

도시가스 배관 검사용 자기누설 비파괴검사 시스템의 결함 검출신호 특성 분석

김희민*, 유휘룡**, 노용우**, 박관수*
부산대학교*, 한국가스공사 연구개발원**

Analysis of the characteristics about defect signal of MFL type NDT System for Inspecting City Gas Pipelines

Hui Min Kim*, Hui Ryong Yoo**, Yong Woo Rho**, Gwan Soo Park*
Pusan National University*, Korea Gas Corporation**

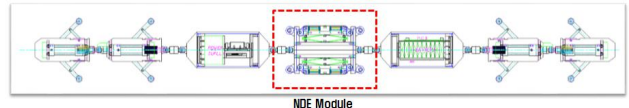
Abstract - 지하 매설된 가스배관을 정기적으로 검사하기 위해서 가스 공급 및 용역업체에서는 주로 비파괴검사 탐상장비인 MFL(Magnetic Flux Leakage) PIG(Pipeline Inspection Gauge)를 사용한다. 기존의 MFL PIG는 배관 내 유체(가스,오일 등)의 진후차단 압력의 흐름을 이용해 별도의 구동장치 없이 피크를 진행시켜 배관의 결함 유무를 평가하는 시스템이다. 하지만 10기압 이하의 낮은 운영압력과 T 분기관과 같이 급격한 곡관부가 존재하는 직경 16인치 이하의 도시가스 배관에는 기존의 시스템을 적용하기 어렵다. 이처럼 기존 MFL PIG의 적용이 불가능한 도시가스 배관(직경 16인치 이하)을 활주하기 위해서는 우선 비파괴검사 시스템을 견인할 수 있는 추진 로봇이 필요하고 추진로봇에 적합한 자기누설 비파괴검사 시스템의 개발이 필요하다. 또한 비파괴검사 장비의 센서 시스템은 결함신호를 탐지하여 결함의 발생유무 및 결함의 형상을 판별하는 성능도 중요하다. 본 논문에서는 16인치 도시가스 배관의 검사를 위한 자기누설 비파괴검사 시스템의 기초설계와 대상 시스템의 자기적 특성을 분석한다. 또한 배관 외벽의 결함 발생 유무에 따른 자기누설 신호의 크기 및 분포변화를 3차원 유한요소법을 이용해 해석하여, 결함 검출 신호의 특성을 분석하는데 초점을 둔다.

1. 서 론

천연가스는 현재 전 세계적으로 석유에 이어 가장 많이 사용되고 있는 에너지 자원중 하나로 활용가치 및 중요성은 점점 더 증가할 전망이다. 뿐만 아니라 새롭게 주목받고 있는 셰일가스의 등장으로 이를 수송하기 위한 가스 배관망의 안정성을 점검하는 일은 점점 더 중요할 것으로 전망된다. 현재 천연가스 공급을 위해 설치된 배관들은 대부분 지하에 매설되어 있는데, 매설된 배관들은 습기나 지압, 수분 등의 외부적인 환경에 장시간 노출되어 있어 부식이나 변형의 가능성이 높고, 이는 폭발과 같은 대형 사고를 유발할 수 있다. 이러한 사고를 미연에 방지하기 위해서는 배관의 정기적인 검사를 통한 유지보수가 반드시 필요하다.

대상 구조물을 파괴하지 않고 손상, 균열, 부식, 피로 부위를 검사하는 방법으로 주로 비파괴검사법을 이용한다. 가스배관과 같이 도진율과 높은 투자율을 동시에 갖는 금속재료의 비파괴검사 방법으로는 특히 전자기적인 방법을 주로 사용하는데, 대표적인 방법으로는 MFL(Magnetic Flux Leakage) 방법이 이에 해당한다. 특히 금속관과 같이 투자율이 상대적으로 큰 강자성체 구조물의 비파괴검사에 대해서는 자기누설 방법이 결함검출 성능에서 가장 우수한 특성을 보인다 [1]-[2].

