

자기누설탐상시스템에서 밀집된 다수의 결함이 탐상 신호에 미치는 영향

서강정원원박관수이민호*최두현*이승현*엄창근*신판석**김철***노용우***유휘룡***조성호***김동규***
 부산대학교 전기공학과, 경북대학교 전자전기공학부*, 홍익대 전기공학과**, 한국가스공사 연구개발원***

Effects of the Multi-Defects on Detecting Signals in Magnetic Flux Leakage System

Kang Seo-Hyun Won Jeong-Gwan Soo Park

Dept. of Electric Engineering, Pusan National University

Min Ho Lee*Doo-Hyun Choi*Seung Hyun Lee*Chang-Gun Um*

School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University*

Pan Seok Shin**Chul Kim**

Dept. of Electric Engineering, Hongic University**

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

Pipeline Research Center, Korea Gas Corporation R&D Division***

Abstract - 자기누설탐상시스템은 지하에 매설된 가스관에서 발생하는 부식이나 크랙 또는 기계적 변형을 탐지하기 위한 방법으로 비파괴검사 방법의 하나이다. 가스관은 Nd자석에 의해 착자가 되고, 가스관에 부식이 발생했을 경우 가스관의 단면적이 작아지게 되어 자기누설이 발생하며, 발생한 자기누설을 홀센서로 검출하여 부식의 유무, 크기, 모양 등을 판별하게 된다. 가스관에는 한 개의 독립적인 부식도 있지만, 다수의 부식이 밀집되어 나타나기도 한다. 다수의 부식이 밀집되었을 경우 부식간의 거리에 따라 하나의 부식으로 판정되기도 하며, 그에 따라 부식의 깊이를 판정하는데 있어 정확성이 저감된다. 따라서 본 논문에서는 다수의 부식이 밀집되어 발생할 경우 자기적 영향을 분석하고, 깊이를 판정에 있어 정확성을 높이기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해서 실제 결함을 제작하여 실험하고, 해석하여 비교하였으며 밀집된 다수의 부식에 의한 자기적 영향에 대하여 고찰하였다.

1. 서론

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 Nd자석으로 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 깊이를 판정에 있어 정확도를 저감시켜 결국은 자기누설탐상시스템의 결함감지능력을 저감시킨다.

본 논문에서는 자기누설탐상시스템에서 다수의 부식이 밀집되어 나타날 경우, 이를 정확하게 판정하고, 부식의 깊이를 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 형성 하였다. 그리고 브러쉬와 브러쉬 사이에 홀센서를 위치하여 누설자속을 검출할 수 있도록 하였다. Fig.1은 MFL PIG를 나타낸 것으로 앞쪽에 있는 것이 자기누설탐상시스템이고 뒤쪽에 있는 것은 PIG가 가스관을 지나가면서 검출한 신호를 저장하는 저장 시스템이다. Fig. 2는 실제 제작한 MFL PIG이다.

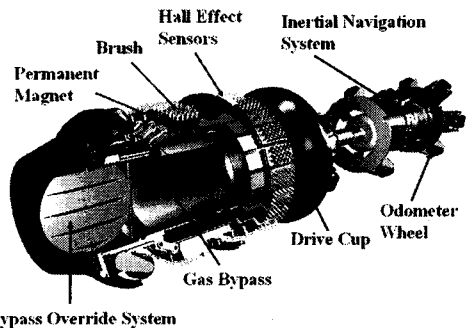


Fig. 1 Structure of MFL PIG

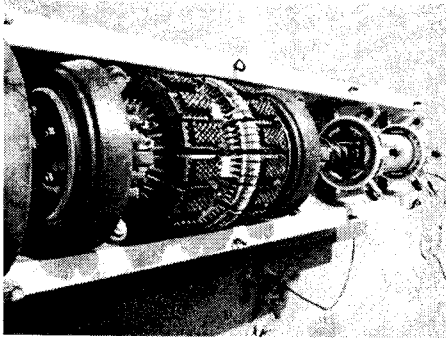


Fig. 2 Photograph of MFL PIG

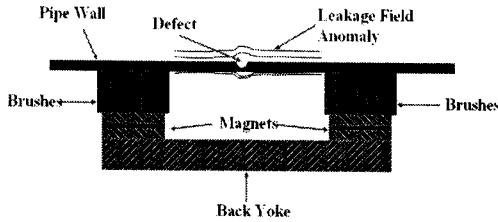


Fig. 3 Principle of MFL

2.2 자기누설탐상법의 원리

자기누설탐상법이란 검사하고자 하는 대상물체를 외부에서 자기장을 인가하여 착자시킨다. Fig. 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. 탐상신호의 0자기적 해석

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell 방정식과 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. 히스테리시스 현상이 없는 문제에서 자화량은 자화율 χ 로서

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

와 같이 표현되지만 해석 영역 내에 히스테리시스 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우에는 자화량은 자계의 세기나 자속밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지수로 남겨두어야 한다. 일반적으로 자화량 M은 외부의 자계가 제거되면 사라지는 가역항

(reversible component : χH)과 외부의 자계가 제거되어도 사라지지 않고 자발자화 특성을 갖는 비 가역항 (irreversible component : M)의 합으로 나타낼수 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 대입하면 식 (6)의 관계로 부터

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

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

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

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

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

Green 정리와 경계조건으로부터

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

를 얻는다. 해석영역을 유한개의 요소로 나누고 요소내의 자기 벡터 포텐셜을 구할 수 있다.

