

## A Study on the Signal Correction for Multiple Defects in MFL Type Nondestructive Testing System

Jeng Hoon Park, Hui Min Kim, and Gwan Soo Park\*

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received 15 January 2016, Received in final form 22 February 2016, Accepted 23 February 2016)

MFL (Magnetic flux leakage) type nondestructive testing has been used for inspection of underground gas pipelines to find metal defects by detecting magnetic leakage signal. Because the underground gas pipeline is exposed by environment such as high pressure with great humidity, external defects are easily formed on the surface of pipelines and they are being grouped respectively. These adjacent defects cause the signal distortion of leakage flux so that it is hard to estimate the shape information of defects. In this paper, we performed to study of the signal distortion and compensating method for multiple defects in MFL type nondestructive testing system by using 3D FEM simulation. This paper proposes the basic algorithm of defect signal analysis on multiple defects on the surface of 30 inch diameter pipeline.

**Keywords :** magnetic flux leakage testing, nondestructive testing, pipeline, multiple defects, finite elements method

### MFL 비파괴 검사 시스템에서 다중 결함에 의한 신호 왜곡과 신호 보정에 관한 연구

박정훈 · 김희민 · 박관수\*

부산대학교 전기공학과, 부산시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241

(2016년 1월 15일 받음, 2016년 2월 22일 최종수정본 받음, 2016년 2월 23일 게재확정)

지하에 매설된 가스배관에 발생한 결함 유무를 판별하는 방법으로는 자기누설 신호를 탐지하는 비파괴검사 기법이 사용되어져 왔다. 지하 매설된 배관은 높은 가스 운용압력과 습기와 같은 외부환경에 노출되어 있어 금속부식과 같은 결함들이 군집하여 발생한다. 군집 결함들에 의해 발생한 자기누설 신호는 단일결함 신호와 비교하여 왜곡된 형태를 가지며, 왜곡된 결함 신호의 분포는 최종적으로 결함의 형상 추정을 어렵게 한다. 본 논문에서는 30인치 직경의 배관을 기준으로 다중 결함의 배치 형태와 거리를 달리하며 신호 패턴을 분석하고, 인접한 결함의 분리 가능 여부와 신호 보정을 고려한 개선된 결함 판정 알고리즘을 제안하였다.

**주제어 :** MFL, 비파괴검사, 배관결함탐상, 다중 결함, 유한요소해석

#### I. 서 론

현재 국내에서 주로 사용되는 에너지원인 석유와 천연가스는 주로 지하에 매설되어 있는 배관을 통해 각 지역으로 공급되고 있다. 그러나 그 매설 기간이 30여년 이상 지속되어 왔기 때문에 지하에서 발생할 수 있는 압력이나 습기 등에 의해 배관에 부식이 발생하여 사고로 이어질 가능성이 상존한다[1-3]. 따라서 이러한 배관의 부식으로 인한 사고를 미연

에 방지하기 위해 배관의 정기적인 검사를 통한 유지·보수가 필요하다. 배관의 손상, 균열, 용접부의 형태, 피로와 부식 정도를 측정하기 힘든 경우에 사용되는 검사 방법으로 비파괴 검사(Non-destructive Testing)가 사용된다[3].

가스배관의 비파괴검사 기법 중 전자기신호를 이용하여 대상체의 결함유무를 판단하는 방법으로 MFL(Magnetic Flux Leakage: 자기누설) 탐상 기법이 대표적이다. 자기누설 기법을 적용한 비파괴검사 탐상 시스템을 MFL PIG(Pipeline Inspection Gauge)라고 부른다. 일반적으로 직경이 30 inch 이상인 가스배관 내부는 20기압 이상의 높은 압력을 유지하고 있고, 이로 인해 자기누설 피그(MFL PIG)는 별도의 추진

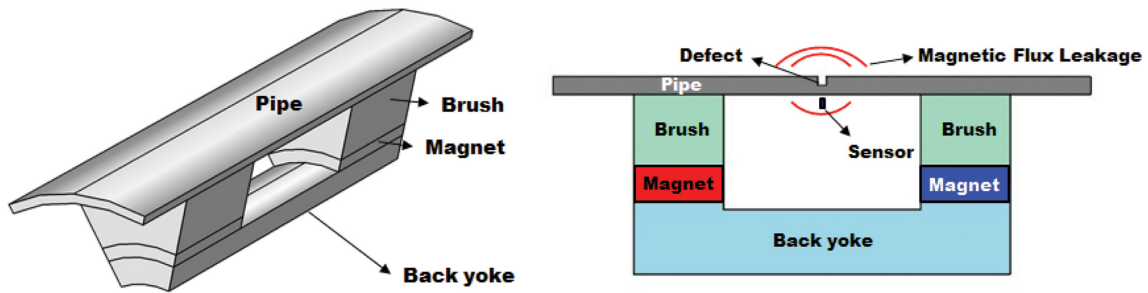


Fig. 1. (Color online) The basic structure and operating principle of MFL PIG.

