

## A Study on the Design of RFECT System for Ferromagnetic Pipelines

Yu Ki Lee, Hui Min Kim, and Gwan Soo Park\*

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

(Received 25 November 2014, Received in final form 19 December 2014, Accepted 22 December 2014)

Remote Field Eddy Current Testing (RFECT), one of the ways which is a nondestructive testing using electromagnetic fields, can make up for Magnetic Flux Leakage (MFL) weaknesses and general Eddy Current Testing (ECT) weaknesses which is an occurrence of a huge friction force or disadvantage of detecting defects on the outer wall. So many of institutes and laboratories have studied on RFECT for the past 50 years. But There is a lack of discussion about a study on eddy current and magnetic field distributions in a pipe wall and designing of RFECT exciter coil. In this paper, eddy current and magnetic field distributions in a pipe wall and influence of altering variables are analyzed. Also, the optimal design algorithm about the RFECT Exciter coil are proposed, and influence on defect signals caused by alteration of its shape is analyzed.

**Keywords** : remote field eddy current testing, nondestructive testing, pipe defect detection, design of RFECT exciter coil, finite elements method

### 강자성체 배관 탐상용 RFECT System의 설계에 관한 연구

이유기 · 김희민 · 박관수\*

부산대학교 전자전기컴퓨터공학과, 부산시 금정구 부산대학로 63번길, 609-735

(2014년 11월 25일 받음, 2014년 12월 19일 최종수정본 받음, 2014년 12월 22일 게재확정)

전자기를 이용하여 배관의 비파괴검사를 적용하는 방법 중 하나인 Remote Field Eddy Current Testing (RFECT)는 큰 마찰력이 발생하고 잔류자화성분이 남는 Magnetic Flux Leakage (MFL) 방식과 외벽의 결함을 측정하는데 곤란한 일반 Eddy Current Testing (ECT) 방식의 단점들을 보완할 수 있는 기법으로 50여 년 전부터 다양한 기관에서 연구되어왔다. 그러나 배관 내에서 발생하는 와전류와 자기장에 대한 연구와 RFECT Exciter Coil의 설계에 대한 논의가 부족한 실정이다. 본 논문에서는 유한요소법을 이용한 전자기 해석을 통해 배관 내에서 발생하는 와전류와 자기장의 분포를 확인하고 변수 변화에 따른 영향을 분석하였다. 또한 Exciter Coil에 대한 최적 설계 알고리즘을 제시하고, 결함 형상과 기타 변수 변화가 결함신호에 미치는 영향을 확인하였다.

**주제어** : Remote Field Eddy Current Testing, 비파괴검사, 배관결함탐상, Exciter Coil 설계, 유한요소해석

#### I. 서 론

천연가스는 전 세계적으로 석유에 이어 가장 많이 사용되고 있는 에너지 자원중 하나로 그 중요성은 점점 더 증가할 전망이다. 뿐만 아니라 셰일가스와 같은 비전통가스의 비중 또한 증가함에 따라, 이를 수송하기 위한 가스 배관의 안전을 점검하는 일 또한 중요하게 될 것으로 예상된다[1, 2]. 현재 천연가스 공급을 위해 설치된 배관들은 대부분 지하에 매설되어 있는데 이러한 배관들은 습기, 지하수, 산성도, 지압,

자연재해 등으로 인해 부식이나 손상될 가능성이 있다. 따라서 이를 미연에 방지하기 위한 유지보수 기법으로 가스배관에 비파괴검사를 널리 사용하고 있다. 세계적인 리서치그룹인 Frost & Sullivan에 따르면 전 세계 비파괴검사 기기 시장은 2008년 11억불에서 7.8%, 비파괴검사 서비스 시장은 2012년 42억불에서 매년 10.8%의 높은 성장률을 가질 것으로 전망하였다. 이를 바탕으로 비파괴검사 기법에 대한 연구가 활발해 질 것을 예상할 수 있다[3, 4].

비파괴검사 기법 중 전자기를 이용한 방법으로 영구자석을 이용한 자기누설법(Magnetic Flux Leakage)와 와전류를 이용한 방법이 있다. 자기누설법은 내벽과 외벽에 상관없이 결함을 검출할 수 있는 장점이 있으나 배관의 직경이 작을 경우,

강력한 인력으로 인해 발생하는 마찰력으로 기기 구동에 어려움이 있을 수 있고, 한번 배관을 탐상하고 나면 잔류자화성분이 남게 되어 재검사시 누설자기장의 크기를 줄여 결함 탐상에 어려움이 발생한다. 일반적인 와전류 탐상법은 내벽에서 발생한 결함을 잘 측정할 수 있으나, 표면에서 크게 발생하는 와전류의 특성상 외벽 결함을 탐상하는데 있어 불리함이 있다. 따라서 이 두 기법의 단점을 보완하는 방법으로 Remote Field Eddy Current Testing (RFECT) 기법을 사용한다[5, 6].

RFECT는 1958년, 당시 Shell사에 근무하고 있던 Schmidt 교수에 의해 처음 제시되었고, 3년 후인 1961년 ‘Intelligent Pig’라고 명명하여 처음 배관에서 시연하게 되었다. 이후 많은 대학과 비파괴검사 용역업체에서 RFECT에 대해 연구와 개발을 진행해왔다. 그러나 주로 배관 내부와 외부에서 측정되는 자기장의 크기나 위상의 변화에 대한 연구가 주를 이루었고 배관 내에서 형성되는 와전류 및 자기장의 분포와 자기장을 형성하는 Exciter Coil의 설계 알고리즘에 대한 논의가 부족한 실정이다.

