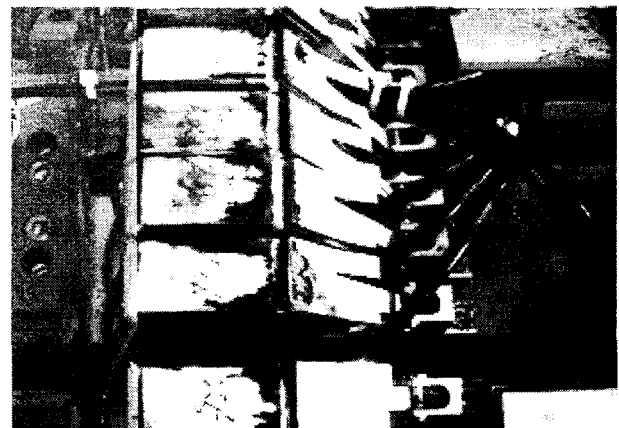


그림 2 센서 그룹
Fig. 2 Sensor group

* 正 會 員 : 韓國海洋大學 電氣電子工學部 博士修了
** 正 會 員 : 釜山大學 電子電氣通信工學部 教授 · 工博
接受日字 : 2002年 10月 21日
最終完了 : 2003年 8月 11日

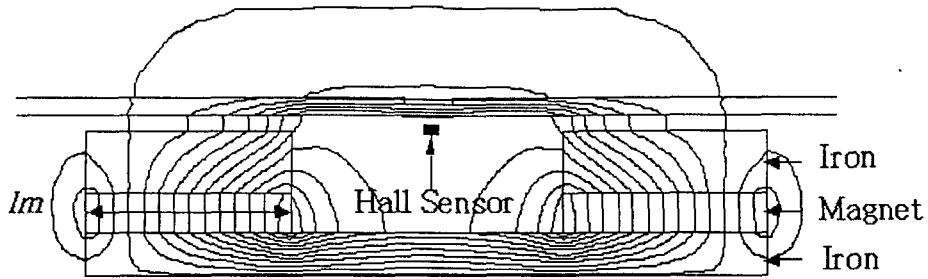


그림 3 MFL type의 비파괴검사 시스템의 개요도
 Fig. 3 Diagram of the MFL type NDT system

만들고 이 가스관을 적절히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설자속을 홀센서를 이용하여 검출한다. 그림 1은 한국가스공사에 제작한 MFL PIG의 실제 사진이며 브러시 아래에 magnet가 있다. 그림 2는 누설자속을 검출하는 센서 그룹이며 한 개의 센서 그룹에는 9개의 홀센서와 1개의 와전류 센서가 들어있다. 그림 3은 MFL 시스템의 개요도로써 결함이 있을 때 누설자속을 나타내었다. MFL PIG는 가스관의 결함이 있을 경우 발생하는 누설자속을 홀센서로 측정하여 검출신호의 크기와 폭을 가지고, 결함의 크기, 깊이를 알 수 있다. 그러나 실제 가스관을 통과하여 검출된 신호는 가스관의 착자에 의한 영향과 속도에 의한 와전류에 의하여 왜곡이 발생하게 된다. 가스관의 착자에 의한 영향과 속도에 의한 와전류에 의한 영향을 해석하여 이를 보정하여야만 실제 결함을 검출할 수 있다

본 논문에서는 자기 누설 탐상 시스템에서 PIG의 주행에 따라 주행속도에 비례하여 증가하는 속도기전력에 의한 와전류가 감지신호에 미치는 영향과 PIG magnet에 의하여 가스관이 착자되어 발생하는 자계 왜곡 현상에 대하여 해석하였다.

2. 본 론

2.1 자기누설 탐상이론

2.1.1 지배방정식

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

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

$$M = \chi H \quad (4)$$

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

$$M = \chi H + M \quad (5)$$

식 (5)를 식 (2)에 대입하면

$$H = \nu B - \nu_r M \quad (6)$$

와 같은 식을 얻는다. 여기서 $\nu = 1/\mu$, $\mu = \mu_0 \mu_r$, $\nu_r = 1/\mu_r$, $\mu_r = 1 + \chi$ 이다. 이것을 식 (1)에 대입 하면 식 (6)의 관계로부터

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J + \nu_r \nabla \times M \quad (7)$$

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

$$-(\nabla \cdot \nu \nabla) A = J + \nu_r \nabla \times M \quad (8)$$

속도에 의해 발생하는 와전류의 전류밀도 J_v 로 나타내면

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

로 나타낼 수 있고, 매질을 고려하면 B와 H는

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

로 나타낼 수 있고, 식 (10)을 식 (3)에 대입하여 H에 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 적용하면

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

로 나타낼 수 있다. 식 (13)에 식 (8)의 속도에 의한 와전류 J_v 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.

2.1.1 유한요소 정식화

해석영역을 고정 경계조건과 자연경계조건으로 나누고 고정 경계에서 고정경계조건을 만족시키며 한번 미분 가능한 가중함수 W 를 식 (8)에 곱한 후 전체 영역에서 적분하면 아래와 같은 식을 얻는다.

