

工學碩士 學位論文

자기누설 탐상법에 의한
비파괴검사 시스템 개발에 관한 연구

A Study on the Development of a Non-Destructive Test
System by a Magnetic Flux Leakage Method.

指導教授 朴 寬 秀

2002 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 朴 垠 植

本 論 文 을 朴 垠 植 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 李 成 根 ①

委 員 : 工 學 博 士 吉 暻 碩 ①

委 員 : 工 學 博 士 朴 寬 秀 ①

2 0 0 2 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 氣 工 學 科

朴 垠 植

목 차

Abstract

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 MFL PIG의 구조	3
제 2 장 MFL PIG 시스템의 전자기적 해석과 최적 설계	5
2.1 MFL PIG 설계	6
2.2 MFL 결함 해석을 위한 유한 요소법	8
2.2.1 지배 방정식	8
2.2.2 정식화	10
2.3 브러시의 투자율	12
2.4 MFL PIG의 비선형 해석	13
2.5 MFL PIG의 2차원과 3차원 해석	15
2.6 가스관 적정 포화 설계	17
2.7 센서의 민감도 향상	22
제 3 장 가스관 결함에 의한 MFL PIG 검출 신호 해석	24
3.1 MFL PIG의 defect가 있을 경우 3차원해석	24
3.2 MFL PIG의 센서 방향에 따른 검출신호	25
3.3 MFL PIG의 defect 깊이 영향	29
3.4 MFL PIG의 defect 크기 영향	30
3.4.1 기준 defect 해석	30
3.4.2 결함의 폭이 커질 경우	32
3.4.3 결함의 길이가 길어질 경우	34
3.4.4 결함의 폭과 길이가 모두 커질 경우	36
제 4 장 결 론	38
참 고 문 헌	40

A study on the Development of a Non-Destructive Test System by a Magnetic Flux Leakage Method.

by Park, Eun-Sik

Department of Electrical Engineering
The Graduate School of Korea Maritime University
Busan, Republic of Korea

Abstract

In this research, the development of a Non-Destructive Test (NDT) system by a Magnetic Flux Leakage(MFL) method is presented.

The detection of a crack or defect of a gas pipe is very important in management of a gas pipe. The sensing equipment, so called PIG, is commonly used to detect defects of the underground gas pipe. The system is consisted of magnetic yoke, Hall sensors and gas pipe.

in the system, the magnetic field produced in permanent magnet is guided to the gas pipe by brush and magnetic yoke. The Hall sensors detect the leakage flux in the region of defects such as crack, corrosion, wrinkle, buckle and so on.

The defect signals in a MFL type NDT system mainly depend on

the change of the magnetic leakage flux in the region of a defect. So, the optimum system was designed to maximize the magnetic leakage flux in that region and the results are compared with experimental measurements.

제 1장 서론

1.1 연구배경

비파괴 검사란 측정하고자 하는 물체에 손상을 가하지 않고 물체의 결함을 측정하는 방법으로 산업용, 의학용으로 널리 쓰이고 있다. 교량, 시설물 등의 결함발견은 큰 사고를 미연에 방지하는 역할을 한다. 또한 인체내의 이물질이나 손상된 곳을 발견하는 것은 생명을 구하는데 큰 도움이 된다.

비파괴 검사의 종류로는 방사선 투과검사, 초음파 탐상검사, 침투 탐상검사, 자분 탐상검사, 누설 탐상검사, 와전류 탐상검사 등이 있다[1].

방사선 투과검사(Radiographic Test)는 투과성 방사선을 시험체에 조사하였을 때 투과 방사선의 강도의 변화 즉, 건전부와 결함부의 투과선량의 차에 의한 필름상의 농도 차로부터 결함을 검출하는 방법으로 용접부, 구조품 등의 대부분 재료의 내외부 결함을 검출한다. 초음파 탐상검사(Ultrasonic Test)는 가청 주파수 이상의 주파수를 갖는 초음파를 이용하여 소재의 내부결함을 검출하거나 두께를 측정하는데 사용된다. 탐촉자에서 발생한 초음파의 경로 상에 결함이 존재할 경우 초음파는 반사되고, 이 신호를 이용하여 결함의 깊이와 크기를 찾아낸다. 침투 탐상검사(Penetrant Test)는 부품 등의 표면 결함을 아주 간단하게 검사하는 방법으로 침투액, 현상액, 세척액 3종류의 약품을 사용하여 결함의 위치, 크기 및 지시 모양을 관찰하는 검사 방법이다. 자분 탐상검사(Magnetic Particle Test)는 강자성체의 표면 또는 표면 하에 있는 불연속 부를 검출하기 위하여 강자성체를 자화시키고 자분을 적용시키는 누설자장에 의해 자분이 모이거나 붙어서 불연속 부의 윤곽을 형성, 그 위치, 크기 형태 및 넓이

등을 검사하는 방법이다. 누설 탐상검사(Leak Test)는 기체나 액체와 같은 유체가 시험체의 내부와 외부 즉 계와 주위의 압력차에 의해 시험체의 결함 속으로 흘러 들어가거나 결함을 통해 흘러나오는 성질을 이용하여 결함을 찾아내는 시험 방법이다. 근래 들어 개발된 와전류 탐상검사(Eddy Current Test)는 코일에 교류를 흘리면 교변 자장이 발생하는데 이 때 코일을 전도성의 시험체에 가까이 접근시키면 이 교변 자장에 의해 전도체에 와전류가 유도되는데 이에 의해 자기장이 생겨나고 이는 코일에 의한 자기장과 상호 작용하게 되어 코일의 임피던스를 변화시키게 되므로 이러한 변화를 측정하고 전개하여 시험자로 하여금 시험체의 상태와 물성에 관한 중요한 정보를 알 수 있게끔 한다.

본 논문에서는 측정하고자 하는 시험체의 주변에 자기장을 걸어 시험체의 투자율 변화를 감지하는 자기누설 탐상방법을 설계하고 그 측정감도를 최대화 할 수 있는 기법을 개발하였다. 자기누설 탐상방법은 자기장으로 투자율 변화를 감지하므로 측정하고자하는 시험체에 전혀 손상을 주지 않으며, 교류와 직류의 영향도 받지 않고 홀 센서만으로도 측정이 가능하여 기존의 와전류 탐상검사방법보다 구조도 간단하며, 실시간 측정이 가능하다. 자기누설 탐상검사방법은 일반적으로 가스 파이프나 석유 파이프 등의 결함을 검출하는데 사용될 수 있다. 지하에 매설된 배관들이 세월이 지나면서 배관계통의 외부 환경적인 영향에 의한 부식, 열화, 스트레스, 파괴 등으로 인하여 노후화가 가속화되어 사고의 위험에 노출되어 있어 이에 대한 설비의 교체 및 보수의 필요성이 증대되어 많은 돈과 시간을 투자하고 있다. 우리나라에서도 대형 가스폭발사고로 인명 피해가 있었듯이 가스관에서의 결함 발견은 매우 중요하다. 현재 선진기술로는 캐나다나 영국의 MFL(Magnetic Flux Leakage) PIG가 있고 이를 국내에서 수입하여 쓰고 있다. 따라서 국내 기술의 도입이 시급한 실정이다[2-7].

1.2 MFL(Magnetic Flux Leakage) PIG의 구조

센서를 탑재한 채로 배관 속을 지나가며 배관의 결함을 검사하는 PIG 시스템은 배관 내부에 삽입되어 내부를 흐르는 매체에 의하여 추진되는 장치로써 처음에는 매체의 흐름을 방해하는 퇴적물 등을 제거하기 위해서 사용되었다. 그러나 오늘날에는 배관을 건설, 유지·보수, 해체하는 작업, 즉 배관을 운용하기 위한 모든 단계에서 사용되고 있을 만큼 PIG의 활용 범위가 매우 넓어지고 있으며, 이에 따라 배관을 이용하는 석유, 가스등의 수송에 필수적인 요소가 되었다.

현재 사용되는 PIG는 용도에 따라 Utility PIG와 Inspection PIG로 구분 할 수 있으며, Inspection PIG는 배관 내부의 상태나 손상을 조사하기 위한 PIG를 의미하며 Geometry PIG, MFL PIG 등이 있다. Geometry PIG는 배관 내부의 홈 및 주름의 형태·크기와 위치, 접합부의 여부와 위치, 배관의 난형도 및 배관의 곡률을 결정하기 위하여 사용된다. 그리고 이러한 기능을 수행하기 위해서 배관 내에서 PIG의 이동경로를 결정하여 지리 정보 시스템(Geometric Information System, GIS)상의 맵핑(Mapping)을 위한 관성 항해 시스템(Inertia Navigation System, INS)과 홈의 형태와 크기 및 난형도를 측정하기 위한 캘리퍼 시스템, 주행거리계 그리고 데이터 처리 시스템으로 구성된다[8-18].

MFL PIG는 가스관의 부식 등으로 인한 결함을 검출한다. 그림 1.1은 가스관 내의 PIG를 나타내며 그림 1.2는 PIG의 구조를 나타낸다.

본 논문에서는 MFL PIG 시뮬레이션을 위하여 몇 가지 형태의 결함에 대하여 비선형 특성을 적용한 2, 3차원 전자기 수치해석을 수행하였다. 특히 비 투자율 감지 부분에 대하여 실험 제작하였으며, 수치해석 결과와 비교하였다.

