

자기누설탐상시스템에서 밀집된 다수의 결함에 의한 탐상 신호 왜곡에 관한 연구

論 文

56-5-9

Study on the Distortion of Detecting Signals with the Multi-Defects in Magnetic Flux Leakage System

徐 康** · 金 德 建* · 韓 在 萬* · 朴 寬 秀†

(Kang Seo · Dug Gun Kim · Jea Man Han · Gwan Soo Park)

Abstract - The magnetic flux leakage(MFL) type nondestructive testing(NDT) method is widely used to detect corrosion, defects and mechanical deformation of the underground gas pipelines. The object pipeline is magnetically saturated by the magnetic system with permanent magnet and yokes. Hall sensors detect the leakage fields in the region of the defect. The defects are sometimes occurred in group. The accuracy of the detecting signals in this defect cluster become lowered because of the complexity of the defect cluster. In this paper, the effects of the multi-defects are analyzed. The detecting signals are computed by 3-dimensional finite element method and compared with real measurement. The results say that, rather than the size of the defects, the effects of the relative position of the multi-defects are very important on the detecting signals.

Key Words : Nondestructive Testing(NDT), Magnetic Flux Leakage(MFL), Finite Element Method(F.E.M), Pipeline Inspection, Corrosion

1. 서 론

지하 또는 수중에 매설된 배관 속을 센서를 탑재한 채로 주행하며 배관의 결함을 탐지하도록 개발된 PIG(Pipe In Gas)는 배관의 유지 보수에 필수적인 장비가 되었다. 현재 사용되고 있는 PIG는 용도에 따라 Utility PIG와 Inspection PIG로 분리할 수 있으며, Inspection PIG는 배관 내부의 상태나 기계적 변형을 조사하기 위한 PIG를 의미하며 용도에 따라 Geometry PIG, MFL(Magnetic Flux Leakage) PIG, Ultrasonic PIG등으로 구분할 수 있다. 그 중에 자기누설탐상시스템(MFL PIG)은 가스관의 부식으로 인한 결함을 검출하는 방법이다^[1-3]. 자기누설 탐상 방법은 네오디뮴 자석으로 가스관을 자기 포화시킨 후 부식으로 인해 결함 부근에서 발생하는 누설자속을 홀센서를 이용하여 검출한다^[4-5].

자기누설탐상시스템에서 결함을 검출하는 중요한 요소는 탐상신호로부터 결함의 신호를 분리해 내는 데 있다. 또한 결함감지능력의 척도는 센서의 감지상황에서 발생하는 각종 영향에 대한 해석과 분석이 필요하다. 센서의 감지 상황에 발생하는 영향중에 다수의 부식이 밀집되어 나타날 경우는 하나의 부식으로 판정될 수도 있으며, 부식의 깊이 판정에 있어 정확도를 저감시켜 결국은 자기누설탐상시스템의 결함 감지능력을 저감시킨다.

본 논문에서는 자기누설탐상시스템에서 다수의 부식이 밀

집되어 나타날 경우, 이를 정확하게 판정하고, 부식의 깊이 판정의 정확도를 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 다수의 밀집된 부식이 발생할 경우를 유한요소법으로 해석하고, 실제 밀집된 다수의 부식을 제작하여 실험하였으며, 실제 측정된 데이터와 해석된 데이터를 비교하였다. 이를 바탕으로 인접한 부식과의 상호 연관성을 분석하고, 독립된 하나의 부식이 발생할 경우의 결함신호와 비교, 고찰하였다.

2. MFL PIG의 구조와 원리

2.1. MFL PIG의 구조

MFL PIG는 자기누설탐상시스템을 가스관에 적용한 것으로 가스관을 착자시키기 위한 자석과 자기효율을 높이기 위한 백요크와 가스관의 내벽에 밀착하여 PIG가 진행해야함으로 브러쉬를 이용하여 자기회로를 형성하였다. 그리고 브러쉬와 브러쉬 사이에 홀센서를 위치하여 누설자속을 검출할 수 있도록 하였다. 그림 1은 MFL PIG를 나타낸 것으로 앞쪽에 있는 것이 자기누설탐상시스템이고 뒤쪽에 있는 것은 PIG가 가스관을 지나가면서 검출한 신호를 저장하는 저장 시스템이다. 그림 2는 실제 제작한 MFL PIG이다.