MFL을 이용한 NDT시스템은 자기포화 곡선을 이용하는 비선형 문제이므로 오차가 일정 값 이하로 될 때까지 식 (6)을 유한요소법으로 계속 반복 계산하여야 한다.

4. 자기누설탐상시스템에서의 결함 신호

가스관에서 발생하는 부식은 Fig. 4와 같다. 이것은 자기누설탐상시스템으로 가스관을 검사하여 부식이 일어난 부분의 배관을 촬영한 것이다. 실험을 위하여 제작한 결함은 기계적으로 만들어 제작하였다. 가스관의 결함의 크기는 가스관의 두께와 비교하여 두께의 비율로 나타내며, 가스관의 두께는 17.5 mm로 하였으며, 1 t로 표시한다.

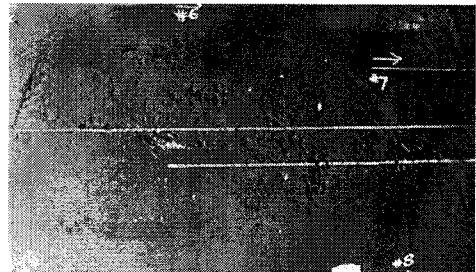


Fig. 4 Corrosion at Gas Pipe

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 Fig. 5와 같으며, 실제로 발생하는 부식의 형태와 최대한 유사하게 제작하였다. 결함의 크기는 Length가 2 t, Width가 2 t, Depth가 0.3 t이며 $2t \times 2t \times 0.3t$ 로 표시한다. Fig. 6의 결함에 의해 발생하는 누설자속을 자기센서로 측정된 결함 신호를 이미지 처리한 것이 Fig. 7(a)에 나타내었다. Fig. 7(b)은 검출신호에서의 Global Axia 1 신호로 점선은 계산한 데이터이며, 실선은 측정된 데이터로 거의 일치한다. 이와 같이 결함이 발생하였을 경우 가스관의 단면적이 감소하여 자기누설이 증가하여 결함이 없는 부위와는 다른 형태의 자기 분포를 이루게 된다. 그리고 검출되는 신호로 결함의 형태를 판정하게 된다.

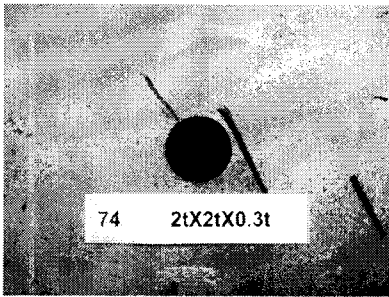
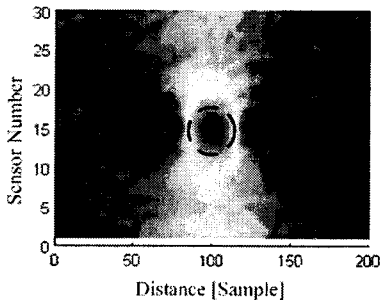
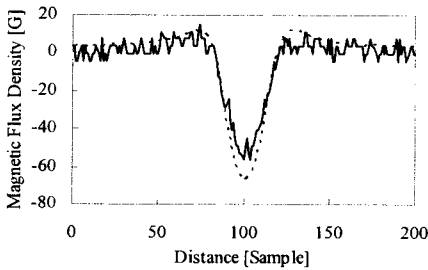


Fig. 5 Photograph of Defect ($2t \times 2t \times 0.3t$)



(a) Image of Defect



(b) Global Signal

(--- Computed Data, — Measured Data)

Fig. 6 MFL Signal of Defect(Axial Component)

4.2. 밀집된 다수의 결함에 의한 결함 신호

두 개 이상의 결함이 밀집되어 있을 경우에 결함신호의 변화를 확인하기 위하여 두 개의 결함을 Fig. 7, 8 같이 두께 17.5 mm의 배관에 제작하였다. 결함의 크기는 $2t \times 2t \times 0.5t$ 로 하고 결함과의 거리를 2 t로 하였다. Fig. 7, 8과 같은 형태의 결함을 Complex Defect라 한다. 실험을 통하여 검출된 신호를 Fig. 9, 10에 나타내었다. Fig. 9는 Radial 성분을 이미지 처리한 것으로 두 개의 결함이 있음을 확연히 확인할 수 있다.