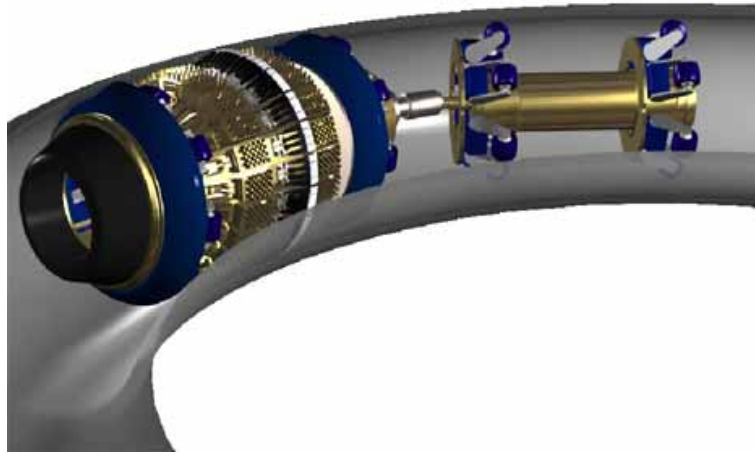


그림 1.1 가스관 내의 PIG (캐나다 BJ사)

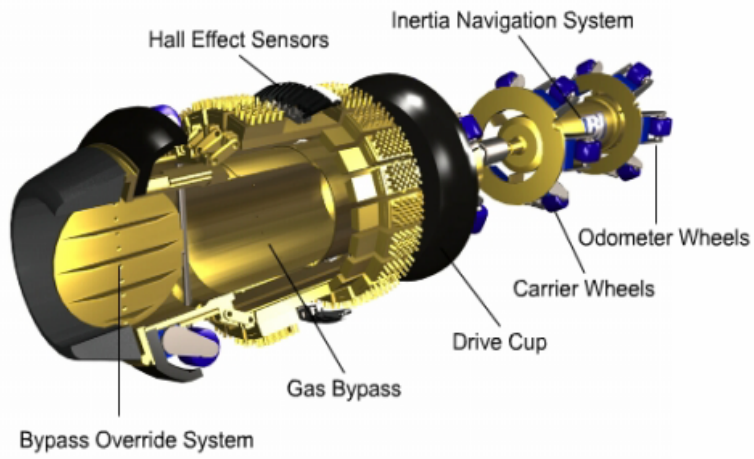


그림 1.2 PIG의 각부 명칭 (캐나다 BJ사)

제 2장 MFL PIG 시스템의 전자기적 해석과 최적 설계

MFL PIG는 비파괴 검사로서 그림 2.1과 같이 가스관의 부식 등으로 인한 결함을 검출한다. 이 방법은 가스관을 yoke와 영구자석을 이용하여 자기시스템으로 만든 다음, 이 가스관을 충분히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설자속을 홀 센서로 검출한다. 따라서 홀 센서의 규격과 위치는 자기포화를 고려하여 설정하여야 한다.

결함에 따라서 측정 신호는 변하게 된다. 본 연구는 yoke와 영구자석으로 구성된 자기시스템을 유한요소법으로 해석하였다. 동작점이 낮을 경우(가스관이 충분히 포화가 되지 않은 경우)는 누설자속이 적어서 측정이 곤란하고, 동작점이 높을 경우는 결함이 없을 경우도 누설자속이 크므로 결함이 있는 경우와 없는 경우를 구분이 어렵게 된다. 따라서 자기 시스템의 동작점은 결함이 생겼을 때 자속이 최대가 되도록 최적화 되어야 한다.



그림 2.1 부식 등으로 인한 결함을 검출하는 MFL PIG

2.1 MFL PIG 설계

그림 2.2는 한국가스공사와 함께 본 연구에서 개발된 MFL PIG 도면이다. 여기에 사용된 영구자석의 크기는 가로 180[mm], 세로 82[mm], 높이 32[mm]이며 재질은 Nd(네오뎴)자석이다. 브러시는 여러 개의 다발들이 빗살구조로 되어있다. 사용된 홀 센서는 Allegro 3507L 선형 센서로 자기장의 크기에 비례하여 전압이 발생되며, 약 -1,000에서 +1,000[Oe]까지 측정할 수 있다.

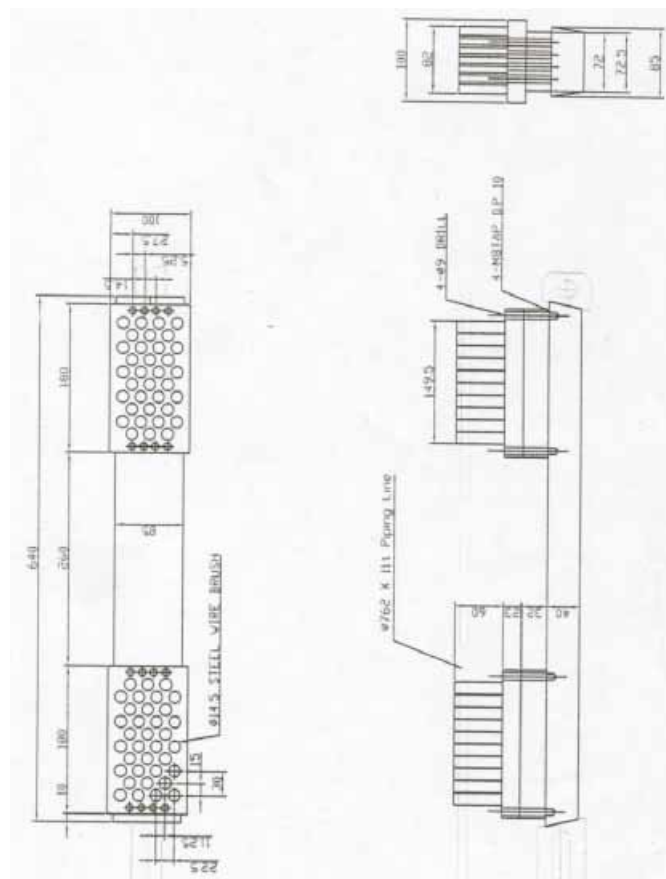


그림 2.2 MFL PIG도면

그림 2.3은 MFL PIG의 구조이다. MFL PIG 해석시 고려해야되어야 할 사항은

- a) 가스관의 포화정도
 - b) 브러시의 투자율
 - c) 측정부분의 자속밀도의 크기
- 등이다.

측정부분의 자속밀도는 결함이 없을 경우는 작고, 결함이 있을 경우는 크게 되도록 설계되어야 한다.

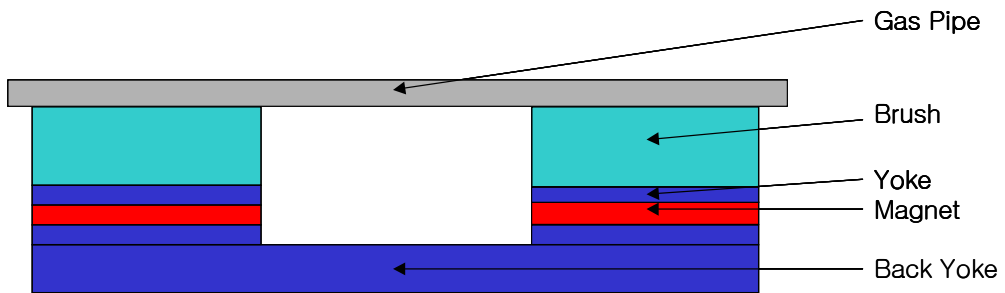


그림 2.3 MFL PIG 구조

2.2 MFL 결함 해석을 위한 유한 요소법

MFL PIG 시스템은 비파괴 검사로써 가스관을 적절히 포화시켜 결함이 있을 경우 누설 자속이 발생하게 되고, 이를 홀 센서 등으로 검출하는 시스템이다.

2.2.1 지배방정식

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell 방정식과 그 보조 방정식은

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2.1)$$

이며 매질을 고려하면

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.2)$$

자기벡터포텐셜은

$$\mathbf{B} \equiv \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.3)$$

로 나타낼 수 있다. 식(2.2)에 식(2.3)과 식(2.1)에 대입하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (2.4)$$

이 된다.

벡터정리에서

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} \right) - \left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) \mathbf{A} \quad (2.5)$$

이고

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} \right) = 0 \quad (2.6)$$

이므로

$$-\left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (2.7)$$

이다.

선형 등방성 매질에서

$$-\nabla^2 \mathbf{A} = \mu \mathbf{J} \quad (2.8)$$

이며, 이 식(2.8)은 자기장을 해석하기 위한 지배방정식인 Poisson 방정식이 된다.

식(2.8)을 유한요소법으로 사용하기 위하여 범함수 형태로 바꾸면

$$\begin{aligned}
I(\mathbf{A}) &= \int \left[\frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} - J\mathbf{A} \right] dv \\
&= \int \left[\frac{1}{2} \frac{1}{\mu} \mathbf{B}^2 - J\mathbf{A} \right] dv
\end{aligned}
\tag{2.9}$$

로 나타낼 수 있으며, 다시 자기 벡터포텐셜 형태로 정리하면

$$I(\mathbf{A}) = \int \left[\frac{1}{2} \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A})^2 - J\mathbf{A} \right] dv
\tag{2.10}$$

이며, 해는 에너지가 가장 작은 값이므로 $I(\mathbf{A})$ 가 0일 때이다.

2.2.2 정식화 (formulation)

식(2.10)을 일반화시키면

$$-\nabla^2 \phi = f
\tag{2.11}$$

형태로 나타낼 수 있다. 이것을 유한개의 요소로 나누기 위해서 2차원일 경우 보간 함수

$$\phi(x, y) = \sum_{e=1}^{NE} \phi^e(x, y)
\tag{2.12}$$

을 사용하며 $\phi^e(x, y)$ 는

$$\phi^e(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y
\tag{2.13}$$

로 표현한다.

해석영역을 고정 경계조건($\phi = g(s)$)과 자연 경계조건($-\frac{\partial\phi}{\partial n} = h(s)$)으로 만족시키는 유한요소를 정식화시키면

$$-\nabla^2\phi = f \quad (2.14)$$

이고, 식(2.14)를 범함수 형태로 바꾸면

$$I^e(\phi^e) = \frac{1}{2} \int \int \left\{ \left(\frac{\partial\phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy - \int \int f\phi dx dy \quad (2.15)$$

이며 식(2.15)를 식 (2.12)형태로 바꾸어서 간략화 시키면

$$\sum_{j=1}^n K_{ij}\phi_j = f_i \quad (2.16)$$

로 만든 후, 이것을 결합한다. 그 후 이 행렬의 해에 고정경계조건과 자연경계조건을 대입한 후 해를 구할 수 있다.