† 교신저자, 正會員 :釜山大學 電氣工學科 副教授 · 工博

E-mail : gspark@pusan.ac.kr

* 學生會員 :釜山大學 전자電氣工學科 碩士課程

** 正會員 :釜山大學 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2007年 3月 9日

最終完了 : 2007年 4月 4日

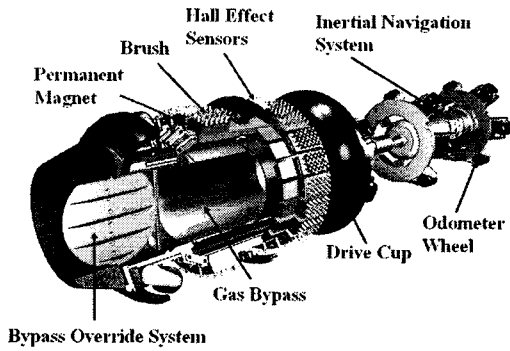


그림 1 MFL PIG의 구조
Fig. 1 Structure of MFL PIG

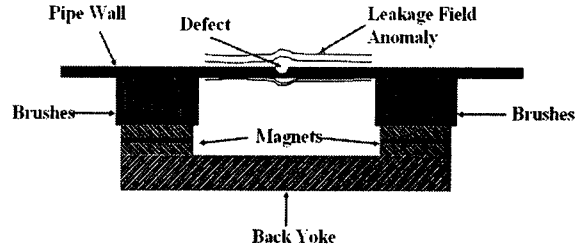


그림 3 MFL의 동작 원리
Fig. 3 Principle of MFL

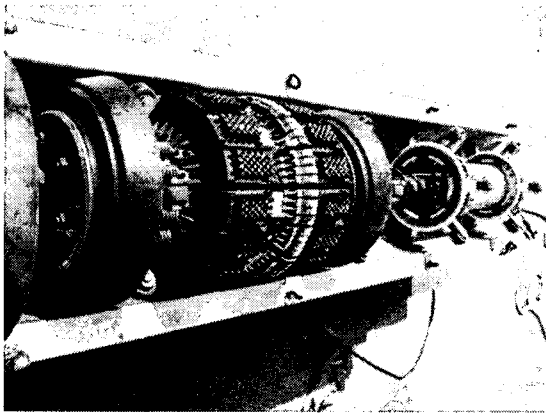


그림 2 제작한 MFL PIG
Fig. 2 Photograph of MFL PIG

2.2. 자기누설탐상법의 원리

자기누설탐상법이란 검사하고자 하는 대상물체를 외부에서 자기장을 인가하여 착자시킨다. 그림 3과 같이 자기회로를 형성하여 자기이력곡선에서의 포화영역까지 가스관을 착자시키게 되면 대상물체는 자화되고 결함이 있을 경우는 대상물체에서 발생한 결함 부위의 단면적이 줄어들게 되어 자기저항은 증가하고, 외부로 자기누설이 발생하게 된다. 이렇게 외부로 발생하는 자기누설을 자기센서로 측정하게 되는 것이다. 결함의 형상은 3차원의 형태를 가지고 있으며, 자기장의 성분도 또한 3차원으로 이루어져 3방향의 성분을 포함하고 있다. 발생하는 자기장의 성분은 Axial, Radial, Circumferential로 구분하여 측정한다.

3. 탐상 신호의 자기적 해석

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

3.1. 지배방정식

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 맥스웰 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 영역 내에 비선형 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우의 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 비가역항(irreversible component : M)의 합으로 나타낼 수 있다.

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

식(5)를 식(2)에 대입하면

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

와 같은 식을 얻는다. 여기서 $\nu = 1/\mu$, $\mu = \mu_0 \mu_r$, $\mu_r = 1 + \chi$ 이다. 이것을 식 (1), (3)을 이용하여 식 (6)의 관계로 부터

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J + \nabla \times M \tag{7}$$

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

$$-(\nabla \cdot \nu \nabla) A = J + \nabla \times M \tag{8}$$

3.2. 유한요소 정식화

해석영역을 경계조건에 따라 다르게 해석하게 되며, 경계면에서의 자계의 성분을 고려하여 경계조건을 만족시키면 한번 미분 가능한 가중함수 W 를 식 (8)에 곱한 후 전체 영역에서 적분하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\int_{\Omega} W \{ (\nabla \cdot \nu \nabla) A + J + \nabla \times M \} d\Omega = 0 \tag{9}$$

Green 정리와 경계조건으로부터

$$\int_{\Omega} \{ -\nu \nabla W \nabla \cdot A + W J - \nabla W \times M \} d\Omega = 0 \tag{10}$$

를 얻는다. 해석영역을 그림 4와 같이 유한개의 요소로 나누고 요소내의 자기 벡터 포텐셜을 구할 수 있다. 자기누설을 이용한 NDT시스템은 자기포화 곡선을 이용하는 비선형 문제이므로 오차가 일정 값 이하로 될 때까지 식 (10)을 유한요소법으로 반복 계산하여야 한다.

