

누설자속을 이용한 지하매설관 결함의 크기 및 형상 판정을 위한 해석(I)

*김철¹ 김한들¹ 신판석¹ 박관수²
¹홍익대학교 ²부산대학교

A Magnetic Flux Leakage Analysis of Various Defects for Underground Pipeline

Chul Kim¹ Han-Deul Kim¹ Pan-Seok Shin¹ Gwan-Soo Park²
¹Hongik University ²Pusan National University

Abstract - 이 논문은 지하매설관의 손상에 따른 자기 누설 신호를 유한요소법을 이용하여 Simulation 하고, 자기누설탐사장치를 이용하여 지하매설관에 대한 비파괴검사를 할 경우 나타나는 여러 가지 자기적 신호를 분석하여 손상의 크기나 형상 등을 판별할 수 있도록 기본적인 자기누설정보를 제공하기 위한 연구이다. 3가지 형태의 결함을 배관과의 상대적인 위치에 따라 3차원 FEM으로 해석을 하고 결함의 형상 및 크기대한 정보제공을 위하여 분석을 하였다.

1. 연구개요

수송을 목적으로 한 지하매설관은 현대에 이르러 수백 킬로미터에 걸쳐있다. 이러한 수송관은 유지보수를 위해서 정기적인 검사를 필요로 한다. 이러한 비파괴 검사에는 자기누설탐사(MFL : Magnetic Flux Leakage)기술, 초음파(Ultrasonic)기술, CCD카메라를 이용한 영상처리 기술 등이 있다. 이 중 MFL을 이용한 기술은 배관 외부의 손상에 대해서도 탐사가 가능하기 때문에 외부에 손상이 많은 지하매설관의 경우에 가장적합하다.

지하 매설관을 MFL PIG를 이용하여 비파괴 검사를 할 경우 수십 킬로미터에 달하는 방대한 데이터를 얻을 수 있다. 미지의 결함에 대해서 신호만으로 결함의 형상을 추정하는 것은 매우 어려운 일이다. 분석을 위해서 많은 시간과 노력이 필요하다.

이 논문은 결함의 모양에 따른 자기신호를 해석하는 연구를 하였다. MFL PIG를 이용하여 지하매설관에 대한 비파괴 검사를 할 경우 파이프라인의 외부물체를 감지하고 그 물체의 너비, 길이, 두께, 이격거리 등에 따른 자기누설 신호를 해석할 수 있도록 기본적인 정보를 제공하기 위한 연구이다. 정확한 분석을 위하여 유한요소 프로그램을 이용한 3차원 해석을 하였다.

2. 본 론

2.1 MFL PIG 와 Defect

자기누설탐사장치는 지하나 수중에 매설되어 측정이 어려운 배관의 손상, 균열, 부식정도를 측정하기 위한 것으로, 배관 내부에 삽입되어 주행하면서 지하에 매설되어 있는 배관의 내, 외부에 발생하는 결함이나 부식상황을 감지하는 장치이다. 자기누설탐사장치를 지하매설관 내부에 삽입하면 가스의 흐름을 따라 이동하며, 요크와 영구자석을 이용한 자기시스템으로 가스관을 적절히 포화시킨 후, 결함이나 외부물체로 인해 발생하는 결함이나 부식상황을 감지하는 장치이다. 자기누설탐사장치를 지하매설관 내부에 삽입하면 별도의 동력없이 수송물의 흐름을 따라 이동하며, 요크와 영구자석을 이용한 자기시스템으로 Pipe를 적절히 포화시킨 후, 결함에 의한 누설자속을 홀센서를 이용하여 검출하는 장비이다.

