

축방향 미소결함 검출을 위한 자기누설 비파괴 검사 방법에 관한 연구

윤승호 · 박관수*

부산대학교 전자전기공학과, 부산시 금정구 장전2동, 609-735

(2010년 12월 31일 받음, 2011년 2월 21일 최종수정본 받음, 2011년 2월 23일 게재확정)

비파괴 검사방법 중 자기누설 방법을 이용한 비파괴 검사방법은 높은 자기 투자율을 갖고 있는 배관 검사에 적합하다. 자기누설 방식이 적용된 시스템을 MFL PIG라고 하는데 이전 MFL PIG는 금속 손실이나 부식과 같은 결함을 검출하는 데 높은 성능을 보인다. 하지만 MFL PIG는 배관 내·외부의 압력차에 의해 발생하는 크랙을 검출하는데 어려움이 있다. 크랙은 매우 가늘고 길게 발생하기 때문에 축방향으로 자기장을 형성하는 기존의 MFL PIG에서는 자기장이 통과하는 크랙의 단면적이 변화가 거의 없게 된다. 크랙은 배관에서 빈번히 발생하는 결함으로 사고의 위험은 금속 손실이나 부식에 의한 것보다 훨씬 크다. 그러므로 크랙을 검출하기 위한 새로운 PIG가 연구 개발 될 필요가 있다. CMFL PIG는 자기장을 원주방향으로 형성하여 크랙에서의 자기 누설을 최대화할 수 있다. 본 논문에서는 3차원 비선형 유한요소해석법을 이용하여 CMFL PIG를 설계하고 자기장 분포를 분석하였다. CMFL PIG를 이용하여 NACE의 표준인 크랙을 검출할 수 있고 크랙의 형상을 추정하기 위해 많은 종류의 크랙에 대해 자기장의 누설을 분석하고 신호 처리를 통해 형상 추정을 하였다.

주제어 : 자기누설, 비파괴 검사, 축방향 미소결함, 배관검사, 유한요소해석

I. 서 론

전 세계적으로 널리 이용되는 에너지원으로서 석유와 천연 가스가 있다. 이러한 에너지원은 배관을 통해 수요처에 공급이 되는데 배관은 대부분 지하에 매설되어 있다. 지하에 매설된 배관은 습기나 지압 등 외부 환경에 장시간 노출되기 때문에 부식이나 변형에 의한 결함이 생긴다. 결함에 의해 사고가 발생할 수 있으며 이를 미연에 방지하기 위해서는 배관의 정기적인 유지 및 보수가 필요하다. 배관을 검사하기 위한 방법으로 여러 비파괴 검사 방법[1, 2] 중 투자율이 큰 금속배관을 검사하는데 적합한 자기누설(Magnetic Flux Leakage) 비파괴 검사 방법이 널리 이용된다[3, 4]. 배관에 적용된 비파괴 검사 기술을 탑재한 시스템을 PIG(Pipeline Inspection Gauge)라고 하며 자기누설 비파괴 검사 시스템을 MFL PIG라고 한다.

일반적으로 배관 내부는 에너지원의 공급을 위해 높은 압력을 유지한다. 따라서 배관 내부와 외부의 압력 차이는 매우 크며 이 상태로 장시간 운용되면 배관에 작용하는 스트레스로 인해 배관 표면에 미세한 결함이 발생하게 된다. 이러한 결함은 육안으로 확인하기 어려울 만큼 폭이 좁고 배관의 축방향으로 길게 발생하는 특징이 있다. 또한 부식과 같은 결함에 비해 크기가 매우 작고 발생빈도는 부식에 의한 결함 이상으로 빈번하게 발생한다. 기존에 연구되어 개발된 MFL PIG는 부식과 같은 결함의 검출 성능이 뛰어나지만 축방향으

로 발생하는 미소결함에 대해서는 자기장 인가 방향의 구조적 문제로 인하여 검출에 어려움이 있다. Fig. 1에 나타난 MFL PIG는 배관의 축방향으로 자기장을 형성하기 때문에 축 방향을 따라 발생하는 미소결함의 유무에 따른 자기장 통과 단면적의 변화가 거의 없게 된다. 단면적의 변화가 없기 때문에 누설 자기장이 발생하지 않으며 축방향 미소결함을 검

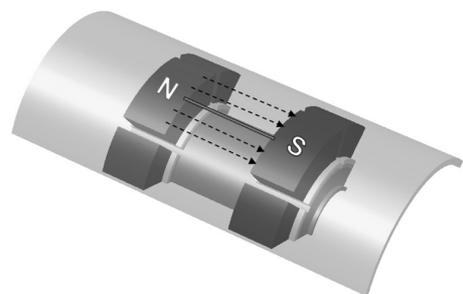


Fig. 1. Magnetic field distribution of MFL PIG



Fig. 2. Magnetic field distribution of CMFL PIG

*Tel: (051) 510-2788, E-mail: gspark@pusan.ac.kr

출하는 데 한계가 있다. 따라서 자기장을 원주방향으로 인가하도록 구조를 변경시켜 크랙에서의 자기장 통과 단면적을 최대로 만들 필요가 있다[5-7].

본 논문에서는 Fig. 2와 같이 자기장을 원주방향으로 인가하는 CMFL(Circumferential MFL) PIG를 이용하여 그림에서 보이는 축방향 미소결합에서의 누설 자기장이 최대가 되도록 구조를 설계하고 자기장 해석 기법을 이용하여 결함의 형상 및 위치에 따른 자기장 분포를 해석하고 분석하여 이를 활용하는 기법을 제안하였다.

II. 자기누설 비파괴 검사기의 원리 및 구조

1. 자기누설 비파괴 검사의 동작원리

배관 검사용 자기누설 비파괴 검사 시스템은 Fig. 3과 같이 금속배관을 착자시키기 위해 영구자석을 이용하여 자기장을 인가하며 전체 시스템은 자기회로를 구성한다. 배관의 결함을 검사하기 위하여 비파괴 검사 시스템은 배관을 자기 포화시키며 배관을 따라 이동하면서 검사를 수행한다. 배관에 결함이 있을 경우 결함 부분의 자기장이 통과하는 단면적이 줄어들어 배관의 비선형적 자기 특성에 의해 자기저항이 증가하게 되고, 이로 인해 인가 자기장에 의한 자속이 모두 배관을 통과하는 것이 아니라 외부로 누설된다. 이 배관의 외부로 누설되는 자속을 누설 자속이라고 하며, 외부에서 자속 또는 자속밀도를 측정할 수 있는 센서를 이용하여 누설 자속을 측정한다. 따라서 결함이 있는 경우와 결함이 없는 경우에 따라 센서를 통해 측정되는 누설 자속의 양이 변화하게 되고 이를 센서로 검출하여 결함의 유무를 판별한다. 누설 자속의 변화에 의해 결함을 판정하고 측정된 누설 자속의 변화량에 따라 결함의 형상을 추정할 수 있다.

