

CMFL 비파괴 검사 시스템에서 축방향 결함 위치에 따른 신호의 왜곡 분석 및 보정 기술 개발

김희민, 김진성, 박관수
부산대학교 전자전기공학과

A development on the compensating technique of the signal distortion and an Analysis of the signal in the CMFL type nondestructive testing system for detecting axial cracks

Hui-Min Kim, Jin-Sung Kim, Gwan-Soo Park
School of Electrical Engineering, Pusan National University

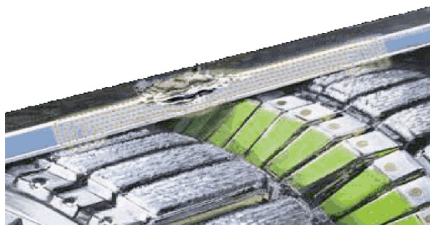
Abstract - 비파괴 검사방법 중 자기누설 방법을 이용한 방법은 높은 자기 투자율을 갖고 있는 배관 검사에 적합하다. 자기누설 방식이 적용된 시스템을 MFL PIG라고 한다. MFL PIG는 금속 손실이나 부식과 같은 결함을 검출하는데 높은 성능을 보인다. 하지만 이 시스템은 축방향으로 자기장을 형성하여 투자율이 큰 금속 배관을 포화시켜 결함이 있는 부분에서 발생하는 누설자속을 검출하는 방식이기 때문에 축방향으로 발생하는 미소 결함은 자기장이 통과하는 단면이 작고 누설자속이 거의 없어 검출이 어렵다. 축방향 미소결함을 검출하기 위해 기존의 MFL PIG를 개선시킨 것이 CMFL PIG이며, 이것은 자기장을 원주방향으로 형성하여 결함에서의 자기 누설을 최대화 가능하다.

본 논문에서는 축방향 미소 결함의 검출이 가능한 CMFL 비파괴 검사 방법에 관한 논의와 이를 이용하여 축방향 결함의 위치이동에 따른 왜곡 신호의 분석 및 보정하는 방법에 대해 제안한다.

1. 서 론

금속성 구조물을 파괴하지 않고 손상, 균열, 부식, 피로, 용접부위를 검사하는 방법으로 비파괴검사 (NDT : Non-Destructive Testing)가 이용된다. 도전율과 투자율을 동시에 갖는 금속재료의 비파괴검사로는 주로 전자기적인 방법이 사용되는데 지금까지 자기장 센서를 이용한 구조물의 검사에 대한 기본적인 연구는 미국을 중심으로 1980년대부터 이루어지고 있으며 이에 대한 기존의 검사방법으로는 MFL(Magnetic Flux Leakage) Method, Eddy Current Method, Eddy Current에서 Coil을 분리한 Far Field Eddy Current Method, Magnetic Fluid를 이용한 Visual Method, Magneto Striction Method, Ultra Sonic Method, Acoustic Emission Method, 방사능 활용법 등이 있다. 이 중에서 투자율이 큰 금속으로 만들어진 시험체를 센서가 시험체와 상대적으로 거리를 둔 채로 측정하여야 할 경우에는 MFL Method의 측정법이 적절하다. MFL 비파괴 검사의 동작 개요도는 그림 1과 같다. 그림 2는 2차원으로 해석한 자기장의 분포를 구한 것이다. 그림에서와 같이 yoke와 영구자석을 이용하여 자기시스템으로 만든 다음, 이 배관을 충분히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설자속을 홀 센서로 검출한다.

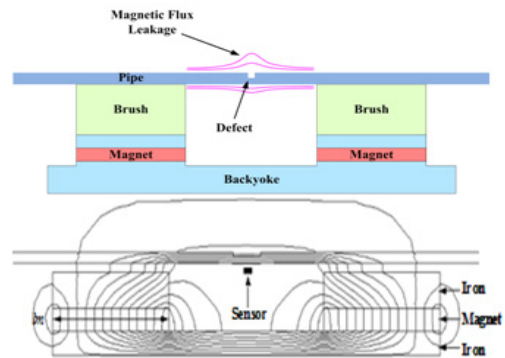
일반적으로 배관의 결함은 지하에 매설된 가스배관의 특성 상 지압이나 여러 스트레스에 의해 배관 표면에 축방향으로 미소결함이 발생한다. 이러한 결함은 다른 결함과 달리 육안으로 판별하기 어려울 정도로 크기가 매우 작고 발생빈도는 부식에 의한 결함 이상으로 빈번하게 발생한다. 그림 1에 나타낸 MFL PIG는 배관의 축방향으로 자기장을 형성하기 때문에 축방향을 따라 발생하는 미소결함의 유무에 따른 자기장통과 단면적의 변화가 거의 없다. 단면적의 변화가 없기 때문에 누설 자기장이 발생하지 않으며 축방향 미소결함을 검출하는 데 한계가 있다.