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

Green 정리와 경계조건으로부터

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

를 얻는다.

$$[K_v][A] = [J] + [f_m] \quad (17)$$

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

2.2 착자 및 와전류에 의한 NDT 신호왜곡

MFL PIG는 가스관의 부식 등의 결함을 검출하는 방법의 일종으로 가스관을 요크와 영구자석을 구성하여 적절히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설 자속을 홀센서를 이용

하여 검출한다[8-9]. 결함의 길이가 증가하면 신호의 폭이 증가하고, 결함의 깊이가 깊어지면 신호의 크기가 증가한다. 이 결과를 신호 처리하여 이미지화 하면 결함의 모양과 깊이 정도를 나타낼 수 있다. 그러나 가스관의 착자와 MFL PIG의 주행속도에 따른 신호의 왜곡이 발생하게 된다. MFL PIG의 주행 시 PIG내의 영구자석에 의한 잔류자화로 인하여 가스관은 착자가 된다. PIG 주행후의 가스관은 잔류자화로 인하여 용접 시 불꽃이 튀고, 가스관 근처의 모든 자성체가 영향을 받는 등 큰 잔류자화로 착자가 되어있다. 본 연구에서는 이러한 착자에 대한 영향을 분석하였다. 그림 4는 가스관의 B-H 곡선을 나타낸 것이다. 가스관은 30[inch] 배관이며 결함은 3t×3t×0.5t를 기본으로 하였으며 t는 가스관의 두께로 17.5[mm]이다.

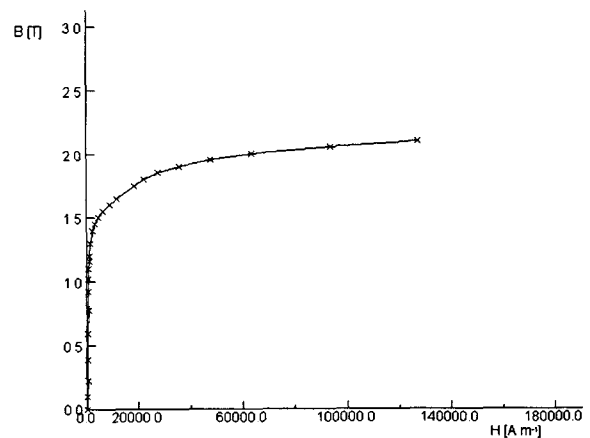
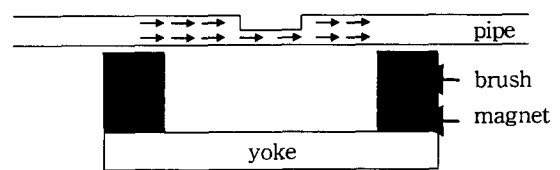
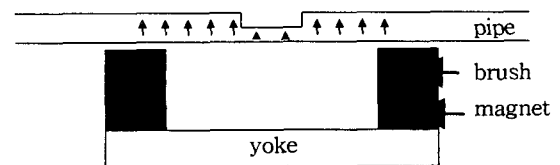


그림 4 B-H 곡선
Fig. 4 B-H curve



(a) 횡방향 착자의 개요도

(a) Diagram of the axial component magnetization

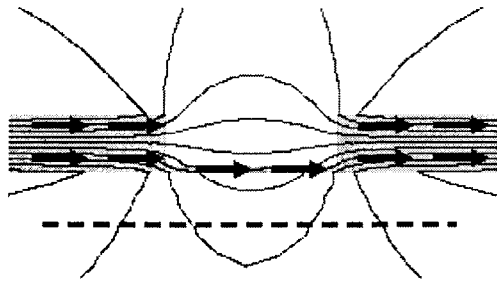


(b) 종방향 착자의 개요도

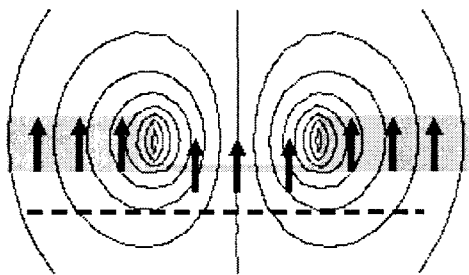
(b) Diagram of the radial component magnetization