2. 자기누설 비파괴 검사기의 구조

배관 검사용으로 사용되는 PIG 중 배관에서 발생하는 결함을 판정하기 위해 사용되는 일반적인 MFL PIG는 Fig. 4와 같다. MFL PIG는 배관을 착자시키기 위한 자기장 인가 시스템과 결함에 의해 발생하는 누설 자기장을 측정하기 위

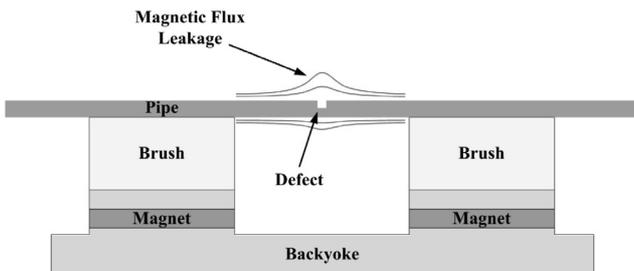


Fig. 3. Structure of the MFL testing method.

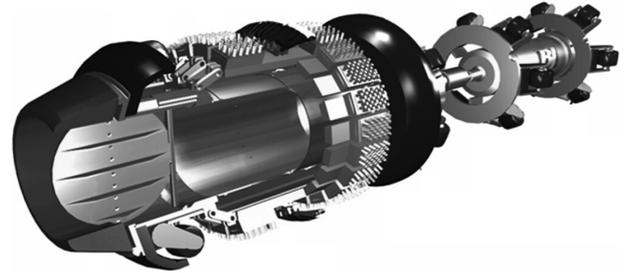


Fig. 4. Structure of MFL PIG.

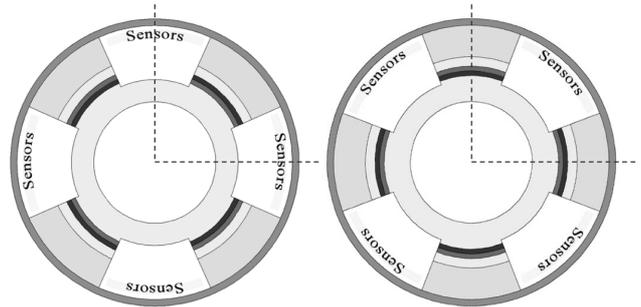


Fig. 5. Two modules of the CMFL PIG.

한 센서 시스템으로 구성된다. 배관을 착자시키기 위한 자기장 인가 시스템은 네오디뮴 자석, 백요크, 브러쉬를 이용하여 배관을 자기 포화시키도록 구성된다.

CMFL PIG는 MFL PIG와 달리 축방향 미소결합을 검출하기 위해 Fig. 2와 같이 원주방향으로 자기장을 형성한다. Fig. 1에서 MFL PIG는 축방향으로 긴 결함에 대해서 누설 자기장이 발생하지 않는 것을 볼 수 있으며 Fig. 2에서 CMFL PIG는 결함 부분에서 자기장이 통과하는 단면적의 변화가 가장 크기 때문에 누설 자기장 또한 가장 크게 된다. 따라서 원주방향으로 자기장을 형성하도록 구조를 설계할 필요가 있다.

CMFL PIG는 모든 축방향 결함에 대한 누설 자기장을 검출하여야 하기 때문에 배관의 모든 부분에서 자기 포화되는 영역을 가져야 하므로 Fig. 5와 같이 원주 방향의 coverage 영역이 다른 두 개의 모듈을 가질 필요가 있다. 두 모듈의 구조는 동일하며 축방향에 대해 45°만큼 차이가 나도록 연결하여 제작한다.

III. 자기누설 비파괴 검사 시스템의 설계

1. 배관의 자기 포화 설계

검출에 충분한 누설 자속을 얻기 위해서는 우선 배관을 자기 포화시켜야 한다. 결함 부분에서 자기장의 통과 단면적이 줄어들게 되는데 배관을 자기적으로 포화시키지 않으면 자속

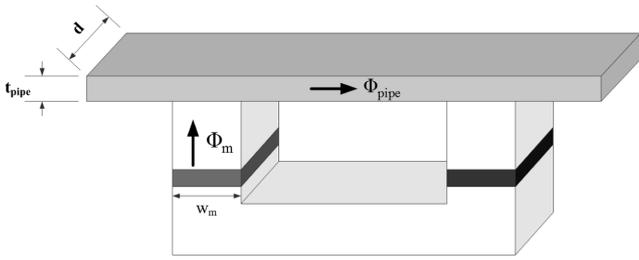


Fig. 6. Magnetic flux in the magnet and the pipe.

이 외부로 충분히 누설되지 않고 배관을 따라 통과하게 된다. 배관을 자기 포화시키게 되면 결함 부분에서 자속은 배관을 따라 통과하기 힘들어지므로 결함 외부로 누설되어 흐르려고 한다. 따라서 자기 누설 비파괴 검사 시스템을 설계하기 위해서는 우선 배관을 자기 포화시킬 수 있는 구조를 설계하여야 한다.