이에, 본 논문에서는 전자기 해석을 통한 RFECT의 배관 내에서의 와전류와 자기장 분포를 확인하고 각 변수들의 영향을 분석하여 탐상기기의 설계에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 또한 Exciter Coil의 최적 설계 알고리즘을 제시하여 탐상기기 설계 시에 발생할 수 있는 인적, 물적 낭비를 줄일 수 있는 방안을 모색하였다. 마지막으로 결함의 형상과 기타 변수의 변화가 측정신호에 미치는 영향을 분석하였다.

## II. RFECT System 분석

### 1. 배관내에서의 와전류 및 자기장 분석

먼저 RFECT의 원리에 대해 명확히 확인하기 위해 배관 내부에서 발생하는 와전류와 배관 주변에서 발생하는 자기장

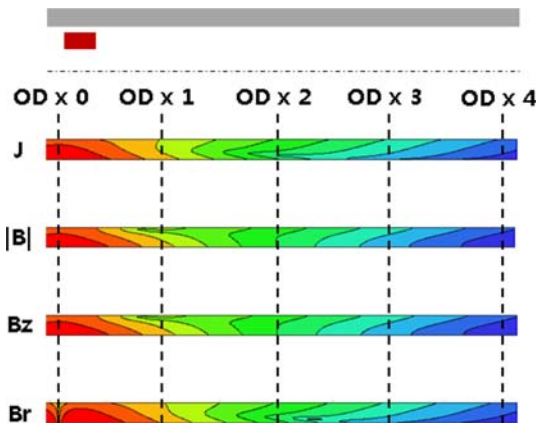


Fig. 1. (Color online) Distribution of eddy current and magnetic flux density in the pipe wall.

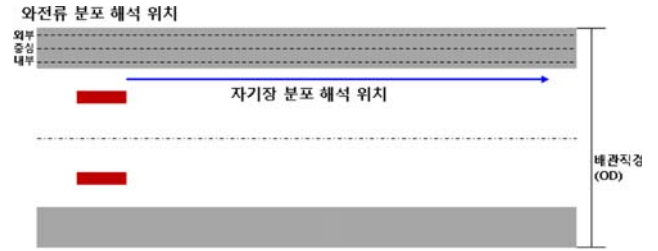
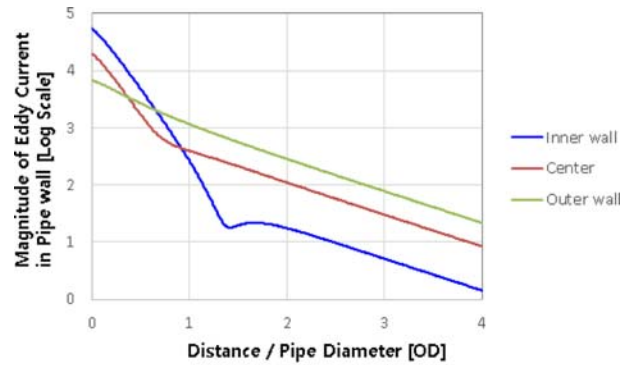
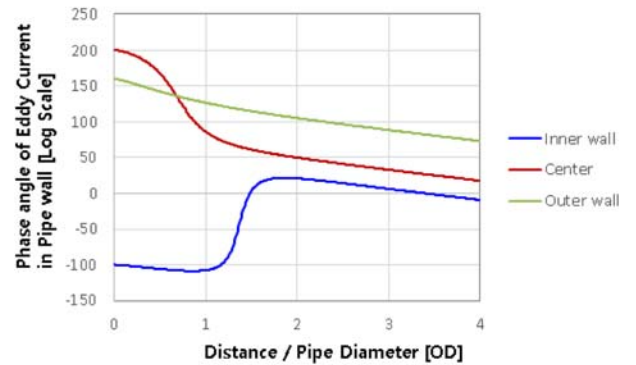


Fig. 2. (Color online) Measured section of eddy current and magnetic flux density in the pipe wall.

의 분포에 대해 분석하였다. 이때 와전류와 자기장의 크기는 거리에 따른 감소량이 크므로 Log Scale로 표현하였다. 먼저 Fig. 3에 배관 내의 와전류 분포를 내벽, 중심, 외벽의 세부 분포로 나누어 분석하였다. Exciter Coil과 가까운 배관 내벽의 경우, 와전류 크기의 감소량에 따라 명확히 Direct Zone과 Remote Zone을 구분할 수 있고 배관 외벽에서는 Remote Zone에서 내벽의 와전류 감소량과 유사한 것을 확인할 수 있다. 위상의 변화 또한 와전류의 크기와 동일한 경향성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 공기에서 전달되는 자기장과 배관에서 전달되는 자기장의 감소량의 차이로 인해 와