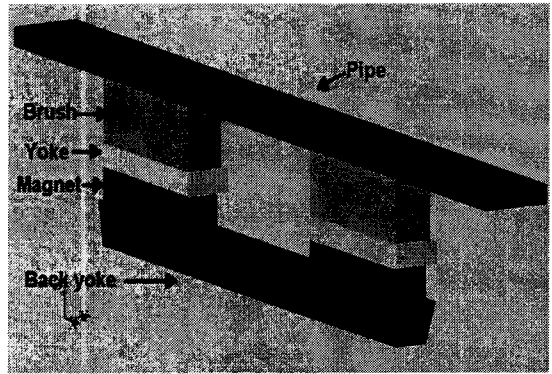


그림 1. MFL PIG와 Pipe

그림 1은 자기누설탐사장치와 Pipe의 한 부분을 3차원으로 형상화 한 것이다. 원통형의 파이프와 원주형의 자기누설탐사장치의 일부분을 해석모델로 설정하였고, 좌우 대칭인 특성을 이용하여 다시 1/2로 형상화 하고 해석하였다. 모델을 단순화하기 위해서 Pipe는 평판으로 설정을 하였고, Brush역시 4각형으로 가정하고 투자율을 조정하였다. 결함모양에 따라 좌우 대칭인 경우 1/2, 원점 대칭인 경우 전체를 해석하였다. Pipe의 두께는 17.5mm 이며 이를 t라고 정의 하였다.(t=17.5mm) 자기누설탐사장치의 진행방향과 평행한 한쪽을 길이, 진행방향과 수직인 크기를 너비로 정의한다. 파이프의 중심을 향하는 방향을 깊이라 하며, 모든 결함의 깊이는 0.5t 이다.

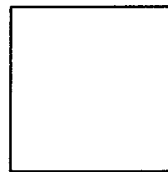


그림 2. 정사각형

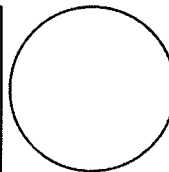


그림 3. 원형

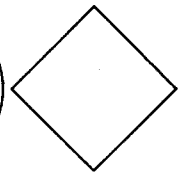


그림 4. 마름모형

그림 2, 3, 4는 Defect의 형상 모델이다. 모두 같은 지름 또는 길이가 3t이며, 자기 누설 신호의 패턴 분석을 위해서 극단적인 모델을 선정하였다.

그림 6, 7, 8은 그림 5의 직사각형결함 모양을 회전시킨 형상이다. 자기누설감지장치의 진행방향과 결함의 길이 방향이 평행하지 않고 각을 이루는 경우의 신호변화를 Simulation하였다.



그림 5. 직사각형
결합

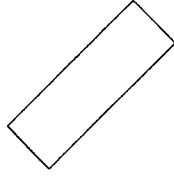


그림 6. 배관과의
각도 45도



그림 7. 배관과의
각도 90도

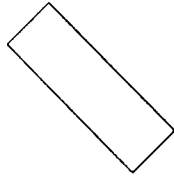


그림 8. 배관과의
각도 315도

그림 5의 결합은 너비 방향으로 잘랐을 때 단면적이 $1t \times 0.5t(\text{mm})$ 이며, 그림 6 45도 일 때는 $\sqrt{2}t \times 0.5t(\text{mm})$ 이고, 그림 7의 90도에서 단면적은 $3t \times 0.5t(\text{mm})$ 이다. 같은 부피의 결합이 진행방향 축과 이루는 각이 변함에 따라서 결합의 단면적이 변하게 된다.

동일한 부피의 결합이 다른 형태로 존재할 때의 경우를 알아보기 위해서, 그림 2의 정사각형을 배관과의 각도 45형태로 설정하면, 결합의 부피는 같고, 길이와 너비가 $\sqrt{2}$ 배 커지게 된다.

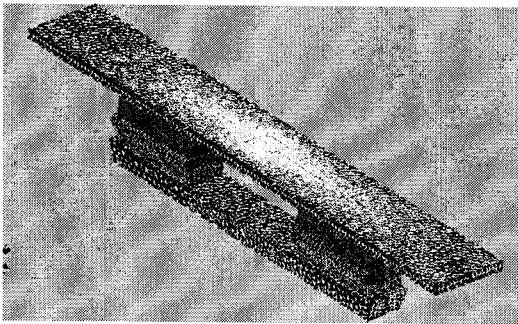


그림 9. 모델의 요소분할도

그림 8은 Simulation의 요소분할 그림이다. 결합 부분을 집중적으로 요소분할 하였다. Pipe, Yoke, Back yoke, 등의 재질은 포화자속 밀도, 2.1T 이며, 초기 비투자율 7000의 특성을 가지고 있다. Brush의 경우는 비투자율을 10으로 하여 Simulation 하였다. Magnet은 Nd계 열 영구자석으로 잔류자속밀도 1.24T의 특성으로 해석하였다.

2.2 Simulation 결과

그림 10은 해석 결과 자속밀도 분포를 나타내는 그림이다. 파란색 부분은 자속밀도가 낮은 부분이고 노란색으로 갈수록 자속밀도가 높아진다. 최저 $-6.3 \times 10^3[\text{T}]$ 에서 최대 2.365[T]의 범위를 나타내고 있다. 결합부분인 Pipe 중심과 Back yoke에서 충분한 포화상태를 보이고 있다.