배관의 포화 자속밀도는 1.6~1.8 T이다. Fig. 6에서 누설을 고려하여 배관을 통과하는 자속과 자석에서 발생하는 자속의 관계식은 식 (1)과 같다. 여기서 λ는 누설계수로서 자석에 의해 발생된 자기장이 검사 시스템 외부로 누설되는 것과 배관에서 자기 포화되는 것을 고려한 것으로 약 0.5~0.6의 값을 가진다.

$$\Phi_{pipe} = \lambda \cdot \Phi_m \quad (1)$$

배관을 통과하는 자속을 식 (2), 자석에 의한 자속을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{pipe} = \int_S B_{pipe} \cdot dS_{pipe} \approx B_{pipe} \cdot t_{pipe} \cdot d \quad (2)$$

$$\Phi_m = \int_S B_m \cdot dS_m \approx B_m \cdot w_m \cdot d \quad (3)$$

여기서 B_{pipe} 는 배관의 자속밀도, S_{pipe} 는 배관의 자기장 통과 단면적, B_m 는 자석의 자속밀도, S_m 는 자석의 자기장 방향의 단면적, t_{pipe} 는 배관의 두께, d 는 자기장 인가 시스템의 길이, w_m 은 자석의 폭이다. 식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 최적의 영구자석의 폭에 관한 식을 구할 수 있다.

$$w_m = \frac{1}{\lambda} \cdot t_{pipe} \cdot \frac{B_{pipe}}{B_m} \quad (4)$$

2. 자기장 인가 시스템의 구조 설계

CMFL PIG에 이용되는 자석은 잔류 자속밀도가 1.24 T이고 보자력은 880,000 A/m인 네오디뮴 자석을 이용하며 식 (4)에서 계산된 최적의 폭 64 mm를 이용하고 길이는 180 mm, 높이는 25 mm이다.

배관은 후판 재질 중 파이프용 압연 강판을 이용한다. 백요크는 배관을 충분히 자기 포화시키고 CMFL PIG의 자기

효율을 높이기 위해서 사용되는데 단면적이 너무 작으면 자기 포화 레벨에 가까워지기 때문에 자기효율이 떨어지고 단면적이 너무 크면 자기효율은 크지만 구조적 문제가 발생한다. 백요크의 구조는 외경 220 mm, 내경 160 mm인 원통형 구조를 한 모듈 내 4개의 자기장 인가 시스템이 들어가도록 4등분하여 각각 10°의 공극을 가지도록 설계한다. 백요크의 자화 곡선은 Fig. 7에 나타내었다. 브러시는 얇은 철판을 묶은 판 브러시 구조를 가지며 자기장 해석 시 자기이력 곡선을 따르지 않고 점적률을 고려한 투자율 값인 10을 대입하여 해석을 수행한다.

설계한 CMFL PIG의 자기장 인가 시스템을 Fig. 8에 나타내었다.

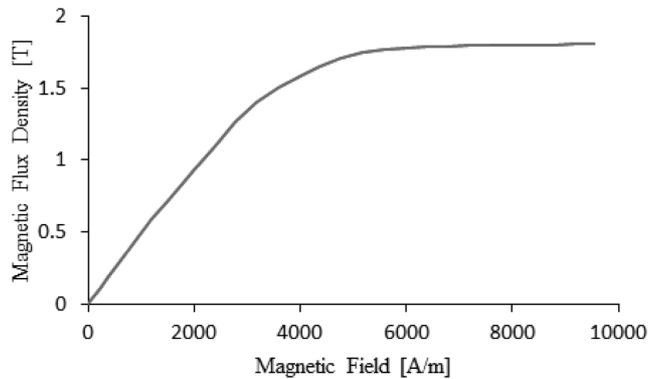
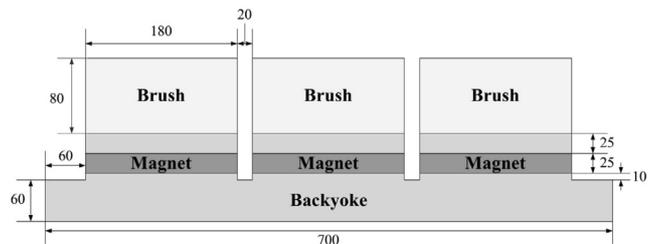
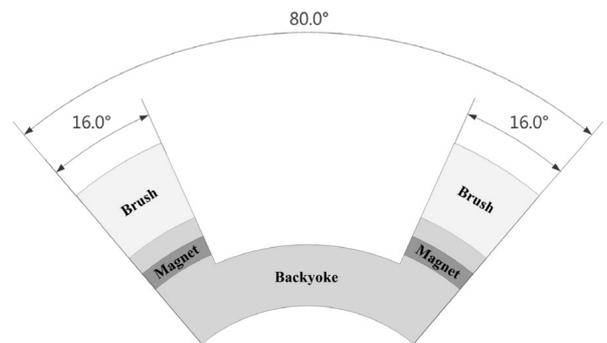


Fig. 7. Magnetization curve of the yoke.



(a)



(b)

Fig. 8. Drawings of CMFL PIG; (a) Side view, (b) Front view.

IV. CMFL PIG의 자기장 분포 해석

1. 3차원 정자기장 비선형 유한요소해석

변위 전류를 무시할 경우 Maxwell 방정식과 보조 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \tag{5}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{6}$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{7}$$

여기서 \vec{H} 는 자기장의 세기, \vec{J} 는 전류밀도, μ 는 자기 투자율, \vec{A} 는 자기 벡터 포텐셜이다. 식 (5), 식 (6)과 식 (7)로부터 다음 식이 유도된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \tag{8}$$

식 (8)의 좌변에 식 (9)에 나타낸 vector identity를 적용하면 식 (10)와 같다.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla \cdot (\nabla \vec{A}) \tag{9}$$

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \vec{A} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \vec{A} \right) = \vec{J} \tag{10}$$

Coulomb Gauge 조건에 따라 자기 벡터 포텐셜의 발산은 0이므로 식 (10)은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \vec{A} \right) = \vec{J} \tag{11}$$

본 논문에서는 외부에서 인가되는 전류원이 없으며 영구자

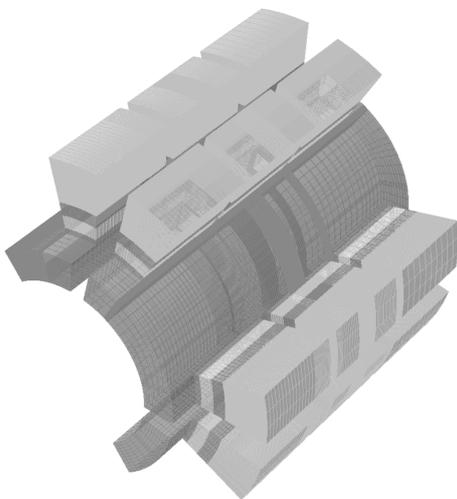


Fig. 9. Separated elements diagram of the CMFL PIG.