장치 없이 배관 내벽에 붙은 상태에서 약 4 m/s의 속도로 이동하며 운용된다. 국내외에서 운용되고 있는 자기누설 피그(MFL PIG)는 배관 외벽에 발생한 단일결함의 유무 판별과 결함의 형상 추정 성능은 뛰어나며, 이를 위해 효율적인 결함 신호 측정 방법 및 신호처리 방법에 관한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다[4-6].

가스 배관의 MFL 비파괴 검사 시스템이 다방면으로 적용되어 발전해오고 있는 가운데 실제 배관에서 발생하는 결함은 대부분 용접 부위 근방에서와 수분 함량 지대에 나타난다. 이 경우에는 하나의 결함을 중심으로 기존 결함의 크기를 확장되는 형태를 취하거나 인접한 곳에 군집상태로 늘어선 분포를 보이는 경우가 많다. 이와 같은 다중 결함현상은 배관의 물질 특성과 주위 환경을 고려해 보았을 때 배관 전체 면을 따라 분포할 가능성이 높다. 기존 연구에서 사용한 결함 판정법으로는 수 mm 간격으로 인접한 다중 결함을 구분해내고 그 크기를 정확하게 판정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 다중 결함 판정 중 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위해 인접 결함간의 신호 패턴을 분석하여 이를 보정할 수 있는 기법이 필요가 있다[7]. 그러나 선행 연구에서는 밀집된 다수의 결함에 의해 왜곡된 자기누설 신호가 결함신호를 분석할 때 미치는 영향을 분석하는데 국한되어 있어, 인접한 결함간의 영향을 고려하여 결함의 형상 추정 정확도를 향상시키는 연구가 미흡하다.

본 논문에서는 자기 누설 방식의 비파괴 검사 시스템에서 다중 결함에 의한 자기 신호의 왜곡 현상을 확인하기 위해 결함의 배치를 축방향과 원주 방향으로 달리하고 결함간의 거리를 결함 직경의 배수로 변화시키면서 신호 패턴을 분석하였다. 이를 바탕으로 인접한 결함간의 영향을 고려한 개선된 결함 판정법에 대한 기초 알고리즘을 제안하였다.

## II. 자기 누설 신호의 패턴 분석

### 1. 자기누설 탐상시스템(MFL PIG)의 구조 및 원리

Fig. 1은 자기누설 비파괴검사 시스템의 기본적인 구조와

동작원리를 나타낸다. 이 시스템의 구조는 가스배관을 강력하게 착자시키기 위한 자계 인가 시스템과 결함에 의해 발생하는 누설 자기장 신호를 측정하기 위한 센서 시스템으로 구성된다. 배관에 자계를 인가할 때 높은 자기 효율을 얻기 위하여 강자성체인 백요크(Back-yoke)를 피그(PIG) 몸체로 사용하며, 그 위에 영구자석을 설치한 후 판형 브러시(Brush)를 배치하여 영구자석에서 발생한 자속이 최대한 배관으로 전달될 수 있도록 자기회로를 구성한다. 배관이 자기 포화된 상태에서 배관외벽에 결함이 존재하는 경우 결함 주위에 자속이 통과하는 단면적이 줄어들고 배관의 비선형적인 자기 특성에 의해 자기저항이 증가한다.

이로 인해 자기저항이 증가하면 인가 자계에 의한 자속이 모두 배관을 통과하는 것이 아니라 공기 중으로 누설이 발생하는데, 이때 배관 외부로 누설되는 신호를 자기누설 신호라고 한다. 피그(PIG)는 이러한 자기누설 신호를 홀 센서를 이용하여 검출함으로써 결함 유무를 판별하고 형상 정보 데이터를 취득한다. Fig. 2는 직경이 30 inch인 배관에 적용되는 자기누설 피그(MFL PIG)의 구조를 나타낸 것이다.