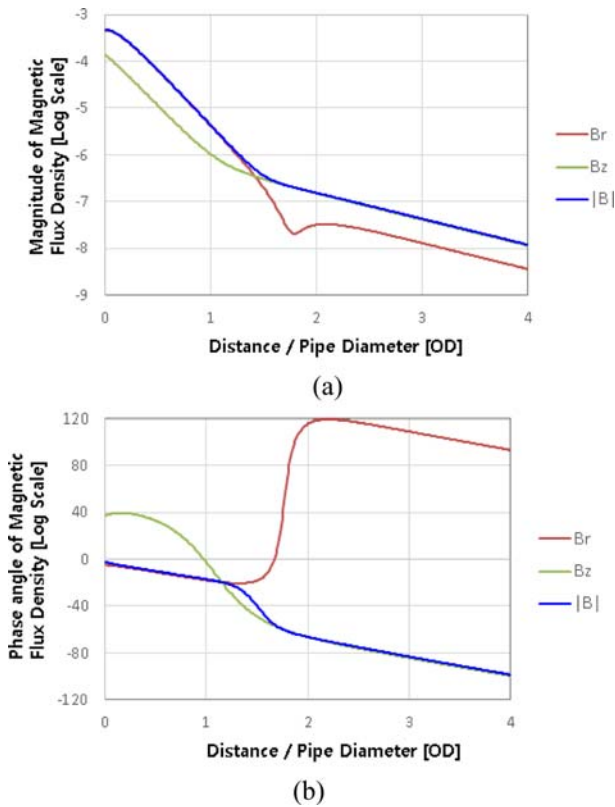


(a)



(b)

Fig. 3. (Color online) Change in distribution of eddy current; (a) magnitude of eddy current in pipe wall, (b) phase angle of eddy current in pipe wall.



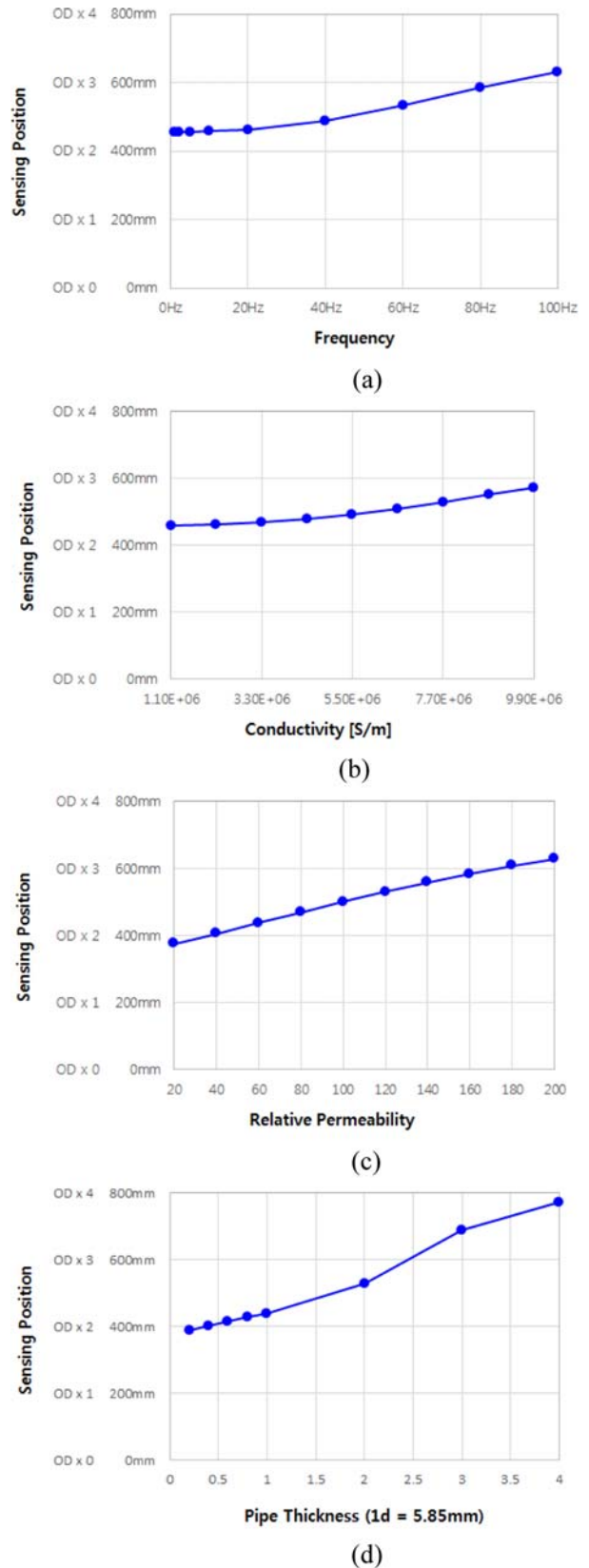
**Fig. 4.** (Color online) Change in distribution of magnetic flux density; (a) magnitude of magnetic flux density near inner pipe wall, (b) phase angle of magnetic flux density near inner pipe wall.

전류의 감소량 또한 달라지고 결과적으로 각 영역으로 나눌 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 Fig. 4에 배관 내벽 부근에서의 자기장 변화를 방사방향성분, 축방향성분, 합성성분으로 나누어 분석하였다. 분석 결과, Direct Zone에서는 방사방향성분의 자기장이 지배적이고 Remote Zone에서는 축방향성분의 자기장이 지배적인 것을 확인할 수 있다. 이를 이용하여 각 영역을 구분할 수 있는데, 먼저 크기를 이용할 경우 방사방향성분과 축방향성분의 크기가 서로 같은 지점을 중심으로 Direct Zone과 Remote Zone을 간단히 구분할 수 있다. 위상을 이용할 경우 방사방향의 성분이 지배적인 구간을 Direct Zone, 축방향의 성분이 지배적인 구간을 Remote Zone으로 정할 수 있고 그 사이에 있는 구간을 Transition Zone으로 정할 수 있다. 또한 각 성분별로 감소량이 변하는 구간이 다른 것을 확인할 수 있는데, 측정센서의 측정방향에 따라서 측정센서의 설치위치에 영향을 줄 것으로 예상된다.