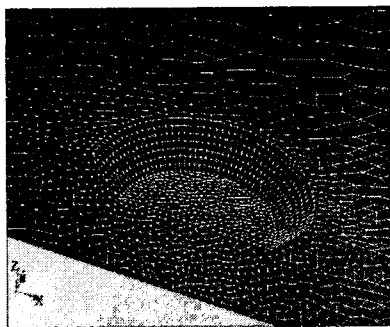


그림 4 해석을 위한 MFL의 요소분할
Fig. 4 Mesh of Analyzed MFL

3.3. 유한요소 해석을 위한 MFL의 모델링

유한요소법을 이용하여 MFL의 자기장 분포와 자기누설을 해석하기 위해서는 대상물체를 포화시키기 위한 외부에서 자계를 인가시키는 시스템의 치수, 재질 특성과 대상물체의 재질 특성이 필요하다. 그림 5는 시스템에 대한 치수에 대해 나타내었다. 자계를 인가시키기 위하여 네오디뮴 자석 (Neodymium Magnet)을 사용하였다. 사용된 네오디뮴 자석은 잔류자속 밀도가 1.2[T]이고, 보자력은 880000[A/m]이다. 네오디뮴 자석의 감자곡선은 그림 6과 같다. 자기효율을 증가시키기 위한 요크(Yoke)를 사용하였으며, 요크의 자화곡선은 그림 7과 같다. 대상물체는 후판 중에서 석유 수송용 강재의 X60으로 자화곡선은 그림 8과 같다

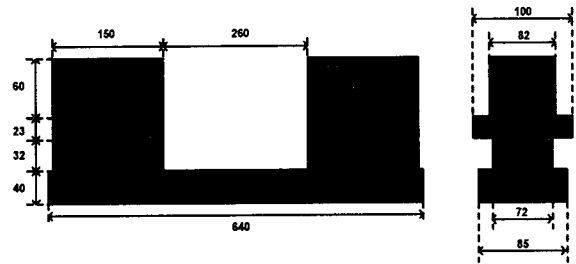


그림 5 해석에 사용된 MFL 시스템의 치수
Fig. 5 Size of Analyzed MFL System

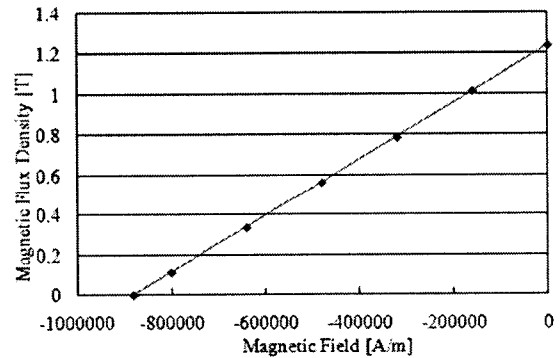


그림 6 네오디뮴 자석의 감자 곡선
Fig. 6 Demagnetization curve of neodymium magnet

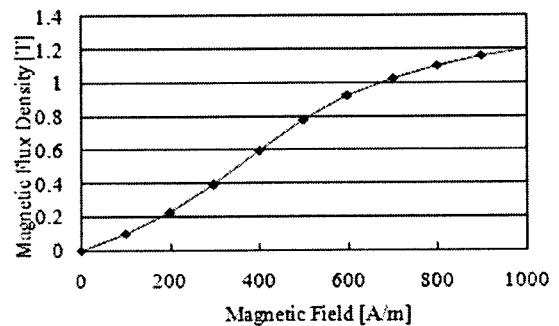


그림 7 요크의 자화 곡선
Fig. 7 B-H curve of yoke

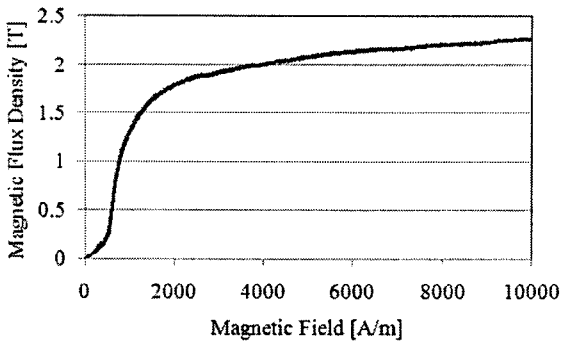


그림 8 요크의 자화 곡선
Fig. 8 B-H curve of yoke

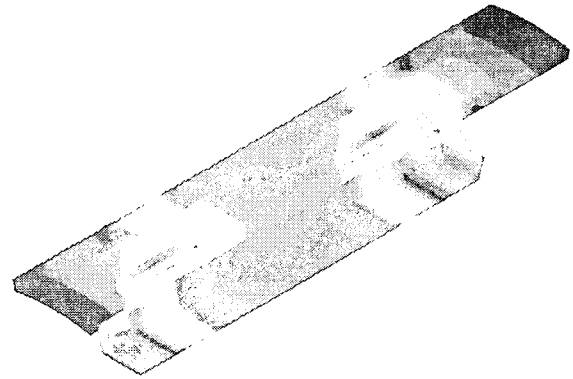


그림 11 요크 1개에 대한 자기장 분포 (3D)
Fig. 11 Magnetic Field Distribution of a Yoke (3D)