### 2. 단일 결함에 의한 신호

먼저 다중 결함에 의한 신호의 왜곡 현상을 고찰하기 전에 단일 결함에 의한 신호 패턴 분석을 수행하였다. Fig. 3과 같은 두 가지 방향으로 자속 밀도의 축 방향 성분을 측정하였

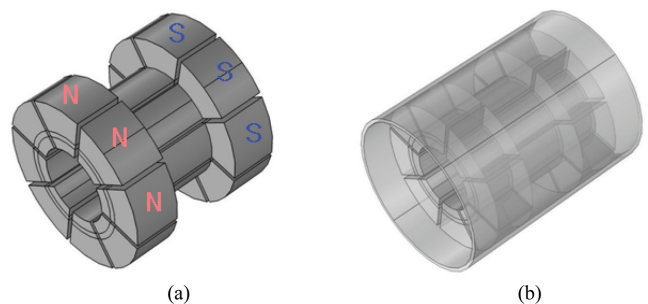


Fig. 2. (Color online) The structure of MFL PIG in pipelines; (a) MFL PIG (b) MFL PIG in pipelines.

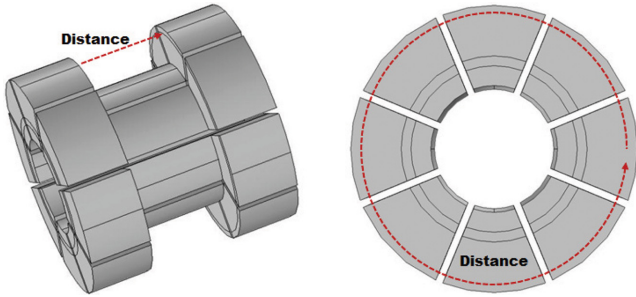


Fig. 3. (Color online) Measure direction by location of defect.

으며, 여기서 실제 MFL 시스템의 홀센서 위치를 고려하여 배관 내경으로부터 3 mm 아래 지점에서 각각 측정하도록 하였다. 해석에 사용된 결함은 직경이 배관 두께의 3배인 52.5 mm, 깊이는 배관 두께와 같은 17.5 mm인 것을 사용하여 배관에 완전한 천공(Hole)이 형성되도록 하였다.

먼저 원주 방향으로 측정했을 경우 자속 밀도의 축 방향 성분이 Fig. 4(a)에서와 같이 결함을 중심으로 넓게 펼쳐지고, 결함으로부터의 거리에 따라 점차 0으로 수렴하는 형태를 띈다. 또한 결함 중심부를 기준으로 화산의 형태로 움푹 패인 곡선이 그려지는 것은 결함이 배관을 완전히 관통한 천공의 형태이기 때문에 결함 아래로 누설되는 자기장의 효과가 최소화되고 원주 방향으로 크게 누설되기 때문이다. 그러나 Fig. 4(b)에서 나타나듯이 측정 방향을 축 방향으로 했을 경우 결함의 모서리 부근에서 오히려 자속 밀도의 부호가 바뀌는 현상이 생기는데 이는 결함의 모서리 부근일 경우 오히려 배관 내부 또는 외부로 수직하게 이동하는 성분이 지배적으로 나타나기 때문에 축 방향 성분만 놓고 봤을 경우 감소하는 현상이 나타난다.

### 3. 축 방향으로 위치한 결함에 의한 신호

다중 결함의 위치에 의한 영향을 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 배관 표면에 설정된 기준점으로부터 축 방향과 원주 방

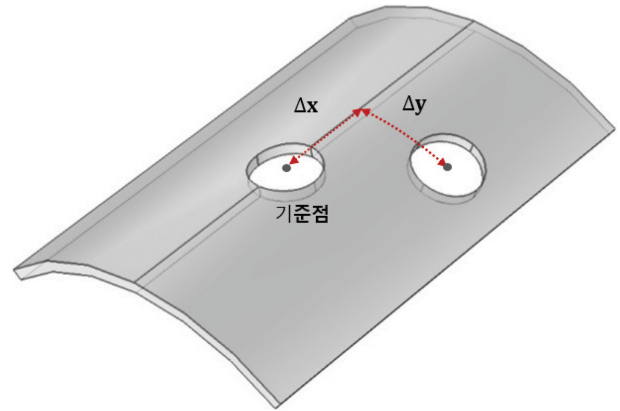


Fig. 5. (Color online) Location of multiple defects.