## 2. 원격장(Remote Zone)에 영향을 미치는 변수 분석

RFECT System을 설계함에 있어 Remote Zone의 시작점은 탐상기기를 구성할 때 최소길이를 지정하는데 중요한 역



**Fig. 5.** (Color online) Displacement of sensing point changing variables; (a) in case of frequency, (b) in case of conductivity, (c) in case of relative permeability, (d) in case of pipe thickness.

할을 한다. Remote Zone의 시작점에 의해 측정센서의 위치가 정해지므로 이에 영향을 주는 변수를 분석하였다. Remote Zone의 형성에 영향을 주는 변수들은 주파수, 배관의 투자율, 전도율, 배관의 두께로 나눌 수 있다. 여기서 주파수, 배관의 투자율, 전도율은 배관 내에서 발생하는 Skin depth에 영향을 주는 변수들로 식(1)과 같이 성립한다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

또한 Fig. 5(a), (b), (c)의 결과와 같이, 주파수, 배관의 투자율, 전도율이 커짐에 따라 Remote Zone의 시작점이라고 할 수 있는 Sensing Point 지점이 점점 길어지는 것을 확인하였다. 이것은 식(1)에 의해 Skin depth의 크기가 작아질수록 Remote Zone의 시작점은 멀리서 생성되는 것으로 해석할 수 있다. Fig. 5(d)는 Skin depth를 고정하고 배관의 두께를 변화가 Remote Zone에 미치는 영향을 분석한 것으로 배관의 두께가 두꺼워 짐에 따라 마찬가지로 Sensing Point 지점이 점점 길어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 배관의 두께와 Skin depth의 비에 따라 RFECT Sensing Point가 변화함을 알 수 있고, 이는 배관의 재질과 두께에 따라 최적의 주파수가 존재할 수 있음을 나타낸다.

### III. RFECT System 설계

#### 1. 설계 기본 조건

기준이 될 배관의 명칭은 연료가스 배관용 탄소강관(SPPG, KSD 3631)로 규격은 8인치 배관을 기준으로 한다. 이때 배관의 두께는 KS규격에 따라 5.85 mm를 선정하였다. 배관의 재질특성인 비투자율과 전도율은 실험치에 의거하여 각각 100과  $6.67 \times 10^6$  S/m로 선정하였다. RFECT System의 구성은 탐상기기를 구성하는 구조물을 무시하고 Exciter Coil과 Receiver Coil만 존재한다고 가정한다. Exciter Coil에 사용할 전원은 AC 12 V 50 Hz로 선정하였다. Receiver Coil은 공심코어를 가지는 코일로 Table I의 사양을 가진다.

#### 2. RFECT Exciter Coil 설계 알고리즘

Exciter Coil은 RFECT System에서 자기장을 발생시키는

요소로 설계에 있어 설계 변수와 제한 변수로 나누어 설계과정을 진행 할 수 있다. 설계 변수로는 기하학적 요소로 코일의 길이, 코일의 외경과 내경, 와이어의 두께 등으로 설정하였고 제한 변수는 회로 보호와 열 발생 제한, 배터리 용량 고려를 통해 전류, 전류밀도, 소모전력 등을 설정하였다. 본 논문에서는 GTI사의 설계법에서 설계 변수와 제한 변수를 추가하여 최적의 RFECT Exciter Coil 설계 방법을 제시하였다[7].

먼저 코일의 길이와 와이어 직경을 설정하고 코일의 외경과 내경을 설정하면 코일의 두께가 선정된다. 식(2), 식(3), 식(4)를 통해 코일의 턴수와 저항과 인덕턴스 등의 회로정수를 구할 수 있다.

$$N = \frac{D \times l_{coil} \times k_{fill}}{0.25 \times \pi \times d_{wire}^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{2\pi \times N \times r_{coil}}{\sigma_{copper} \times 0.25 \times d_{wire}^2 \times \pi} \quad (3)$$

$$L = \frac{31.5 \times r_{coil}^2 \times N^2}{6r_{coil} + 9l_{coil} + 10D} \times 10^{-6} \quad (4)$$

이때,  $D$ 는 코일의 두께,  $l_{coil}$ 은 코일의 길이,  $d_{wire}$ 는 와이어의 직경,  $r_{coil}$ 은 코일의 실효 반지름,  $k_{fill}$ 은 Exciter Coil의 점적률,  $\sigma_{copper}$ 는 구리의 전도율을 나타낸다. 인덕턴스는 코일 주변의 강자성체에 따라 그 값이 크게 바뀔 수 있으나 배관이 코일 외부에 존재하고 그 거리 또한 충분히 멀어 공심코어를 가지는 코일의 인덕턴스 수식과 COMSOL 4.3을 이용하여 비교 시 무시할만한 수준의 오차가 나왔다.

다음으로 제한 변수인 코일의 전류와 전류밀도, 소모 전력으로 본 설계에서는 전류 1 A 이하, 전류밀도 2 A/mm<sup>2</sup> 이하, 소모전력 30 W 이하의 제한값을 선정하여 설계를 진행하였다.