2.3 브러시의 투자율

브러시의 구조는 그림 2.4와 같다. 브러시는 여러 개의 다발들이 빗살구조로 되어있다. 브러시의 투자율을 산출할 경우 한 가닥의 B-H커브는 산출할 수 있으나 빗살구조인 경우는 산출하기 어렵고 또한 브러시와 가스관 사이의 공극, 브러시와 MFL PIG의 접합면, 그리고 MFL PIG 운행 중에 가스관과 이격이 발생하게 된다. 브러시의 투자율을 산출하려면 이 모든 것을 고려해야 한다. 그러나 이처럼 모든 것을 고려한 브러시의 투자율을 산출한다는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구는 브러시의 비 투자율을 가장 최악의 조건인 공기 1로부터 높은 값인 100까지 여러 가지 경우를 해석하였다. 결과 투자율이 1일 경우에서도 가스관이 포화됨을 알 수 있었다.

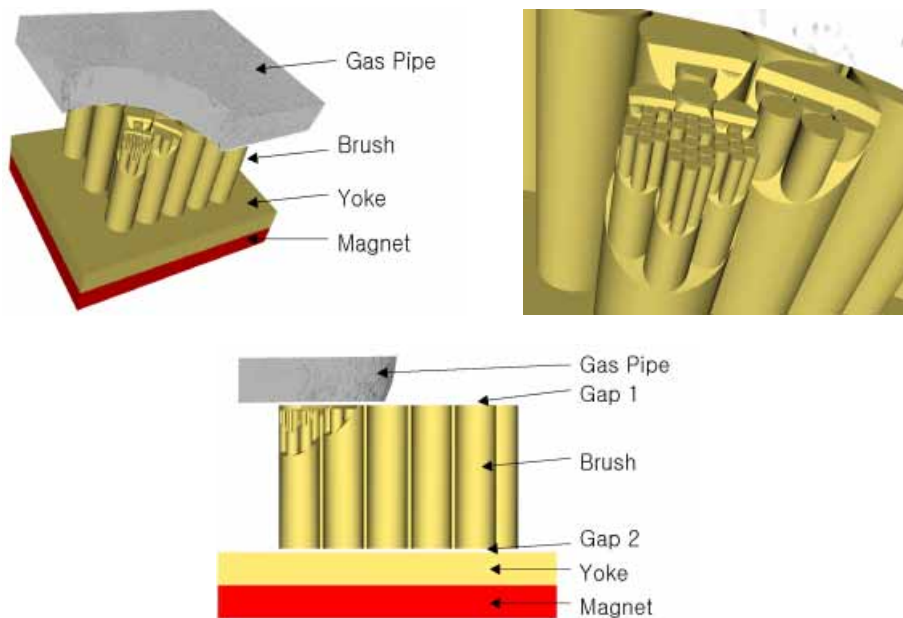


그림 2.4 브러시의 구조

2.4 MFL PIG의 비선형 해석

그림 2.5와 표 2.1과 표 2.2는 MFL PIG를 선형 해석하였을 경우와 비선형 해석을 하였을 경우 그 해석결과를 비교한 것이다. MFL PIG 시스템은 가스관의 자기포화부분을 이용하는 것으로써 이것을 무시하고 선형으로 해석할 경우 표 2.1과 같이 4[T] 이상의 비 현실적인 높은 값이 나온다. MFL PIG 시스템을 해석할 경우 반드시 비선형 해석을 하여야한다. 따라서 본 연구는 모든 해석을 비선형으로 해석하였다.

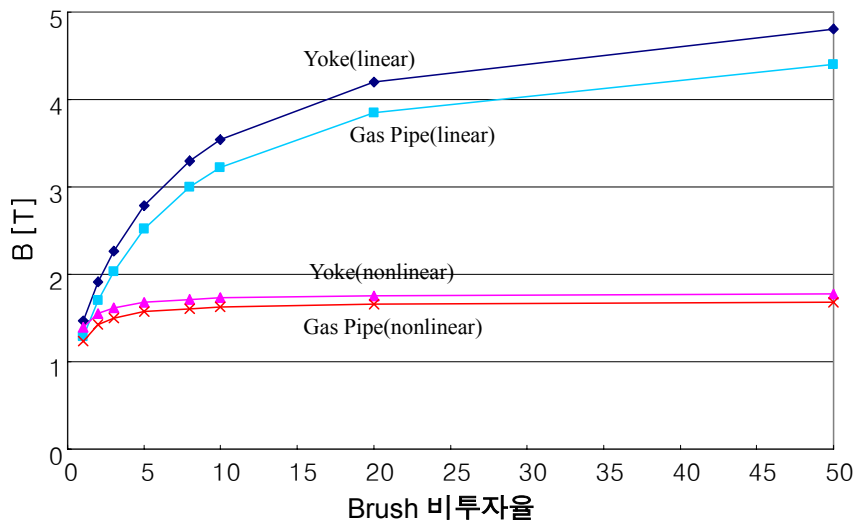


그림 2.5 MFL PIG의 선형 해석과 비선형 해석에 대한 비교

표 2.1 MFL PIG의 선형 해석 [단위 : T]

위치 투자율	Pipe	Brush	Yoke	Magnet	Back Yoke
1	1.290	0.135	0.344	0.540	1.466
2	1.706	0.238	0.431	0.608	1.915
3	2.033	0.320	0.498	0.659	2.266
5	2.510	0.443	0.597	0.735	2.785
8	2.990	0.564	0.695	0.810	3.299
10	3.220	0.620	0.740	0.845	3.540
20	3.840	0.774	0.866	0.941	4.206
50	4.400	0.900	0.975	1.026	4.804
100	4.640	0.936	1.018	1.063	5.059
200	4.790	0.928	1.040	1.084	5.207
500	4.900	0.871	1.055	1.099	5.316
1000	4.950	0.811	1.068	1.106	5.366

표 2.2 MFL PIG의 비선형 해석 [단위 : T]

위치 투자율	Pipe	Brush	Yoke	Magnet	Back Yoke
1	1.236	0.131	0.314	0.534	1.390
2	1.425	0.211	0.384	0.575	1.550
3	1.501	0.260	0.423	0.597	1.614
5	1.570	0.317	0.467	0.621	1.676
8	1.611	0.360	0.500	0.638	1.715
10	1.626	0.376	0.512	0.645	1.729
20	1.659	0.412	0.540	0.660	1.760
50	1.682	0.433	0.562	0.670	1.781
100	1.691	0.437	0.573	0.674	1.788
200	1.696	0.434	0.584	0.676	1.793
500	1.700	0.424	0.605	0.677	1.796
1000	1.702	0.409	0.623	0.678	1.797

2.5 MFL PIG의 2차원과 3차원 해석

그림 2.6과 그림 2.7은 MFL PIG의 2차원과 3차원에 대한 비교이다. 실제는 yoke의 폭보다 가스관의 폭이 크나 2차원에서는 이것에 대한 설정이 되지 않으므로 같다고 놓고 해석을 하였을 경우 그림 2.6과 같은 경우처럼 2차원에서는 가스관이 높게 나타나지만 실제로 3차원에서는 가스관의 폭이 yoke보다 크므로 자기회로법에서 자속은 같지만 폭이 큰 만큼 yoke 보다 가스관의 면적의 비가 3차원이 2차원보다 크므로 가스관의 자기장은 줄어들게 된다. 따라서 본 연구에서는 모든 해석을 3차원으로 해석하였다.

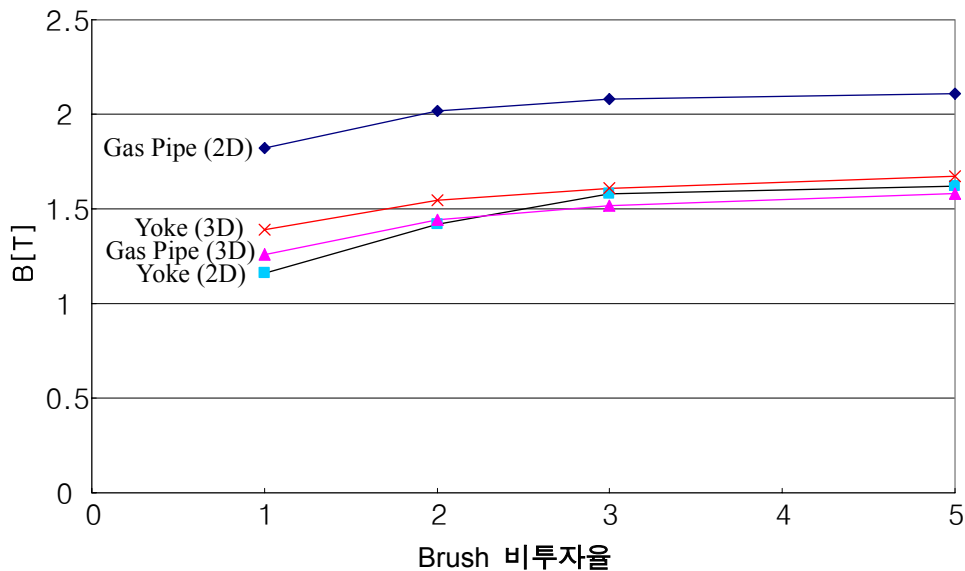
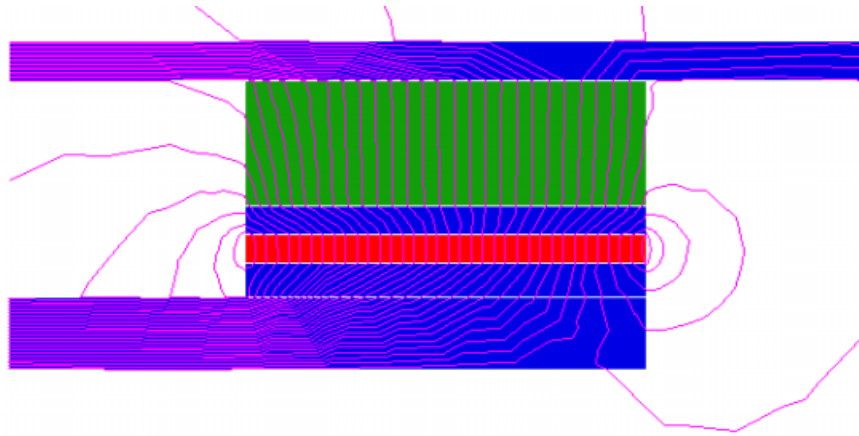
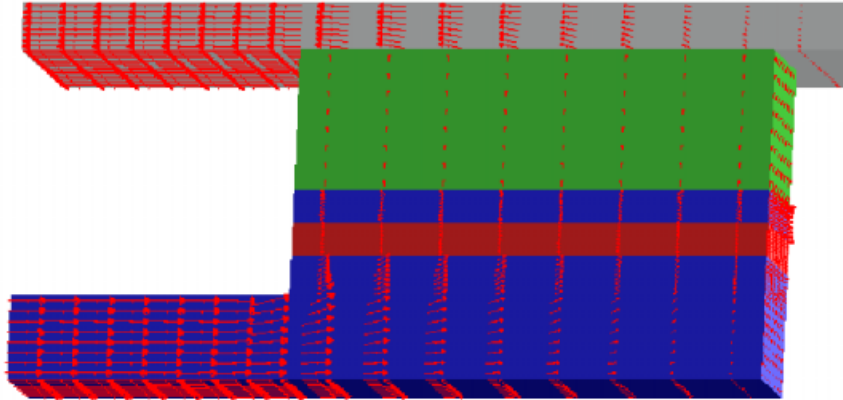