기존의 MFL PIG는 배관 내 유체(가스,오일 등)의 흐름을 이용해 별도의 구동장치 없이 탐상장비를 진행시켜 배관의 결함 유무를 검사하는 시스템을 뜻한다. 이는 배관 운영 압력이 20기압 이상, 직경이 32인치 이상의 장거리 가스 및 석유 송유관 검사에 적합한 유지보수 방안이었다. 하지만 10기압 이하의 낮은 운영압력과 T 분기관과 같이 급격한 곡관부가 존재하는 직경 16인치 이하의 도시형 가스배관에는 기존의 시스템을 적용하기 어렵다. 이를 위해서는 비파괴검사 장비를 견인하는 스네이크 형태의 로봇이 필요하고, 이에 따라 배관 내부의 상황 및 환경 변화를 인지하여 자율 주행이 가능한 배관 검사용 로봇의 개발에 관한 연구는 현재 활발히 진행되고 있다 [3]. 그러나 도시가스 배관 로봇용 자기누설 비파괴검사 기술의 연구개발은 국내에서 수행된 바 없다. 따라서 도시가스 및 산업용 가스배관 관리 기술의 높은 효율성과 비용절감을 위해서는 배관 추진로봇과 검사 시스템의 자기적 특성 인자 및 설계 변수를 함께 고려한 자기누설 비파괴검사 시스템의 최적설계 및 개발이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 직경 16인치인 도시가스 배관 검사용 자기누설 비파괴검사 시스템의 기초설계 방법을 소개하고 자기적 특성을 3차원 유한요소법을 이용하여 분석하였다. 또한 배관 외벽에 결함이 발생하였을 때 결함 주위에서 자기누설 신호의 크기와 분포가 어떻게 변화하는지와 검출 신호로부터 결함의 형상을 판별하는 방법을 제안하였다 [4]-[5].

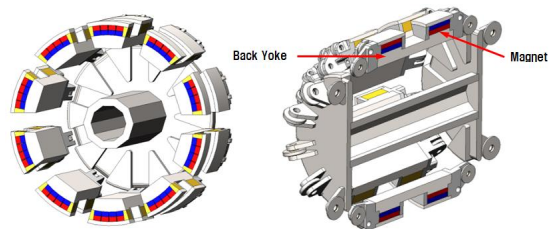


〈그림 1〉 도시가스 배관 검사를 위한 로봇용 MFL 시스템 개요도

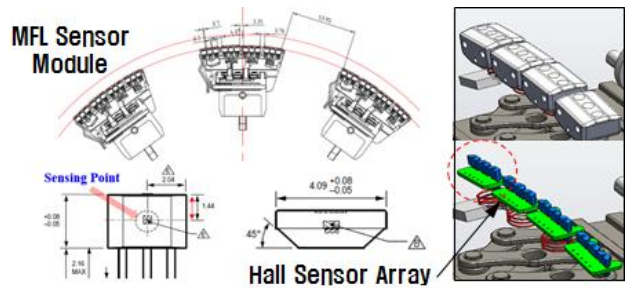
2. 본 론

2.1 자기누설 비파괴검사 시스템의 구조 및 설계

자기누설 비파괴 검사 모듈은 그림 2와 같이 자기회로를 구성한다. 16인치 가스배관을 착자 시키기 위해 회토류 영구자석을 이용하여 자계를 발생시키고, 높은 자기효율을 얻기 위하여 강자성체 재료인 Back-Yoke를 시스템의 몸체로 구성한다. MFL Module을 배관에 적용하여 충분한 자기누설 신호를 얻기 위해서는 먼저 배관을 자기 포화시켜야 한다. 배관의 결함 근처에는 자속의 통과 단면적이 줄어들어 외부로 누설되는 자기신호가 발생하는데, 만약 배관을 자기적으로 충분히 포화시키지 않는다면 누설되는 자기신호의 크기는 작을 것이다. 또한 MFL System에는 각각 10개의 동일한 구조의 모듈이 배관 전체 둘레를 둘러싸고, 배관 내·외벽에 결함이 존재할 때 누설 자기장 신호를 효과적으로 검출하기 위해 각각의 모듈에는 홀센서가 배관의 원주방향으로 나란히 배열된다. 홀센서는 MFL 모듈에서 2개의 영구자석 사이에 위치하고 결함에 의한 자기누설 신호를 검출한다. 이때 홀센서의 위치는 배관 내벽으로부터 2.5mm 떨어진 지점으로 설정하였다.



(a) The structure of MFL Modules



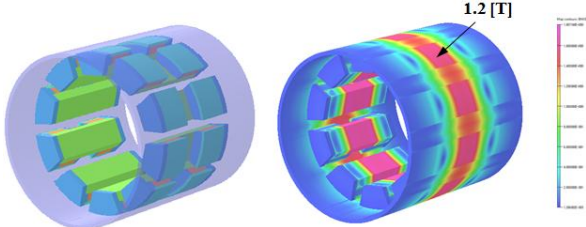
(b) Sensor Modules of MFL Module

〈그림 2〉 도시가스 배관 검사용 MFL 시스템의 구조

2.2 자기누설 비파괴검사 시스템의 전자기해석

그림 3은 3차원 비선형 정자계 유한요소법을 이용하여 MFL Module의 자기장 분포와 크기를 해석한 결과이다. MFL Module은 외부에서 따로 인가되는 전류원이 없으며, 정자계 해석을 수행하므로 시변 자장에 의한 와전류 효과를 고려하지 않는다. 즉, Source는 전류원이 아닌 영구자석이기 때문에 자석의 자화량을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다.