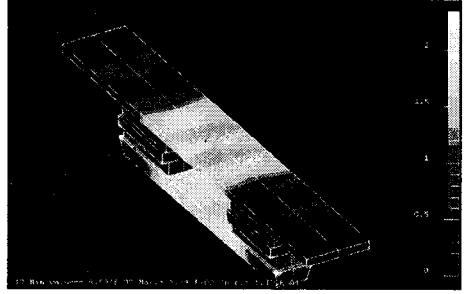


그림 10. 자속밀도 분포

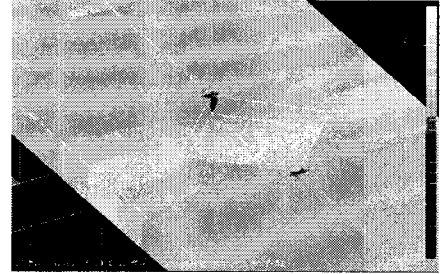


그림 11. 결합 주변의 자속밀도 분포

그림 11은 결합 부분의 자속밀도를 보여주고 있다. 길이 방향의 양끝 모서리 부분은 상대적으로 낮은 자속밀도를 보여주며, 너비 방향의 양끝 모서리는 높은 자속밀도를 보여주고 있다.

2.3 MFL 신호분석

자기누설탐사장치의 진생방향 축인 Axial방향, Pipe의 중심에서 수직인 방향을 Radial방향, 원주방향에 등을 정의하고, 신호를 추출하여 3차원 자료로 활용한다. Axial방향 신호는 자기누설탐사장치의 진행방향과 자속의 방향이 반대이기 때문에 누설이 많을때, (-)값을 가지게 된다. Radial방향에선, 자속의 방향이 Pipe의 내부를 향할 땐(-), Pipe의 외부를 향할 땐(+의 값을 가진다.

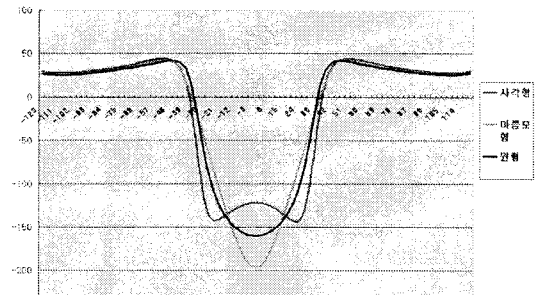


그림 12. 형상에 따른 신호

그림 12는 그림2, 3, 4의 결합을 Simulation한 결과이다. 결합의 길이와 너비는 같으며, 결합의 모양에 대한 Axial방향의 신호이다. 사각형 모양의 경우 단면적이 변화하지 않지만, 마름모형이나 원형은 결합의 단면적이 증가하다가 감소한다. 신호 패턴도 결합의 단면적 변화에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 결합 위를 지난 센서의 수가 많지 않아도 결합의 모양을 대략적으로 판단할 수 있다.

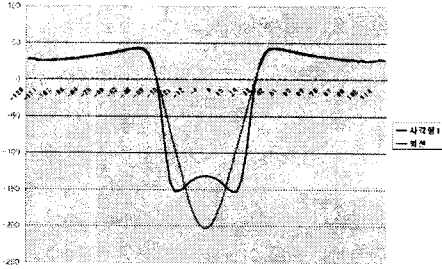


그림 13. 사각형의 45° 회전

그림 13은 사각형상의 결함이 기이방향과 45° 이룰 때 신호의 변화이다. 그림 12에서는 결함의 길이와 너비가 같았고, 그림 13에서는 결함의 부피가 같다. 45° 각도를 이룬 경우, 길이와 너비는 $\sqrt{2}$ 배 만큼 커지게 된다.

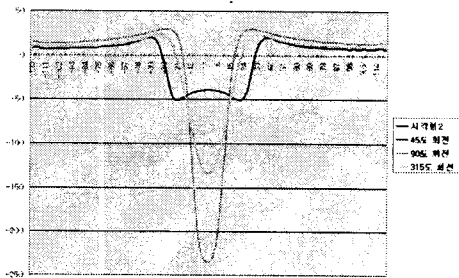


그림 14. 길이 1t 너비 3t인 결함의 회전

그림 14는 그림 5, 6, 7, 8의 결함의 Axial방향 신호이다. 45도와 315도는 같은 신호를 보이고 있으며, 단면적이 늘어날수록 신호의 폭은 감소하고, 최대값은 커지는 것을 알 수 있다. 센서가 지나가는 결함의 길이도 각도를 가짐에 따라 $3t$, $\sqrt{2}t$, $1t$ 로 줄어들게 된다. 단면적은 $1t$, $\sqrt{2}t$, $3t$ 로 늘어나게 된다.

