ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 23(1), 18-25 (2013) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2013.23.1.018

배관용 자기누설 비파괴 검사에서 축방향 미소결함의 형상 판정에 관한 연구

김희민 · 박관수*
부산대학교 전자전기공학과, 부산시 금정구 장전동 산30, 부산 609-735

(2012년 11월 26일 받음, 2013년 2월 5일 최종수정본 받음, 2013년 2월 13일 게재확정)

배관용 비파괴 검사에서 자기누설방식을 이용하여 배관의 결함을 검출하도록 개발된 탐상 시스템 장비를 MFL PIG(Magnetic Flux Leakage Pipeline Inspection Gauge)라 한다. 이 장비는 투자율이 큰 금속 배관의 길이 방향인 축방향으로 자기장을 형성하고, 결함이 있는 부분에 발생하는 누설 자속 신호를 홀센서를 이용하여 검출한다. 하지만 MFL PIG는 배관에 축방향으로 발생한 미소결함에 대해서는 누설 자속의 발생량이 미세하여 결함 유무를 판별하기 어렵다. 본 논문에서는 배관에 발생한 축방향 미소결함을 검출하기위해 CMFL(Circumferential MFL) PIG를 적용하였고, 결함 주위에 발생한 누설 자속 신호의 크기 및 분포를 3차원 정자계 유한요소법을 이용하여 검출 및 분석하였다. 이러한 검출 신호로부터 길이, 폭, 깊이와 같은 결함의 형상을 판정하는 기법을 제안하였고 이를 CMFL PIG 모의 성능 실험을 통하여 비교 및 검증하였다.

주제어 : 자기누설, 배관용 비파괴 검사, 축방향 미소결함, CMFL PIG

I. 서 론

자기누설 탐상검사는 배관의 단면적이 변화할 때 발생하는 누설 자기장을 검출하고, 검출된 누설 자기장의 크기로 배관의 결함을 검출하는 방법이다[1]. 강력한 자력을 생성하는 자계시스템을 이용하여 배관에 주입 후 자기적으로 포화시켜 배관의 두께 변화 및 부식에 의해 누설되는 자기장을 자력계로 측정하기 때문에 배관의 내벽과 외벽에 상관없이 결함 검출이 가능하다. 따라서 자기누설 탐상검사는 지하 깊이 매설되어 있는 배관을 검사할 경우 배관의 손상, 균열, 용접부의 형태, 피로와 부식정도를 모두 검출하는 가장 적합한 검사 방법이다[2].

배관용 비파괴 검사에서 자기누설방식을 이용하여 배관의 결함을 검출하도록 개발된 탐상 시스템 장비를 MFL PIG라고 한다[3, 4]. MFL PIG는 배관 내 천연가스가 흐르고 있는 상태에서 전후단의 차압으로 장거리의 배관을 주행하면서 자력계로부터 누설 자속 신호를 획득한다. 과거 국내에서는 지하매설 배관 검사를 위해 외국 용역 업체에 의존 하였으나 최근에는 MFL PIG가 도입되어 이미 운용 중에 있으며 결함 검출 성능도 우수하다.

일반적으로 가스 배관 내부는 가스의 원활한 공급을 위해 높은 압력을 유지한다. 따라서 배관의 내·외부의 압력 차이는 매우 크며 장시간 운용 시 가스압 력에 의한 스트레스로 배관에 미세한 결함이 발생한다[5, 6]. 이 결함은 폭이 매우 좁고 배관의 축방향으로 길게 발생하여 육안으로 확인이 어렵다. 이와 같은 축방향 미소결함을 검출을 위해 MFL PIG는 배관의 축방향으로 자기장을 인가하는 구조이므로, 동일 방향으로 가늘고 길게 생성되는 미소 결함에 대해서는 자속이 통과하는 단면적 변화가 미세하여 누설되는 자속 신호를 검출하기 어렵다[8].

기존의 결함과 더불어 배관의 축방향으로 발생하는 미소결함을 검출하기 위해 MFL PIG의 구조적인개선이 요구됨에 따라 제안된 것이 CMFL PIG이다[8]. CMFL PIG는 배관의 원주 방향으로 자기장을 인가하여 축방향 결함에 대한 자속 누설을 최대화 가능하다. 본 논문에서는 먼저 배관 외벽에 발생하는 축방향 미소결함을 검출하기 위해 배관 원주 방향으로 자계를 인가하는 시스템인 CMFL PIG의 동작 원리와 구조를 설명하였다. 그리고 CMFL PIG를 설계하고 자계해석을 이용하여 배관의 결함 유무와 결함의 형상 변화에 따른 누설 자속 신호를 비교 및 분석하였다. 결함 검출 및 결함 형상파악 성능 검증용으로 제작된 모의시험 배관, 결함 및 고정 구조물을 이용한 실험을 통하여 누설 자속 신호를 측정하였고, 이 검출 신호를 이용하여 길이, 폭, 깊이와 같은 결함의 형상을 판정하는 기법을 제안하였다.

II. CMFL PIG의 동작원리 및 구조

1. CMFL PIG의 동작원리

CMFL PIG는 배관을 자기 포화시키고 배관을 따라 주행하

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author:
Tel: +82-51-510-2788, e-mail: gspark@pusan.ac.kr

면서 검사를 수행하며, 기존 MFL PIG의 운용 및 동작원리와 동일하다. 만약 배관 내에 결함이 존재할 경우 결함 부분에 자기장이 통과하는 단면적이 줄어들고, 배관의 비선형적 자기 특성에 의해 자기저항(Magnetic Reluctance)이 증가하게 된다. 자기저항은 자기회로에서 자기력선속에 대하여 발생하는 전기 저항력으로, 전기회로에서의 전기저항과 대응된다. 배관 내·외벽에 결함이 발생함에 따라 자기저항이 증가하면 인가 자계에 의한 자속이 모두 배관을 통과하는 것이 아니라 외부로 누설 되는데, 이때 배관의 외부로 누설되는 자기력선속을 누설 자속이라고 한다.