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2}} \quad (5)$$

$$J = \frac{I}{0.25 \times d_{wire}^2 \times \pi} \quad (6)$$

$$P = I^2 R \quad (7)$$

마지막으로 자기장 및 측정신호로 기자력을 이용하여 코일의 자기모멘트를 구하고 이를 통해 측정전압을 구할 수 있다. 측정전압은 전자기 해석결과 자기모멘트와 비례하는 경향성이 있어 이를 토대로 보정상수를 구해 대략적인 측정전압을 구한다. 같은 주파수 및 같은 배관을 사용할 경우 코일이 바뀌더라도 이 보정상수를 이용하여 측정전압을 구할 수 있다.

$$NI = H l_{coil} \quad (8)$$

Table I. Specifications of receiver coil.

|                |         |
|----------------|---------|
| Outer diameter | 16 mm   |
| Inner diameter | 3 mm    |
| Coil length    | 5.4 mm  |
| Wire diameter  | 0.02 mm |
| Turns          | 40000   |
| Fill factor    | 40 %    |

**Table II.** Specifications of exciter coil.

|                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| Outer diameter       | 100 mm                  |
| Inner diameter       | 70 mm                   |
| Coil length          | 33 mm                   |
| Wire diameter        | 0.75 mm                 |
| Coil Thickness       | 15 mm                   |
| Turns                | 560                     |
| Coil Resistance      | 5.83 Ω                  |
| Coil Inductance      | 0.02541 H               |
| Current              | 0.858 A                 |
| Current Density      | 1.942 A/mm <sup>2</sup> |
| Power Consumption    | 4.296 W                 |
| Magnetomotive Force  | 480.48 AT               |
| Coil Magnetic Moment | 2.726 A m <sup>2</sup>  |
| Sensing Voltage      | 30.39 μV                |

$$m = NI \times r_{coil}^2 \times \pi \quad (9)$$

$$V_{sen} = k_{sen} m \quad (10)$$

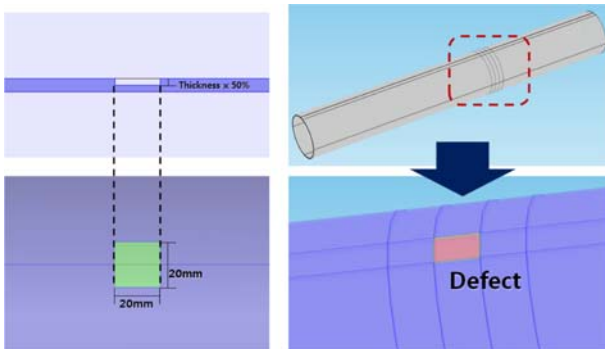
이때,  $H$ 는 코일에 의해 발생하는 자기장,  $m$ 은 코일의 자기 모멘트,  $V_{sen}$ 은 측정코일에서의 출력전압,  $k_{sen}$ 은 출력 비례상수이다. 위의 설계식을 이용하여 AC 12 V 50 Hz의 전원을 이용한 REFCT Exciter Coil의 설계치는 Table II와 같다.

#### IV. 결함 형상에 의한 RFECT 신호 검출

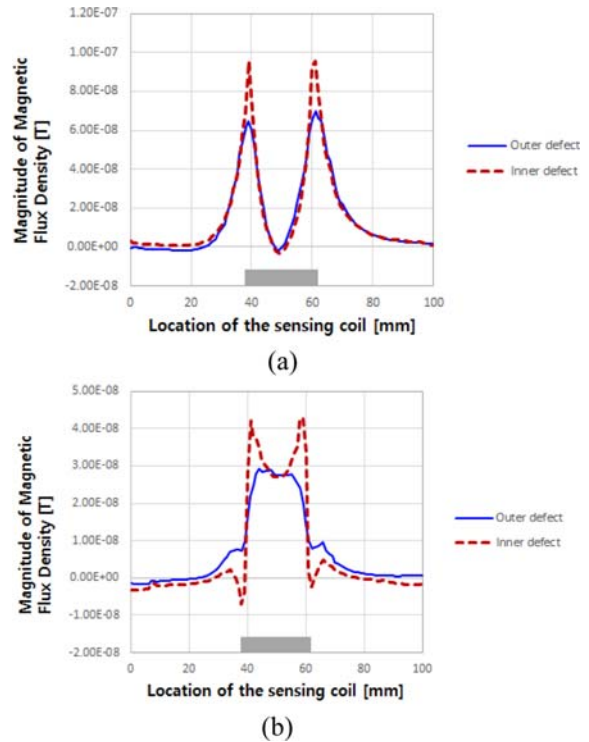
##### 1. 결함 위치에 의한 영향

위에서 설계한 Exciter Coil을 기준으로 결함 발생을 가정하여 전자기 해석을 통해 결함에 의한 신호를 분석하였다. 이때 프로그램은 COMSOL 4.3을 사용하였다. 기본 기준 결함은 길이 20 mm, 폭 20 mm, 깊이 50%(2.925 mm)으로 선정하였다.