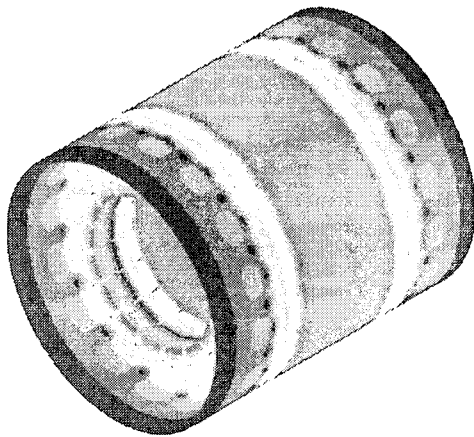


그림 9 가스관 전체의 자기장 분포
Fig. 9 Magnetic Field Distribution of full gas-pipe



그림 10 요크 1개에 대한 자기장 분포 (측면)
Fig. 10 Magnetic Field Distribution of a Yoke (side view)

각 재질의 자화곡선을 이용하여 가스관 전체에 대해 자기장 분포를 해석한 것을 그림 9에 나타내었다. 가스관의 착자레벨은 1.7[T]이다. 그리고 요크 한 개에 대한 자기장의 분포를 그림 10, 11에 나타내었다. 외부에서 인가되는 자기장에 의해 가스관은 자화곡선의 무릎점을 지나 포화 영역에서 동작하고 있다.

4. 자기누설탐상시스템에서의 결함 신호

가스관에서 발생하는 부식은 그림 12와 같다. 이것은 자기누설탐상시스템으로 가스관을 검사하여 부식이 일어난 부분의 배관을 촬영한 것이다. 가스관에서 발생하는 부식은 습기나 수분에 의해서 발생하는 것으로 실험을 통해 검출 신호를 취득하기 위해서 인위적으로 제작한 결함은 기계적으로 만들어졌다. 가스관에서 발생하는 결함의 크기는 가스관의 두께와 비교하여 두께의 비율로 나타내며, 가스관의 두께는 17.5[mm]이고, 이 길이를 $1t$ 로 표시한다.

4.1. 독립된 하나의 결함에 의한 결함 신호

독립된 하나의 결함에 의해서 발생하는 결함 신호는 결함의 형상을 결정하는 Length, Width, Depth 등에 의해서만 결정되게 된다. 실제 제작된 결함은 그림 13과 같으며, 실제로 발생하는 부식의 형태와 최대한 유사하게 제작하였다. 그림 13에서 제작된 결함의 크기는 Length가 $2t$, Width가 $2t$, Depth가 $0.3t$ 이며 $2t \times 2t \times 0.3t$ 로 표시한다.

그림 13의 결함에 의해 발생하는 누설자속을 자기센서로 측정된 결함 신호를 이미지 처리한 것을 그림 14(a), 그림 15(a)에 나타내었다. 그림 14(b)는 검출신호에서의 Global Axial 신호로 점선은 3차원 유한요소해석을 통해 검출한 데이터이며, 실선은 실제 결함에서 발생한 자기누설을 측정된 데이터로 해석 결과와 측정 결과가 측정 시에 발생하는 노이즈를 제외하면 일치한다. 그림 15(b)는 Global Radial 신호로 점선은 3차원 유한요소해석을 통해 검출한 데이터이며, 실선은 실제 결함에서 발생한 자기누설을 측정된 데이터로 해석 결과와 측정 결과가 측정 시에 발생하는 노이즈를 제외하면 일치한다. 이와 같이 결함이 발생하였을 경우 가스관의 단면적이 감소하여 자기누설이 증가하여 결함이 없는 부분과는 다른 형태의 자기 분포를 이루게 된다. 그리고 검출되는 신호로 결함의 형태를 판정하게 된다.

