

工學博士 學位論文

자기누설 방식을 이용한
비파괴검사 시스템에 관한 연구

A Study on the Magnetic Flux Leakage Type
Non-Destructive Testing System.

指導教授 金 潤 植

2004年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科 朴 相 浩

本 論 文 을 朴 相 浩 의 工 學 博 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 朴 寬 秀 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 趙 爽 濟 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 朴 東 國 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 河 潤 秀 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 金 潤 植 ㉠

2 0 0 3 年 1 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 氣 電 子 工 學 科

朴 相 浩

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 논문의 구성	3
제 2 장 3차원 유한요소법에 의한 MFL PIG의 검출신호 계산 ...	5
2.1 MFL PIG 시스템	5
2.2 지배방정식	7
2.3 정식화	9
2.4 이산화	11
제 3 장 MFL PIG 시스템의 최적 설계	17
3.1 2차원 해석과 3차원 해석의 비교 검토	17
3.2 MFL PIG의 비선형 해석에 대한 검토	20
3.3 브러쉬의 투자율 처리	24
3.4 센서 이동 해석과 요크 이동 해석 검토	25
3.5 자기 포화 시스템의 비선형 설계	31
제 4 장 가스관 결함에 의한 검출신호 분석	38
4.1 결함에 의한 검출신호 분석을 위한 기초연구	38
4.2 MFL PIG 도면	47
4.3 결함에 의한 3차원 신호	47

4.4 센서의 성분별 신호	47
4.5 결함 깊이에 의한 신호	57
4.6 결함 크기에 의한 신호	59
4.7 결함의 가시화	59
4.8 MFL PIG의 분석	66
제 5 장 PIG 주행속도 및 가스관 착자에 의한 왜곡신호 보정법	67
5.1 PIG의 주행 속도에 의한 유한요소 해석	67
5.2 속도기전력 및 자화량이 고려된 유한요소 정식화	70
5.3 가스관 착자에 의한 신호 보정	71
5.4 PIG 주행속도에 의한 신호 보정	76
5.5 MFL PIG의 이동에 따른 검출신호 영향과 분석	87
제 6 장 실험 및 결과	88
6.1 8인치 배관의 실험 및 결과 검토	88
6.2 30인치 배관의 실험 및 결과 검토	96
6.3 결함의 길이, 폭, 깊이 판정	121
제 7 장 결론	123
참 고 문 헌	125

List of figures

Fig. 2.1 MFL PIG with defect	6
Fig. 2.2 MFL PIG diagram	6
Fig. 2.3 Fig. 2.3 MFL PIG computed by FEM	6
Fig. 2.4 Tetrahedron element	13
Fig. 3.1 MFL signals according to the relative permeability of the brush	18
Fig. 3,2 Magnetic flux leakage computed by 2D/3D FEM	19
(a) 2D analysis	
(b) 3D analysis	
Fig. 3.3 Comparisons of MFL PIG signal in linear and non-linear ...	20
Fig. 3.4 The magnetic saturation curve	21
Fig. 3.5 Brush diagram	24
Fig. 3.6 Analysis point of MFL PIG	26
Fig. 3.7 Analysis of MFL which is 3mm far from hall sensor in R axis and hall sensor is center in Z axis.	27
(a) Bx(Radial component)	
(b) By(Axial component)	
Fig. 3.8 Analysis of MFL which is 5mm far from hall sensor in R axis and hall sensor is center in Z axis.	28
(a) Bx(Radial component)	
(b) By(Axial component)	

Fig. 3.9 Analysis of MFL which is 3[mm] far from hall sensor in R axis and hall sensor is three quarters in Z axis.	29
(a) Bx(Radial component)	
(b) By(Axial component)	
Fig. 3.10 Analysis of MFL which is 5[mm] far from hall sensor in R axis and hall sensor is three quarters in Z axis.	30
(a) Bx(Radial component)	
(b) By(Axial component)	
Fig. 3.11 The magnetic saturation curve in gas pipeline	32
Fig. 3.12 3D analysis of MFL PIG	33
Fig. 3.13 Magnetic flux with defect in gas pipeline	35
Fig. 3.14 The magnetic saturation curve	35
Fig. 3.15 Three cases of the operating point and λ	36
(a) Case I	
(b) Case II	
(c) Case III	
Fig. 4.1 Analysis signals according to depth of defect	40
(a) Defect depth 10[%]	
(b) Defect depth 50[%]	
(c) Defect depth 90[%]	
Fig. 4.2 Analysis signals according to length of defect	41
(a) Defect length 1t	
(b) Defect length 2t	
(c) Defect length 3t	