그림 2.6 MFL PIG의 2차원과 3차원에 대한 비교



(a) 2차원 해석



(b) 3차원 해석

그림 2.7 MFL PIG의 2차원과 3차원에 대한 해석

2.6 가스관 적정 포화 설계

그림 2.8은 가스관 결함에 대한 개요도이다. 그림에서 ϕ_a 는 결함이 없는 부분 아래의 누설자속이며, ϕ_c 는 결함이 없는 부분 아래의 누설자속이다. ϕ_b 와 ϕ_d 는 각각 결함의 없을 때와 있을 때의 가스관 내부의 자속이다.

그림 2.9는 검출지점의 자기포화곡선을 나타낸다. 결함이 있는 영역의 경우 자기장은 증가하게 된다. 만약 가스관이 포화되지 않으면 ϕ_b 와 ϕ_d 는 같게된다. 그렇게 되면 가스관 내부의 자속밀도는 B_{q1} 에서 B_{q2} 로 변하게 된다. 만약 가스관이 포화되면 가스관 내부의 자속밀도는 B_{p1} 에서 B_{p2} 로 변하게 된다. $B_q - B_p$ 은 누설자속과 비례한다. 그래서 ϕ_c/ϕ_a 에 비례하는 누설 파라메트를 λ 라 하였고 식 (2.17)처럼 나타냈었다.

$$\lambda = \frac{B_{q2} - B_{p2}}{B_{q1} - B_{p1}} \quad (2.17)$$

그림 2.10은 3가지의 가능한 경우를 나타낸다. 그림 2.10(a)의 경우는 동작점이 낮을 경우 ϕ_c 의 크기인 λ 의 크기는 작다. 그림 2.10(c)의 경우처럼 동작점이 너무 높을 경우 ϕ_c 는 크나 누설자속의 변화 ϕ_c/ϕ_a 의 크기는 작다, 그래서 λ 의 크기도 작다. 그림 2.10(b)의 경우가 최적이다. 이 경우는 동작점이 포화상태에 접근하여 작은 손실에도 λ 값은 크게 된다. 그래서 영구자석과 yoke를 이용한 자기회로 시스템의 최적설계는 측정 영역에서 동작점을 설정하여 λ 값을 최대로 하는데 있다.

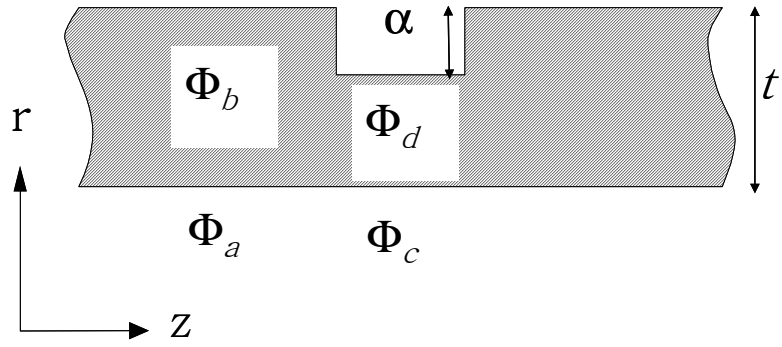


그림 2.8 결함이 있는 가스관의 누설자속

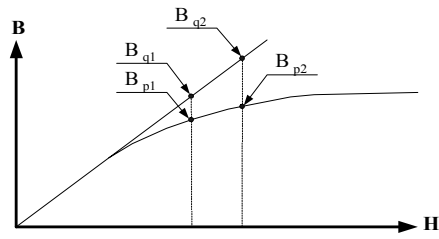


그림 2.9 자기포화곡선

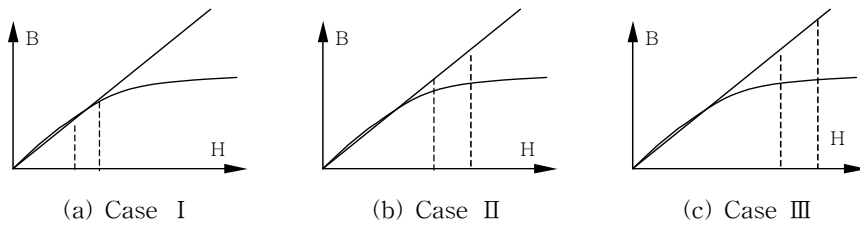


그림 2.10 3가지 경우의 동작점과 λ

그림 2.11은 비파괴 검사 시스템인 MFL PIG의 자기장의 분포를 나타낸다. 총자속은 식 (2.18)과 같다.

$$\Phi = \Phi_a + \Phi_b = \Phi_c + \Phi_d = B_m \cdot l_m \cdot w \quad (2.18)$$

B_m : 영구자석의 자속밀도

l_m : 영구자석의 길이

w : 영구자석의 폭

최적의 영구자석의 크기는 동작점 λ 가 최대가 되도록 설계하여야 된다. 그림 2.8에서 λ 를 구하면 식 (2.19)와 같다.

$$\lambda = \frac{\Phi_c}{\Phi_a} = \frac{\Phi - \Phi_d}{\Phi - \Phi_b} = \frac{B_m \cdot l_m - B_d \cdot (t - a)}{B_m \cdot l_m - B_b \cdot t} \quad (2.19)$$

최적의 영구자석의 길이는 식 (2.20)과 같다.

$$l_m = \frac{B_d \cdot (t - a) - B_b \cdot t \cdot \lambda}{B_m \cdot (1 - \lambda)} \quad (2.20)$$

B_b : 결함이 없는 가스관의 자속밀도

B_d : 결함이 있는 가스관의 자속밀도

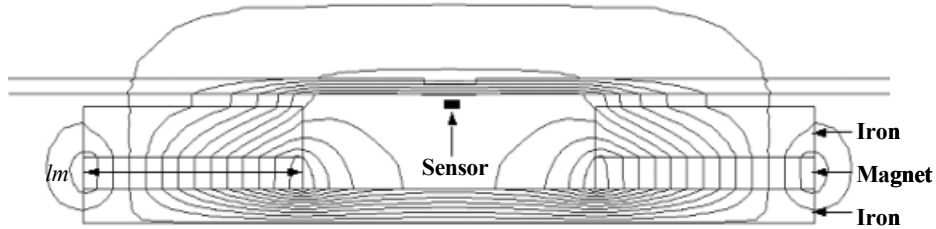


그림 2.11 MFL을 유한요소법으로 자기장 해석

가스관과 MFL PIG의 yoke부분은 선형 재질이 아니다. 그러므로 재료에 해당하는 B-H 커브를 입력하여 비선형 해석을 하여야 한다. 따라서 본 연구는 모든 해석을 비선형으로 실시하였다.

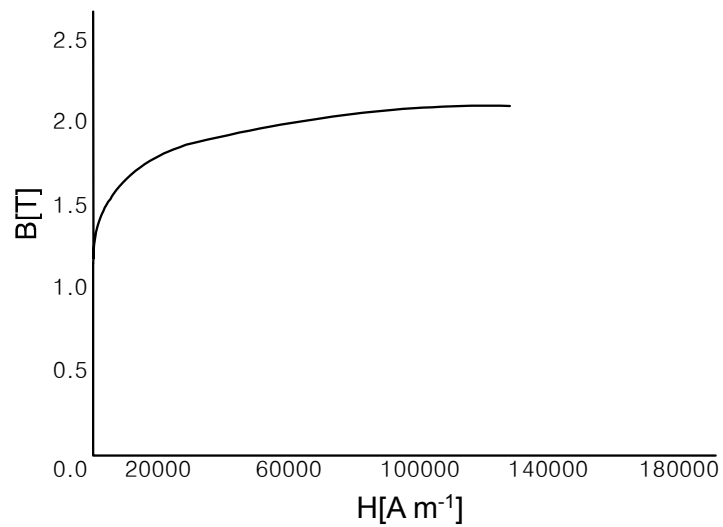


그림 2.12 B-H 커브

MFL PIG의 각 부분에 대한 3차원 비선형 해석결과는 표 2.3에 나타내었다. 브러시의 비 투자율을 1~100까지 변화 시켰을 때 가스관의 자속밀도는 1.57 ~ 1.81[T]로 가스관을 포화시키기에 적당한 값으로 설계되었다.