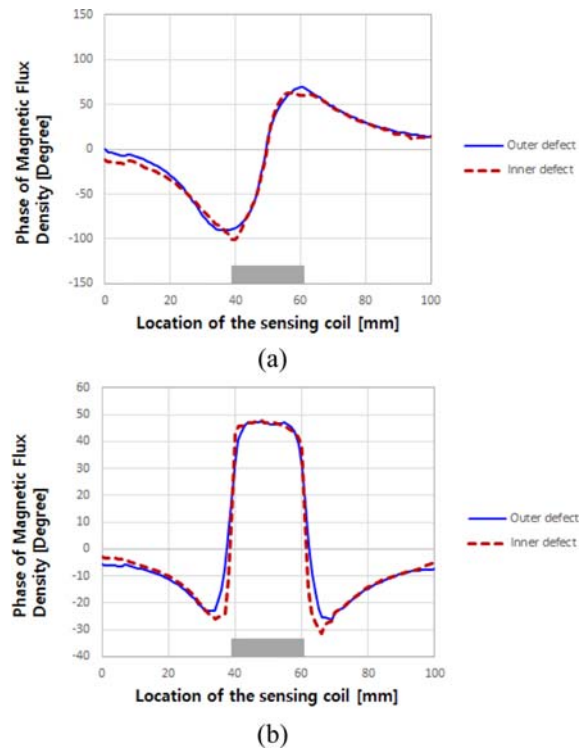
먼저 배관에서의 결함 발생위치에 따른 측정신호의 변화를 분석하였다. 측정 자기장 방향은 방사방향과 축방향 성분을 측정하고 그 크기와 위상을 측정하였다. Fig. 7와 Fig. 8에



**Fig. 6.** (Color online) Electromagnetic analysis modeling of RFECT system.



**Fig. 7.** (Color online) Magnitude of leakage magnetic flux density by location of defect; (a) in case of radial magnetic flux density, (b) in case of axial magnetic flux density.



**Fig. 8.** (Color online) Phase angle of leakage magnetic flux density by location of defect; (a) in case of radial magnetic flux density, (b) in case of axial magnetic flux density.



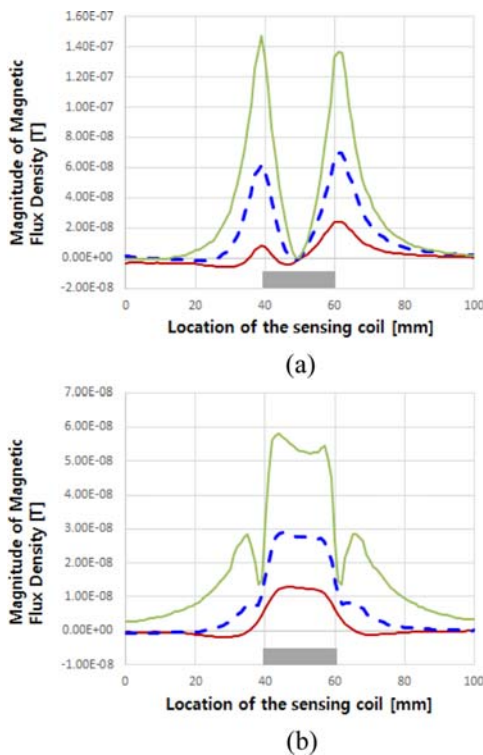
각 신호의 그래프를 나타내었다. 측정결과, 내부결함의 신호의 크기가 대체로 크나 신호의 형태가 유사하여 신호측정에 의한 내부와 외부 결함의 판정은 어려울 것으로 확인되었다. 그러나 축방향 자기장 크기의 경우, 결함 모서리 부분의 영향으로 내부 결함 신호는 모서리 부분의 값이 크게 측정되고 외부 결함 신호는 결함 가운데 값이 크게 나오는 경향이 있으나 실제 결함형성에서는 모서리 부분이 둥글게 형성되는 경우가 많기 때문에 이 또한 실제 상황에서는 비슷한 결함 신호를 가질 것으로 예상된다.

**2. 결함 깊이에 의한 영향**

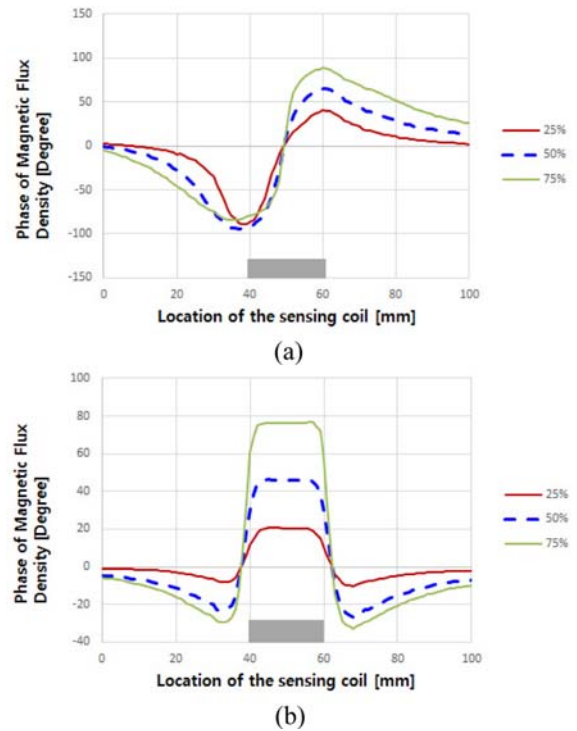
다음으로 결함 깊이에 의한 영향을 분석하였다. 측정 자기장 방향은 방사방향과 축방향 성분을 측정하고 그 크기와 위상을 측정하였다. Fig. 9과 Fig. 10에 각 신호의 그래프를 나타내었다. 측정 결과 깊이가 깊을수록 자기장의 크기와 위상의 변화도 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 특히 자기장 크기의 변화와 축방향의 위상 변화는 깊이 변화에 크게 변하는 것을 확인할 수 있다.