그러나 Fig. 8과 같은 형태의 Complex Defect의 경우는 Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 다른 크기의 하나의 결함이 있는 것과 같이 결함 신호가 나타난다. Fig. 11의 결함 신호는 $2t \times 2t \times 0.8t$ 의 이미지 신호인 Fig. 12와 거의 유사하다. 따라서 Fig. 8과 같은 형태의 Complex Defect의 경우는 결함의 크기 추정에 있어 정확성을 저감시킨다. Global Signal을 비교해

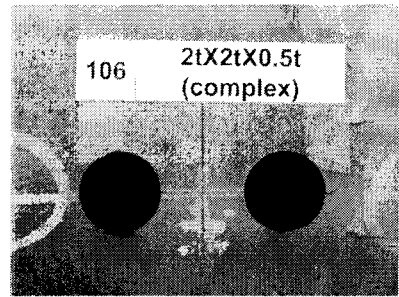


Fig. 7 Photograph of Complex Defect (Num. 106)

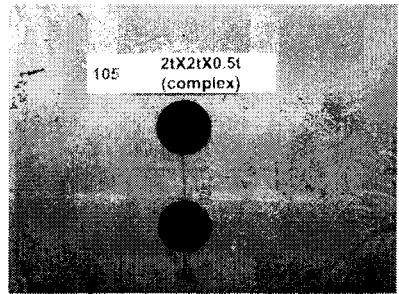


Fig. 8 Photograph of Complex Defect (Num. 105)

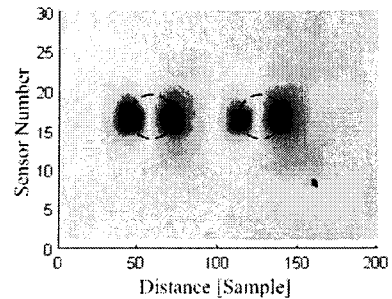


Fig. 9 Signal Image of Complex Defect (Num. 106)

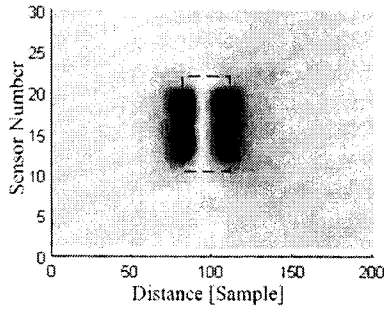


Fig. 10 Signal Image of Complex Defect (Num. 105)

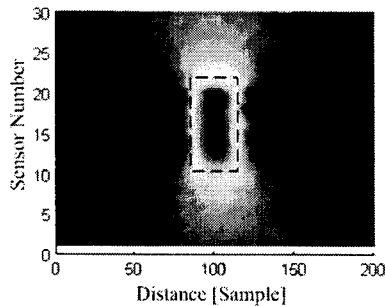


Fig. 11 Signal Image of Complex Defect (Num. 105) Axial Component

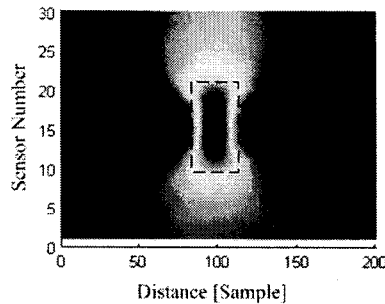


Fig. 12 Signal Image of Complex Defect (2t×2t×0.8t) Axial Component

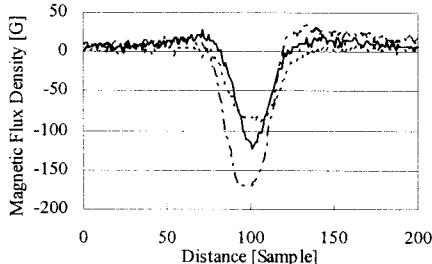


Fig. 13 Global Signal of Defect
(--- 2t×6t×0.2t, - 2t×6t×0.3t, Num. 105)

보면 Fig. 13과 같으며 Num. 105와 같은 Complex Defect의 경우는 $2t \times 6t \times 0.25t$ 로 추정이 될 것이다. 이것은 가스관의 결함에 의해 발생하는 자기누설이 가스관 외부로도 발생하지만 결함과 결함 사이로 지나가는 자기장이 많아지게 되고 따라서 부식이 없는 부분이지만 자

기포화가 크게 일어나 부식이 있는 것과 같은 형태의 검출 신호가 측정되는 것이다.

5. 결 론

자기누설탐상시스템에서 결합감지능력의 척도는 센서의 감지상황에서 발생하는 각종 영향에 대한 해석과 분석이 중요하다. 본 논문은 각종 영향중에 밀집된 다수의 결함이 발생할 경우 검출되는 결합 신호를 분석하기 위해 실제 결합과 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, 원주방향으로 평행하게 위치한 경우 (Num. 105)는 다수의 결함이 아닌 하나의 결함으로 추정될 수 있음을 확인하였다.

차후 이러한 형태의 밀집된 다수의 결함이 발생할 경우의 검출 신호를 분석하여, 결함을 판정하거나 각각의 결함으로 분리해내는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구 결과는 한국가스공사의 지원에 의하여 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [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.