그림 5 착자의 개요도

Fig. 5 Diagram of the magnetization

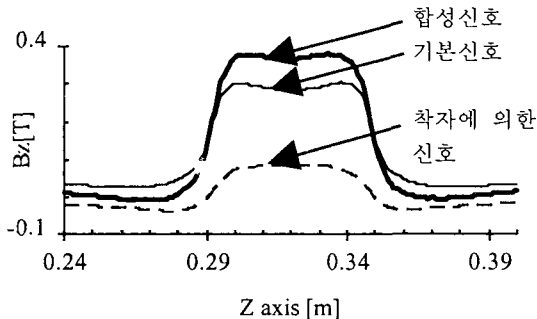


(a) 횡방향 착자에 의한 flux line
(a) Flux line of the axial component magnetization

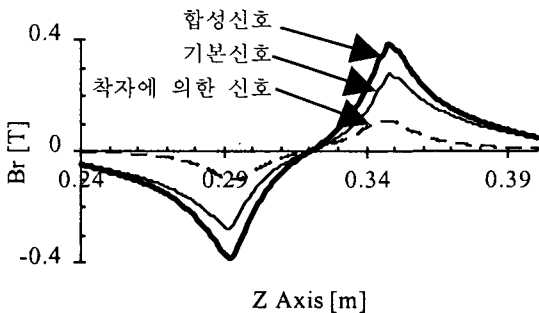


(b) 종방향 착자에 의한 flux line
(b) Flux line of the radial component magnetization

그림 6 착자에 의한 flux line
Fig. 6 Flux line of the magnetization

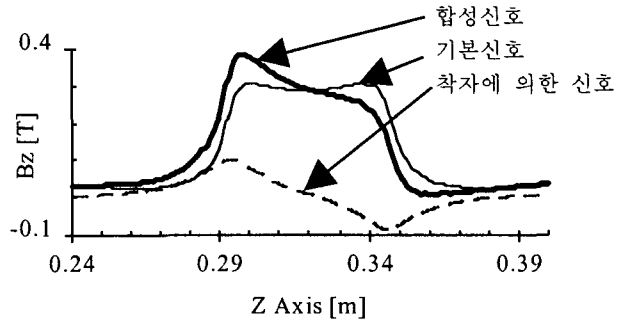


(a) Axial 방향의 MFL 신호
(a) Axial component MFL signals

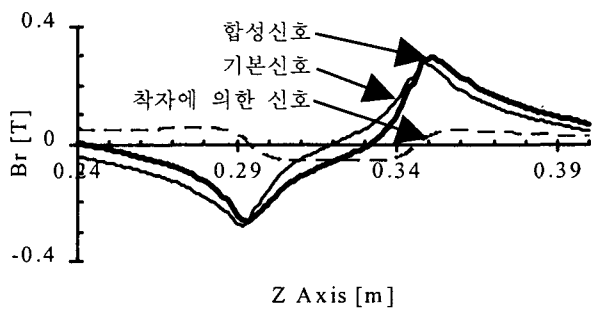


(b) Radial 방향의 MFL 신호
(b) Radial component MFL signals

그림 7 횡방향 착자에 의한 영향
Fig. 7 Effects of the axial component remanent magnetization



(a) Axial 방향의 MFL 신호
(a) Axial component MFL signals



(b) Radial 방향의 MFL 신호
(b) Radial component MFL signals

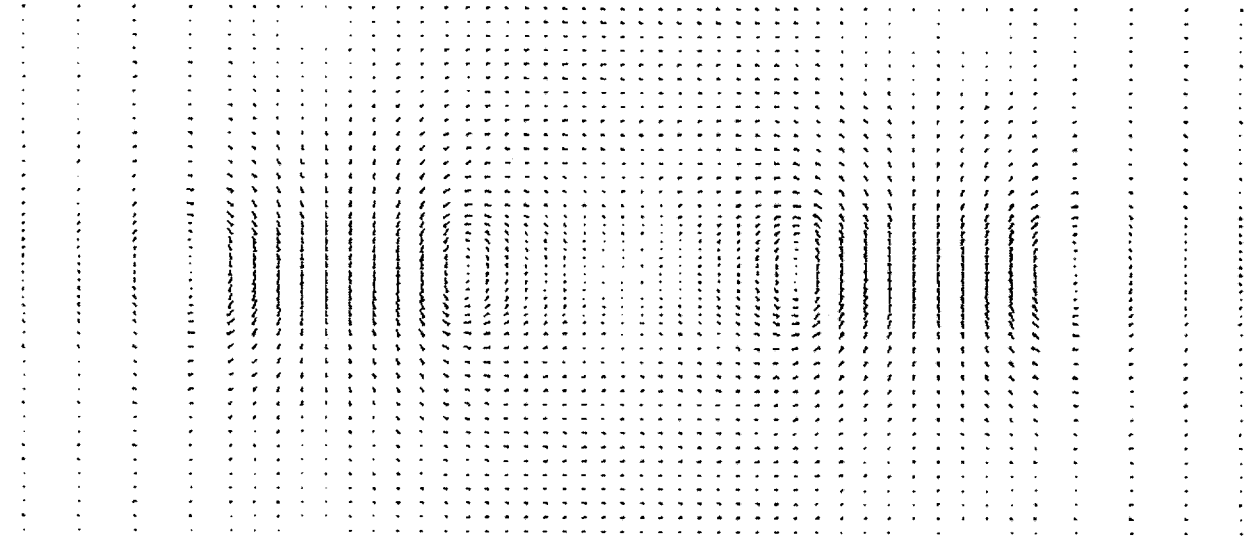
그림 8 종방향 착자에 의한 영향
Fig. 8 Effects of the radial component remanent magnetization