표 2.3 MFL PIG의 3차원에서의 비선형 해석

[단위:T]

위치 투자율	Pipe	Brush	Yoke	Magnet	Back Yoke
1	1.5741	0.1353	0.4256	0.7982	1.5450
2	1.6403	0.2136	0.4831	0.8110	1.5937
3	1.6788	0.2640	0.5188	0.8188	1.6223
5	1.7214	0.3246	0.5606	0.8280	1.6546
10	1.7661	0.3902	0.6048	0.8381	1.6880
20	1.7871	0.4313	0.6335	0.8448	1.7099
50	1.8061	0.4553	0.6544	0.8496	1.7256
100	1.8135	0.4509	0.6645	0.8515	1.7318

2.7 센서의 민감도 향상

본 연구에서는 센서의 민감도를 증가시키기 위하여 센서안쪽의 back-yoke를 제시하였고 이를 검토하였다. 그림 2.13은 $1.45 \times 1.45[\text{mm}^2]$, $1.45 \times 4.35[\text{mm}^2]$, $4.35 \times 1.45[\text{mm}^2]$ 의 크기를 가지는 3가지 형태의 back-yoke이다. 표 2.4는 각각의 경우에 대하여 두 가지 센싱 위치를 나타낸 것이다. 또한 각각의 위치에 대하여 자기장을 해석하였다.

센서내의 자기장을 증가시키기 위한 back-yoke의 특성을 표 2.5에 요약하였고, 센서 주위의 자기장을 종래의 back-yoke가 없는 경우와 비교하였다. back-yoke의 크기가 작아짐에 따라서 자기장은 back-yoke의 고투자율로 인하여 yoke내에 집중되어진다. 그 결과 반경방향 성분은 3번째 yoke형태의 위쪽 위치에서 177[%] 더 증가하였고, 축방향 성분에서는 두 번째 yoke형태의 옆쪽에서 200[%]더 증가하였다. 민감도가 증가함에 따라 작은 결함도 검출할 수 있게 되었다.

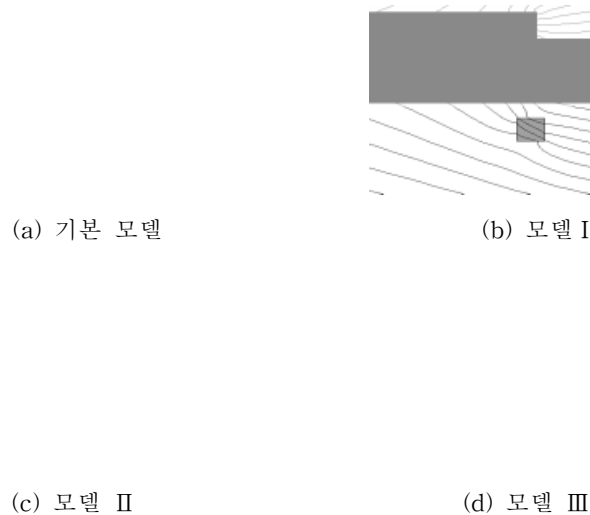
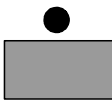


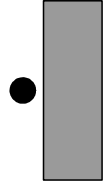
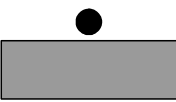



그림 2.13 back-yoke 설치에 대한 자기장

표 2.4 back yoke 유무에 따른 신호 검토

Sensors		축방향의 자기장[G]	반경방향의 자기장[G]
모델1		7.8/12.1 (64[%])	33.3/24 (138[%])
		15.3/11 (139[%])	9.3/16.5 (56[%])
모델2		8/12.1 (66[%])	42.5/24 (177[%])
		11.9/9.7 (122[%])	3.8/12.1 (31[%])
모델3		6.3/12.1 (52[%])	35/24 (146[%])
		22/11 (200[%])	9.9/16.5 (66[%])

: yoke있을 때의 신호 / yoke없을때의 신호

(각 방향으로 증가된 자기장[%])

제 3장 가스관 결함에 의한 MFL 검출 신호 해석

3.1 MFL PIG의 결함이 있을 경우 3차원 해석

그림 3.1은 MFL PIG를 결함이 있을 경우 3차원 해석한 그림이다. 이 경우 자기장이 결함이 있는 부분으로 집중되는 것을 알 수 있다. 이 경우 결함이 있는 부분의 가스관은 자기포화되어 누설자속이 발생하게 된다. 이것을 검출하여 가스관 결함 여부를 판정한다.

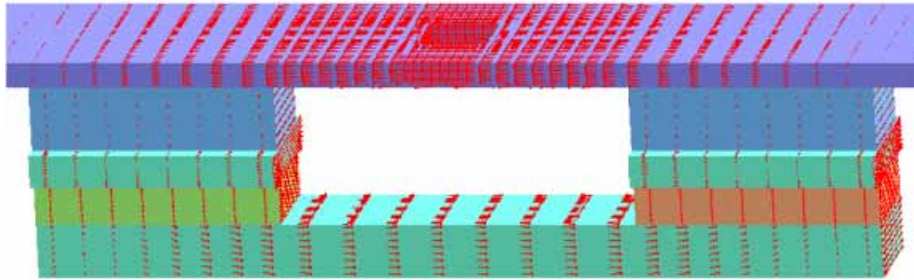
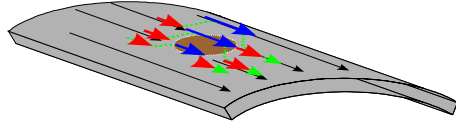


그림 3.1 MFL PIG의 결함이 있을 경우의 해석

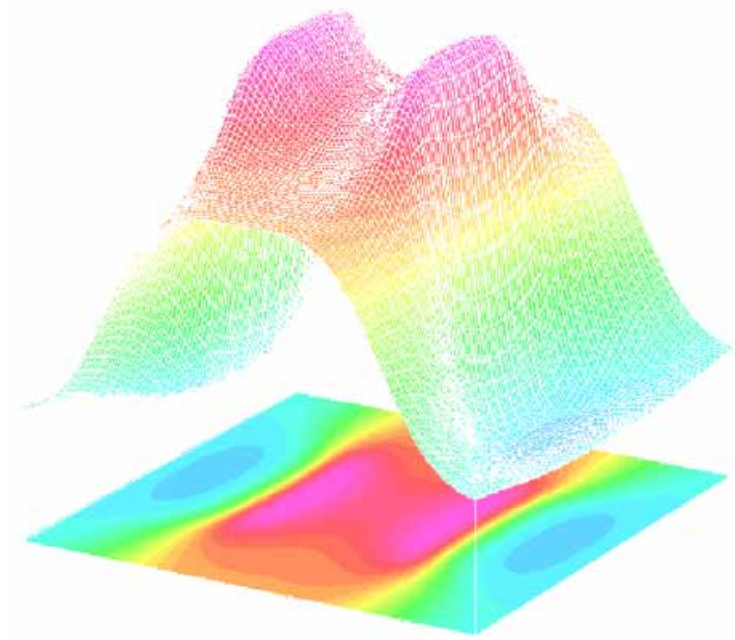
3.2 MFL PIG의 센서 방향에 따른 검출 신호

MFL PIG의 센스 박스 내에는 3개의 홀 센서가 들어있는 구조이며, 각각의 센서의 방향은 3가지 방향으로 결함을 검출한다. 따라서 본 연구에서는 3가지 방향에 대하여 각각의 신호성분을 해석하고, 이것을 이미지 처리를 하여 결함을 나타내고자 하였다.

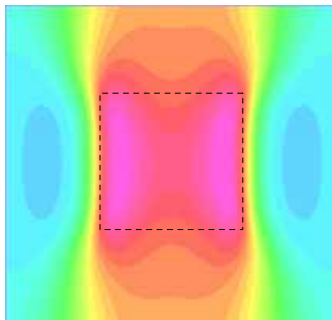
그림 3.2, 그림 3.3, 그림 3.4는 3가지 방향의 신호를 3차원 그래프 이미지로 나타냈었다. 실제 결함의 크기는 52.5×52.5 [mm²]이며 결함의 깊이는 90[%]이며 이것을 이미지 합성한 결과 실제 결함의 형태와 크기를 명확히 추정 할 수 있음을 알 수 있었다.