또한 주행로봇에 의해 이동하는 속도는 1m/s이하이므로 MFL 모듈의 속도기전력에 의한 와전류효과는 고려하지 않았다. 배관의 자속밀도 크기를 보면 약 1.2T로 급속 강관의 일반적인 포화자속밀도 값보다 현저히 낮다. 이는 곧 결함이 발생할 때 누설되는 자기신호의 크기가 작다는 것을 의미한다. 일반적으로 높은 결함검출 성능을 구현하기 위해서는 배관을 자기포화시켜 자기누설신호를 극대화 시키는 것이 이상적이지만, 그만큼 배관에 작용하는 자기력이 증가하고 이는 도시가스 배관을 주행하는 로봇 추진력에 영향을 미치기 때문에 자기포화 동작지점을 기존의 1.8T에서 1.2T 까지 낮추어 설계를 하였다.

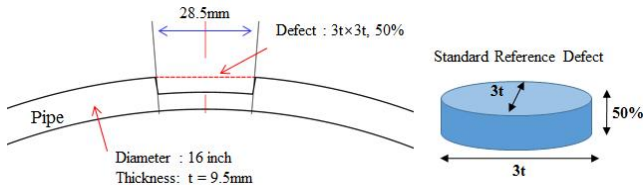


(a) MFL Modeling (b) 배관 및 MFL 모듈의 자속밀도분포

<그림 3> 배관 및 MFL 모듈 모델링 및 자계해석 결과

2.3 결함 검출신호 분석을 위한 표준 기준결함 선정

자기누설 신호를 시뮬레이션하고 실험을 통하여 결함 검출신호를 분석하기 위해서 기준이 되는 표준결함을 선정하였다. 그림 4는 선정된 결함의 치수와 형상을 나타낸다. 16인치 가스배관의 두께 t 를 9.5mm로 정의하고 숫자의 배수 값 만큼에 해당하는 것이 결함의 길이와 폭의 치수이다.

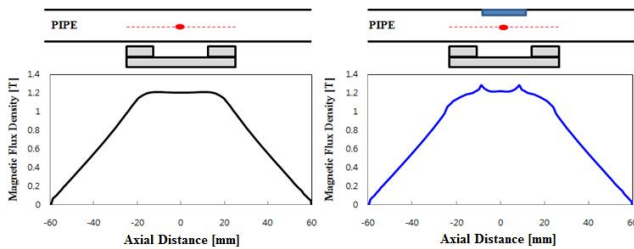


<그림 4> 표준결함의 크기와 형상

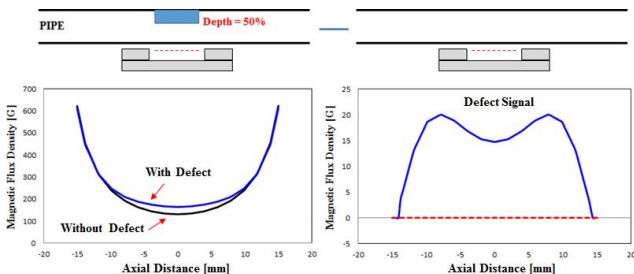
2.4 결함 검출신호 분석

2.4.1 FEM을 이용한 결함 검출신호 분석

가스배관 외벽에 결함이 발생하면 결함 주위에는 누설자속이 발생하고, 누설 자속을 검출하기 위하여 MFL 시스템에서는 홀센서를 이용한다. 그림 5는 배관 결함 유무에 따른 배관 내부의 자속밀도의 크기와 분포를 유한요소법을 이용해 도출한 결과를 나타내며, 이는 자기누설 신호의 발생 원리를 설명한다. 배관 외벽에 결함이 발생하면 배관 내부에 자기저항의 증가로 인해 자속 왜곡현상이 발생하고, 왜곡된 자기신호만큼 홀센서 주위에 누설신호 크기의 증가로 나타난다. 그림 6은 순수한 자기누설 신호를 추출하는 신호보정 방법과 그 크기를 나타낸다. 표준결함 깊이 50% 기준으로 약 20G의 누설자속밀도 값이 계산되었다.