2.2.1 착자에 의한 신호 파형 왜곡

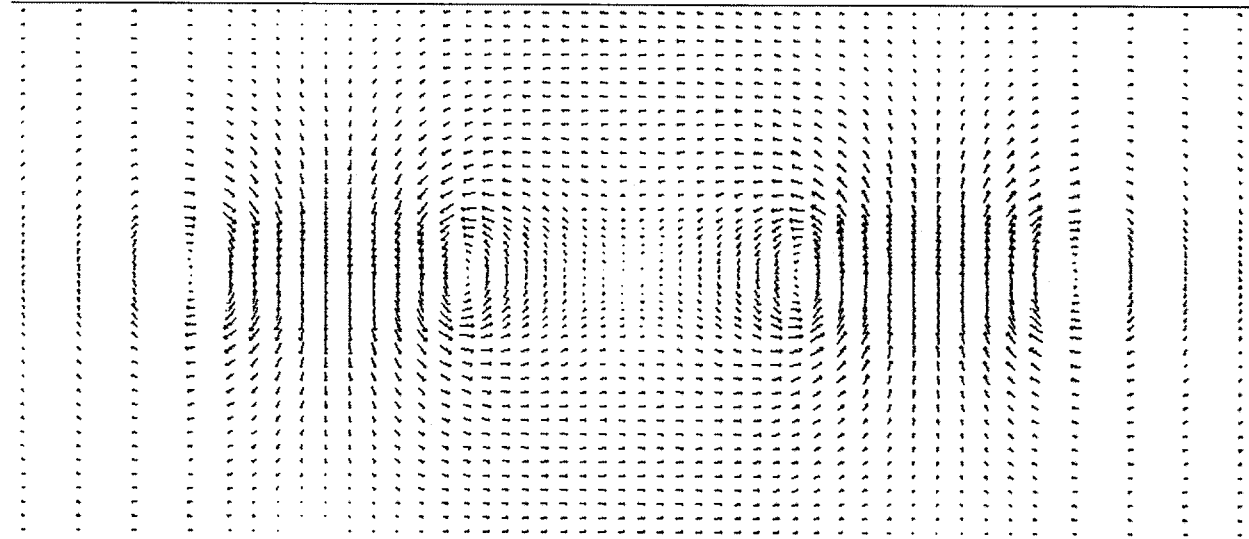
가스관의 착자는 횡방향 착자와 종방향 착자로 나눌수 있으며, 그림 5(a)는 횡방향 착자의 개요도이며, 그림 5(b)는 종방향 착자의 개요도이다. 그림 6(a)에서 횡방향 착자에 의한 flux line이며 그림 6(b)는 종방향 착자에 의한 flux line이다. 그림 6의 화살표는 착자 방향을 나타낸다. 그림 7는 횡방향 착자에 의한 영향이다. 횡방향 착자에 의한 왜곡은 axial 방향과 radial 방향 모두 신호를 증가시키는 왜곡이 발생한다. 이 이유는 횡방향으로의 착자는 인가되는 자기장의 방향과 같으므로 검출신호를 증가시키게 됩니다. 그림 8는 종방향 착자에 의한 영향이다. 종방향 착자에 의한 왜곡은 axial 방향과 radial 방향 모두 신호를 왜곡시키는 형태로 나타난다. 이것은 인가되는 자기장의 방향과 수직이 되므로 검출신호를 왜곡시키게 됩니다.

2.2.2 센서 주행속도에 의한 신호 파형 왜곡

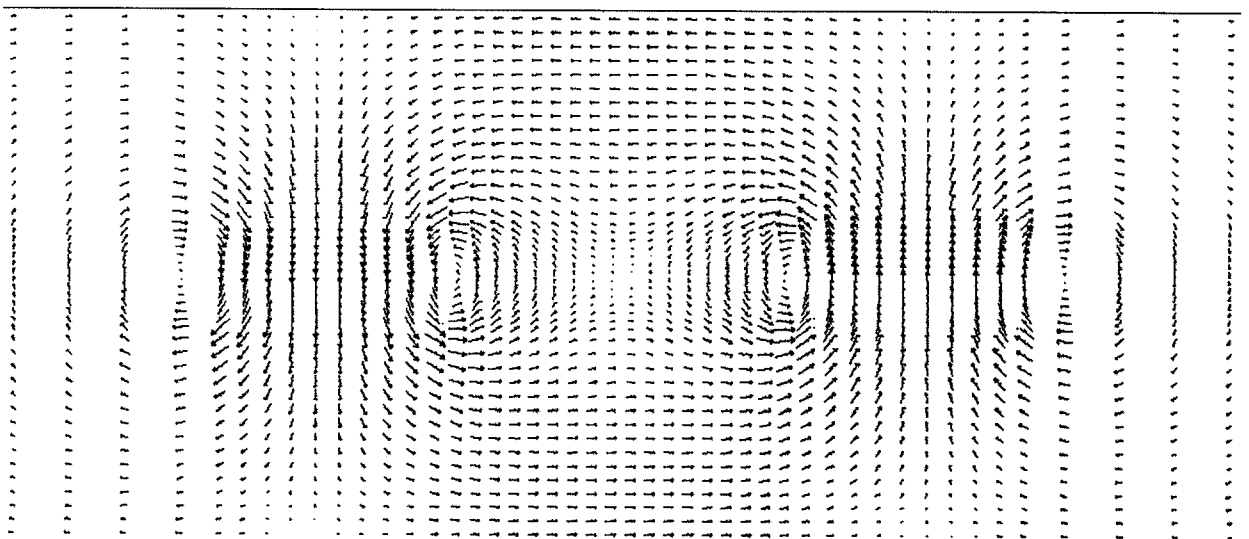
본 절에서는 PIG의 주행으로 인하여 속도 기전력이 발생하게 된다. 이로 인해 가스관 내부 표면에 와전류가 발생하게 되고, 이 와전류로 인하여 자기장이 왜곡된다. 실제 결합에 의한 신호를 검출하기 위해서는 검출신호에서 와전류에 의한 왜곡을 제거하여야 한다. 그래서 PIG 주행시 가스관 내