(a) MFL PIG의 진행방향과 축 방향



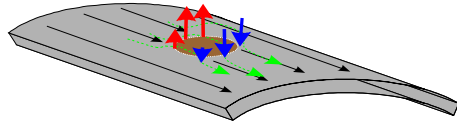
(b) 축 방향의 누설자속 3차원 그래프



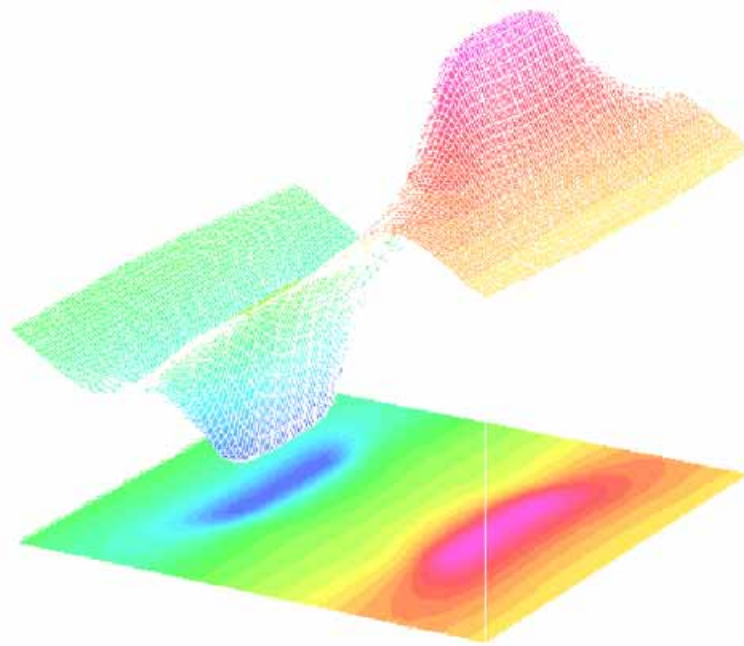
(c) 축 방향의 누설 자속 이미지 합성

그림 3.2 축 방향의 누설자속 해석

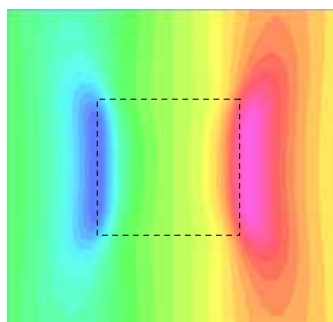
(최소: 195G, 최대:1100G)



(a) MFL PIG의 진행방향과 반경 방향



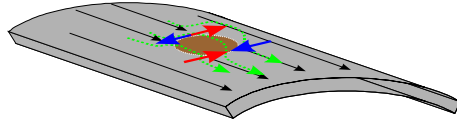
(b) 반경 방향의 누설자속 3차원 그래프



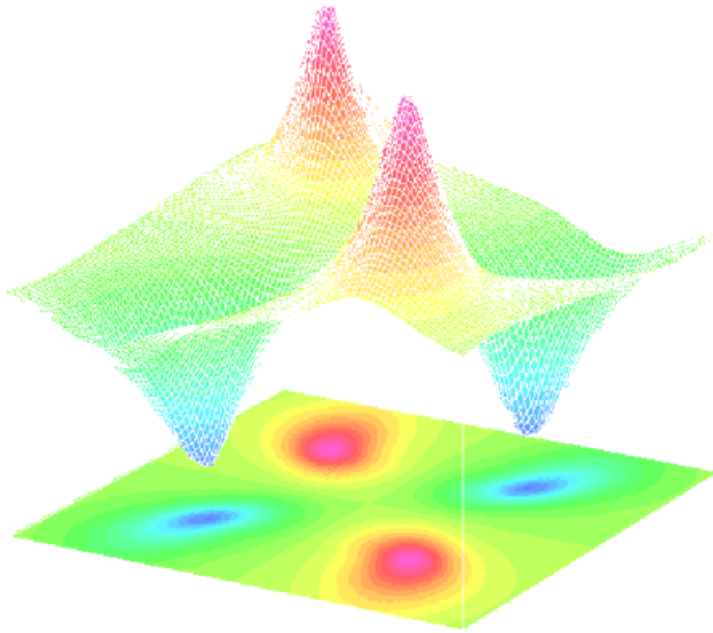
(c) 반경 방향의 누설자속 이미지 합성

그림 3.3 반경 방향의 누설자속 해석

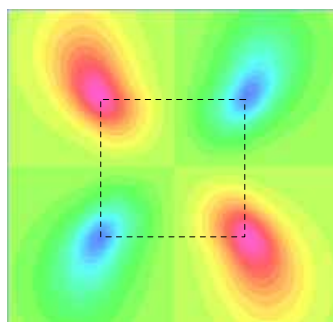
(최소: -1000G, 최대: 1000G)



(a) MFL PIG의 진행방향과 원주 방향



(b) 원주 방향의 누설자속 3차원 그래프



(c) 원주 방향의 누설자속 이미지 합성

그림 3.4 원주 방향의 누설자속 해석

(최소: -216G, 최대: 216G)

3.3 MFL PIG의 결함 깊이 영향

그림 3.5는 MFL PIG의 결함의 깊이에 따른 해석 결과이다. 결함이 클수록 해석결과도 큰 것을 알 수 있다. 이러한 해석결과를 바탕으로 각각의 경우에 대하여 홀 센서의 측정값만으로도 결함의 깊이를 산출할 수 있으며, 이를 신호 처리하여 그래픽 처리함으로써 결함의 모양을 합성할 수 있다.

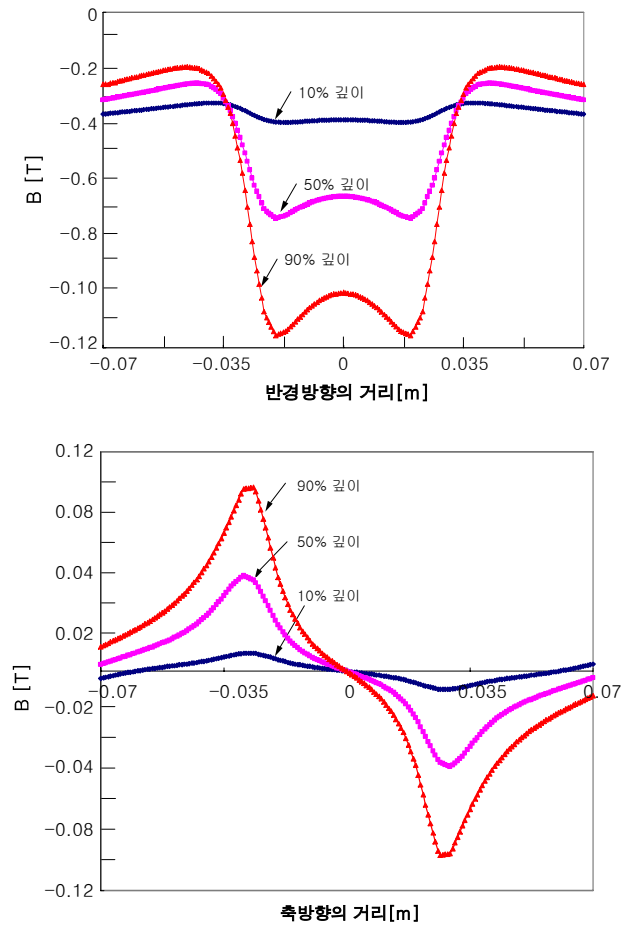


그림 3.5 MFL PIG의 결함의 깊이에 따른 해석 결과

3.4 MFL PIG의 결함 크기의 영향

결함의 크기에는 폭과 길이 방향 성분이 있다. 이 절에서는 우선 기본 결함의 크기를 정하고 그 크기에 맞춰서 폭 방향성분이 커질 때, 길이 방향성분이 커질 때, 양방향 성분이 다 커질 때 이렇게 세 가지 경우를 비교 판단한다.

3.4.1 기준 결함 해석

기준 결함의 크기는 $1t*1t$ 로 하고 이에 따른 반경 방향과 축 방향의 그래프를 그린 후 다른 그래프들과 비교 판단한다. 여기에서 $1t$ 란 가스관의 두께를 말한다. 30[inch] 배관의 경우에는 17.5[mm]가 $1t$ 가 되고, 8[inch] 배관의 경우에는 5.5[mm]가 $1t$ 가 된다.

그림 3.6은 기준 결함의 크기를 나타내며, 그림 3.7은 기준 결함의 그래프를 나타낸다.

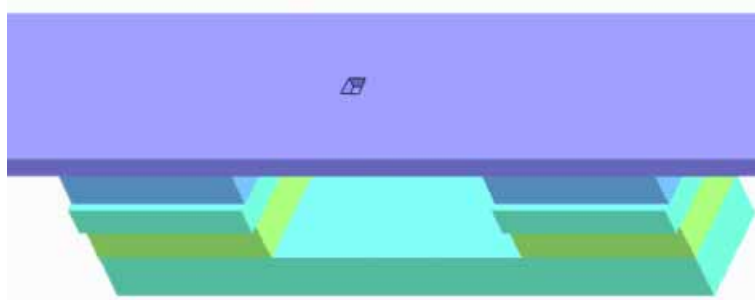


그림 3.6 $1t*1t$ 의 기준결함

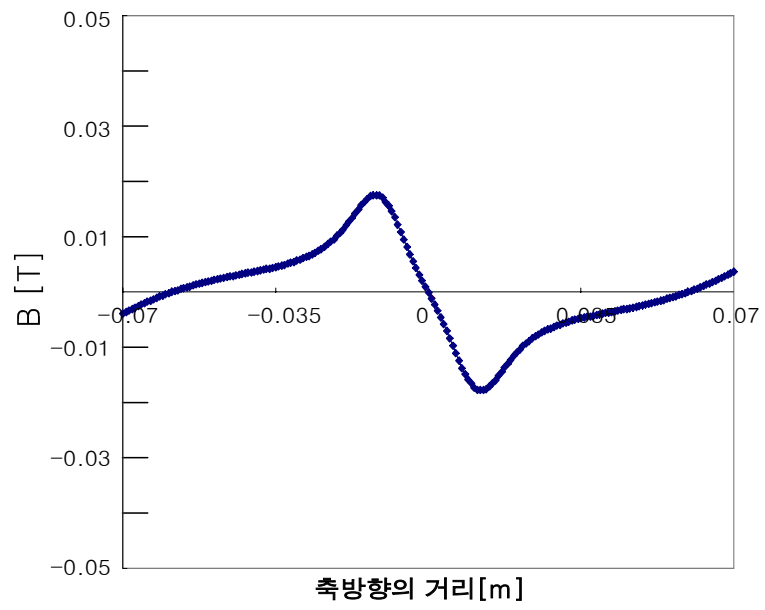
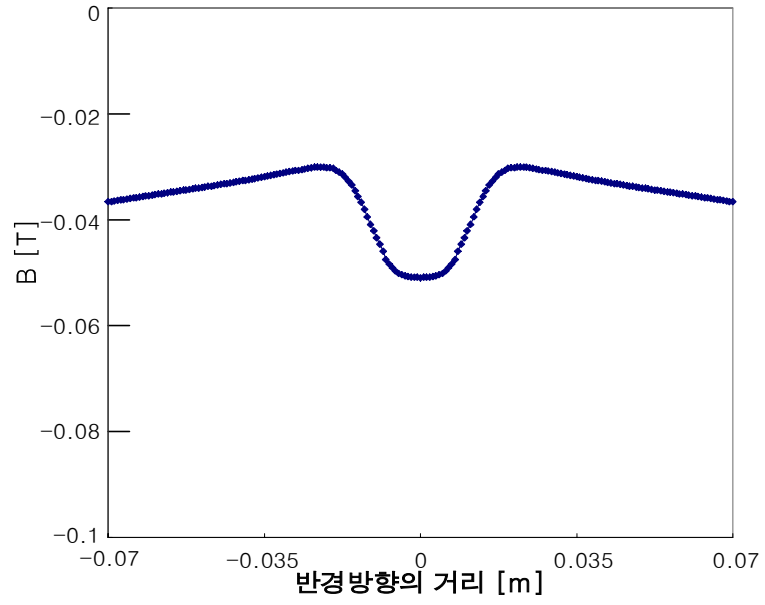