45° 결함의 경우 결함 전체를 지나가는 센서가 없다. 하나의 신호를 가지고 결함을 판정을 할 수 없게 된다. 인접한 센서의 신호를 함께 분석해서 길이 및 너비를 추정해야 한다.

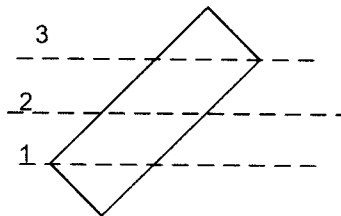


그림 15. 센서가 지나가는 위치

그림 15는 길이방향 축과 45° 기울어진 결함을 지나가는 3개의 센서 위치이다.

그림 16은 신호의 최고점의 값은 같고 위치는 다른 것을 알 수 있다. 그림 16과 같이 기울어진 결함의 경우 그림 15와 같이 인접 센서의 신호를 함께 분석함으로써 형상을 추정할 수 있다.

그림 17은 Radial 방향 신호이다. 결함의 길이 판정을 위해서 최고점과 최저점 간의 거리를 계산하게 되며, 신호가 강한 부분이기 때문에, 노이즈에 의한 영향을 적게 받게 된다.

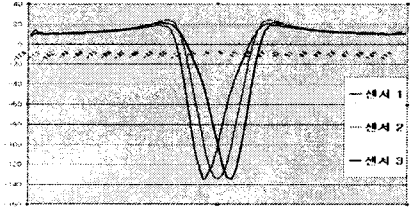


그림 16. 45° 기울어진 결함을 지나가는 센서 신호

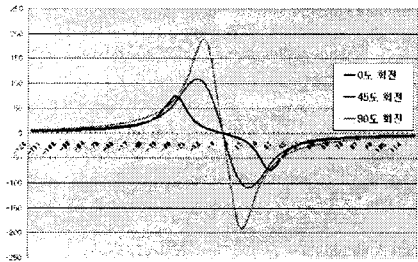


그림 17 Radial 방향 신호

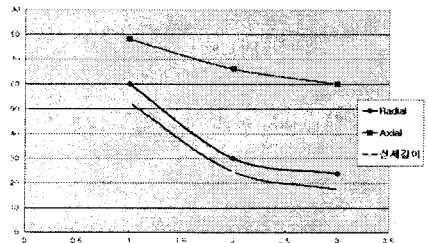


그림 18. 실제 결함의 크기와 신호의 크기

그림 18은 실제 결함의 길이와 신호상의 길이를 비교한 그림이다. Axial 방향 신호는 실제길이와 많은 차이를 보이고 있으며, Radial 신호는 일정크기의 오차를 가지고 있으며, 같은 패턴으로 변화한다.

3. 결 론

본 논문은 자기누설탐사장치의 자체해석을 통하여 결함의 크기 및 형상을 추정하는 방법에 대해 연구하였다. 특정한 하나의 신호만으로 정확하게 결함의 크기 및 형상을 판정하는 것은 어려운 일이다. 결함의 형상에 따른 Axial 방향 신호 패턴과, 결함이 Axial 방향과 각을 이루고 있을 경우에 대해 대표적인 3가지 형상을 취하여 해석하고 신호를 분석하였다. 3차원 유한요소법을 사용하여 Simulation 하였고 결함의 크기 및 형상등을 판별할 수 있는 자료를 제공 하였다.

본 연구는 2004년도 한국가스공사의 지원과제로 이루어 졌음

[참 고 문 헌]

- [1] 박상호, "자기 누설 비파괴 탐상 시스템에서 PIG의 주행속도가 검출신호에 미치는 영향", 대한전기학회논문지, 제52권 10호 pp475-483, 2003
- [2] S. Mandayam, L. Udpa "Invariance Transformation for Magnetic Flux Leakage Signals", IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL. 32 No 3, MAY 1996
- [3] 김철 "누설자속을 이용한 지하가스관 외부 금속물체의 자기 신호 해석", 2005년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집 pp.111 113 2005