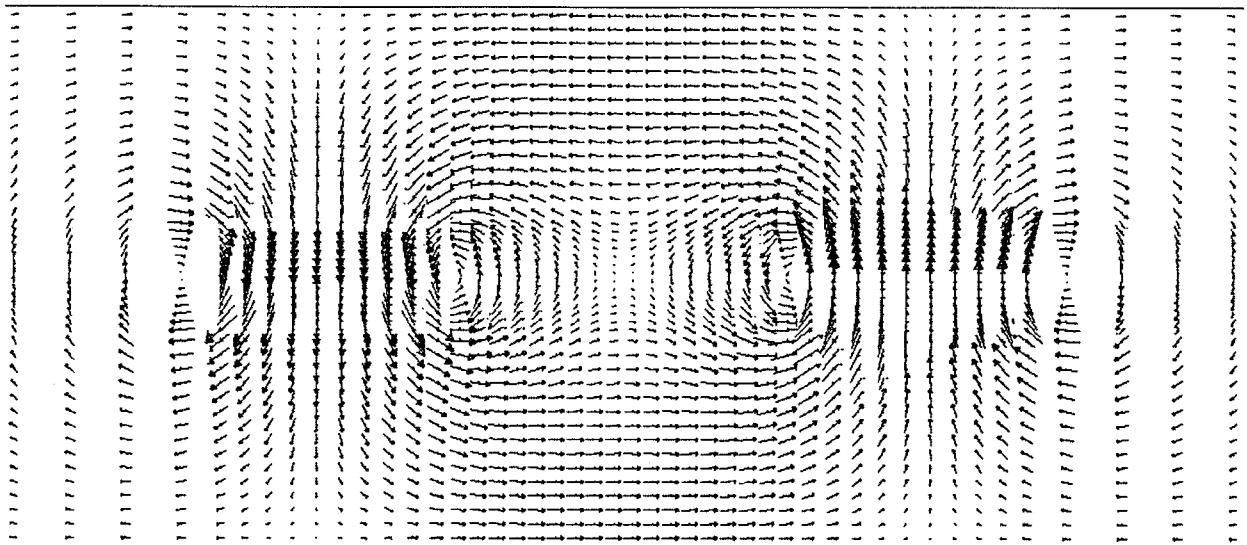
(a) $v = 2\text{m/s}$



(b) $v = 4\text{m/s}$



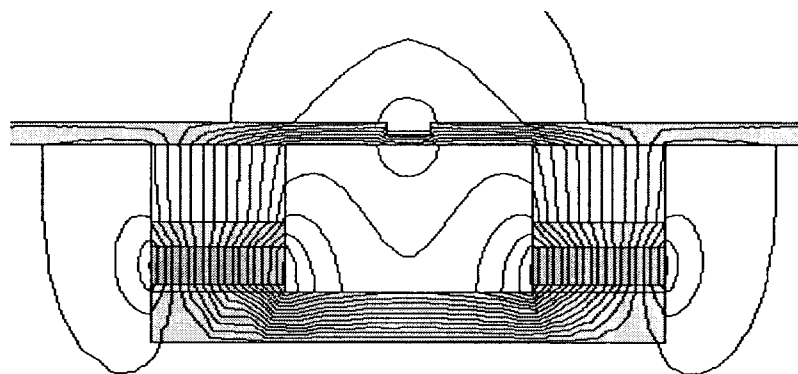
(c) $v = 6\text{m/s}$



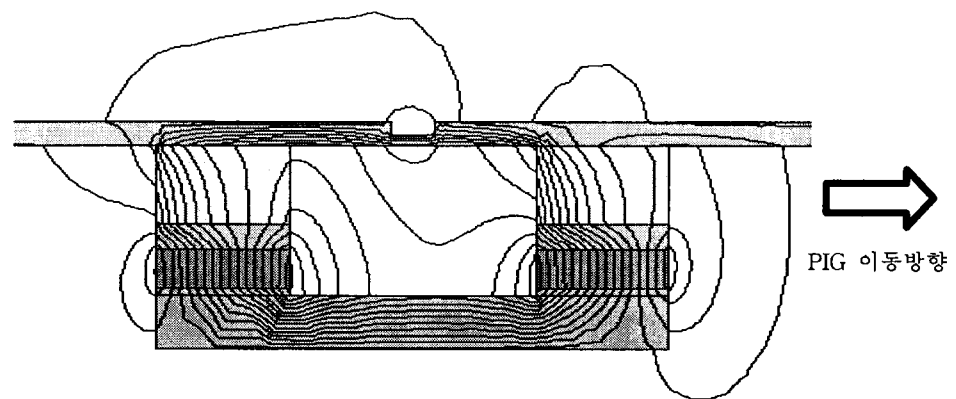
(d) $v = 10 \text{ m/s}$

그림 9 가스관 표면의 와전류

Fig. 9 Eddy current on the pipe surface



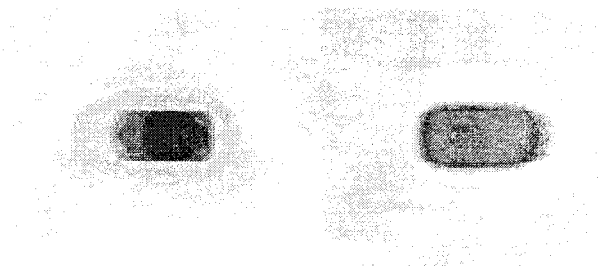
(a) $v = 0 \text{ m/s}$



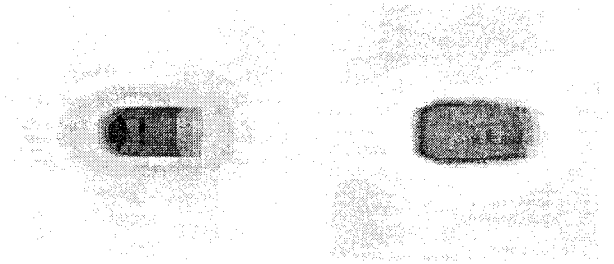
(b) $v = 4 \text{ m/s}$

그림 10 PIG 주행에 따른 flux line의 왜곡