CMFL PIG에서 누설 자속 신호를 검출하기 위한 자력계로써 홀 센서를 사용한다. 배관에 발생한 결함의 유무와 따라 배관 외부로 누설되는 자속의 양은 변화하게 되고, 이를 센서로 검출한다. 또한 배관의 가로축방향 및 원주방향 성분의 거리에 대한 누설 자속 신호의 크기 및 분포로부터 결함의 형상을 추정할 수 있다.

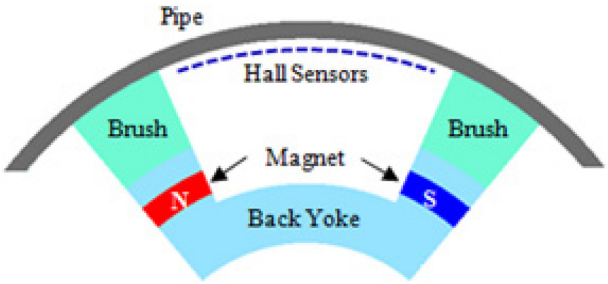

Fig. 1. (Color online) The structure and diagram of the CMFL PIG.

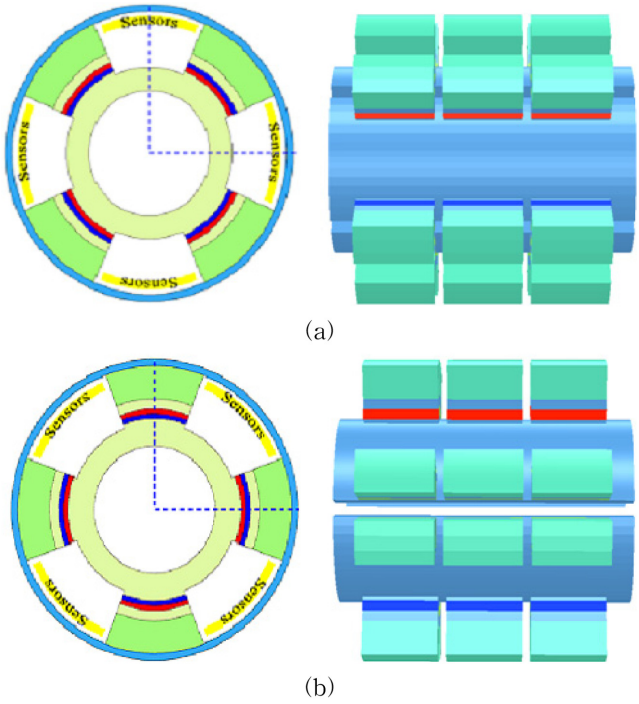

Fig. 2. (Color online) Two module of CMFL PIG; (a) Front Module, (b) Behind Modue.

2. CMFL PIG의 구조

CMFL 비파괴 검사 시스템은 Fig. 1과 같이 자기회로를 구성한다. 가스 배관을 착자 시키기 위해 Nd-Fe-B 영구자석을 이용하여 원주방향으로 자계를 인가하고 높은 자기 효율을 얻기 위해 Back Yoke를 시스템의 몸체로 사용한다. 또한 판 브러쉬를 영구자석 위에 배치하여 배관 벽으로 자계를 전달한다.

배관 내 모든 결함에 대한 누설 자속 신호를 검출하기 위해서는 배관 전체가 자기 포화되는 영역이어야 한다. 즉 배관의 원주방향으로 자계 인가 영역이 다른 2개의 모듈이 필요하다. Fig. 2에서 두 모듈의 구조는 동일하고 배관의 축방향에 대해 45°만큼 차이가 나도록 연결한다. CMFL PIG 두 개의 모듈을 배치함으로서 배관의 모든 부분을 센서부가 통과 가능하고 결함이 존재할 때 누설 자속 신호를 검출할 수 있다.

III. CMFL PIG 시스템 설계 및 제작

1. CMFL PIG 설계 및 제작

배관 내부의 자속밀도를 1.6~1.8 T인 자기포화 영역으로 확보하기 위해 CMFL PIG에 배치한 자석의 크기는 자기 회로법을 이용하여 길이는 180 mm, 폭 64 mm, 높이는 25 mm로 설계하였다. 일반적으로 배관 두께는 17.5 mm인 것을 고려하여, Back Yoke의 구조는 외경 220 mm, 내경 160 mm인 원통형 구조이다. CMFL PIG Module의 축방향 전체 길이는 700 mm이다.

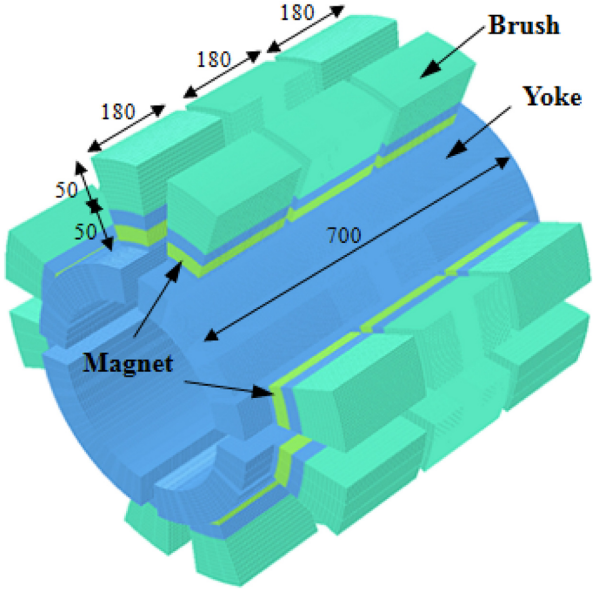

Fig. 3. (Color online) The design of the CMFL PIG.