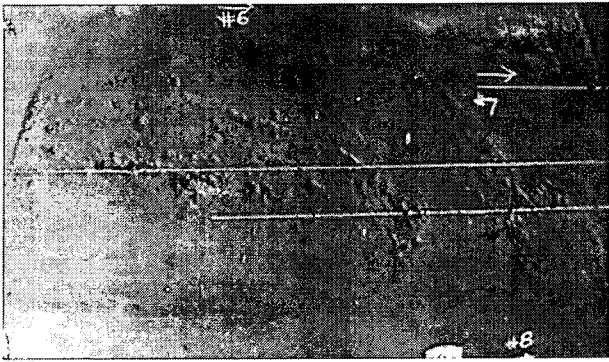
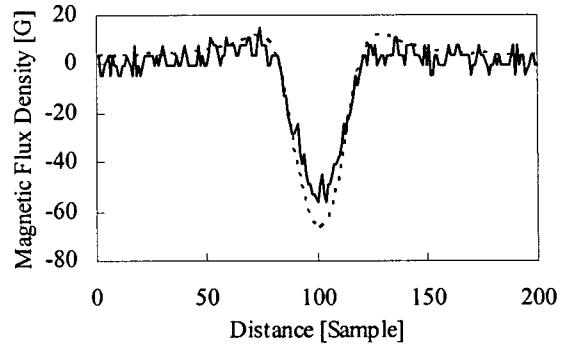


그림 12 가스파이프에서의 부식
Fig. 12 Corrosion at Gas Pipe



(b) Global Signal (---:Computed Data, —:Measured Data)

그림 14 결함에 의한 MFL 검출 신호 (축방향 성분)
Fig. 14 MFL Signal of Defect (Axial Component)

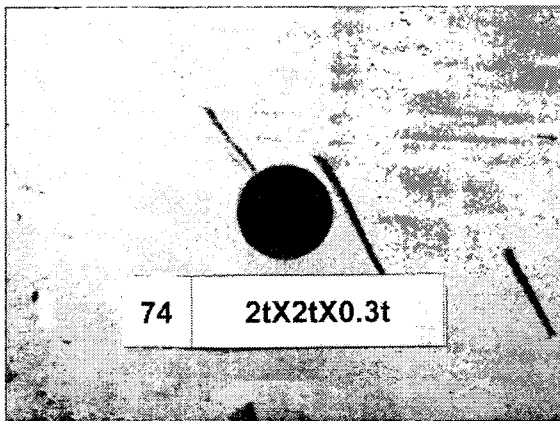
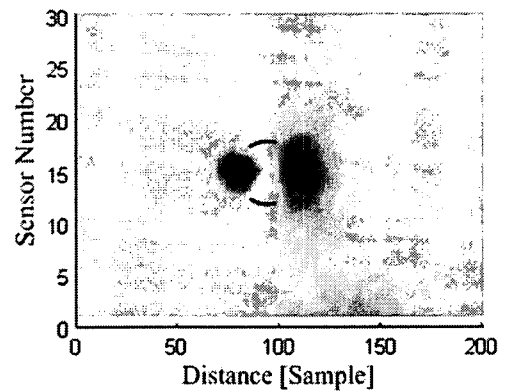
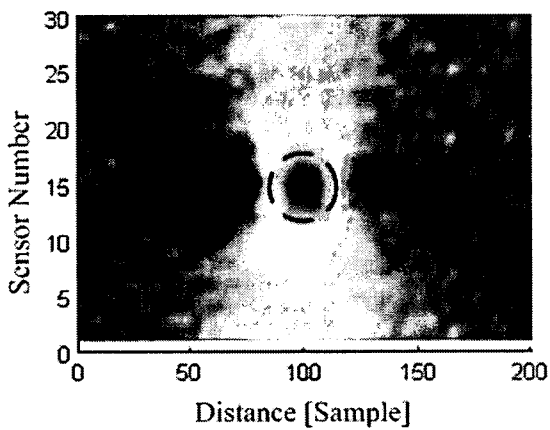


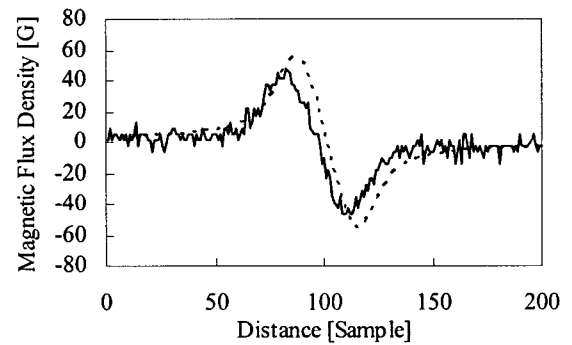
그림 13 제작한 결함 (2t×2t×0.3t)
Fig. 13 Photograph of Defect (2t×2t×0.3t)



(a) Image of Defect



(a) Image of Defect



(b) Global Signal (---:Computed Data, —:Measured Data)