그림 3.7 1t*1t 결함의 그래프

3.4.2 결함의 폭이 커질 경우

그림 3.8은 결함의 폭이 큰 $1t*3t$ 일 때 크기를 나타내며, 그림 3.9는 $1t*3t$ 결함의 그래프를 나타낸다. 기준 결함의 그래프와 비교해보면 결함이 있는 곳에서 폭 방향의 그래프의 크기가 커짐을 알 수 있다.

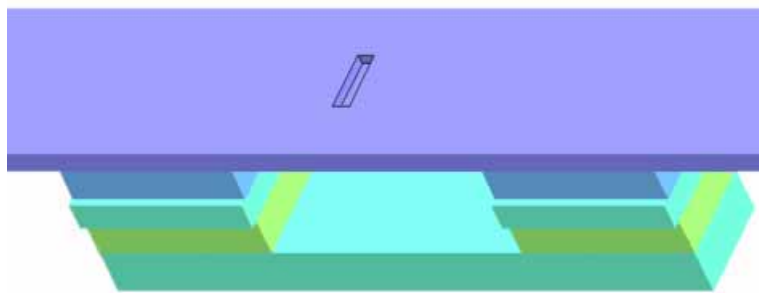


그림 3.8 $1t*3t$ 의 결함

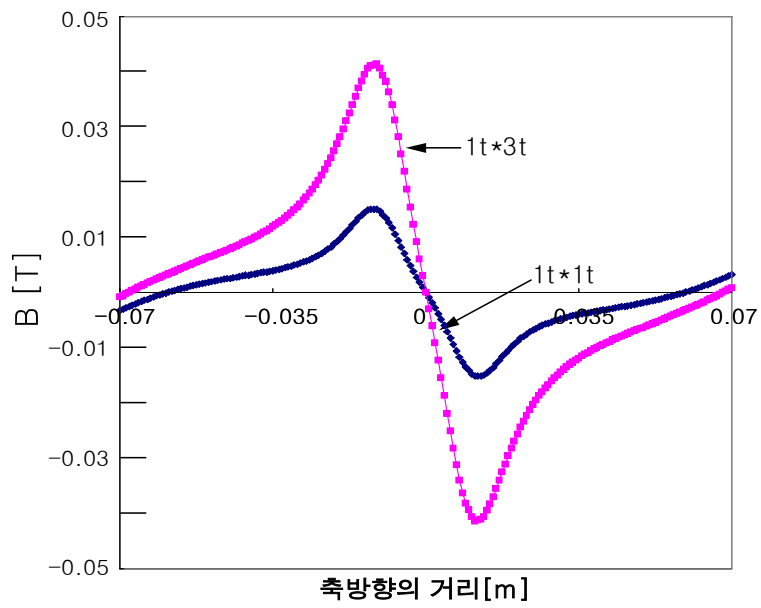
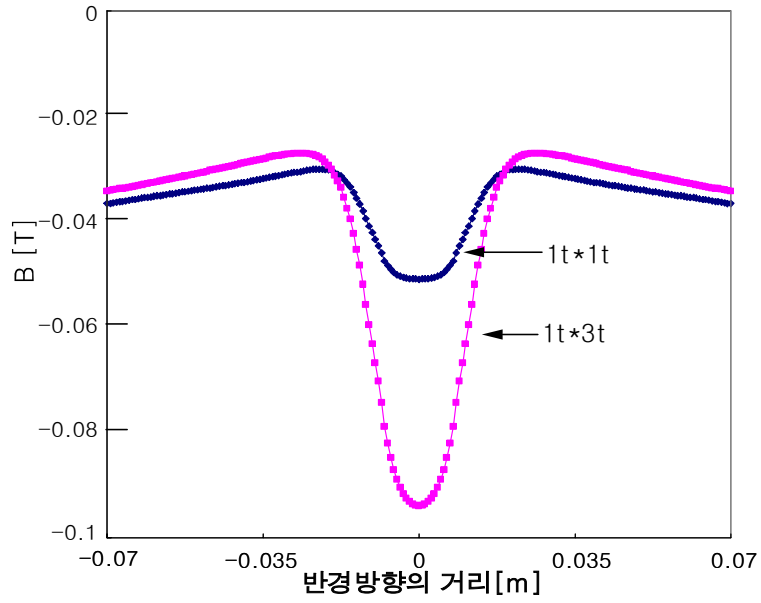


그림 3.9 $1t*3t$ 결함의 그래프

3.4.3 결함의 길이가 길어질 경우

그림 3.10은 결함의 길이가 큰 $3t*1t$ 일 때 크기를 나타내며, 그림 3.11은 $3t*1t$ 결함의 그래프를 나타낸다. 기준 결함의 그래프와 비교해보면 결함이 있는 곳에서 길이 방향의 그래프가 길어짐을 알 수 있다.

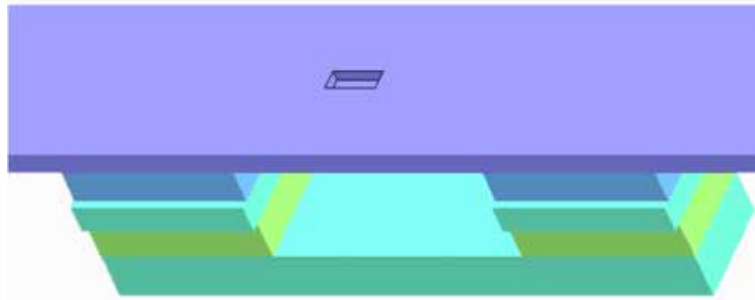


그림 3.10 $3t*1t$ 의 결함

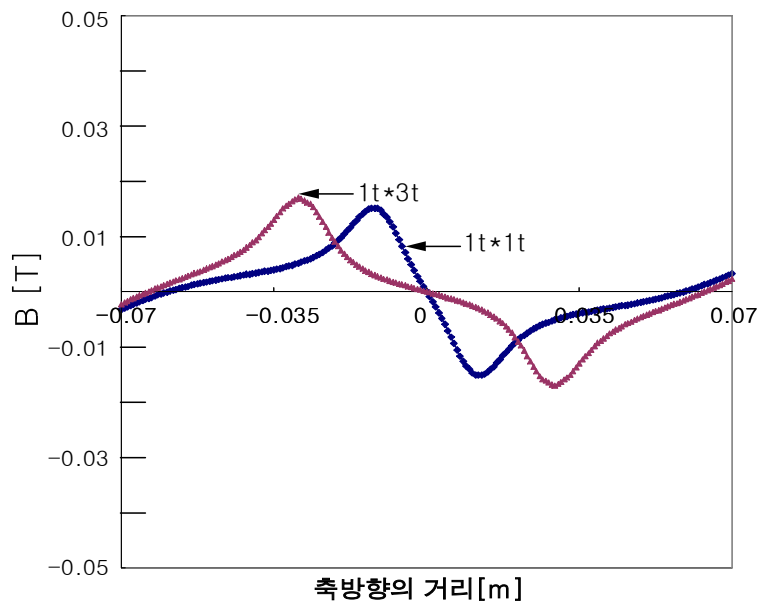
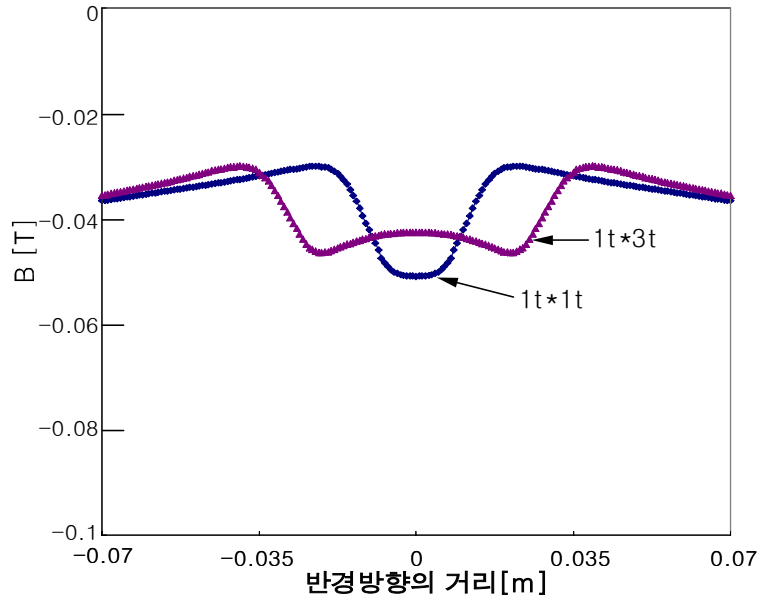


그림 3.11 $1t*3t$ 결함의 그래프

3.4.4 결함의 폭과 길이가 모두 커질 경우

그림 3.12는 결함의 폭과 길이가 모두 큰 $3t \times 3t$ 일 때 크기를 나타내며, 그림 3.13은 $3t \times 3t$ 결함의 그래프를 나타낸다. 기준 결함의 그래프와 비교해보면 결함이 있는곳에서 그래프의 크기가 양방향 모두 커짐을 알 수 있다.