향의 길이를  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 로 정의하고 결함위치의 이동에 따른 자기신호의 변화를 고찰하였다.

축 방향으로 위치한 결함간의 왜곡 현상을 확인하기 위해서  $\Delta y$ 의 값을 0으로 고정한 상태에서  $\Delta x$ 의 값을 변화시켰다. 여기서  $\Delta x$ 의 값을 결함 직경의 1/3 크기인 17.5 mm로 두었을 때의 자기장 신호의 크기와 방향을 Fig. 6에서 나타내었다. Fig. 6(a)에서와 같이 보면 결함 각각의 모서리 부분에서 자기장이 다소 몰리는 것은 배관을 따라 흐르던 자기장이 얇아진 배관의 결함 부분을 지나면서 배관 좌우와 홀 센서가 위치하는 배관 내부로 누설되어 나타나는 현상이다.

Fig. 6(b)에서는 배관의 축 방향으로 위치한 결함간의 거리를  $\Delta x$ 로 나타내었으므로 측정 방향을 축 방향으로 하여 자기장의 크기  $B_z$ 의 값을 그래프로 나타내었다. A지점에서 B지점까지 축 방향으로 위치한 자기장 신호를 살펴보면 인접한 두 결함의 위치와 크기가 확연히 드러난다. 결함 각각의 먼 쪽 부분의 신호 크기가 안쪽에 비해 크게 나타나는 것은 결함이 없는 상태에서 결함을 만나면서 자기장의 방향이 틀어지며  $B_z$  성분이 크게 증가하여 나타나는 현상이다.

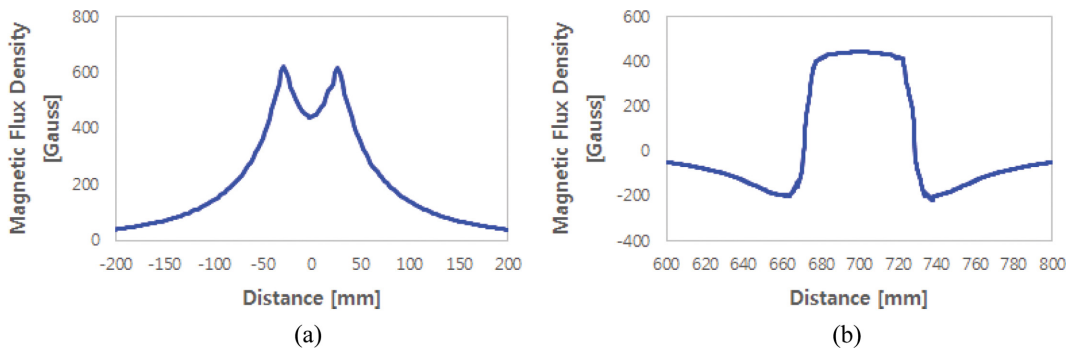
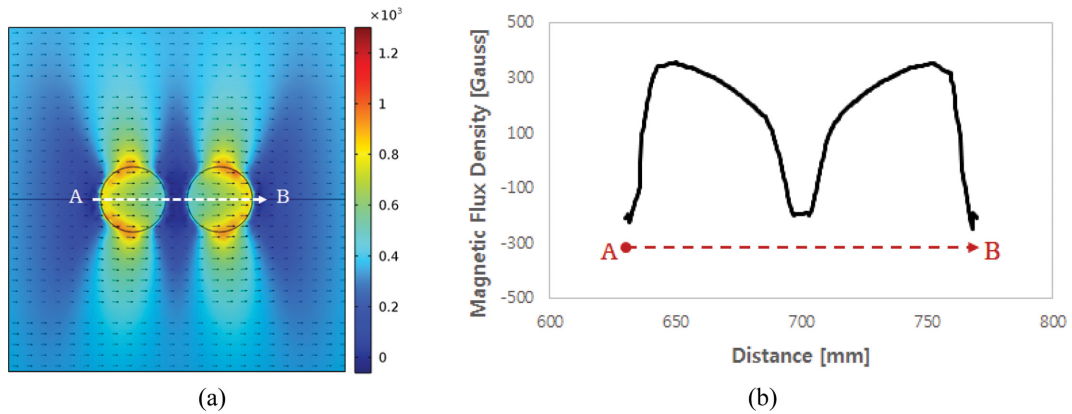
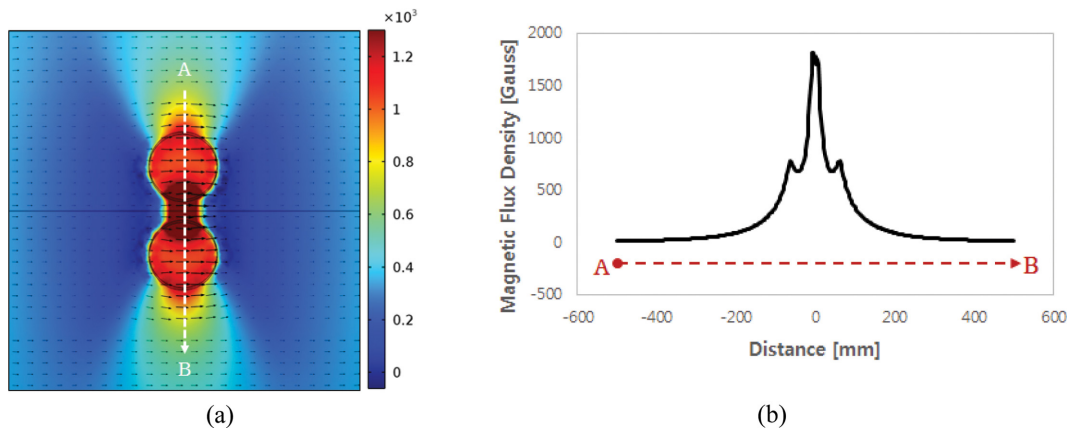