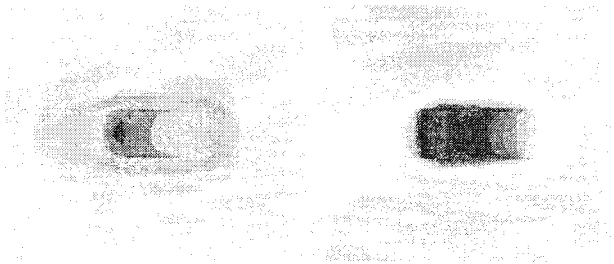
Fig. 10 Distortion of the flux line because of the PIG speed



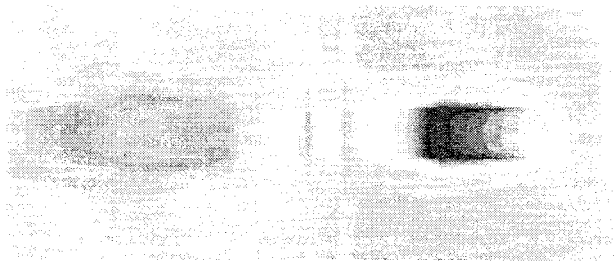
(a) $v=0$ m/s



(b) $v=1$ m/s



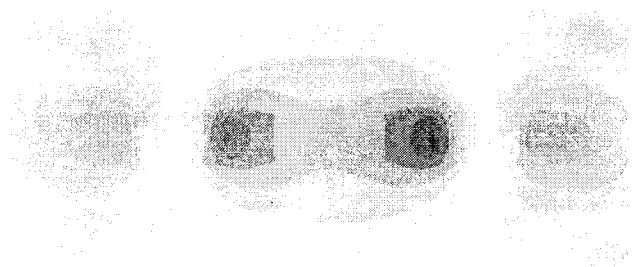
(c) $v=2$ m/s



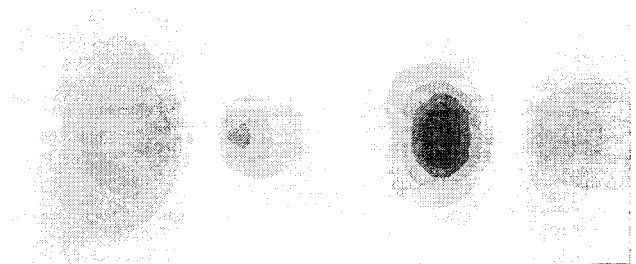
(d) $v=4$ m/s

그림 11 Radial 방향의 PIG 주행 속도 변화에 따른 자기장의 변화

Fig. 11 Changes of the radial component magnetic fields according to the PIG speed