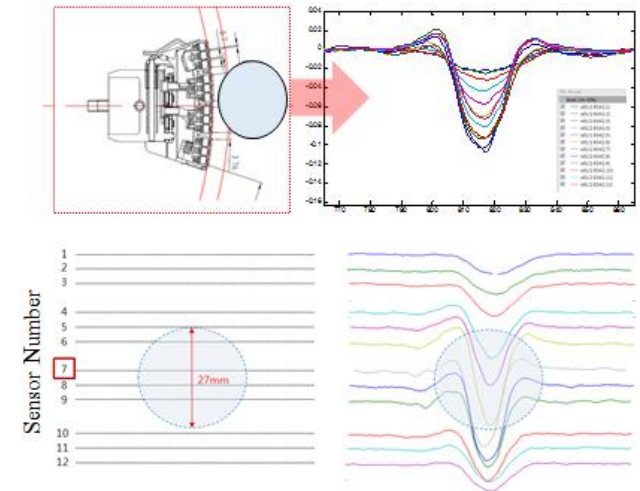
<그림 5> 배관 내부 자속밀도의 크기변화



<그림 6> 배관 내벽 부근의 공극자속밀도 크기변화

2.4.2 결함 검출 실험신호 분석

배관 내부의 자속밀도가 배관 외벽에 발생한 결함에 의해 달라지는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였고, 그림 7은 실제 비파괴검사 시스템 내부의 홀센서를 이용하여 측정된 자기누설 신호를 나타낸 것이다. 그림 7로부터 결함주위를 통과하는 12개의 개별센서 신호에 대해서 축방향 이동거리에 따른 자기누설 신호의 크기변화를 확인할 수 있다. 즉, 각각의 센서 출력전압 파형으로부터 누설 자기장 신호의 크기를 환산할 수 있고, 배관 외벽에 발생한 결함의 크기와 위치를 추정하는 것이 가능하다.



<그림 7> 결함 검출신호의 실험 결과

3. 결론

도시가스 배관과 같이 직경이 작고 낮은 운영 압력 상황의 대상물에 자기누설 비파괴검사법을 적용하기 위해서는 배관을 원활하게 주행하는 스키니크 형태의 로봇이 필요하다. 하지만 자기누설 비파괴검사 기법의 핵심은 배관을 충분히 착자시킨 후 결함이 발생할 때 발생하는 자기누설신호를 측정하는 것이고 착자정도에 따라 배관에 작용하는 부착력은 크게 달라진다. 로봇의 원활한 주행을 위해서는 MFL장비의 배관에 대한 부착력 크기가 상당히 중요하므로 기존의 MFL PIG와 같이 배관을 자기포화 영역으로 착자시켜 결함을 검출하는 것은 한계가 있다. 본 논문에서는 도시가스 배관 검사에 적합한 추진 로봇용 자기누설 비파괴검사 기법에 관한 방법을 제안하였고 수치해석 기법을 이용하여 결함 검출 신호를 분석하였다. 또한 표준결함을 선정하고 모의시험 배관 제작을 통하여 결함신호를 측정하는 기초실험을 수행하였고, 실제 결함 검출신호의 형태와 크기 및 분포를 분석하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. A. Ivanov, Z. Zhang, C. H. Yeoh, L. Udpa, Y. Sun, S. S. Udpa, W. Lord, "Magnetic Flux Leakage Modeling for Mechanical Damage in Transmission Pipelines", IEEE Trans. Magnetics, vol. 34, no. 5, pp. 3020-3023, September 1998.
- [2] G. S. Park, "Analysis of the velocity-induced eddy current in MFL type NDT", IEEE Trans. Magnetics, vol. 40, no. 2, pp.663-666, March 2004.
- [3] P. Laursen, G. Vradis, and C. Swiech, "First Robotic Device To Inspect Unpiggable Gas Transmission Pipeline", Pipeline & Gas Journal, vol. 236, No. 11, November 2009,
- [4] Y. K. Shin and W. Lord, "Numerical Modeling of Moving Probe Effects for Electromagnetic Nondestructive Evaluation", IEEE Trans. Magnetics, vol. 29, no. 2, pp. 1865-1868, March 1993.
- [5] Hui Min Kim, Gwan Soo Park, "A Study on the Estimation of the Shapes of Axially Oriented Cracks in CMFL type NDT System," IEEE Trans. Magnetics, vol. 50, no. 2, 7002504, February 2014.