**3. 결함 길이에 의한 영향**

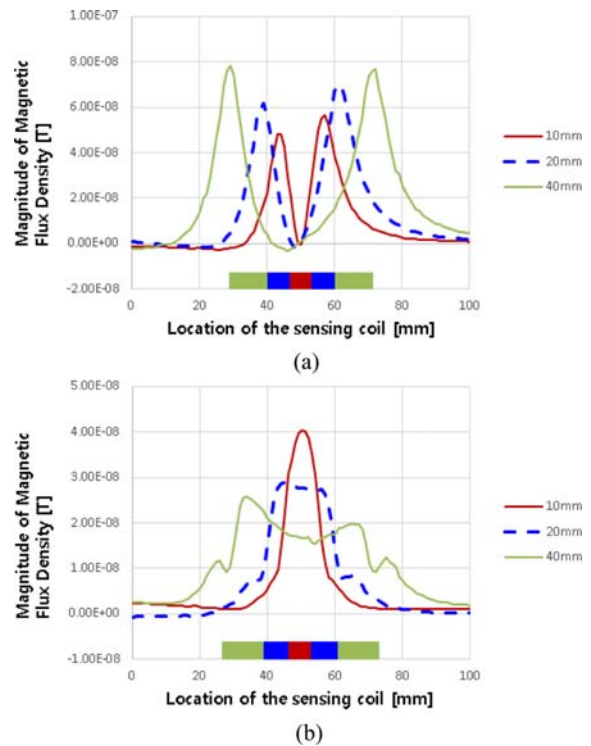
다음으로 결함 길이에 의한 영향을 분석하였다. 측정 자기



**Fig. 9.** (Color online) Magnitude of leakage magnetic flux density by depth of defect; (a) in case of radial magnetic flux density, (b) in case of axial magnetic flux density.



**Fig. 10.** (Color online) Phase angle of leakage magnetic flux density by depth of defect; (a) in case of radial magnetic flux density, (b) in case of axial magnetic flux density.



**Fig. 11.** (Color online) Magnitude of leakage magnetic flux density by length of defect; (a) in case of radial magnetic flux density, (b) in case of axial magnetic flux density.

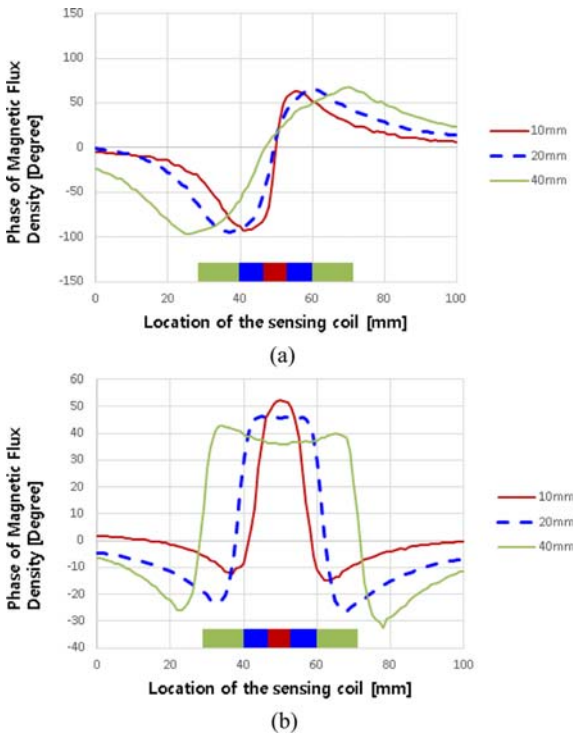


Fig. 12. (Color online) Phase angle of leakage magnetic flux density by length of defect; (a) in case of radial magnetic flux density, (b) in case of axial magnetic flux density.

장 방향은 방사방향과 축방향 성분을 측정하고 그 크기와 위상을 측정하였다. Fig. 11과 Fig. 12에 각 신호의 그래프를 나타내었다. 측정 결과 방사방향의 측정성분은 길이가 길수록 더 큰 최대값을 가지나 축방향 성분은 이와 반대로 길이가 길수록 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 길이의 경우 방사방향성분의 최대값 지점을 연결하여 결함의 길이를 쉽게 구할 수 있는 특징이 있다.

#### 4. 결함 폭에 의한 영향

마지막으로 결함 폭에 의한 영향을 분석하였다. 측정 자기장 방향은 방사방향과 축방향 성분을 측정하고 그 크기와 위상을 측정하였다. Fig. 13과 Fig. 14에 각 신호의 그래프를 나타내었다. 폭의 경우 원주방향으로 측정 시 길이에서의 측정결과와 유사하게 결과값이 도출 될 것이나, 본 논문에서는 하나의 센서에서 축방향으로 이동시에 측정되는 결과만을 분석하였다. 측정 결과 길이와 마찬가지로 폭이 커질수록 신호의 변화가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 길이에 비해 폭에 의한 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