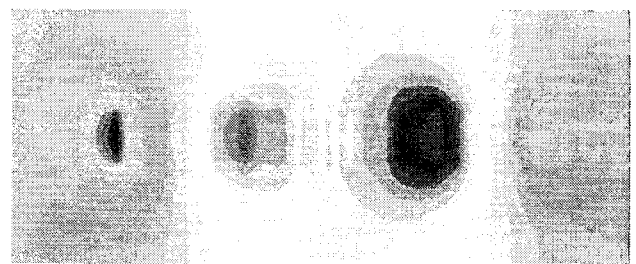
(a) $v=0$ m/s



(b) $v=1$ m/s



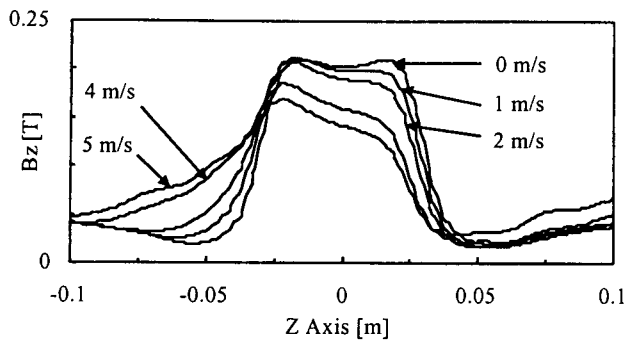
(c) $v=2$ m/s



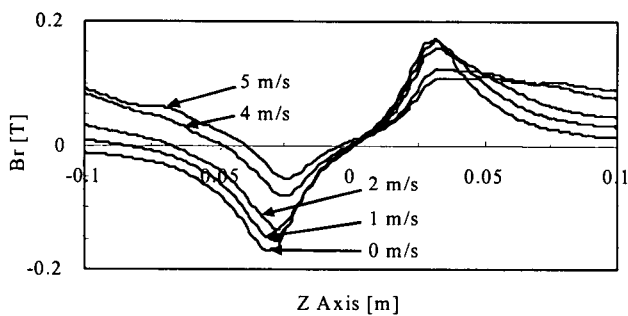
(d) $v=4$ m/s

그림 12 Axial 방향의 PIG 주행 속도 변화에 따른 자기장의 변화

Fig. 12 Changes of the axial component magnetic fields according to the PIG speed



(a) Axial 방향의 MFL 신호
(a) Axial component of the MFL signals



(b) Radial 방향의 MFL 신호
(b) Radial component of the MFL signals

그림 13 PIG 주행에 따른 신호 왜곡

Fig. 13 Effect of the PIG speed

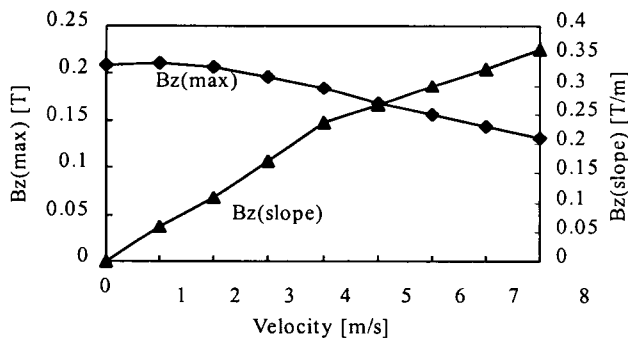


그림 14 PIG 주행에 따른 자기장의 최대값과 기울기

Fig. 14 Maximum field and slope according to the PIG speed

부 표면의 와전류, flux line의 변화, 가스관 표면의 자속밀도의 변화, 검출신호와 실제 결함에 의한 신호를 분석하여 주행 속도에 따라 검출신호 보상에 관하여 연구하였다. PIG의 주행 속도는 4m/s가 기준이며 실제 이동 속도는 0 - 10m/s이다. 주행 속도에 따라서 와전류 크기가 변화하게 된다. 주행 속도에 인하여 가스관의 속도 기전력에 의한 와전류가 발생하고 와전류에 의한 자기장이 측정 신호과형을 왜곡시킨다. PIG가 정지해 있다면 자기장의 변화가 없으므로 속도 기전력이 발생하지 않는다. PIG가 주행하면 그림 9처럼 PIG의 브러