Fig. 4.3 Rhombic defect of two type	42
(a) Hollowed rhombic defect	
(b) Grooved rhombic defect	
Fig. 4.4 Detected MFL signals and constructed images of an artificial hollowed rhombic defect.(The size and depth of the defect is $3t \times 3t$ and $0.9t$ where the thickness t of pipe is $17.5[\text{mm}]$) ..	43
(a) Bx	
(b) By	
Fig. 4.5 Constructed images of the signals from hollowed rhombic defect.(The size and depth of the defect is $3t \times 3t$ and $0.9t$)	44
(a) Bx	
(b) By	
Fig. 4.6 Detected MFL signals and Constructed images of an artificial grooved rhombic defect.(The size of the groove width is $0.5t$)	45
(a) Bx	
(b) By	
Fig. 4.7 Constructed images of the signals from grooved rhombic defect.(The size of the groove width is $0.5t$)	46
(a) Bx	
(b) By	
Fig. 4.8 A drawing of MFL PIG	49
Fig. 4.9 Analysis of MFL PIG with defect by 3D	50
Fig. 4.10 Analysis MFL signals by axial component	51
(a) Axial components of MFL PIG	

(b) MFL image of axial component	
(c) MFL signals of axial component	
Fig. 4.11 Analysis MFL signals by radial component	53
(a) Radial components of MFL PIG	
(b) MFL image of radial component	
(c) MFL Signals of radial component	
Fig. 4.12 Analysis MFL signals by circumferential component	55
(a) Circumferential components of MFL PIG	
(b) MFL image of circumferential component	
(c) MFL Signals of circumferential component	
Fig. 4.13 MFL PIG signals according to defect depth	57
(a) Radial component	
(b) Axial component	
Fig. 4.14 Type of defect by size	60
(a) Defect size 1t×1t	
(b) Defect size 1t×3t	
(c) Defect size 3t×1t	
(d) Defect size 3t×3t	
Fig. 4.15 MFL PIG signals according to the defect	62
(a) Bx(Radial component)	
(b) By(Axial component)	
Fig. 4.16 Image of defect depth by axial component	63
(a) Defect depth 10[%]	
(b) Defect depth 50[%]	
(c) Defect depth 90[%]	

Fig. 4.17 Image of defect depth by radial component	64
(a) Defect depth 10[%]	
(b) Defect depth 50[%]	
(c) Defect depth 90[%]	
Fig. 4.18 Image of defect depth by circumferential component	65
(a) Defect depth 10%	
(b) Defect depth 50%	
(c) Defect depth 90%	
Fig. 5.1 Diagram of the magnetization	72
(a) Diagram of the axial component magnetization	
(b) Diagram of the radial component magnetization	
Fig. 5.2 Flux line of the magnetization	73
(a) Flux line of the axial component magnetization	
(b) Flux line of the radial component magnetization	
Fig. 5.3 Effects of the axial component remanent magnetization	74
(a) Axial component MFL signals	
(b) Radial component MFL signals	
Fig. 5.4 Effects of the radial component remanent magnetization	75
(a) Axial component MFL signals	
(b) Radial component MFL signals	
Fig. 5.5 Distortion of the flux line because of the PIG speed	78
(a) The result of $v=0$ [m/s]	
(b) The result of $v=4$ [m/s]	
Fig. 5.6 Eddy current on the pipe surface	79
(a) The result of $v=2$ [m/s]	

- (b) The result of $v=4$ [m/s]
- (c) The result of $v=6$ [m/s]
- (d) The result of $v=10$ [m/s]

Fig. 5.7 Changes of the radial component magnetic fields according to the PIG speed 81