Fig. 4. (Color online) Distribution of magnetic flux density by measure direction; (a) in case of circumferential direction. (b) in case of axial direction.



**Fig. 6.** (Color online) Distribution of magnetic flux density by located with axial direction; (a) Measure direction of multiple defects located by axial direction. (b) Magnetic flux density of multiple defects.



**Fig. 7.** (Color online) Distribution of Magnetic Flux Density by located with circumferential direction; (a) Measure direction of multiple defects located by circumferential direction. (b) Magnetic Flux Density of multiple defects.

**4. 원주 방향으로 위치한 결함에 의한 신호**

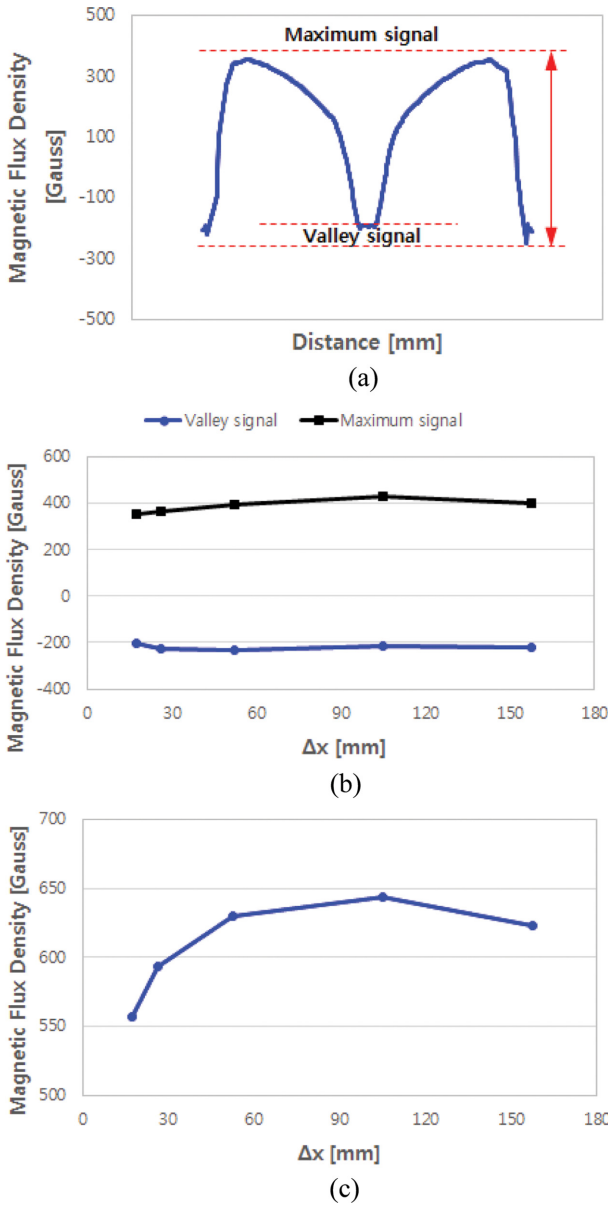
마찬가지로 배관의 원주 방향으로 위치한 결함에 의한 왜곡 현상을 확인하기 위해  $\Delta x$ 의 값을 0으로 고정하고  $\Delta y$ 의 값을 17.5 mm로 둔 상태에서 자기장의 크기와 방향을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6과는 달리 결함 사이에서 더욱 진한 빨간색을 띄면서 신호가 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 3차원 원통형으로 설계된 배관에서 누설된 자기장은 투자율이 낮고 자기 저항이 큰 공기층인 배관 내부와 외부로 흐르기보다 결함 옆으로 돌아서 나가려는 성질이 크기 때문에 나타나는 현상이다.