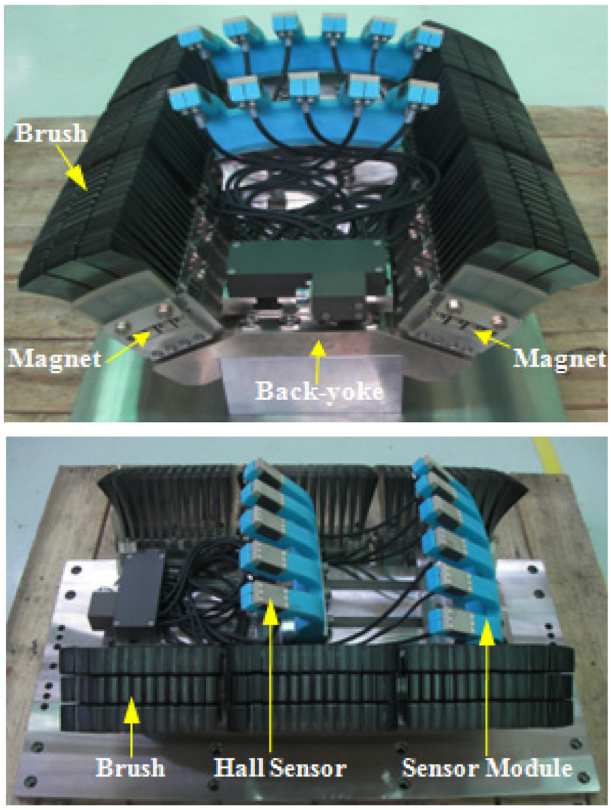

Fig. 4. (Color online) The photograph of the CMFL PIG simple model.

CMFL PIG는 Fig. 3과 같이 배관의 원주방향으로 각각 4개의 자계인가 시스템으로 구성되어있고, Fig. 4는 동일한 구조를 가지는 4개의 자계인가 시스템 중에서 하나의 간략화 모듈을 나타낸다. 영구자석에서 발생한 자속은 브러시를 통해 배관으로 전달되고, 배관 내의 자속밀도는 배관의 원주방향으로 분포하게 된다.

2. CMFL PIG 센서 모듈

CMFL PIG의 결함 검출 성능은 누설 자속 신호를 검출하는 센서의 정밀도와 밀접한 관련이 있다. 또한 센서의 정밀도와 더불어 누설 자속 신호를 효과적으로 검출하기 위한 센서의 배치도 중요하다. Fig. 5와 같이 PIG에 탑재된 Sensor Module은 두 개의 모듈로 구성된다. 두 개의 모듈은 각각 11개의 Sensor Head로 구성되어 있고, Sensor Head 내부에는 총 15개의 홀 센서가 1.9 mm 간격으로 배치 되어있다. 홀센서는 PIG와 함께 진행하며 배관의 원주방향 성분의 누설 자속 밀도(B_ϕ) 신호를 측정한다.

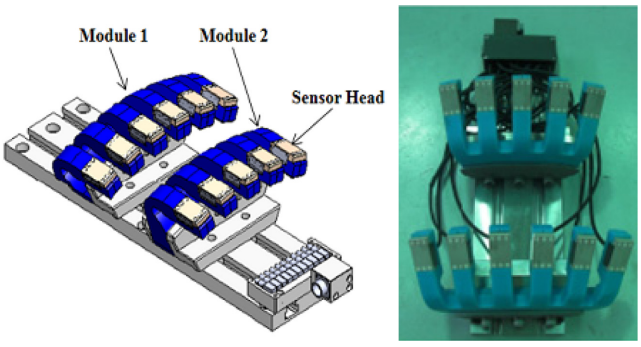

Fig. 5. (Color online) The structure of sensor module.

IV. 축방향 미소결함의 형상 판정

1. 결함의 형상 추정 방법

배관의 외벽에 발생한 축방향 미소결함의 형상은 누설 자속 검출 신호의 분포와 크기 변화로부터 추정할 수 있다. Fig. 6은 CMFL PIG가 배관의 축방향으로 주행할 때, 배관 외벽에 결함이 존재할 경우 결함 주위에서 발생하는 누설 자속 분포를 나타낸 것이다.

결함 길이의 판정은 Fig. 7과 같이 배관의 축방향 거리에 대한 누설 자속의 크기 및 분포로부터 추정한다. 배관의 축방향으로 결함의 길이가 커질수록 누설 자속 신호의 크기 및 분포의 변화량은 선형적으로 증가하므로, 임의의 결함에 대하여 길이 판정이 가능하다. 동일한 방법으로 결함 폭의 추정은 Fig. 8과 같이 배관 원주 방향으로의 거리에 대한 누설 자속의 크기 및 분포로부터 가능하다[8].

결함의 깊이 판정은 누설 자속 신호의 크기 및 결함의 길이, 폭과 같은 형상정보와 밀접한 관련이 있다. 결함의 형상정보를 고려하여 누설 자속 신호 크기의 최대값(Peak

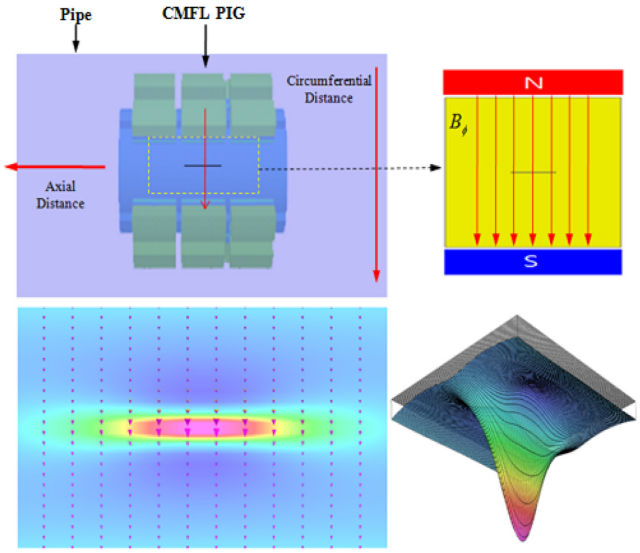

Fig. 6. (Color online) Magnetic flux leakage distribution in the vicinity of the crack.