석에 의한 정자기장 해석만을 고려하고 시변 자장에 의한 와전류 효과를 고려하지 않으므로 식 (11)에서 \vec{J} 를 0으로 치환할 수 있다. 이 정자기장 모델의 기저력은 영구자석에 의한 것이므로 영구자석의 자화량 \vec{M} 을 고려하여 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$-\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \vec{A} \right) = \nabla \times \vec{M} \tag{12}$$

위와 같은 편미분 방정식의 형태로 된 식의 해를 바로 계산하여 구하는 것은 어렵기 때문에 수치 유한요소해석법을 이용하여 식 (13)과 같은 요소행렬식을 유도할 수 있다.

$$[K_{ij}] [U_j] = [F_j] \tag{13}$$

여기서

$$[K_{ij}] = \begin{bmatrix} k^{xx} & k^{xy} & k^{xz} & k^{x\phi} \\ k^{yx} & k^{yy} & k^{yz} & k^{y\phi} \\ k^{zx} & k^{zy} & k^{zz} & k^{z\phi} \\ k^{\phi x} & k^{\phi y} & k^{\phi z} & k^{\phi\phi} \end{bmatrix}, \quad [U_j] = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ \phi \end{bmatrix}, \quad [F_j] = \frac{V^\theta}{4} \begin{bmatrix} J_{ox}^\theta \\ J_{oy}^\theta \\ J_{oz}^\theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

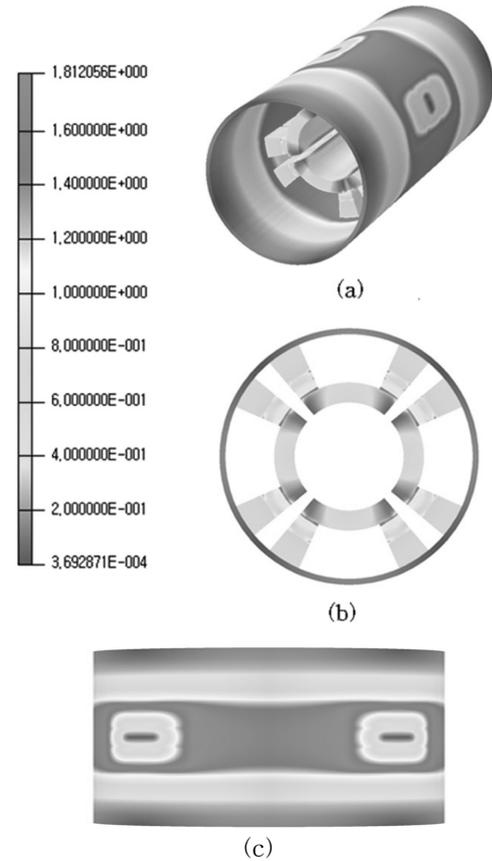


Fig. 10. Magnetic field distribution of CMFL PIG; (a) Full view, (b) Front view, (c) Top view.

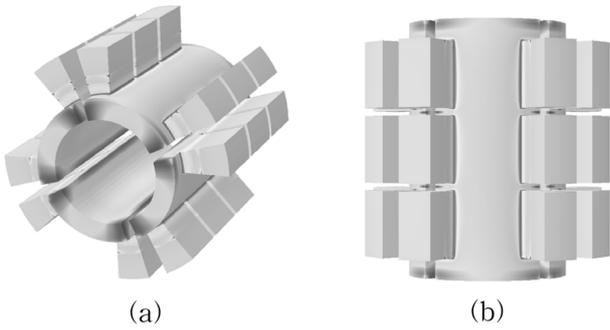


Fig. 11. Magnetic field distribution of the magnetizer; (a) Full view, (b) Top view.

이다. 이를 전 요소에 대입하여 계 행렬(system matrix)을 만들고 경계 조건을 적용한 후 행렬식을 풀어서 해석한다. Fig. 9는 CMFL PIG 모델의 요소분할도를 나타낸 것이다.

Fig. 10과 Fig. 11에 CMFL PIG의 3차원 자기장 해석 결과를 나타내었다. Fig. 10은 PIG 전체를 해석하여 나타낸 자기장 분포이며, Fig. 11은 Fig. 10에서 배관을 뺀 자기장 인가 시스템 부분만 나타내었다.

배관 내부의 자기장 값을 나타낸 Fig. 12에 의해 배관을 충분히 자기 포화시키는 구조를 설계했다는 것을 알 수 있

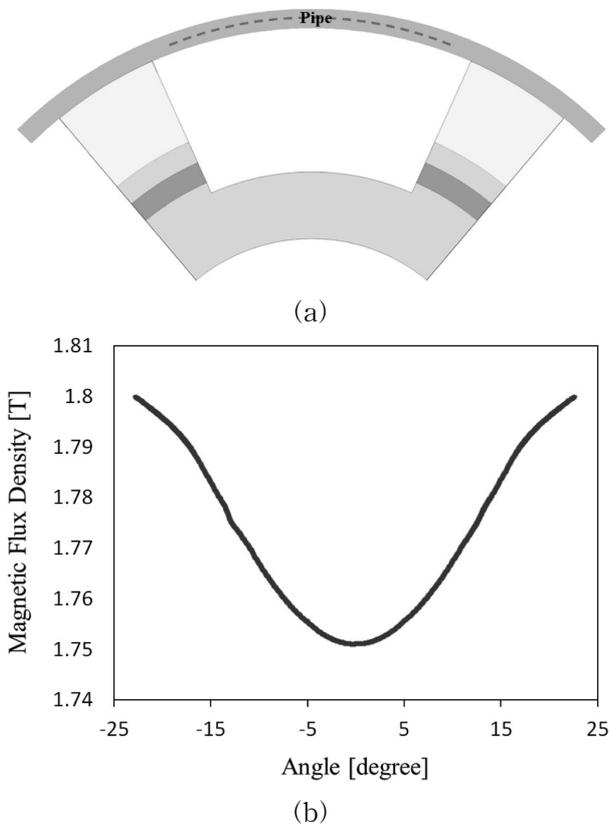


Fig. 12. Magnetic field distribution in the pipeline; (a) Inside of the pipeline, (b) Magnetic field distribution along the line.