그림 15 결함에 의한 MFL 검출 신호 (방사방향 성분)
Fig. 15 MFL Signal of Defect (Radial Component)

4.2. 밀집된 다수의 결함에 의한 결함 신호

두 개의 결함에 대한 상호 작용에 대해 검증될 경우 밀집된 다수의 결함에 의한 영향은 두 결함 각각의 영향을 합한 것과 같은 결과를 얻을 수 있게 된다. 따라서 두 개의 결함에 의한 상호영향을 확인하기 위하여 그림 16, 17, 18과 같이 두께 17.5 mm의 배관에 결함을 가로, 세로, 대각선으로 위치시켜 제작하였다. 이것은 하나의 결함을 중심으로 나타날 수 있는 세 가지 경우에 대한 것이다. $1t \times 1t$ 보다 작은 결함의 경우를 Pinhole이라고 하며, 이 결함의 경우는 유·무를 판단하는 것도 어려운 결함이다. 또한 결함의 간격은 결함의 크기에 비해 거리가 멀 경우에는 독립된 결함으로 간주하고, 결함의 크기에 비해 거리가 가까울 경우를 다중 결함으로 판정한다. 따라서 본 논문에서는 결함의 크기는 $2t \times 2t \times 0.5t$ 로 하고 결함과의 거리를 $2t$ 로 결정하였다. 따라서 그림 16, 17, 18과 같은 형태의 결함을 corrosion cluster라고 한다. 실험을 통하여 검출된 신호를 그림 19, 20, 21에 나타내었다. 그림 19, 20, 21은 신호의 방사방향 성분을 이미지 처리한 것으로 그림 19와 20은 이미지 처리상으로도 두 개의 결함이 있음을 확연히 확인할 수 있다.

그러나 그림 18과 같은 형태인 세로방향의 다중 결함의 경우는 그림 21에서 확인할 수 있듯이 다른 크기의 하나의 결함이 있는 것과 같이 결함 신호가 나타난다. 그림 18의 결함은 $2t \times 2t \times 0.8t$ 의 축방향 결함 신호 이미지인 그림 23과 $2t \times 2t \times 0.5t$ 로 이루어진 세로방향 다중 결함의 축방향 결함 신호 이미지인 그림 22와 유사하다. 따라서 그림 18과 같은 형태의 다중 결함의 경우는 결함의 크기 추정에 있어 정확성을 저감시킨다. Global Signal을 비교해 보면 그림 24와 같으며 Num. 105와 같은 세로방향 다중 결함의 경우는 그 크기가 중앙에 위치하고 자기누설의 경우는 그 크기에 선형성을 보이므로 $2t \times 6t \times 0.25t$ 로 추정이 될 것이다. 이것은 가스관의 결함에 의해 발생하는 자기누설이 가스관 외부로도 발생하지만 결함과 결함 사이로 지나가는 자기장이 많아지게 되고 따라서 부식이 없는 부분이지만 자기포화가 크게 일어나 부식이 있는 것과 같은 형태의 검출 신호가 측정되는 것이다.

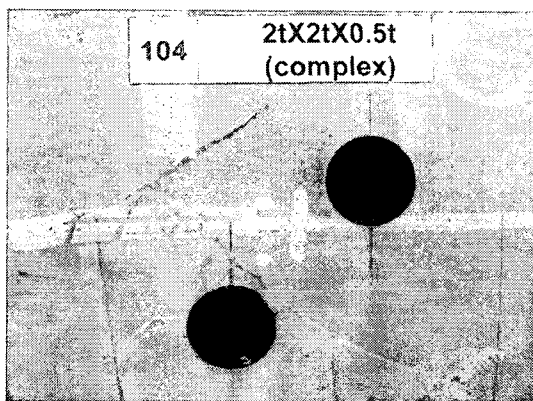


그림 16 대각선방향 다중 결함 (Num. 104)
Fig. 16 Photograph of corrosion cluster (Num. 104)

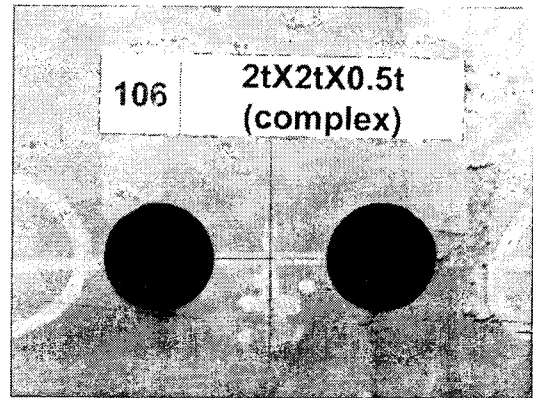


그림 17 가로방향 다중 결함 (Num. 106)
Fig. 17 Photograph of corrosion cluster (Num. 106)