〈그림 1〉 부식에 의한 결함을 검출하는 MFL 비파괴 검사 시스템

가스 배관에서 발생한 축방향 미소결함을 검출하기 위해 기존의 MFL 비파괴 검사방법을 개선시킨 것으로 CMFL(Circumferential MFL) 비파괴 검사시스템이 있다. 이 시스템은 자기장을 원주방향으로 인가하도록

PIG 구조를 변경시킨 것이다. 즉, 배관의 결함 부분에서의 자기장 통과 단면적을 최대로 함으로써, 축방향 미소결함에서의 누설자기장을 최대로 검출하는 시스템을 말한다.



〈그림 2〉 MFL 시스템 구조 및 자기장해석

본 논문에서는 3차원 비선형 유한요소해석법을 적용하여 CMFL PIG를 설계하였고, 이를 이용하여 축방향 미소결함의 위치에 따라 발생하는 누설자기장 신호를 분석하였다. 또한 그 신호의 왜곡 정도를 추정 및 보정하는 방법에 대해 제안한다.

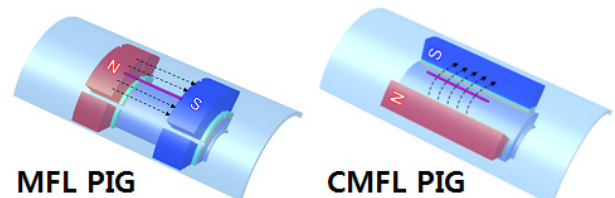
2. 본 론

2.1 CMFL 비파괴 검사 System의 개요

배관 검사용 자기누설 비파괴 검사 시스템은 금속배관을 착자시키기 위해 영구자석을 사용하고 이를 통해 자기장을 인가하며 전체 시스템을 자기회로로 구성한다. 결함 검출을 위해 가스배관을 충분히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설 자속을 홀센서를 이용하여 측정한다.

2.1.1 CMFL 비파괴 검사 System의 원리

CMFL PIG는 축방향 미소결함을 검출하기 위해 그림 3와 같이 원주방향 자기장을 형성한다. 그림 3의 MFL PIG는 축방향으로 긴 결함에 대해서 누설 자기장이 발생하지 않는 것을 볼 수 있으며, CMFL PIG는 결함 부분에서 자기장이 통과하는 단면적의 변화가 가장 크기 때문에 누설 자기장 또한 가장 크게 된다.



〈그림 3〉 Magnetic field distribution

2.1.2 CMFL PIG 자기장 분포 해석

3차원 정자기장 비선형 유한요소해석을 수행하기 위해 Maxwell 방정식과 보조방정식은 다음과 같다.

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

여기서 (1)식을 H에 관하여 나타내면, $\vec{H} = \nu_0 \vec{B} - \vec{M}$ (6)

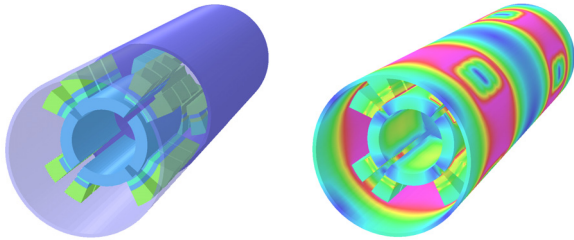
(3)식에 (6)식을 대입하여 나타내면, $\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = \vec{J} + \nabla \times \vec{M}$ (7)

벡터 연산에 의해 (7)식은 아래와 같이 나타낼 수 있다. $-(\nabla \cdot \nu \nabla) \vec{A} = \vec{J} + \nabla \times \vec{M}$ (8)

도출한 지배 방정식에 대해 Galerkin법으로 형상함수를 정식화하여 요소행렬식으로 나타내면 다음과 같다. $[K_{ij}][U_j] = [F_j]$ (9)

2.2 CMFL 시스템의 자체 해석

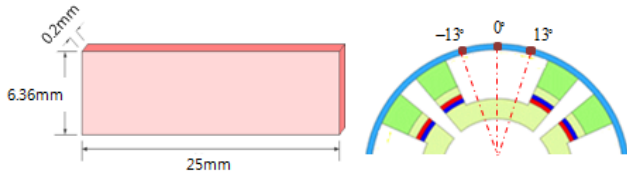
3차원 유한요소해석을 이용하여 CMFL 시스템을 해석한 결과를 그림 4에 나타내었고 이 때 배관 내 자속밀도는 1.8[T]이다.