원주 방향으로 놓인 결함간의 신호를 그래프로 확인하기 위해서 측정 방향을 결함 각각의 중심을 지나도록 하는 선을 따라  $B_z$ 의 값을 나타낸 것이 그림 Fig. 7(b)이다. 단일 결함에 의한 신호보다 결함 사이 공간에서 더욱 크게 왜곡되어 비정상적인 크기의 뾰족한 신호가 나타나 약 1800 Gauss의 피크값을 가지는 신호가 형성된다.

**III. 다중 결함에 의해 왜곡된 결함신호의 분리 및 평가방법**

**1. 축 방향으로 위치한 결함의 자기누설 신호의 분리**

인접한 결함간의 신호 왜곡 현상을 보정하기 위해 Fig. 8(a)와 같이 신호의 최대신호(Maximum signal)값과 결함 사이의 계곡신호(Valley signal)값을 이용하여 결함의 분리 가능 여부와 실제 결함 대비 증가분에 대해서 살펴보기 불가능해지는 것으로 볼 수 있기 때문이다.  $\Delta x$ 의 값을 각각 결함 직경의 배수인  $a/2(8.75 \text{ mm})$ ,  $a(17.5 \text{ mm})$ ,  $2a(35 \text{ mm})$ ,  $3a(52.3 \text{ mm})$ 일 때 최대신호 값과 계곡신호 값을 Fig. 8(b)에 나타내었다. Fig. 8(c)는 결함의 축방향 간격거리에 따른 최대신호 값과 계곡신호 값의 차이에 해당한다. 최대신호 값을 놓고 보았을 경우 결함간 거리  $\Delta x$ 의 변화에 따라 상승하다가 다시 감소하는 양상이 보이지만, 전체 신호 크기의 비중을 놓고 보았을 때 일정한 값을 가지는 것으로 해석할 수 있고 최