- (a) The result of $v=0$ [m/s]
- (b) The result of $v=1$ [m/s]
- (c) The result of $v=2$ [m/s]
- (d) The result of $v=4$ [m/s]

Fig. 5.8 Changes of the axial component magnetic fields according to the PIG speed 83

- (a) The result of $v=0$ [m/s]
- (b) The result of $v=1$ [m/s]
- (c) The result of $v=2$ [m/s]
- (d) The result of $v=4$ [m/s]

Fig. 5.9 Effect of the PIG speed 85

- (a) Axial component of the MFL
- (b) Radial component of the MFL

Fig. 5.10 Maximum field and slop according to the PIG speed 86

Fig. 6.1 8 inch pipeline and defect 89

Fig. 6.2 PIG after pigging 89

Fig. 6.3 Sensor position of 8 inch pipeline 91

Fig. 6.4 Standard defect, shape and position of 8 inch pipeline 92

Fig. 6.5 Calculated and measured of defect A1 94

- (a) A calculated value

(b) A measured value

Fig. 6.6 The magnitude of the MFL signals with respect to defect depth	95
Fig. 6.7 MFL PIG	97
Fig. 6.8 Hall sensor module	97
Fig. 6.9 Pull Bed Gas Pipe	98
Fig. 6.10 $3t \times 3t \times 0.2t$ defect	98
Fig. 6.11 $0.5t \times 0.5t \times \text{hole}$ defect	99
Fig. 6.12 $2t \times 1t \times 0.4t$ defect	99
Fig. 6.13 Axial signals	101
Fig. 6.14 Constructed images of the axial signals	102
Fig. 6.15 Radial signals	103
Fig. 6.16 Constructed images of the axial signals	104
Fig. 6.17 Analysis of radial component(defect size $3t \times 3t \times 0.2t$)	105
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.18 Analysis of axial component(defect size $3t \times 3t \times 0.2t$)	106
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.19 Analysis of radial component(defect size $2t \times 2t \times 0.3t$)	107
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	

Fig. 6.20 Analysis of axial component(defect size $2t \times 2t \times 0.3t$)	108
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.21 Analysis of radial component(defect size $0.5t \times 0.5t \times \text{hole}$) ...	109
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.22 Analysis of axial component(defect size $0.5t \times 0.5t \times \text{hole}$) ..	110
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.23 Analysis of radial component(defect size $1t \times 1t \times 0.4t$)	111
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.24 Analysis of axial component(defect size $1t \times 1t \times 0.4t$)	112
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.25 Analysis of radial component(defect size $1t \times 1t \times 0.4t$)	113
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	

Fig. 6.26 Analysis of axial component(defect size $1t \times 1t \times 0.4t$)	114
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.27 Analysis of radial component(defect size $1t \times 3t \times 0.4t$)	115
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.28 Analysis of axial component(defect size $1t \times 3t \times 0.4t$)	116
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.29 Analysis of radial component(defect size $2t \times 1t \times 0.4t$)	117
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.30 Analysis of axial component(defect size $2t \times 1t \times 0.4t$)	118
(a) Signals	
(b) Constructed images	
(c) Constructed images of 3D	
Fig. 6.31 Calculated length and width of radial component	122
Fig. 6.32 Calculated length and width of axial component	122

List of tables

Table 3.1 Magnetic flux densities inside the gas pipe in 3D linear analysis	22
Table 3.2 Magnetic flux densities inside the gas pipe in 3D non-linear analysis	23
Table 3.3 Magnetic flux densities inside the gas pipe in 3D non-linear analysis	32
Table 6.1 Standard defects on 8 inch pipeline surface	90
Table 6.2 Defect size and measurement of defect A1	93
Table 6.3 Defect position of Pull Bed Gas Pipe	100
Table 6.4 Analysis of defect signals by radial component	119
Table 6.5 Analysis of defect signals by axial component	120

A Study on the Magnetic Flux Leakage Type Non-Destructive Testing System

by Sang Ho PARK

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

Abstract

The magnetic flux leakage(MFL) type non-destructive testing(NDT) system is widely used to detect metal loss of the underground gas pipelines. In the system, sensor module is consisted of permanent magnet, magnetic yoke and hall sensors to detect corrosion defect or any other damages of the gas pipeline.