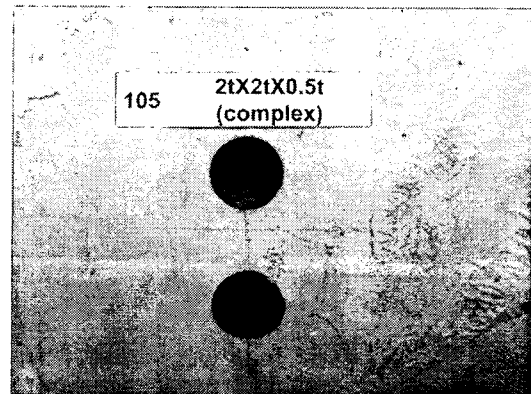


그림 18 세로방향 다중 결함 (Num. 105)
Fig. 18 Photograph of corrosion cluster (Num. 105)

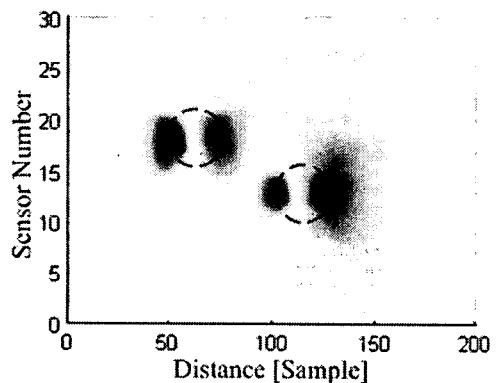


그림 19 대각선방향 다중 결함 신호 이미지 (Num. 104)
Fig. 19 Signal Image of corrosion cluster (Num. 104)

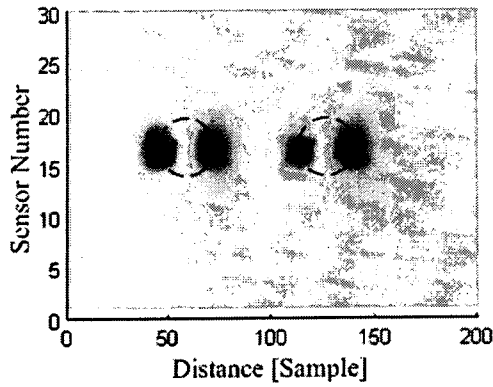


그림 20 가로방향 다중결합의 신호 이미지 (Num. 106)
Fig. 20 Signal Image of corrosion cluster (Num. 106)

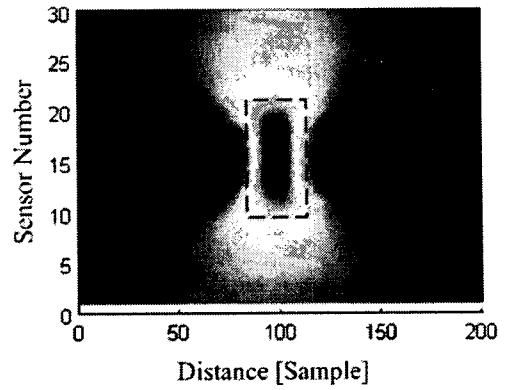


그림 23 세로방향 다중결합 신호 이미지 (2t x 2t x 0.8t) 축방향 성분
Fig. 23 Signal Image of Complex Defect (2t x 2t x 0.8t) Axial Component

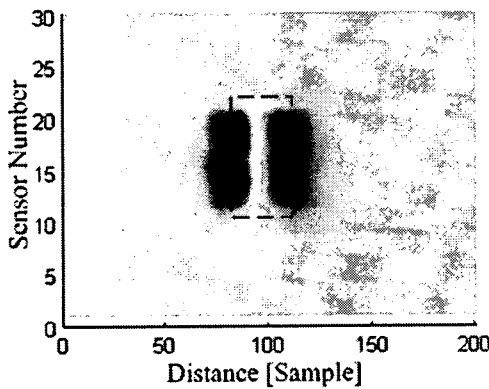


그림 21 세로방향 다중 결함의 신호 이미지 (Num. 105)
Fig. 21 Signal Image of corrosion cluster (Num. 105)