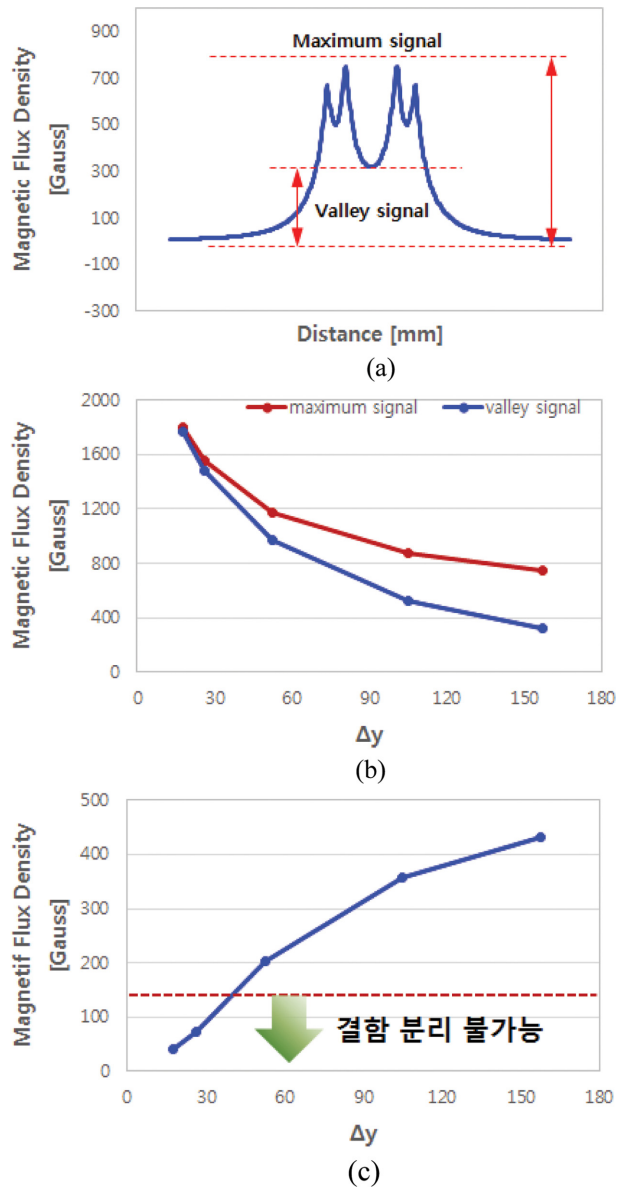


**Fig. 8.** (Color online) Distortion effects due to change in  $\Delta x$ ; (a) Definition of maximum signal and valley signal. (b) Change of maximum signal and valley signal. (c) Difference of maximum signal and valley signal.

대신호 값과 계곡신호 값의 차이 또한  $-250 \sim -200$  Gauss 범위에서 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 축 방향으로 인접한 결함간의 신호 왜곡 현상이 결함의 분리 여부에는 영향을 미치지 않는 것으로 해석된다.

**2. 원주 방향으로 위치한 결함의 자기누설 신호의 분리**

원주 방향으로 놓인 결함의 경우도 마찬가지로, 결함 직경의 배수로 간격  $\Delta y$  값을 설정하여 신호값을 살펴 본 결과가 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 9(a)와 같이 최대신호(Maximum



**Fig. 9.** (Color online) Distortion effects due to change in  $\Delta y$ ; (a) Definition of maximum signal and valley signal. (b) Change of maximum signal and valley signal. (c) Difference of maximum signal and valley signal.

signal)값과 계곡신호(Valley signal)값을 정의하고 각각의  $\Delta y$ 에 대해서 측정된 결과를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 축 방향으로 놓인 결함에서와는 달리  $\Delta y$ 의 변화에 따른 신호의 왜곡 현상이 두드러지게 나타나는데 특히 Fig. 9(c)와 같이  $\Delta y$ 가 감소하면서 결함 직경보다 작은 경우까지 도달한 경우에는 최대신호 값과 계곡신호 값의 차가 0에 수렴하면서 두 결함의 신호가 단일 결함에 의한 신호와 유사한 형태를 가지게 된다. 이러한 신호의 경우 실질적으로 별개의 결함으로 판별하기 어려움이 있고 또한 크게 증가한 최대신호 값으로 인해 실제 결함보다 크게 판정된다.

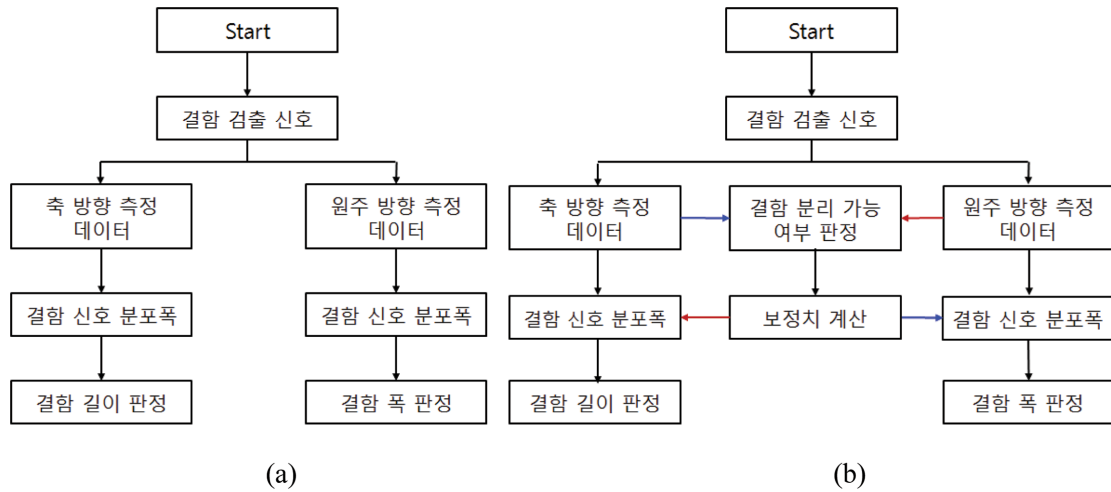


Fig. 10. (Color online) Estimation method of defect's length and width; (a) previous method. (b) enhanced method.