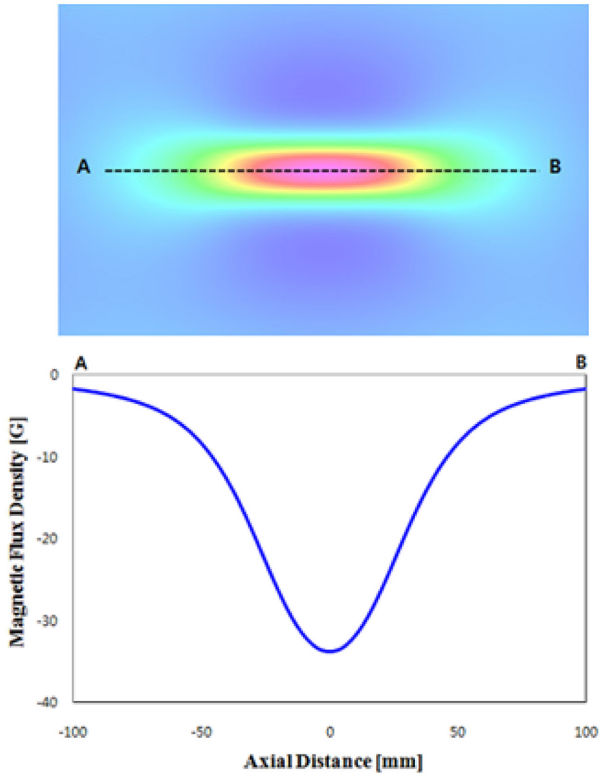

Fig. 7. (Color online) Magnetic flux leakage distribution for estimation of defect length.

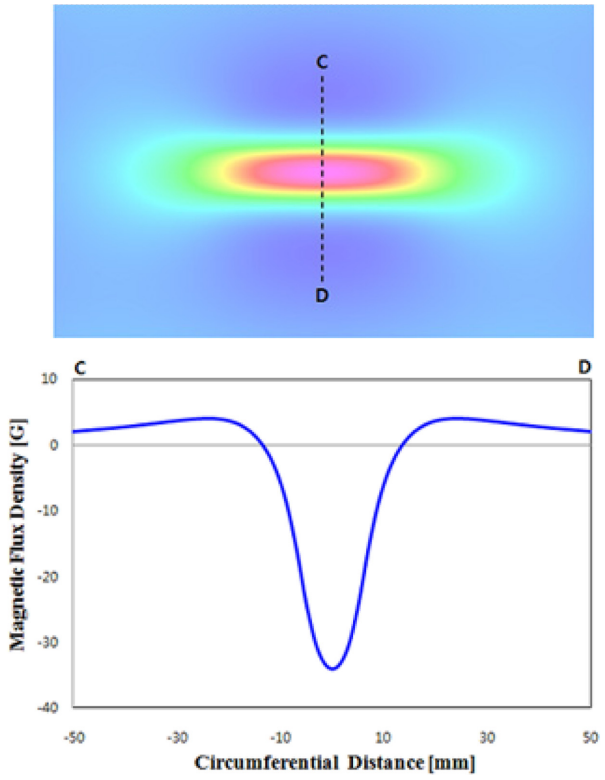

Fig. 8. (Color online) Magnetic flux leakage distribution for estimation of defect width.

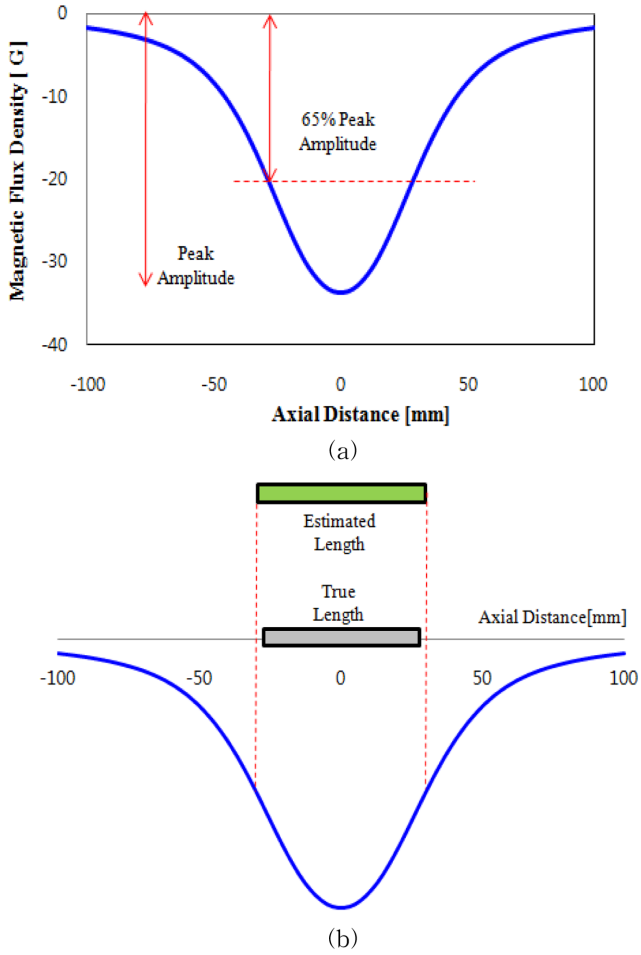

Fig. 9. (Color online) Estimation method of defect length; (a) Defect signal about axial distance, (b) Diagram of length estimation.

Amplitude)에 대한 2차 방정식을 이용하여 추정한다.