To increase the magnitude of the sensing signals, it is necessary to increase the change of the magnetic leakage flux in the region of defect. The optimal design method of the magnetic system with permanent magnet and yokes is described. In case the operating point on the magnetic saturation curves of the object is too low, the object will not be magnetically saturated in the defect region, so the defect signals become weak. In case it is too high, the change of the

magnetic flux in the defect region will be small, so the amplitude of the sensor signal becomes weak. The operating point of the magnetic system is optimized so as to maximize the change of the magnetic flux in the region of the defect.

During the measurement, average speed of the PIG module is 4~5 m/sec. But, in most cases, the speed of the PIG module is not constant and varying inevitably from 0 to over 10 m/s because of the irregular geometry of the underground pipeline such as curvature, joint, and wrinkle structures. So, it is necessary to compensate the velocity induced distortion signals as to obtain the pure defect signals from measured signals. The method to deduce the speed of the PIG module from the sensing signals are described and the compensation scheme to eliminate the velocity induced signal distortions are developed.

In each leg, a magnetizing yoke and magnet were equipped with 3 sets hall sensors to detect the MFL signals. For the measurement, we made a gas pipe of 30 inches diameter with several types of artificial defect. Artificial rhombic defect could be successfully identified from the defect signals. The computed MFL signal obtained by a nonlinear finite element method is verified by actual measurements.

제 1장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

현재 전세계적으로 3,000,000[km]의 가스관과 오일관이 사용되고 있다. 직경이 큰 배관들은 지하에 매설되어 있어 항상 극심한 부식 환경에 장시간 노출되어 있다. 그러나 지하 수십 미터 아래 매설된 가스관의 상태를 점검하는 것은 매우 어렵다. 그래서 지하배관 비파괴 검사 기술들이 도입되었고 그 중에 자기누설탐상(MFL; Magnetic Flux Leakage) 기술이 도입되어 배관의 상태를 조사하는데 많은 기술적인 진보가 있었다. 지하배관 비파괴 검사 기술은 배관 내에 흐르는 가스나 기름등의 기체나 유체의 압력차에 의해 배관의 내부에 삽입된 PIG가 배관을 따라 흐르게 하는 기술로 처음에는 가스관 내부의 벽 청소, 퇴적물의 제거 등에 사용되었다. 현재는 PIG의 활용범위가 매우 넓어져 가스관의 관리, 보수뿐만 아니라 배관운용의 거의 모든 분야에 널리 적용되는 기술이다[1]-[5].

현재 사용되고 있는 기술은 PIG의 용도에 따라 utility PIG와 inspection PIG로 나눌 수 있으며, utility PIG는 cleaning PIG, sealing PIG 등이 있다. Inspection PIG는 내부의 결함이나 상태를 조사하는 기능을 가지고 크게 배관이 손상된 위치를 파악하기 위해 mechanical finger, sonar ring이나 INS(Inertia Navigation System) 장치가 내장된 geometry PIG, 자기누설탐상을 이용한 MFL PIG 그리고 초음파를 이용한 ultrasonic PIG등이 있다. Utility PIG는 배관을 유지 운용하는데 주로 사용되는 것으로 PIG의 재질과 형태가 여러 가지가 있다. 이러한 종류의 PIG는 배관 시공 후 관내부에 남아있는 찌꺼기를 제거하거나, 후속되는

inspection PIG의 운전에 방해가 될 수 있는 장애물을 제거 또는 감지하는 기능을 가지고 있으며 또한 배관 자체의 기하학적인 모양을 기록하는 역할을 담당하기도 한다.

현재 가스관은 안전상의 문제로 지하에 매설하도록 하고 있다. 만약 이 배관들이 부식이나 사고 등으로 인하여 가스가 누출되어 폭발할 경우 큰 재난이 일어나게 된다. 그러므로 가스관을 검사할 수 있는 기술이 당연히 개발의 대상이 되었고, 캐나다의 BJ Pipeline Inspection Services, CORROPRO, 영국의 PII(Pipeline Integration International), 독일의 3P Services 등의 업체가 개발하여 배관을 검사하고 있다.