### V. 결 론

현재 수도, 가스, 석유등의 다양한 자원을 수송하는데 배관

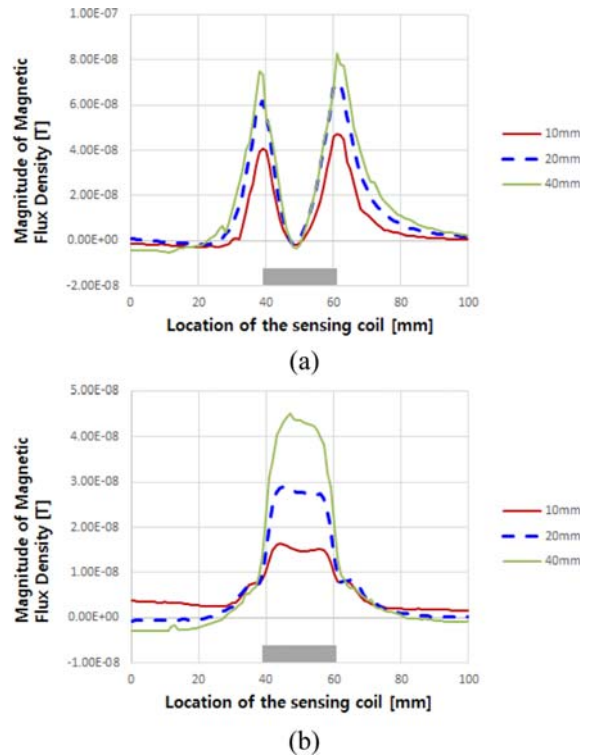


Fig. 13. (Color online) Magnitude of leakage magnetic flux density by width of defect; (a) in case of radial magnetic flux density, (b) in case of axial magnetic flux density.

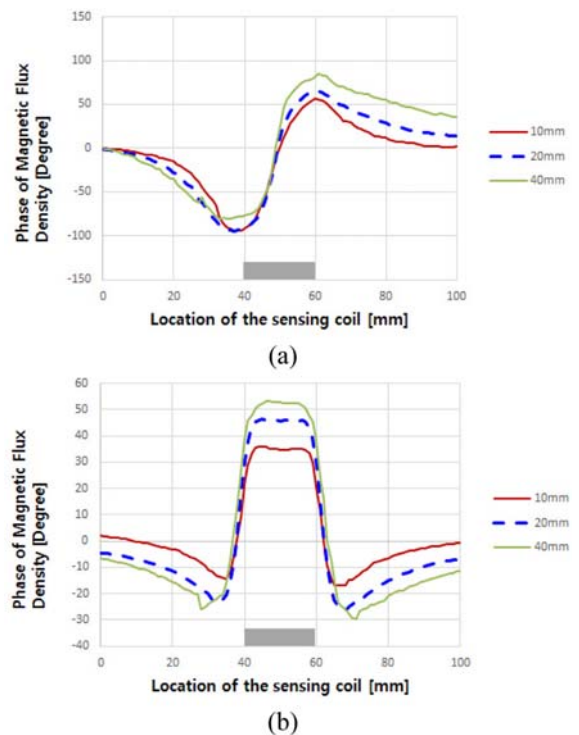


Fig. 14. (Color online) Phase angle of leakage magnetic flux density by width of defect; (a) in case of radial magnetic flux density, (b) in case of axial magnetic flux density.

을 사용하며, 특히 안전 및 미관상의 이유로 각종 배관들이 지하에 매설된 경우가 많다. 이러한 배관의 결함을 검사하는데 비파괴검사를 이용하여 검사할 경우, 공사 작업으로 인한 인적, 물적 낭비를 줄일 수 있으며 많은 사람이 거주하는 지역에서는 자기장을 이용함 비파괴검사가 적절한 방법 중 하나이다. RFECT를 사용한 배관 탐상기법의 경우 배관의 직경에 비해 작게 설계가 가능해 꺾인 부분을 이동하기 쉽다는 장점이 있으나, 이러한 RFECT에 대한 논의가 부족한 실정이었다. 이에 본 논문에서는 RFECT의 와전류 및 자기장 분포에 관한 분석을 진행하고 이를 바탕으로 RFECT Receiver Coil의 위치선정을 논의하였으며, 수식과 제한값을 통해 Exciter Coil의 설계에 대한 알고리즘을 구축하여 추후 탐상 목표가 될 배관에 맞는 RFECT 탐상기기의 최적 설계 과정을 제시하였다.

배관에 결함이 발생할 경우, 그 발생위치, 깊이, 길이, 폭에 신호의 변화가 영향을 받게 되고, 또한 측정 방향에 따른 변화를 분석하여 각 측정 방향에 따른 장점을 분석하였다.

본 논문에서는 측정된 신호를 자기장의 크기와 위상 신호로 선정하였으나 실제 기기를 구성하여 측정할 시 Receiver Coil에 유기되는 전압의 크기와 위상을 측정하게 된다. 추후 다양한 형태의 결함에서 신호의 변화를 확인하고 실제 실험을 진행하여 전압 측정 시 자기장의 변화 경향성과 비교하여 결함 검출 성능과 정확도를 향상시킬 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통산자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음(10040992, 8" 및 16" Unpiggable 가스배관 비파괴 검사용 자기추진 로봇 기술 개발).

### References

- [1] IEA, World Energy Outlook 2012, 49 (2012).
- [2] W. H. Han, "The Development situation and Prospect of Shale Gas", Journal of the Electrical World **429**, 46 (2012).
- [3] John A. Beavers and Neil G. Thomson, "External Corrosion of Oil and Natural Gas Pipelines", ASM Handbook, **13**, 1015 (2006).
- [4] Vijay Mathew, "Trends in the Global NDT Equipment market", World Nondestructive Test Equipment Markets, Frost & Sullivan (2009).
- [5] M. A. Hussein, ME5713 : Nondestructive Testing, 53 (1996).
- [6] IAEA, Non-destructive testing for plant life assessment, IAEA, 1 (2005).
- [7] Albert Teitsma and Julie Maupin, "Reduced Mandated Inspection by Remote Field Eddy Current Inspection of Unpiggable Pipeline", Technical Final Report, 12 (2006).