며, 이 때 배관의 포화 자속밀도는 1.75~1.8 T이다. Fig. 13은 배관의 직하부 3 mm 떨어진 부분인 센서 위치에서의 자기장 값을 나타낸 것이며, 자속밀도는 0.0073~0.013 T이다. Fig. 12와 Fig. 13에서 보듯이 자기장 인가 시스템의 중심부에서 자기장이 약해지는 것은 자기장 인가가 되는 부분으로부터 거리가 멀고 자기장의 최소 경로가 아니기 때문에 자기장의 누설에 의한 영향으로 볼 수 있다. 따라서 자기장 인가 시스템과 배관의 접촉면 부근의 자속밀도가 가장 크며 중심으로 갈수록 누설에 의한 영향에 의하여 자속밀도는 줄어드는 것을 알 수 있다.

2. 결함에 따른 검출신호 분석

기준 축방향 미소결함의 크기는 폭 0.1 mm, 길이 25 mm, 두께 25%이다. 두께는 배관 두께 17.5 mm에 대해 결함이 차지하는 깊이를 나타낸다. 배관에 결함이 발생하면 결함이 있는 부분에서 누설 자기장이 발생한다. 홀센서를 이용하여 원주 방향의 누설 자기장을 측정하게 되는데 Fig. 13에서 센서의 각 위치별 결함이 없을 때의 자기장 오프셋이 일정하지 않은 것을 알 수 있다. 중심 부분으로 갈수록 자기장이 약해지는 것을 알 수 있으며, 센서 시스템 제작 시 센서 위치별 자기장 오프셋을 다르게 주어야 한다는 것을 알 수 있다. 오

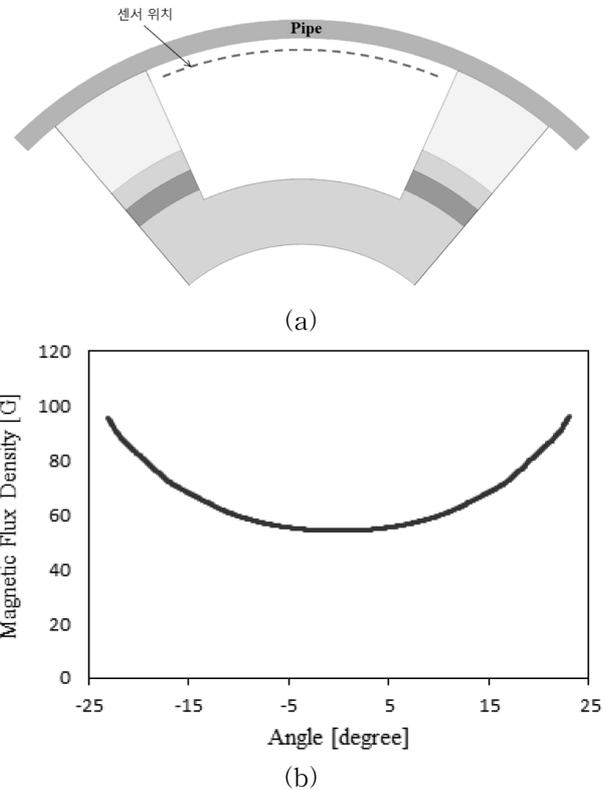


Fig. 13. Magnetic field distribution at sensing position; (a) Sensing position, (b) Magnetic field distribution along the line.

프셋 값에 대한 결함에 따른 누설 자기장 신호는 결함 신호가 되며, 이 결함 신호의 크기는 노이즈 레벨인 최소 0.001 T 이상이 되어야 한다. 본 연구에서는 결함의 형상에 따라 결함 신호를 분석하였다.

결함의 길이에 따른 영향을 확인하기 위해서 결함의 길이와 폭을 기준 결함의 치수로 고정하여 결함의 길이를 25 mm, 50 mm, 100 mm인 경우로 나누어 분석하였다. Fig. 14는 각 경우에 대해 자기장의 분포를 나타낸 것이며, Fig. 15는 PIG를 진행시킴에 따라 원주 방향의 자기장 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 길이가 길어짐에 따라 결함신호의 폭과 크기가

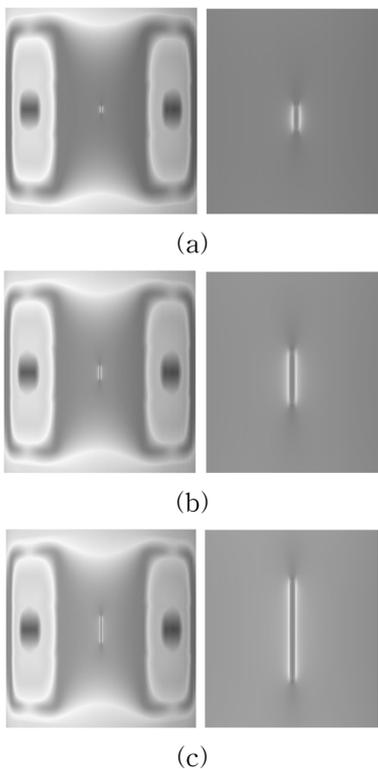


Fig. 14. Magnetic field distribution according to defect length; (a) 25 mm, (b) 50 mm, (c) 100 mm.

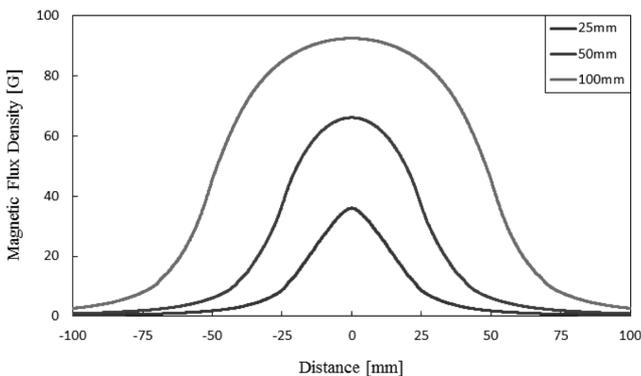


Fig. 15. Defect signals according to defect length.

커지는 것을 확인할 수 있다.