일반적으로 자기누설 방식의 비파괴 검사 시스템에서 노이즈와 실제 결함에 의한 신호를 구분하는 최소 자기장 수치가 약 40 Gauss로 기준을 정한다. 이를 고려하면 Fig. 9(c)에서 처럼 결함 사이의 간격  $\Delta y$ 가 결함 직경의 1/3보다 작아질 경우 판정이 불가능한 것으로 해석된다.

3. 결함의 길이와 폭 치수의 판정 알고리즘 개선

배관의 인접한 결함들의 상호 간섭으로 인해 결함 신호의 왜곡이 발생하고 이는 결함의 형상치수를 판정 시 신뢰성 있는 성능결과를 도출할 수 없다. 따라서 기존의 결함 판정 알고리즘에서 다중 결함간의 신호왜곡 인자를 보상할 수 있는 새로운 알고리즘의 도입이 필요하다. 기존 자기누설 피그(MFL PIG)에서 결함 길이와 폭을 판정할 때에는 배관의 축 방향 이동거리에 따른 결함신호의 분포와 원주방향 거리에 따른 결함신호의 분포 폭을 이용해서 추정하였다[6]. 다중 결함의 신호 왜곡정도를 보상하기 위해서는 우선적으로 결함의 분리 여부를 판별한 뒤에 각각의 신호 보정치를 대입하여 결함의 상호 간섭으로 인해 왜곡된 신호를 보상해 주어야 한다. Fig. 10(a)는 기존의 결함의 평가 알고리즘에 해당하며 Fig. 10(b)는 다중결함의 영향을 고려한 개선된 평가 알고리즘에 해당한다.

IV. 결 론

기존의 자기 누설 방식의 비파괴 검사 시스템에서는 단일 결함에 의한 결함 신호 검출 방법에 집중 해왔는데 실제 배관에서 인접한 다수의 결함이 형성하는 신호는 상호 간섭으로 왜곡되어 결함 판정 과정 중에 치명적인 오류가 발생할 수 있다는 문제점을 가진다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 인

접한 두 결함의 위치에 따른 결함 신호의 왜곡 현상을 분석 하였다.

실제 배관에서 복잡하게 형성되어 있는 다중 결함을 2개의 결함으로 단순화하고, 깊이를 배관 두께의 100 %인 hole의 형태로 하여 자기장이 원주 방향으로 빗겨 나가는 현상을 극대화하도록 하여 신호를 분석하였다. 결함간의 위치를 배관의 축 방향 및 원주 방향으로 이동시키며 분석한 결과 원주 방향으로 인접하여 형성된 결함의 경우 약 결함 직경의 1/3 이하인 지점에서는 단일 결함의 형태로 신호가 형성되고 신호 크기 또한 크게 증가함을 확인하였다.

하지만 본 논문에서는 깊이 100 %, 직경 52.5 mm로 동일한 크기의 결함으로 분석했기 때문에 실제 배관에서 무작위로 분포한 결함에 대해서는 추후 서로 다른 크기와 깊이에 대한 분석을 통해 더욱 정밀한 보정치를 계산할 필요가 있다. 또한, 원주 방향으로 위치한 결함의 경우 결함 직경의 1/3 지점에서 자기장이 단일 신호의 형태로 분포하기 때문에 이를 정확히 판정하기 위해서는 기존의 결함 판정 알고리즘을 개선한 새로운 알고리즘이 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2015R1D1A3A01017721).

References

[1] G. S. Park, Korea Energy Economics Institute Research Report 2005-13 (2005).  
 [2] A. E. Crouch, Gas Research Institute Topical Report GRI-91/0365, 12 (1993).

- [3] G. S. Park, S. Y. Hahn, K. S. Lee, and H. K. Jung, IEEE Trans. Magn. **29**, 1542 (1993).
- [4] K. K. Tandon, Materials Selection & Design **36**, 75 (1997).
- [5] H. Haines, P. C. Porter, and L. Barkdull, Pipeline & Gas Industry **82**, 49 (1999).
- [6] H. M. Kim, H. R. Yoo, Y. W. Rho, and G. S. Park, Int. Conf. URAI 734 (2013).
- [7] K. Seo, D. G. Kim, J. M. Han, and G. S. Park, Trans. KIEE **56**, 876 (2007).