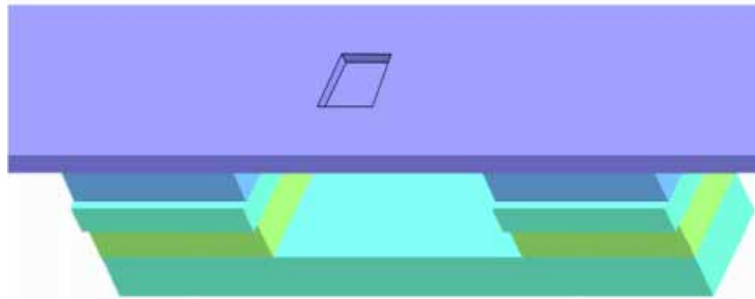


그림 3.13 $3t \times 3t$ 의 결함

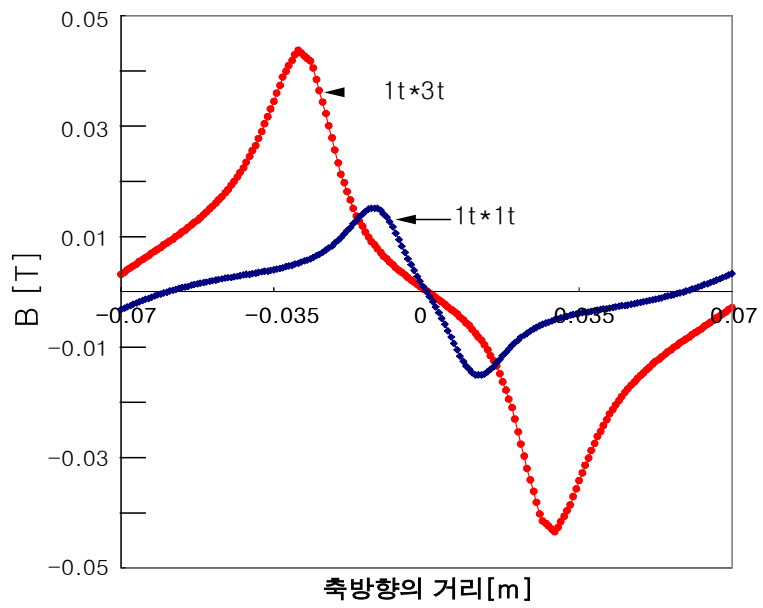
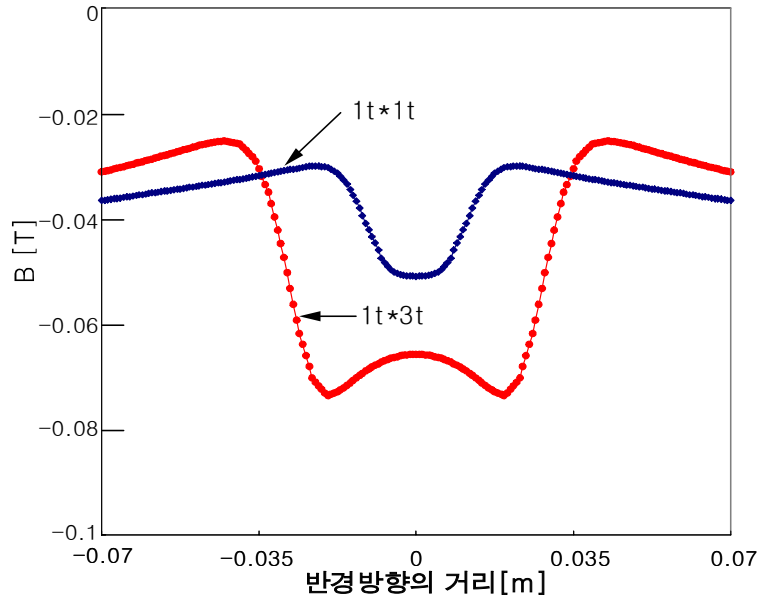


그림 3.13 $1t*3t$ 결함의 그래프

제 4장 결론

본 논문에서는 자기 누설법에 의한 비파괴 검사 시스템을 2차원 및 3차원 유한 요소법을 이용하여 해석하고 결함이 있을 경우 감지 신호를 최대화 할 수 있는 설계 방법을 제시하였다. 본 연구에서 설계된 MFL PIG의 경우 가스관의 포화정도, 홀 센서의 감지 범위, 그리고 홀 센서의 검출 능력을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 가스관의 포화 여부는 3차원 비선형 유한요소 해석 결과 브러시 투자율을 고려하였을 때, 가스관의 결함이 없는 경우 가스관의 자속 밀도는 1.51 ~ 1.87[T]로 계산되었으며 이 값은 가스관을 적절히 포화시키고 있다.

둘째, 홀 센서의 범위는 해석결과 축방향과 반경방향의 홀 센서는 -1500~1500[G]정도를 검출 할 수 있는 홀 센서를 사용해야 하며, 원주방향을 검출하는 홀센서는 -500~500[G] 정도의 범위이면 모든 범위의 결함을 검출 가능하다.

셋째, 홀 센서의 해상도는 결함에 따른 신호변화는 10%의 결함을 검출하고자 할 때 축방향은 신호변화가 70[G], 반경방향은 신호변화가 100[G], 원주방향은 신호변화가 10[G]이다. 따라서 축방향과 반경방향은 홀 센서의 해상도가 신호변화보다 5배정도 크므로 검출 할 수 없다. 원주방향을 10% 결함을 검출하고자 한다면 홀 센서의 해상도는 최대 10[G]이하가 되어야 한다.

본 연구에서는 자기 누설법에 의한 비파괴 검사 시스템에서 결함이 있을 경우 센서의 방향별 검출 신호를 비교하였고, 결함의 깊이와 모양에 따른 검출 신호의 변화를 분석하여 검출 신호를 최대로 할 수 있는 자기

시스템을 설계 할 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구 결과를 바탕으로 하여 PIG의 진행속도에 따른 검출 신호의 영향과 가스관의 스트레스, 히스테리시스에 의한 검출 신호 왜곡 등에 관한 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Brown, B.H. et al, Cardiac and respiratory related “electrical impedance changes in the human thorax”, IEEE Trans. Biomed, Eng. 41(8):729-734. 1994.
- [2] Hong, H.D. & M.D. Fox. “Magnetic backprojection imaging of the vascular lumen”, IEEE Trans. Biomed, Eng. 42(1): 102-108. 1995.
- [3] Muftuler, L.T. & Y.Z. Ider. “Measuring AC magnetic field distribution using MRI”. In Proc. 18th Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc, (Amsterdam). 1996.
- [4] Srebro, R. “Iterative refinement of the minimum norm solution of the bioelectric inverse problem”, IEEE Trans. Biomed. Eng. 43: 547-552. 1996.
- [5] Golub, G.H. & C.F Van Loan. “Matrix Computations. Third edition”, Johns Hopkins University Press. Baltimore. 1996.
- [6] Williamson, S.J. & L. Kaufman. “Biomagnetism topical review”, J. Magnetism Magn. Mater, 22: 129-201. 1981.
- [7] H. Haines et al, “Advanced MFL signal analysis aids pipe corrosion detection”, Pipeline & Gas Industry, pp. 49-63, March 1999.
- [8] K. K. Tandon, “MFL Tool Hardware for Pipeline Inspection”, Materials Selection & Design, pp. 75-79, February 1997.
- [9] D. L. Atherton and M. G. Daly, “Finite Element Calculation of Magnetic Leakage Detector Signals”, NDT International, vol. 20, no. 4, pp. 235-238, August 1987.
- [10] J. Bruce Nestleroth, Steven W. Rust, and David A. Burgoon,

"Determining Corrosion Defect Geometry from Magnetic Flux Leakage FIG Data", The NACE International Annual Conference and Exposition CORROSION 96, Paper No. 44, pp. 1-11, 1996.

[11] S. Mandayam, L. Udpa, S. S. Udpa and W. Lord, "Wavelet-based permeability compensation technique for characterizing magnetic flux leakage images" Data, NDT&E International, Vol. 30, No. 5, pp. 297-303, 1997.

[12] Richard P. Lippmann, "An Introduction to Computing with Neural Nets", IEEE ASSP MAGAZINE, pp. 4-22, April 1987.

[13] 박은식, 박관수 "자성체의 위치와 재질에 따른 Magnetic Inductance 변화 감지 시스템 개발", 대한 전기학회 부산지부 춘계 학술대회 논문집. pp. 22-27, 2001

[14] 박은식, 박관수 "비 투자율 감지에 의한 Magnetic Tomography 개발에 관한 연구", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집. pp. 678-679, 2001

[15] 박상호, 박관수 "MFL을 이용한 비파괴 검사 시스템 최적 설계", 대한 전기학회 부산지부 춘계 학술대회 논문집. pp. 57-64, 2001

[16] 박상호, 박관수 "3차원 형태의 결함에 따른 누설 자기장의 영향", 대한 전기학회 부산, 경남, 울산지부 합동추계 학술대회 논문집. pp. 285-293, 2001

[17] G. S. Park, P. W. Jang and Y. W. Rho, "Optimum Desing of a Non-Destructive Testing System to Maximize Magnetic Flux Leakage", KIEE Journal of Magnetics, vol. 6, no. 1, pp. 31-35, 30, March, 2001.

[18] Gwan Soo Park, Eun-Sik Park, "Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage Type NDT", IEEE Trans. on Magn., vol. 37, no. 2, March, 2002, in press.