

가스 파이프라인 상의 압력 부식에 의한 흠집 검사를 위한 원격 와전류 탐상 기술

김대원*

단국대학교 공학대학 컴퓨터학부 멀티미디어공학전공, 충남 천안시 안서동 산 29

(2006년 11월 11일 받음, 2006년 12월 20일 최종수정본 받음)

Magnetic flux leakage(MFL) 신호를 이용하여 비파괴 검사 신호를 획득하는데 주로 사용하는 감지기 또는 금속 덩어리를 의미하는 pig 이용 기술은 일반적으로 천연 가스 전송에 사용되는 강철 파이프라인 상의 대량 부식 흔적을 감지하는데 널리 이용되고 있다. 이를 대체할 수 있는 비파괴 검사 기술의 양상에 대하여 소개 하자면, 지하에 매설된 가스 파이프라인의 바깥 면에 가로축을 따라 난, 부식에 의한 결함에 일반적으로 동반하는 '압력에 의한 부식 흠집(Stress Corrosion Crack : SCC)'을 탐지하는 기술이 있다. 본 논문은 가스 파이프라인 상의 가능성 있는 SCC 검출 장치로서 탐촉자의 원거리에 형성된 다상 회전 전자장 활용 기술에 대하여 논하고 있다. Pig 원형에 대한 묘사와 비파괴 신호 검사용 탐촉자에 대한 설명이 덧붙여져 있으며 결함 검지 장치의 유한 요소 모델링과 연관한 부분에 관하여도 발전적으로 논하였다. 테스트 용 pig를 이용한 초기 실험 결과는 본 논문에서 보이고 있는 비파괴 검사 양식이 가스 파이프 라인인 가로축을 따라 발생한 결함에 매우 민감하게 반응하고 있음을 보이고 있다.

주제어 : 자기물질, 결함, 비파괴검사, 원격 와전류장, 와전류, 압력부식 흠집

I. 서 론

Magnetic flux leakage(MFL) pig는 지하에 매설된 가스 파이프라인 상의 대량 부식에 의한 결함 및 흠집을 탐지하는데 가스 산업 분야에서 널리 쓰이는 기술이다[1]. 이러한 장치들이 널리 사용되는 기본적인 이유는 가스 파이프라인 상의 부식에 의한 침식과 결함들이 적절한 목적의 보드 상에 장착된 홀 소자(Hall element) 센서들에 의해 쉽게 탐지 가능하면서도 동시에 강력한 누수 장(leakage field) 신호를 생성하는 가스 파이프라인상의 가로축을 따라 형성된 자기적 흐름에 불연속적인 부분을 형성하기 때문이다. 가스 파이프라인의 가로축을 따라 난 결함들은 기존의 일반화된 MFL 장비로는 쉽게 탐지하기가 어려운데 이것은 이러한 결함들이 파이프라인의 가로축을 따라 흐르는 여자의 흐름에 수직인 방향으로 큰 부피를 갖지 않기 때문이다. MFL pig를 이용한 비파괴 검사 기법이 파이프라인 상의 압력 부식에 의한 결함 같이 가로축을 따라 난 흠집들을 탐지하는 장치로 쓰이기 위해서는 이를 대체할 만한 MFL 실험 양태가 필요하다. 그동안 여러 가지 대체 실험 방법들이 제시되었는데[2], 이것들은 1차 자기의 흐름을 파이프라인의 가로축을 따라 난 결함에 수직인 방향으로 자장의 흐름을 갖는 속도 유도 전류를 사용하는 방법을 포함하고 있다. 본 논문은 다상 회전 전자장을 전 기장과 자기장을 형성하는데 사용하는 방법에 대하여 묘사하

고 있는데 이들 전자장은 파이프라인 상의 가로축 방향과 일치하는 SCC 결함에 수직인 방향의 성분을 포함하고 있다. [3]은 유도된 와전류장이 파이프라인의 외부 직경 방향에서 안쪽의 방향으로 쇠퇴하는 양상을 띤 여자기로부터 약간의 거리를 두고 떨어진 곳에 위치한 자기 회로의 원격 전자장으로 부터 측정된 값들을 보이고 있다. 본 논문의 다음 장들은 원격 장이 형성되는 지역에서의 회전 장 현상을 시뮬레이션하는 것에 대한 모델링 기법에 대하여 논하고 있다. 실험에 쓰인 테스트용 검사 장비인 pig에 대한 묘사와 실험 결과가 제시되었는데 이런 양상을 띤 실험 장치와 방법은 가스 파이프라인의 가로축을 따라 난 시뮬레이션 용 결함에 매우 민감한 반응을 보이고 있다.