결함의 폭에 따른 영향을 확인하기 위해 결함의 길이와 깊이를 기준 결함의 치수로 고정하여 결함의 폭을 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm인 경우로 나누어 분석하였다. Fig. 16은 각 경우에 대해 자기장의 분포를 나타낸 것이며, Fig. 17은 원주 방향에 대한 법선 성분의 자기장 분포를 나타낸 것이다. 결함의 폭이 자기장의 최대값과 최소값의 거리에 의존하는 것을 알 수 있다.

결함의 깊이에 의한 영향을 확인하기 위해 결함이 길이와 폭을 기준 결함의 치수로 고정하여 결함의 깊이를 25%, 50%, 75%인 경우로 나누어 분석하였다. Fig. 18은 각 경우에 대해 자기장의 분포를 나타낸 것이며, Fig. 19는 원주 방향에 대한 법선 성분의 자기장 분포를 나타낸 것이다. 결함의 깊이가 증가함에 따라 누설 자기장의 크기가 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있고 결함 깊이는 누설 자기장의 크기에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

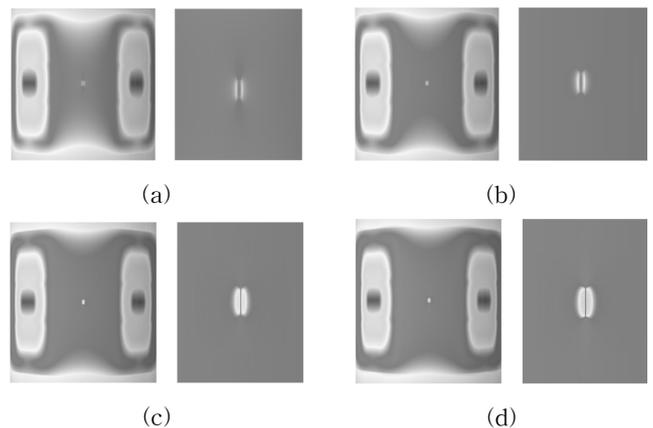


Fig. 16. Magnetic field distribution according to defect width; (a) 0.1 mm, (b) 0.2 mm, (c) 0.5 mm, (d) 1 mm.

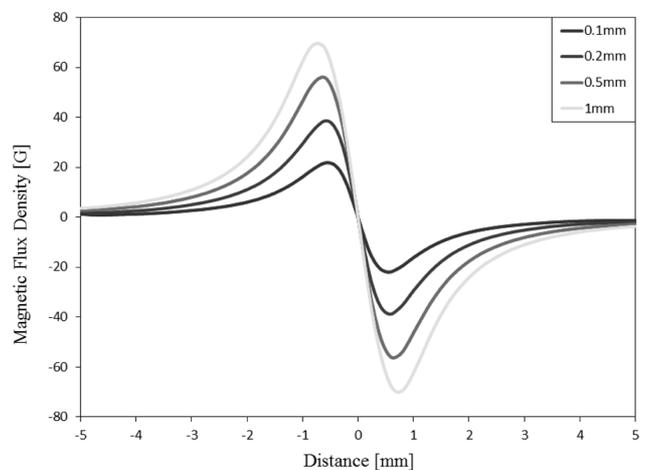


Fig. 17. Defect signals according to defect width.

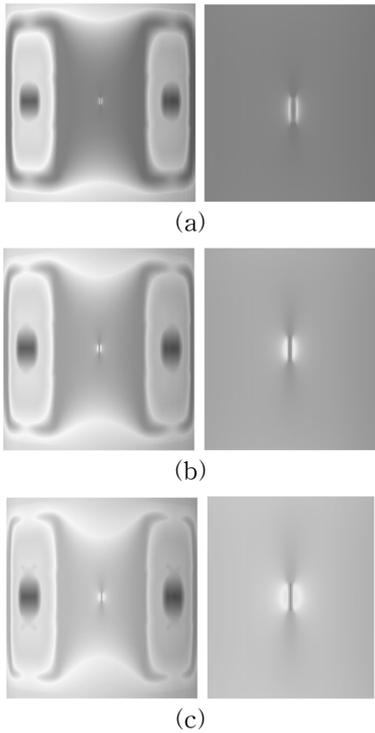


Fig. 18. Magnetic field distribution according to defect depth; (a) 25%, (b) 50%, (c) 75%.

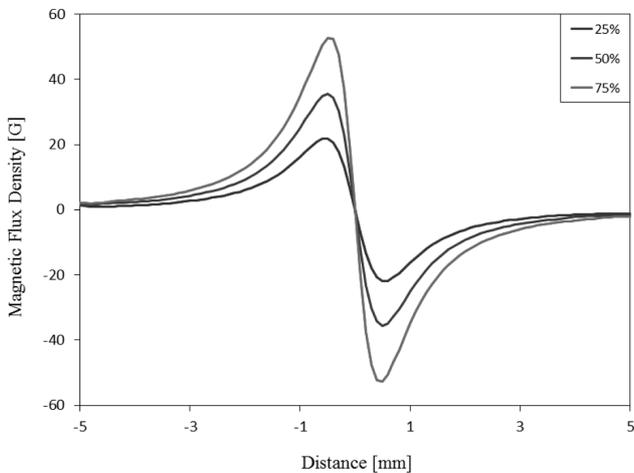


Fig. 19. Defect signals according to defect depth.

앞서 분석한 결함 신호는 결함이 자기장 인가 시스템의 정중앙에 있을 경우의 신호이다. 실제 결함은 다른 위치에 존재할 수도 있으므로 여러 위치에 따른 검출 신호를 Fig. 20과 같이 3개의 다른 위치의 결함에 대한 신호를 분석하였다. Fig. 21은 PIG가 진행하면서 각 위치별 결함의 직하부의 결함 신호를 나타낸 것이다. Fig. 22는 각 경우에 대한 자기장 분포와 PIG가 진행함에 따른 원주 방향의 신호를 나타낸 것이다. 왼쪽의 그림은 센서 위치에서 자기장을 나타낸 이며 오

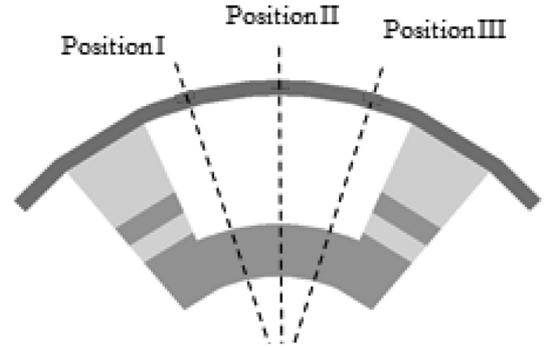


Fig. 20. Positions of defects.