시가 지나가는 가스관 내부의 표면은 와전류가 나타나게 된다. 속도가 증가할수록 와전류가 증가함을 알 수 있으며 이것은 검출 신호를 왜곡시키게 된다. 와전류의 크기는 주행 속도에 거의 비례한다. 그림 10(a)는 정지 시 MFL PIG의 Flux Line이며, 그림 10(b)는 MFL PIG가 4m/s로 이동시 Flux Line이다. 그림 10(b)와 같이 PIG가 오른쪽으로 진행할 양쪽 브러시의 오른쪽은 자기장이 감소하려는 방향으로 와전류가 발생하고, 왼쪽은 증가하려는 방향으로 와전류가 발생한다. 그러나 양쪽 브러시의 자기장의 방향이 반대이므로 그림 9처럼 와전류의 회전 방향은 반대가 된다. 그림 11은 주행 속도에 변화에 따른 가스관 내부 표면의 radial 방향의 자속밀도이며, 그림 12는 주행 속도 변화에 따른 가스관 내부 표면의 axial 방향의 자속밀도이다. PIG 주행 속도가 증가할수록 자기장의 왜곡도 영향도 증가함을 알 수 있으며 오른쪽으로 진행할 경우 브러시 오른쪽은 점점 자기장이 감소하고 반대로 브러시의 왼쪽은 자기장이 증가함을 알 수 있다. 그림 13(a)는 속도가 증가할 경우 저속 운행 시(1-2m/s)로 이동시는 최대값은 변하지 않고 파형의 왜곡이 발생하나 속도가 증가함에 따라 최대값도 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 13(b)는 주행 속도에 의한 axial 방향 신호를 나타내었다. 속도가 증가할 경우 파형이 왜곡됨을 알 수 있다. 본 논문에서는 그림 13(a)를 그림 14처럼 Axial 방향의 자기장의 최대값과 기울기로 나타내었다. 실제 검출된 신호를 주행 속도에 의한 왜곡을 보상하여야만 결함에 의한 신호를 검출할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 지하매설 가스관의 MFL PIG 주행 속도가 검출 신호에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 비선형 3차원 유한요소법을 사용하여, 가스관의 결함이 있을 경우 결함의 크기, 깊이에 따른 결함 신호를 해석하였다. 그러나 PIG 주행 시 가스관을 통과한 신호는 가스관의 착자에 의한 영향과 속도에 의한 와전류에 의하여 왜곡이 발생하게 된다. 본 연구의 결과 첫째 MFL PIG의 주행 시 PIG내의 영구 자석으로 인한 잔류자화로 인하여 가스관은 착자가 된다. 이때 가스관의 횡방향 착자에 의한 영향은 인가되는 자기장의 방향과 같으므로 검출 신호의 크기를 증가시키는 방향으로 작용하고, 종방향 착자의 경우는 신호를 인가되는 자기장과 수직 방향이므로 검출 신호 자체를 왜곡시킨다. 둘째로 PIG 주행으로 인하여 속도 기전력이 발생하게 되고 이로 인해 가스관 내부 표면에 와전류가 발생하게 되고, 이 와전류는 측정신호의 파형을 왜곡시킨다. 착자에 의한 신호왜곡이 주행 속도와 무관한 것과 달리 와전류에 의한 신호왜곡은 주행 속도에 비례하므로, 본 연구에서는 PIG주행 속도가 증가하면 가스관 내부 표면의 와전류가 증가하며, 속도에 따른 flux line의 변화, 가스관 표면의 자속밀도는 PIG가 오른쪽으로 진행할 경우 브러시의 오른쪽의 자기장은 감소하고 왼쪽은 증가하는 것을 그림으로 설명하였고, 신호왜곡 파형을 분석하여 주행 속도를 역산할 수 있었다.

본 논문에서 얻은 결과를 이용하면 PIG의 주행에 따른 속도 기전력에 의한 와전류 및 배관 착자에 의한 감지신호의 왜곡 정도를 보상할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 한전전력연구원 전력산업연구 개발사업(R-2003-B-068) 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Jim Cordell, C. Eng, M. I. Mech. E,F.Inst.Pet and Hershel Vanzant, 1999, "In-line Inspection pigging", All about pigging, chapter 8, pp. 1-28.
- [2] H. Haines et al., "Advanced MFL signal analysis aids pipe corrosion detection", Pipeline & Gas Industry, pp. 49-63, March 1999.
- [3] K. K. Tandon, "MFL Tool Hardware for Pipeline Inspection", Materials Selection & Design, pp. 75-79, February 1997.
- [4] D. L. Atherton and M. G. Daly, "Finite Element Calculation of Magnetic Leakage Detector Signals", NDT International, vol. 20, no. 4, pp. 235-238, August 1987.
- [5] J. Bruce Nestleroth, Steven W. Rust, and David A. Burgoon, "Determining Corrosion Defect Geometry from Magnetic Flux Leakage PIG Data", The NACE International Annual Conference and Exposition CORROSION 96, Paper No. 44, pp. 1-11, 1996.
- [6] S. Mandayam, L. Udpa, S. S. Udpa and W. Lord, "Wavelet-based permeability compensation technique for characterizing magnetic flux leakage images" Data", NDT&E International, Vol. 30, No. 5, pp. 297-303, 1997.
- [7] Richard P. Lippmann, "An Introduction to Computing with Neural Nets", IEEE ASSP MAGAZINE, pp. 4-22, April 1987.
- [8] G.S.Park, P.W.Chang and Y.K.Kim, "Sensitive Detection of the Defect Signals in MFL Type NDT", Proceedings of the Ninths Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, pp 181, Milwaukee, U.S.A., June 4-7 2000
- [9] G.S.Park, P.W.Chang and Y.W.Rho, "Optimum Design of the Non-Destructive Testing System to Maximize the Magnetic Flux Leakages", Journal of Magnetism, Vol.6, No.1, pp.31-35, March 2001

저 자 소 개



박 상 호 (朴 相 浩)

1969년 2월 10일생. 1996년 한국해양대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료
 Tel : 051-410-4925, Fax : 051-404-3986
 E-mail : sanghop@kiki.kmaritime.ac.kr



박 관 수 (朴 寬 秀)

1963년 3월 25일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박사). 1997년-1999년 Carnegie Mellon Univ. Visting Scalar. 1994년-2003년 한국해양대학교 전기전자공학부 교수, 현재 부산대학교 전자전기통신공학부 교수
 Tel : 051-410-4412, Fax : 051-404-3986
 E-mail : gspark@hanara.kmaritime.ac.kr