II. 원격 와전류장 시뮬레이션

본 문제를 위한 주 수식은 Maxwell-Ampere 법칙과 Maxwell-Faraday 법칙에 의해 주어지는데 이는 다음과 같다.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint \vec{j} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -j\omega\mu \iint \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

이들 수식은 다음의 조직 성분과 중간 매개체 사이의 연결 조건에 해당하는 수식들을 활용한다.

$$H_{t1} = H_2 \quad (3)$$

*Tel: (041) 550-3487, E-mail: dr_dwkim@dankook.ac.kr

$$B_{n1} = B_{n2} \quad (4)$$

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (5)$$

$$J = \sigma \bar{E} \quad (6)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (7)$$

유한 요소 분석 기술에 기반한 선행 연구는 SCC에 대하여 원주축과 일치하는 파이프라인 상의 전류 민감도를 측정하기 위하여 기존의 일반적인 MFL pig의 원경 장 지역 내에 촘촘히 생성된 결함을 모델링 하는 것에 관한 것이다[4, 5]. 다 상에 의해 형성된 전자장을 모델링 하기 위해서는 파이프라인을 구성하는 물질 특성의 비선형성 효과와 파이프라인 가로축 방향 상의 센서 속도, 원주 축 방향으로의 시간 변화에 따른 가변적인 전자장 등이 구성 요소로서 필요하다. 모델링을 통하여 생성된 mesh는 파이프라인 상의 원경 전자장의 구역과 촘촘한 크기의, 거의 부피가 0에 가까운 결함들을 반드시 형상화 할 수 있어야 한다. 따라서 결과적으로는 최종 완성된 비파괴검사 시스템의 외면적 형태 모델은 비선형성과 시간 가변성을 다룰 수 있는 반복 과정 중심의 거대한 유한 요소 mesh를 만들어 내게 된다.

III. 실험 장치 Setup

실험 장치는 3상 전력 공급기와 전선이 감긴 형태의 유도 모터 회전자, 그리고 록-인 증폭기(Lock-In Amplifier: LIA), 개인용 컴퓨터와 그에 기반한 모터 컨트롤러 등으로 구성되어 있다. 실험을 수행하기 위하여 직경 215.9 mm의 깨끗한 파이프라인의 외벽에 네 종류의 서로 다른 깊이의, 튕을 이용하여 만든 인위적인 파이프라인 상의 결함들을 배치하였다. 각각의 결함들은 25.4 mm 길이에 4.7 mm 파이프 벽 두께의 80%, 60%, 40%, 20% 깊이에 맞게 만들어졌다. 이러한 결함들에 대한 치수가 Table I에 나와 있다.

원경 전자장의 외연을 지정한 후 여자 코일의 위치가 정해졌다. 그리고 나서 이 실험에서 사용되는 차동 센서인, 결함 신호를 획득하는 코일로 구성된 센서가 유도 모터 회전자의 중심으로부터 990 mm 떨어진 곳에 위치 하였다. Fig. 1은 실험 장비의 set-up 형태를 보여 주고 있다. 유도 모터 회전자는 3상 전력 공급기에 의해 전류가 흐르게 되고 신호 획득 센서는 파이프라인 내에서 원주 축에 맞게 회전할 수 있도록 만들어진 원 모양의 디스크 내에 놓여지게 되는데 평면도와

Table I. Dimensions of defects [mm].

Defects	80%	60%	40%	20%
Depth	3.8	2.8	1.9	0.9

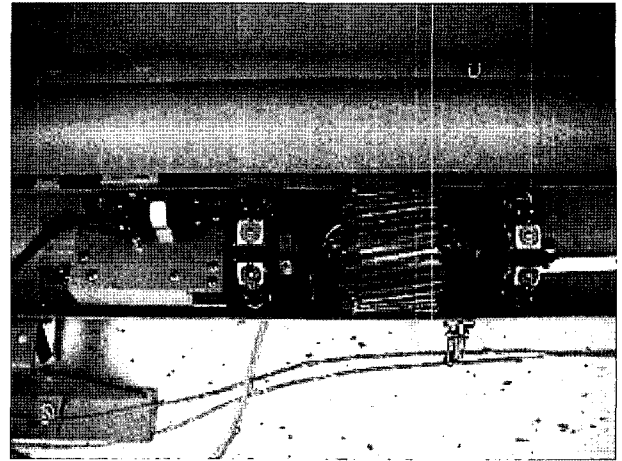


Fig. 1. Experimental setup of RFEC system.