2. 결함의 길이 판정

배관 내부 결함이 존재하는 부분에서는 결함이 축방향으로 길어질수록 누설 자속 신호의 폭은 넓게 검출된다. 따라서, 결함 길이의 판정은 배관의 축방향 거리에 대한 원주방향 성분의 누설 자속 밀도(B_ϕ)의 분포로부터, Fig. 9와 같이 검출 신호의 최대 크기에서 65 %되는 지점의 거리 폭을 결함의 길이로 판정한다.

3. 결함의 폭 판정

결함의 폭을 추정하기 위해서는 배관의 원주방향거리에 대한 누설 자속 밀도를 측정한다. 결함의 폭이 커질수록 원주방향 거리에 대한 누설 자속 신호의 폭도 넓어진다. 즉, 배관의 원주방향 거리에 대한 (B_ϕ)의 분포로부터, Fig. 10과 같이 누설 자속 검출 신호의 최대 크기에서 45 %되는 지점의 거리 폭을 결함의 폭으로 판정한다.

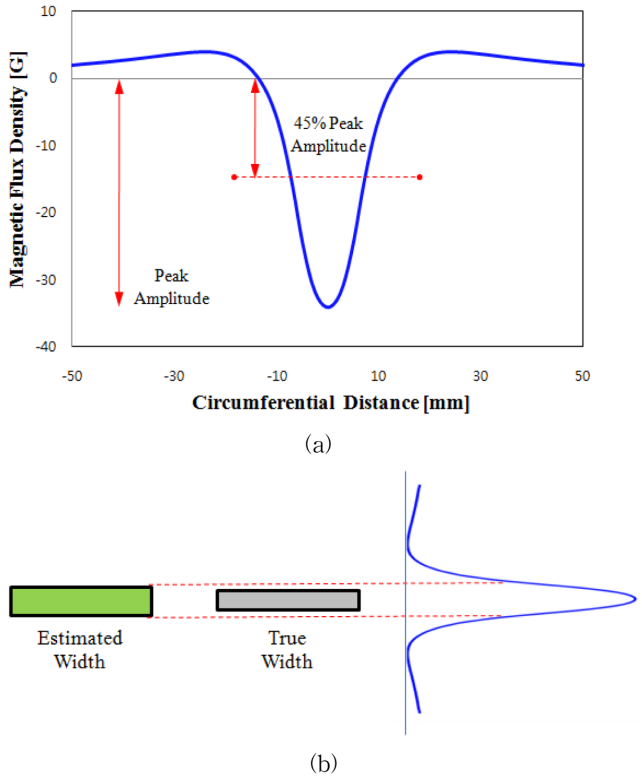

Fig. 10. (Color online) Estimation method of defect width; (a) Defect signal about circumferential distance, (b) Diagram of width estimation.

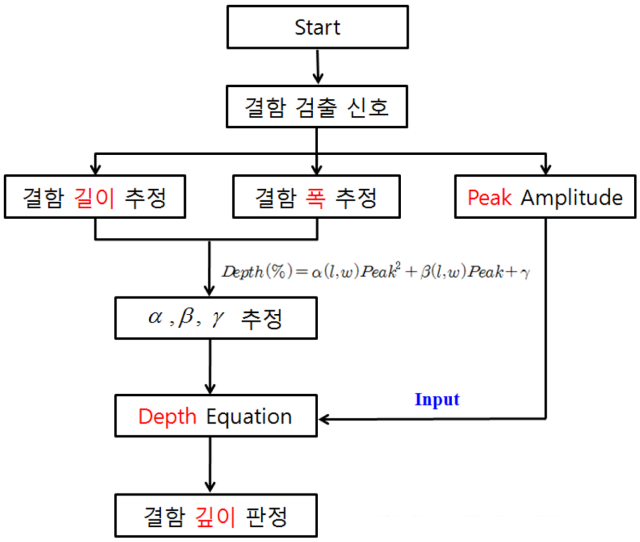

Fig. 11. (Color online) Algorithm for estimation of defect depth.

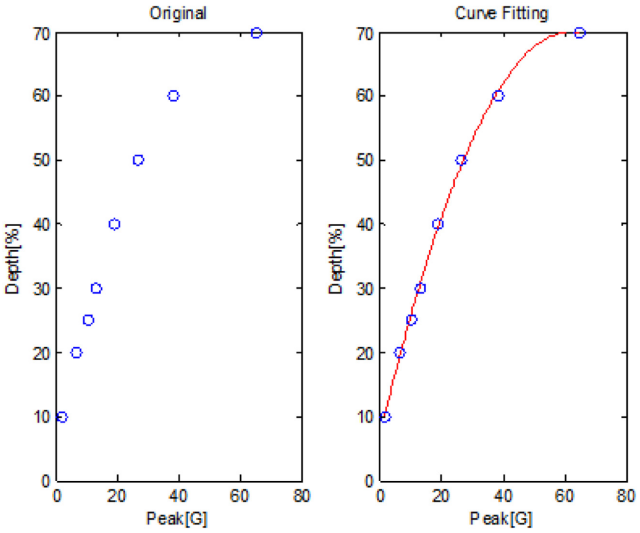

Fig. 12. (Color online) A Quadratic function between depth and peak Amplitude of defect signals.

4. 결함의 깊이 판정

누설 자속 검출 신호의 크기는 결함의 깊이와 밀접한 관련이 있다. 결함 깊이의 판정은 식(1)과 같이 누설 자속 신호의 최대값에 대한 2차 방정식을 이용하여 이루어진다. 먼저, 누설 자속 검출 신호의 폭을 이용하여 결함의 길이와 폭을 판정한 후, 결함 깊이를 검출 신호의 크기에 대한 2차 함수로 근사화 가능하다. 이때 2차 함수의 계수는 결함의 길이와 폭이 결정되는 값에 따라 달라진다. 따라서, 결함의 깊이는 결함의 길이와 폭, 누설 자속 검출 신호의 최대값에 대한 함수로 식(2)과 같이 표현할 수 있다. Fig. 12는 결함의 길이와 폭이 일정하고 깊이가 다른 결함의 검출 데이터 분포에서, 결함의 깊이를 누설 자속 신호의 최대값에 대한 2차 근사 함수로 나타낸 예시를 보여준다. 식(2)의 방정식에서 검출 신호의 Peak 값을 입력 값으로 하여 최종 결함의 깊이를 판정한다. Fig. 11은 결함의 깊이 판정 알고리즘을 나타낸다.