<그림 4> CMFL 시스템 <그림 5> 전체 시스템의 자기장 분포

2.2.1 CMFL 해석용 결함의 크기 및 위치

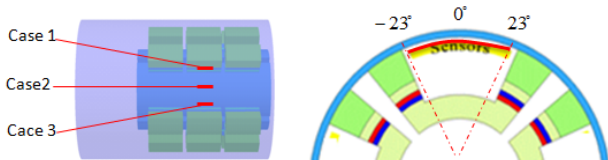
그림 6과 같이 해석용 결함의 축방향 길이는 25mm, 폭은 0.2mm, 깊이는 6.36mm으로 정하였고, 이 결함을 배관의 원주방향으로 세 가지 경우로 나누어 배치시켜 모델링하였다.



<그림 6> 해석용 결함의 크기 및 배관에서의 위치

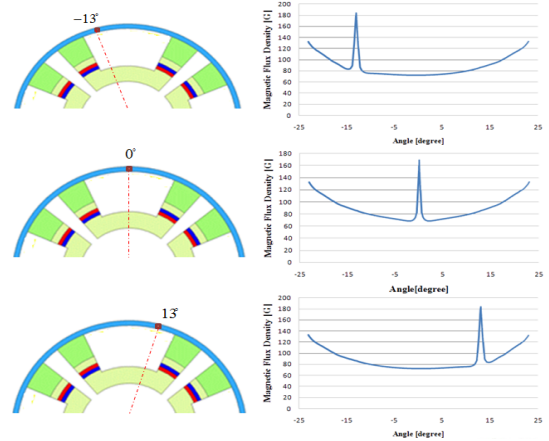
2.2.2 결함 위치에 따른 검출 신호 해석

결함 신호를 검출하기 위해 홀센서를 배관과 평행한 방향으로 3mm 떨어진 곳에 위치시켰다. 그림7은 결함의 위치 선정과 홀센서의 결함 신호 검출범위를 나타낸 것이다.



<그림 7> 3차원 배관 결함의 위치와 센서의 Sensing 범위

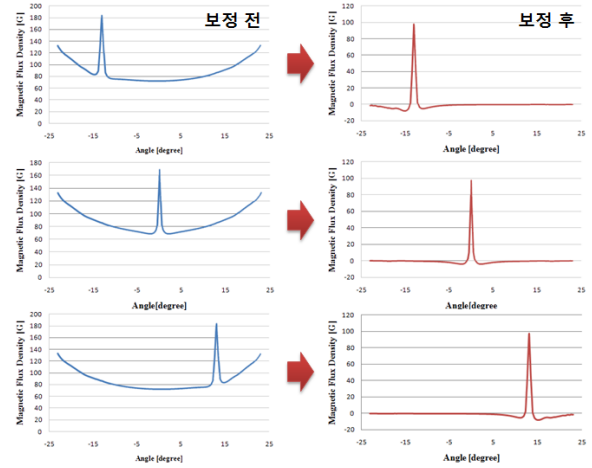
그림8은 배관의 원주방향으로의 결함 위치에 따른 검출 신호를 나타낸 것이다. 센서의 Sensing 각도에 대한 B_z 크기를 분석하였다.



<그림 8> 결함 위치별 검출 신호

2.2.2 결함 판별을 위한 검출 신호의 보정

결함이 없을 때 검출되는 신호를 오프셋으로 두고, 결함이 있을 때의 검출되는 신호에서 오프셋 신호를 Subtraction 처리한다.



<그림 9> 결함 신호의 보정

3. 결 론

본 논문에서는 CMFL 비파괴 검사 방법과 축방향 미소결함의 배관 위치에 따라 발생하는 왜곡 신호를 분석 및 보정하는 방법에 관하여 제안하였다. 본 연구에서 3차원 유한요소해석을 수행한 결과 결함 검출 신호는 100[G] 정도 발생하였고 이 크기는 노이즈인 10[G] 대비 20[G] 이상인 충분한 크기의 수치이다. 본 연구에서 설계한 CMFL을 실제 개발한다면, 논문에서 제안한 결함의 크기와 비슷한 정도의 축방향 미소결함의 검출이 가능할 것이라 판단한다.

본 논문에서는 정자계 해석만을 이용하였으나 차후 와전류, 히스테리시스 모델링에 의한 자화량 분포 해석 등을 수행하면 보다 정확한 결과를 도출할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] K. K. Tandon, "MFL Tool Hardware for Pipeline Inspection," Materials Selection & Design, pp. 75-79, Feb.1997.
 [2] H. Haines et. Al., "Advanced MFL signal analysis aids pipe corrosion detection," Pipeline & Gas Industry, pp. 49-63, March 1999.
 [3] 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.
 [4] M. Li and D. A. Lowther, "The Application of Topological Gradients to Defect Identification in Magnetic Flux Leakage-Type NDT," IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 8, pp. 3221-3224, Aug. 2010.