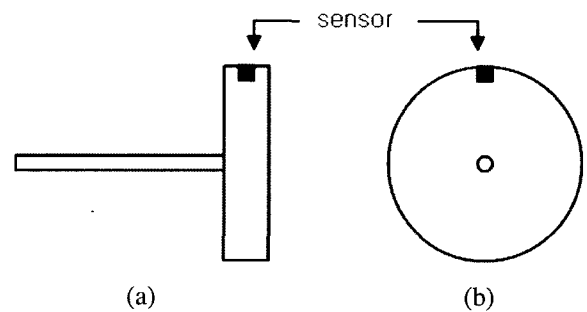


Fig. 2. Structure of a sensor in a disk, (a) side view (b) front view.

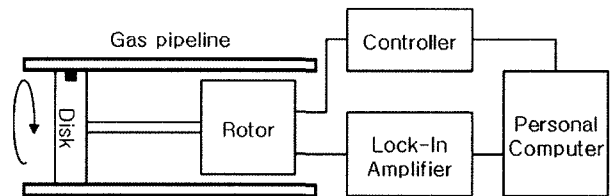


Fig. 3. Schematic diagram of RFEC system.

측면도가 Fig. 2에 나타나 있다.

이 원 모양의 디스크에 홈을 파고 센서를 넣은 후 파이프라인 내에서 회전 운동을 할 때 파이프라인 내부를 스캔 하게 된다. 이 디스크는 개인용 컴퓨터와 연결된 컨트롤러에 의해 통제되고 PC에 기반한 모션 컨트롤러는(Arrick, MD-2) 신호 획득용 센서가 들어있는 디스크의 회전 운동을 제어하게 된다. 신호 획득 용 코일로부터 얻어진 신호는 적절한 이득률을 이용하여 사전 증폭되고 증폭된 신호는 LIA(Ithaco 3981)에 입력되는데 이 신호는 낮은 양으로 증폭된 유도 전류 신호의 위상과 크기를 측정하는데 사용된다. LIA는 외부에 PC와 연결되어 원경 신호를 입력하는 모듈과 PC 내부에 장착된 신호 증폭용 보드로 구성된다.

참조 주파수 신호는 3상 전력 공급기로부터 나와서 다시

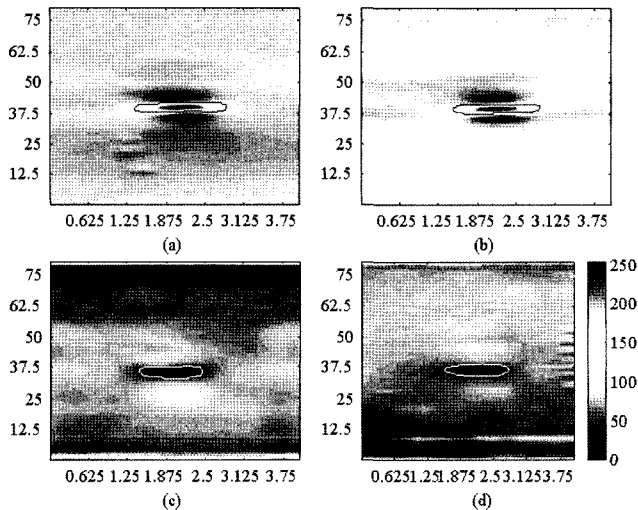


Fig. 4. Detection of phase signal for defects, (a) 80 %, (b) 60 %, (c) 40 %, (d) 20 % depth.

LIA의 메인 보드로 들어간다. LIA의 출력 신호는 위상과 크기인데 이들은 데이터 획득 시스템에 의해 PC에 저장된다. Fig. 3에 전체적인 schematic diagram이 나와있다.

IV. 결 과

신호 획득 용 코일 센서는 실험 용 가스 파이프라인 벽의 원격 장 내의 외부 직경에서 내부 직경 방향으로 침투해 흐르는 전자장의 변화를 측정한다. 본 논문에서 제시한 RFEC (Remote Field Eddy Current) 스캐닝은 2차원의 이미지 데이터를 획득할 수 있도록 실시되었다. 첫 번째로는 센서를 담은 디스크가 원주 축에 맞게 회전 운동으로 움직였고 다음에 파이프라인의 가로축을 따라 움직이면서 신호를 획득하였다.