결함 형상 정보의 변화에 따른 결함의 깊이를 판정하기 위해서는 임의의 형상 정보 각각에 대응하는 깊이 판정 방정식이 필요하다. 만약 결함의 길이와 폭이 결정되면, 이로부터 Fig. 12와 같은 2차 함수의 분포를 얻을 수 있고 Peak 값을 적용하여 깊이를 판정한다. 이를 위해 정자계 유한요소법을 이용하여 결함의 길이는 25 mm 이상 100 mm 이하인 범위, 결함의 폭은 10 mm 이상 35 mm 이하인 범위를 가지는 36개 결함 모델을 설계 및 해석하였다. 결함 모델 해석 결과를 바탕으로 설계 범위 내인 임의의 결함 형상 정보에 관하여 깊이 판정 방정식(2차 함수)을 추정하는 것이다. Fig. 13은 깊이 판정 방정식을 표현하는 3개의 계수 값들을 결함의 길이와 폭에 관하여 추정한 결과이다. 각각의 계수 값은 결함의 길이와 폭에 의한 함수로 표현할 수 있다.

식(2)의 방정식을 추정하고 검출 신호에 대한 2차 함수 분포로 표현한 후 검출한 Peak 값을 적용하면 결함의 최종 깊이를 판정할 수 있다.

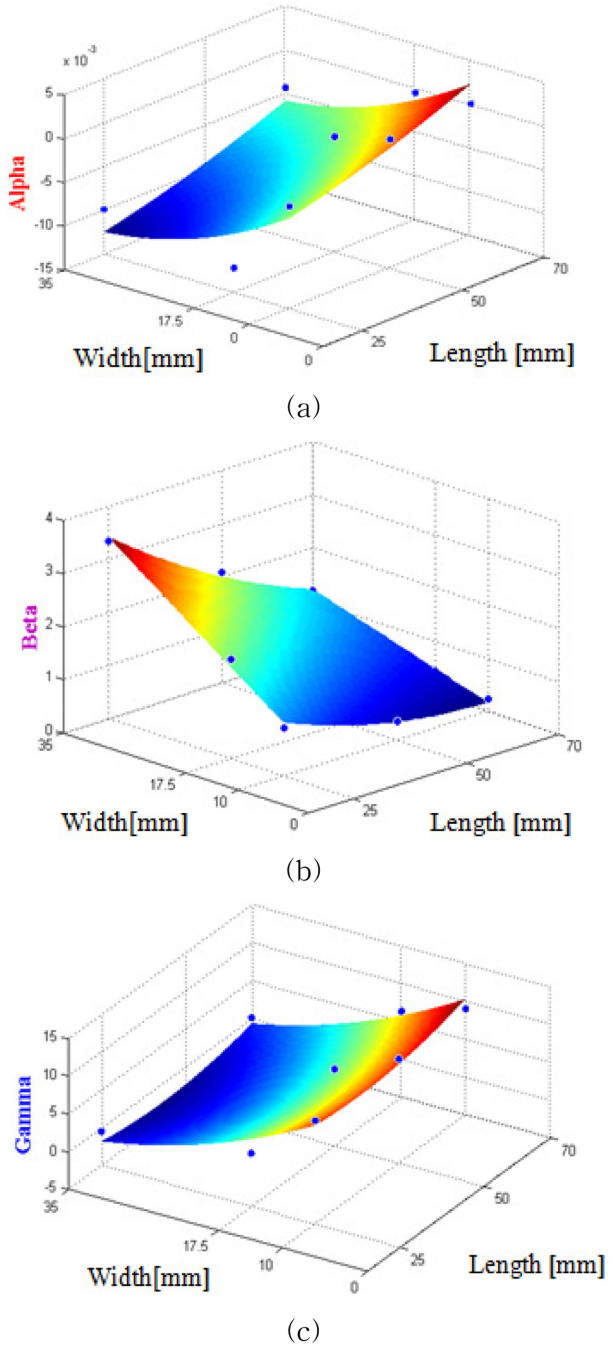

Fig. 13. (Color online) Polynomial surface fitting to find coefficient; (a) $\alpha(l, w)$, (b) $\beta(l, w)$, (c) $\gamma(l, w)$.

V. 결과 및 검증

1. 결함의 길이 추정 결과

형상 추정법의 타당성과 추정결과를 검증하기 위하여 유한요소법을 이용한 결함 형상 판정 결과와 실측 데이터를 이용한 추정 결과를 비교 및 검토하였다.