른쪽 그림은 이 값에서 센서의 오프셋을 뺀 신호를 나타낸 것이다. 각 위치별 검출 신호를 비교해보면 위치에 따라 자기장의 값이 약간씩 다른 것을 알 수 있지만 각 결함의 위치에서 결함 신호가 제대로 검출되는 것을 확인할 수 있다.

3. 결함 신호에 따른 형상 추정

결함의 길이에 따라 누설 자기장의 폭과 크기가 변화하는 것을 Fig. 15에서 확인하였는데 이 데이터로는 길이를 추정하기 어렵다. Fig. 23은 Fig. 15의 데이터의 변화율을 나타낸 것으로 결함의 끝 부분에서 극대값과 극소값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이 극값 간 폭은 결함의 길이와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

결함의 폭의 변화는 누설 자기장의 폭에 영향을 준다. 원주 방향에 대한 누설 자기장을 이용하여 결함의 폭을 추정할 수 있다. Fig. 24는 원주 방향에 대한 누설 자기장의 법선 성분을 나타낸 것이다. 결함의 폭이 변함에 따라 누설 자기장의 법선 성분의 크기가 최대가 되는 지점과 최소가 되는 지점과의 거리가 변화하게 된다. 이 거리의 변화를 3차 함수로 보간하여 결함의 폭 WTH를 추정하면 식 (14)와 같다. 여기서 w는 원주 방향에 대한 누설 자기장의 법선 성분의 극값 간 폭이다.

$$WTH = 2.5 \times w^3 - 4.9 \times w^2 + 2.5 \times w \quad (12)$$

결함의 깊이는 누설 자기장의 크기에 영향을 준다. 원주 방향에 대한 법선 성분의 누설 자기장의 크기를 Fig. 19에서 나타내었다. 결함의 깊이에 대해 누설 자기장 값이 선형적으로 증가함을 알 수 있으며 이를 이용하여 결함의 깊이를 추정할 수 있다.

IV. 결 론

지하에 매설된 가스배관에 발생하는 결함에는 외부적인 환경에 의한 부식 및 변형, 축방향 미소결합이 있다. 그 중 축

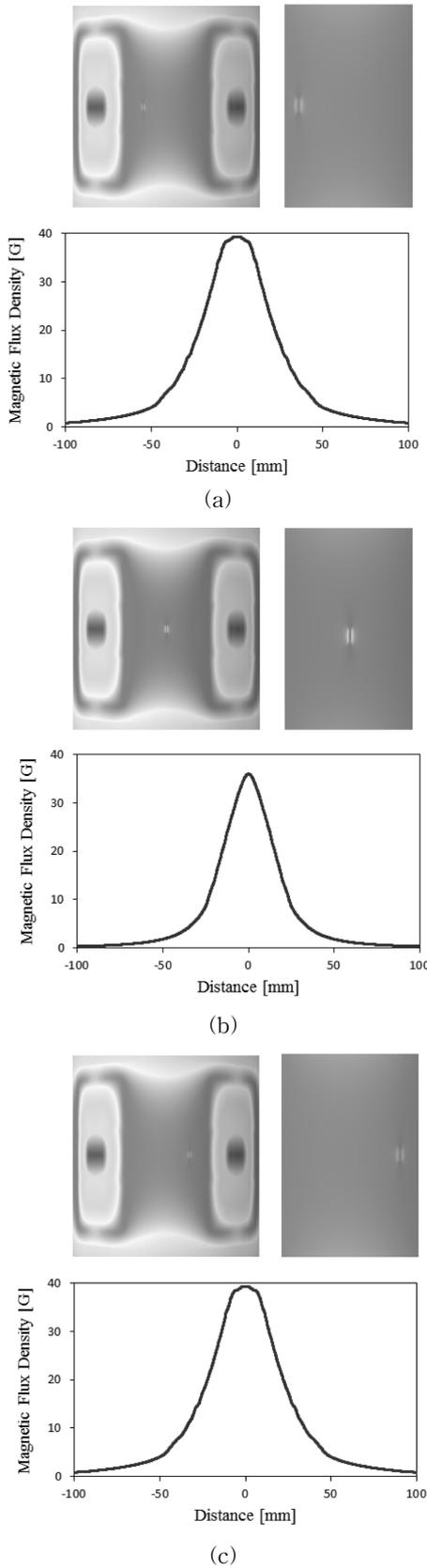


Fig. 21. Magnetic field distribution according to positions; (a) Position I, (b) Position II, (c) Position III.

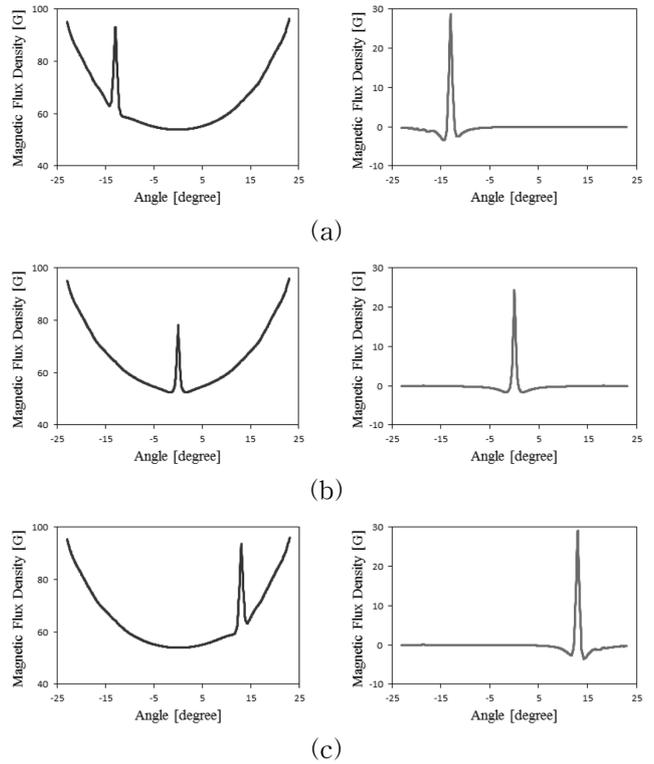


Fig. 22. Magnetic leakage field and defect signals; (a) Position I, (b) Position II, (c) Position III.