Fig. 4는 각각의 4개 결함들에 대한 스캐닝 결과를 보여 주고 있다. 이 그림에서 x축과 y축은 파이프라인의 가로축과 원주 축에 대하여 각각 인치(inch)와 각도(degree) 단위 증가에 따른 스캐닝 결과를 나타낸다. 위상 신호는 획득된 후 적절한 사 후 신호 처리과정을 거쳤고 위상 신호의 미분 계수들은 Wavelet을 이용한 잡음 제거 알고리즘에 의해 필터링 과정을 거쳤다. 그리고 이렇게 얻어진 2차원 이미지 상의 결함 신호에 해당하는 부분의 경계선을 검출해 내는 알고리즘

을 사용하여 결함 부위의 테두리 부분을 측정하였다. 차 후 연구는 최근 설치된 가스 파이프라인 상의 가로축에 순응하는 부식 결함 신호(SCC) 들을 탐지해 내는 실험을 진행 할 계획이며 그 후 실제 필드 상에서 사용 가능한 실제 크기의 pig 원형을 만드는 설계 작업을 진행 할 예정이다.

V. 결 론

본 논문에서는 회전하는 전자장내에서의 pig를 이용한 실험이 가스 파이프라인의 가로축을 따라 난 촘촘한 크기의 결함들에 매우 민감함을 보여 주었다. 실험을 진행 하면서 센서가 장착된 원형 디스크와 원격 와전류장을 생성하는 rotor, pc와 연결되어 파이프라인내의 디스크 움직임을 제어하는 컨트롤러, 그리고 센서로부터 받은 신호를 증폭시키는 록-인 증폭기 등을 포함한 장치 등을 조합하여 측정 장치 set-up을 구성하였다. 원격 와전류장에 의한 스캐닝 실험 결과로는 다양한 크기로 패인 가로축 방향의 파이프라인 두께 대비 20 %, 40 %, 60 %, 80 % 깊이의 결함들이 적절히 감지됨을 확인하였다. 원격 와전류장의 원리에서 유추 가능하듯이 결함의 깊이가 깊어질수록 스캐닝 결과가 확연해짐을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] L. Udpa, S. Mandayam, S. S. Udpa, Y. S. Sun, and W. Lord, "Developments in gas pipeline inspection technology", *Materials Evaluation*, **54**(4), 467 (1996).
- [2] G. Katragadda, J. T. Si, W. Lord, Y. S. Sun, S. S. Udpa, and L. Udpa, "Alternative magnetic flux leakage modalities for pipeline inspection", *IEEE Transactions on Magnetics*, **32**(3), 1581 (1996).
- [3] W. Lord, Y. S. Sun, S. S. Udpa, and S. Nath, "A finite element study of the remote field eddy current phenomenon", *IEEE Transactions on Magnetics*, **24**(1), 435 (1988).
- [4] G. Kobidze and W. Lord, "Tight crack modeling for the finite element simulation of inspection tools in pipelines", *Materials Evaluation*, **56**(10), 1223 (1998).
- [5] S. Yang, Y. Sun, L. Udpa, S. S. Udpa, and W. Lord, "Application of perturbation methods in finite element analysis of stress corrosion cracking", *IEEE Transactions on Magnetics*, **36**(4), 1714 (2000).

Remote Field Eddy Current Testing for Detection of Stress Corrosion Cracks in Gas Transmission Pipelines

Daewon Kim*

Multimedia Engineering, Dankook University, Cheonan, Chungnam, Korea

(Received 11 November 2006, in final form 20 December 2006)

Magnetic flux leakage (MFL) pigs are traditionally used for the detection of gross corrosion on steel pipelines used for the transmission of natural gas. Alternative nondestructive evaluation (NDE) modalities are required for the detection of stress corrosion cracking (SCC) which tends to exist in colonies oriented axially along the length of the pipeline. This paper describes the use of multi-phase rotating magnetic fields in the remote region of the probe as a possible SCC detection mechanism. Details of a prototype pig and test rig are given and the challenges associated with the finite element modeling of the device are discussed. Initial experimental results show that this novel NDE modality is sensitive to axially oriented tight cracks.

Keywords : magnetic materials, defects, nondestructive evaluation, remote field, eddy current, stress corrosion cracks