결함의 축방향 길이 25 mm, 50 mm, 70 mm, 100~105 mm

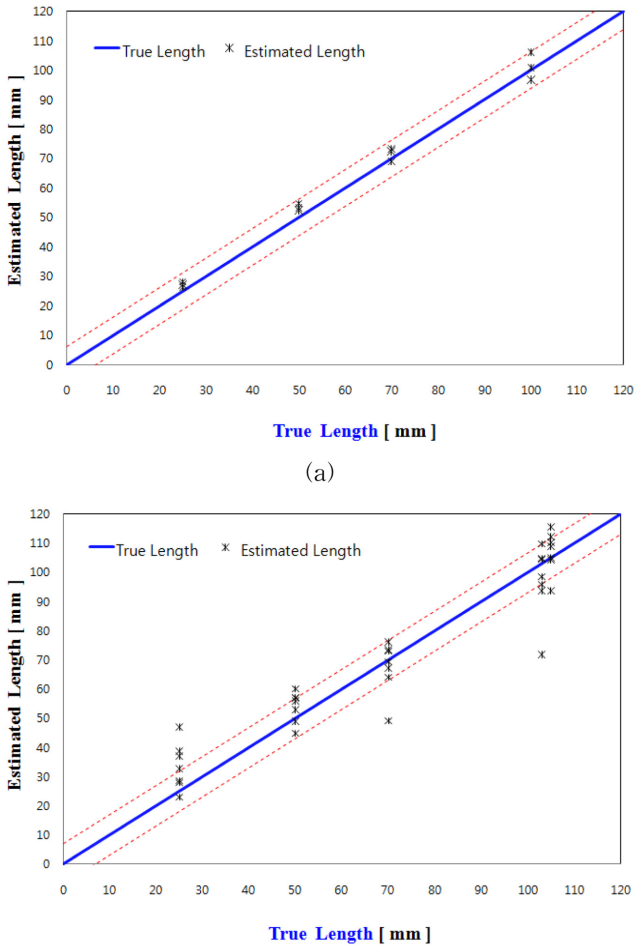

Fig. 14. (Color online) The result of defect length estimation; (a) Using FEM, (b) Using measurement data.

에 대해서, Fig. 14(a)는 유한요소법을 이용한 누설 자속 신호의 분포 해석으로부터 길이 판정법을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 x축은 실제 결함의 길이, y축은 판정법을 적용한 추정 길이이다. 굵은 실선은 실제 결함의 길이에 대응되는 값이고 표식은 추정한 길이를 표시한다. 두 개의 점선은 7 mm의 오차 범위를 나타낸 것이고, 이는 미국 NACE의 결함 길이 산정 신뢰도를 고려한 것이다. Fig. 14(b)는 실험에 의한 실측 검출 신호로부터 결함의 길이를 동일한 방법으로 추정한 결과를 나타낸다. 결함의 길이 판정 결과 대부분이 실제 치수의 오차 범위 내에 존재한다.

2. 결함의 폭 추정 결과

결함의 폭 0.2 mm, 1 mm, 17.5 mm, 35 mm에 대해서, 유한요소법을 이용한 누설 자속 신호 분포로부터 폭 추정법을 적용한 결과와 실측 검출 신호 데이터로부터 추정법을 적용한 결과를 비교하여 보았다. Fig. 15(a)는 유한요소법을 이용

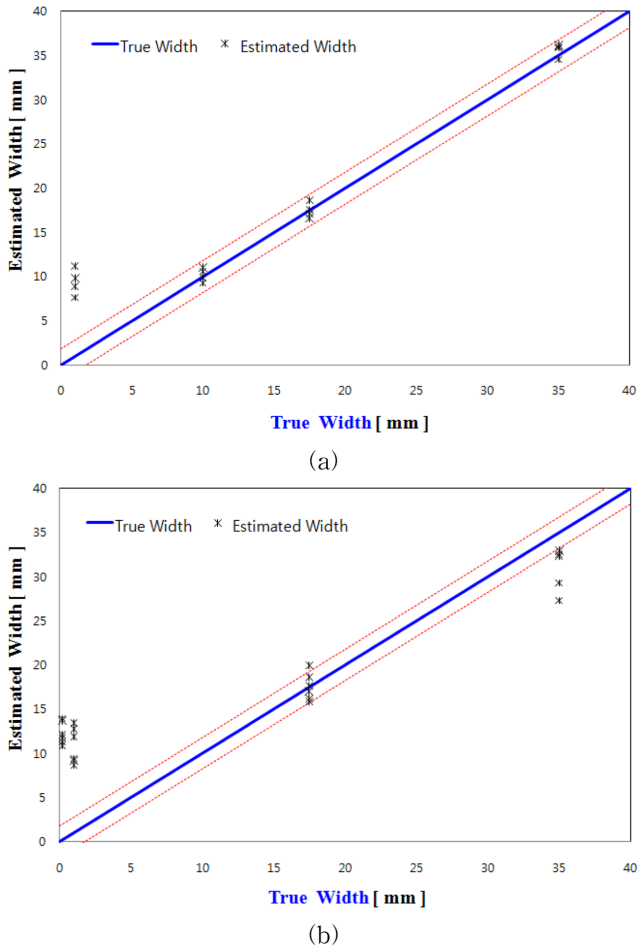

Fig. 15. (Color online) The result of defect width estimation; (a) Using FEM, (b) Using measurement data.

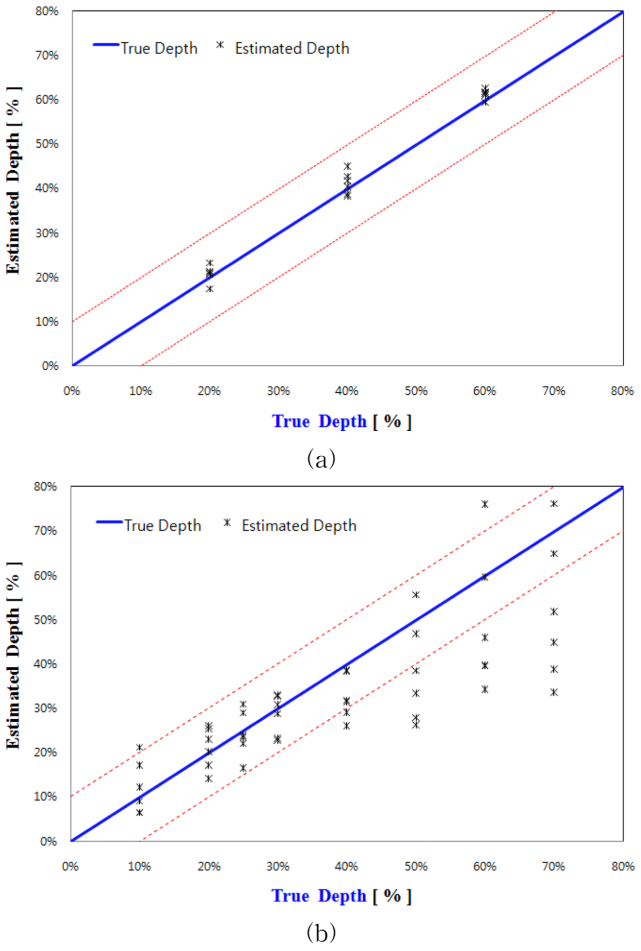

Fig. 16. (Color online) The result of defect depth estimation; (a) Using FEM, (b) Using measurement data.