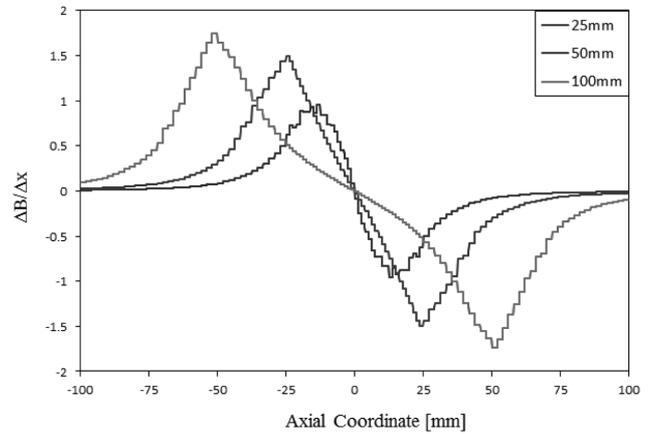


Fig. 23. Rate of change of defect signals.

방향 미소결함은 기존 자기누설 비파괴 검사 시스템이 검출하지 못하는 아주 미세한 결함이며 사고 시 대형 사고로 이어지기 때문에 검출에 대한 중요성이 매우 크다. 기존 자기누설 비파괴 검사 시스템은 구조적 문제로 인해 축방향 미소결함 검출이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 가스배관에 발생하는 축방향 미소결함 검출을 위한 자기누설 방식의 비파괴 검사 방법에 대해 연구하였다. 기존 자기누설 비파괴 검사 시스템과는 달리 원주 방향으로 자기장을 인가하는 CMFL PIG

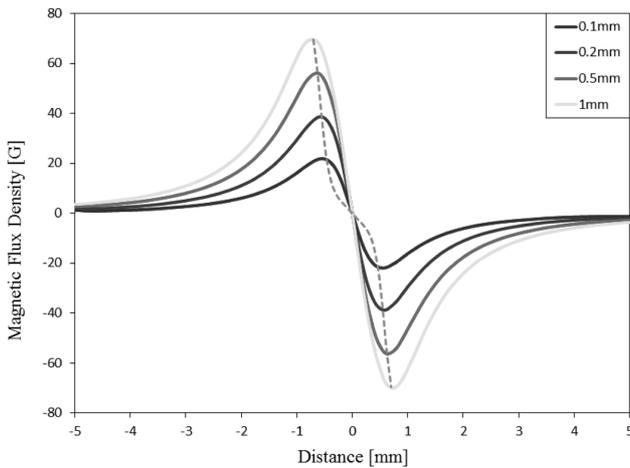


Fig. 24. Defect signals for width estimation.

의 구조를 제안하였고 자기회로법을 이용하여 자기 포화를 고려한 PIG의 자기장 인가 시스템을 설계하였다. 3차원 수치 유한요소법을 이용한 비선형 자기장 해석을 통하여 설계된 PIG를 검증하고 결함에 대한 신호를 분석하였다. 원주 방향으로 위치한 여러 개의 센서의 오프셋 신호가 각각 다르며 이를 고려한 검출 신호로부터 결함 신호를 분리해내고 최종적으로 결함의 형상을 추정하였다.

따라서 본 논문에서 제안하는 축방향 미소결함 검출을 위한 자기누설 비파괴 검사 방법은 기존 축방향 미소결함 검출

성능을 만족하였고 형상 추정이 가능하였다. 차후 더 많은 결함에 대한 해석과 실험을 통해 형상 추정의 정확도를 향상시키고 실제 배관에 적용하여 결함 추정 관계식 및 보정 알고리즘의 보완이 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0006864).

참고문헌

- [1] K. K. Tandon, *Materials Selection & Design*, **36**, 75 (1997).
- [2] H. Haines et. al., *Pipeline & Gas Industry* **82**, 49 (1999).
- [3] Vijay Babbar, James Bryne, and Lynann Clapham, *NDT & E International* **38**, 471 (2005).
- [4] Muhammad Afzal and Satish Udpa, *NDT & E International* **35**, 449 (2002).
- [5] J. B. Nestleroth, *Battelle Report* (2003).
- [6] J. Grimes and A. N. de Alvarez, *Proceedings of the 7th International Pipeline Conference, IPC2008-64275* (2008).
- [7] R. C. Ireland and C. R. Torres, *Sensors and Actuators* **129**, 197 (2006).

A Study on the Method of Magnetic Flux Leakage NDT for Detecting Axial Cracks

Seung Ho Yun and Gwan Soo Park*

Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 31 December 2010, Received in final form 21 February 2011, Accepted 23 February 2011)

From among the NDT (nondestructive testing) methods, the MFL (magnetic flux leakage) method is specially suitable for testing pipelines because pipeline has high magnetic permeability. The system applied to MFL method is called the MFL PIG. The previous MFL PIG showed high performance in detecting the metal loss and corrosions. However, MFL PIG is highly unlikely to detect the cracks which occur by exterior-interior pressure difference in pipelines and the shape of crack is long and very narrow. In MFL PIG, the magnetic field is performed axially and there is no changes of cross-sectional area at cracks that the magnetic field passes through. Cracks occur frequently in the pipelines and the risk of the accident from the cracks is higher than that from the metal loss and corrosions. Therefore, the new PIG is needed to be researched and developed for detecting the cracks. The circumferential MFL (CMFL) PIG performs magnetic fields circumferentially and can maximize the magnetic flux leakage at the cracks. In this paper, CMFL PIG is designed and the distribution of the magnetic fields is analyzed by using 3 dimensional nonlinear finite element method (FEM). In CMFL PIG, cracks, standards of NACE, are detectable. To estimate the shape of crack, the leakage of magnetic fields for many kinds of cracks is analyzed and the method is developed by signal processing.

Keywords : MFL, NDT (nondestructive testing), axial cracks, in-line inspection, CMFL, FEM