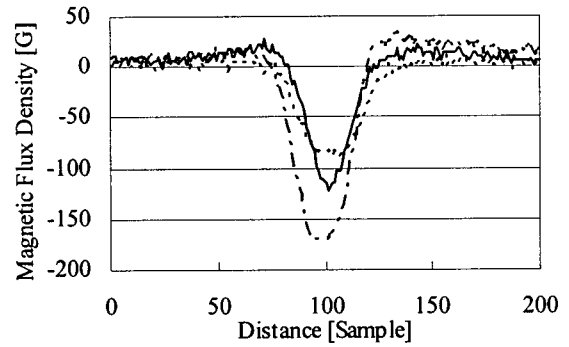


그림 24 결함 신호 (축방향 성분)
(점선: 2t x 6t x 0.2t, 일점쇄선: 2t x 6t x 0.3t, 실선: Num. 105)
Fig. 24 Global Signal of Defect (Axial Component)

5. 결론

자기누설탐상시스템에서 결함감지능력의 척도는 센서의 감지상황에서 발생하는 각종 영향에 대한 해석과 분석이 중요하다. 본 논문은 각종 영향중에 밀집된 다수의 결함이 발생할 경우 검출되는 결함 신호를 분석하기 위해 실제 결함과 유사하게 제작하여 측정하였다. 그리고 3차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 또한 실험한 데이터와 해석 데이터를 비교하고, 분석하였다.

밀집된 다수의 결함 중 가스관의 진행 방향이나 대각선상에서의 결함은 각각의 결함에 대해 추출하고 판정할 수 있었으나, 원주방향(세로방향)으로 평행하게 위치한 경우 (Num. 105)는 다수의 결함이 아닌 하나의 결함으로 추정되어 결함의 깊이 추정의 정확도를 저감시킨다.

따라서 이러한 형태의 밀집된 다수의 결함에 의한 정확도를 향상시키기 위하여, 축방향, 방사방향 신호뿐만 아니라 원주방향 성분의 신호를 추출하여 분석해야 할 것이다. 또한 원주 방향의 신호 레벨이 낮으므로 이러한 신호 레벨을 증가시키는 연구도 필요할 것이다. 차후 원주방향 성분 신호의

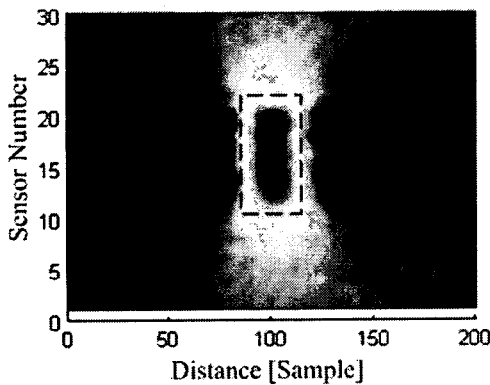


그림 22 세로방향 다중 결함의 신호 이미지 (Num. 105) 축방향 신호
Fig. 22 Signal Image of corrosion cluster (Num. 105) Axial Component

레벨을 증가시키고 이를 통하여 다중 결함 신호를 각각의 신호로 분리해 내는 연구를 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- [1] H. Haines et al., "Advanced MFL signal analysis aids pipe corrosion detection", Pipeline & Gas Industry, pp. 49-63, March 1999.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] G.S.Park, P.W.Jang, Y.W.Rho, "Optimum Design of a Non-Destructive Testing System to Maximize Magnetic Flux Leakage", Journal of Magnetics, vol.6, no. 1, pp. 31-35, March 2001.
- [5] Gwan Soo Park and Eun Sik Park, "Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage Type Nondestructive Testing(NDT)", IEEE Trans. Magn., Vol.38, No.2, pp. 1277-1280, March 2002.

저 자 소 개



서 강 (徐 康)

1976년 1월 17일생. 2001년 한국해양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사). 2004년 부산대학교 대학원 재학(박사)

Tel : 051-510-1488

E-mail : kalam@pusan.ac.kr



김 덕 건 (金 德 建)

1981년 6월 1일생. 2007년 부산대학교 전자전기통신공학부 졸업. 2007년 부산대학교 대학원 재학(석사)

Tel : 051-510-1488

E-mail : kdg81@pusan.ac.kr



한 재 만 (韓 在 萬)

1981년 3월 18일생. 2007년 부산대학교 전자전기통신공학부 졸업. 2007년 부산대학교 대학원 재학(석사)

Tel : 051-510-1488

E-mail : hjklll@pusan.ac.kr



박 관 수 (朴 寬 秀)

1963년 3월 25일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1987년 서울대학교 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박사). 1997년~1999년 Carnegie Mellon Univ. Visiting scalar. 1994년 ~ 2003년 한국해양대학교 전기전자공학부 교수. 2003년 ~ 현재 부산대학교 전자전기통신공학부 부교수. 2007년 ~ 현재 부산대학교 산학협력단 부단장

Tel : 051-510-2788

E-mail : gspark@pusan.ac.kr