한 결함 폭의 추정 결과를 나타낸 것이고, Fig. 15(b)는 실측 검출 신호로부터 추정한 결과를 나타낸다. 그림에서 표시된 점선은 1.75 mm의 오차를 나타낸 것으로 미국 NACE 결함의 폭 크기 산정 신뢰도를 고려한 추정 오차 범위에 해당한다. 결함의 폭이 0.2 mm, 1 mm로 극히 작은 경우, 실제 결함의 폭 치수보다 7 mm 이상 크게 추정된다. 실제로 폭이 10 mm 이하인 결함들은 원주방향 거리에 대한 누설 자속 신호의 분포 변화가 매우 작다. 즉, 폭이 0.2 mm인 결함의 누설 자속 신호 분포를 측정하면 원주 방향으로 실제 결함보다 폭이 넓게 측정된다.

결함의 폭을 판정한 결과 치수가 10 mm 이상인 경우 실제 폭 치수와 근접한 값을 추정가능 하였다.

3. 결함의 깊이 추정 결과

결함의 깊이 20 %, 40 %, 60 %에 대해서, 유한요소법을 이용한 누설 자속 신호 분포로부터 깊이 추정법을 적용한 결과를 Fig. 16(a)에 나타내었다. 굵은 실선은 결함의 실제 깊이에 해당하고, 표식은 추정한 깊이를 표시한다. 그림에서 표시된 점선은 10 %의 결함 깊이 측정 오차 범위에 해당하고, 이는 배관 두께 17.5 mm의 퍼센트 비율로 표현한 것이다. 유한요소해석 결과에 따른 결함의 깊이 추정 결과는 실제 깊이 치수와 거의 유사하게 분포되고 모두 오차 범위 내에 존재한다.

유한요소법을 이용한 추정 결과의 타당성을 고려하여, 검증용 결함으로 제작한 깊이 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 %인 임의의 형상 결함으로부터 깊이 추정 법을 적용한 결과를 Fig. 16(b)에 나타내었다. 결함의 깊이가 상대적으로 작은 10 %~40 %인 구간의 경우 실제 치수와 유사한 값으로 추정이 되지만 깊이가 50 % 이상일 때는 오차 범위를 벗어나는 결과를 나타낸다. 검증용 결함들 중에는 폭이 1 mm 이하인 결함이 존재하고, Fig. 16과 같이 폭이 1 mm 이하의 치수는 정확한 추정이 어렵다. 따라서 Fig. 16과 같은 추정결과는 최종적으로 추정할 결함 깊이의 중요한 오차 요인으로 작용하고, 실제 결함의 깊이가 5 % 이상인 경우 그 효과는 더욱 크다.

V. 결 론

배관에 발생하는 축방향 미소결함은 기존 자기누설 비파괴 검사 시스템이 검출하지 못하는 아주 미세한 결함이고 사고 시 대형 사고로 이어지기 때문에 검출에 대한 중요성이 매우 크다. 따라서 본 논문에서는 가스배관에 발생하는 축방향 미소결함 검출을 위해 원주방향으로 자계를 인가하는 비파괴 검사 탐상장비인 CMFL PIG를 제안하였다. 유한요소법을 이용한 비선형 자기장 해석을 수행하여 누설 자속 신호를 분석하였고, CMFL PIG의 결함 검출 성능을 예측하였다. 또한 CMFL PIG의 간략화 된 모델을 제작하였고 모의시험 배관에 적용한 결함 검출 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

본 논문에서는 최종적으로 배관용 비파괴검사 시스템에서 축방향 미소결함의 형상을 판정하는 기법에 대하여 제안하였다. 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 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] K. K. Tandon, Materials Selection & Design **36**, 75 (1997).
[2] H. Haines, P. C. Porter, and L. Barkdull, Pipeline & Gas Industry **82**, 49 (1999).
[3] Vijay Babbar, James Bryne and Lynann Clapham, NDT & E Int. **38**, 471 (2005).
[4] Muhammad Afzal and Satish Udpa, NDT & E Int. **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).
[8] 김희민, 노용우, 유휘룡, 조성호, 김동규, 구성자, 박관수, 한국자기학회지 **22**, 49 (2012).

A Study on Determining the Shape of Small Axial Cracks by using Magnetic Flux Leakage in NDT System for Underground Pipe

Hui Min Kim and Gwan Soo Park*
Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

(Received 26 November 2012, Received in final form 5 February 2013, Accepted 13 February 2013)

MFL PIG (Magnetic Flux Leakage Pipeline Inspection Gauge) is called the system which detects the defect for underground pipelines by using magnetic flux leakage method in nondestructive testing. This method is very suitable for testing pipelines because pipeline has high magnetic permeability. MFL PIG generates the magnetic fields to the pipe axially oriented, and detect the signal of leakage flux by using hall sensor. However, MFL PIG is hard to detect the axially oriented crack with small size because the magnetic flux leakage is not enough to be occurred. To detect the small size and axially oriented crack, the circumferential MFL (CMFL) PIG is being proposed and it can maximize the leakage flux for the axial crack by performing magnetic fields circumferentially on the pipe. In this paper, CMFL PIG is applied to detect the axially oriented crack with small size and the analysis for the distribution and the amplitude of the leakage flux signal is performed by using three dimensional finite element method. From sensing signals, the method how to determine the shape of axially oriented cracks is proposed and verified with experiment.

Keywords : MFL, NDT (nondestructive testing), axially oriented crack, CMFL PIG