PIG를 이용한 내부 탐사방법이 여러 가지가 있으나 가스관의 경우 가장 효과적으로 널리 사용되고 있는 것이 MFL PIG이다. 자기 누설 탐상 방법은 요크와 영구자석을 이용한 자기시스템으로 가스관을 적절히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설자속을 홀센서를 이용하여 검출한다. 현재 캐나다의 BJ사와 영국의 PII사는 부식으로 인한 결함이 가스관의 두께의 10%까지 검출이 가능하다. 그러나 가스관을 검사하는 기업들은 결함이 가스관의 두께의 5%이내의 정교한 결함 검출을 요구하고 이러한 정밀한 결함 검출에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 결함에 의한 측정신호를 영구자석과 요크로 구성된 자기시스템을 유한요소법으로 가스관의 누설자속을 계산하였다. 또한 결함이 없을 경우와 결함의 있을 경우의 비를 누설 계수 λ 로 정의하였으며 누설 계수 λ 에 적용되는 자기장의 범위를 동작점으로 정의하였다. 동작점이 낮을 설정된 경우(가스관을 충분히 포화가 안된 경우)는 누설 자속이 적어서 측정이 곤란하며 누설 계수 λ 의 크기도 작다. 동작점이 높을 설정된 경우는 결함이 없을 경우도 누설 자속이 크므로 결함이 있는 경우와 없는 경우를 구분이 어렵고 누설 계수 λ 도 작게 된다. 따라서 자기

시스템의 동작점은 결함이 생겼을 때 누설자속이 최대가 되도록 최적화 되어야 하며, 이때 누설 계수 λ 의 값은 크게 된다.

자기누설 탐상 방식의 비파괴 검사 시스템인 MFL PIG의 검출신호를 3차원 비선형 유한요소법으로 해석하면 가스관의 결함에 대한 검출신호를 알 수 있다. 그러나 MFL PIG가 주행함에 따라 속도에 의한 와전류가 발생하여 검출신호를 왜곡시키며 가스관의 착자로 인하여 검출신호 왜곡이 발생한다. 결함 신호를 얻기 위해서는 신호 보정이 필요하다. 이에 본 연구는 MFL PIG의 주행에 의한 왜곡 신호를 MFL PIG의 주행속도, 검출신호의 최대값, 검출신호의 기울기 등으로부터 왜곡성분을 추정하여 보정함으로써 실제신호를 검출하고자 하였으며, 가스관의 착자는 종방향 착자와 횡방향 착자로 나누어서 이에 대한 영향을 연구하였다.

1.2 논문의 구성

본 논문의 내용을 다음과 같이 구성하였다.

제 2장에서는 MFL PIG의 검출신호의 계산을 위한 3차원 유한요소법에 대하여 기술하였다. 2.1절에 MFL PIG 시스템에 대하여 간략한 소개하고 2.2절은 Maxwell방정식과 보조방정식으로부터 2.3절은 정식화 2.4절은 이산화시켜 이를 유한개의 요소로 나타내고 이를 행렬로 조립하여 계행렬을 만들고 경계조건을 대입하여 행렬식을 풀이하는 방법에 대하여 기술하였다.

제 3장에서는 MFL PIG 시스템을 최적설계하기 위해 3.1절에서 3.4절까지 2차원과 3차원, 선형과 비선형, 브러쉬 투자율 처리등에 대한 비교검토를 하였으며, 3.5절에서는 포화계수 λ 와 동작점등을 도입하여 최적설계

값을 정하였다.

제 4장에서는 가스관의 결함에 의한 검출신호를 분석하였다. 4.2절의 MFL PIG의 실제도면으로부터 4.3절은 결함의 의한 3차원 신호, 4.4절은 센서의 성분별 신호, 4.5절과 4.6절은 결함의 깊이와 크기에 의한 신호 분석을 하였으며 4.6절에는 이러한 결함들을 가시화 시켰고, 4.8절에서는 이러한 결과에 대한 검토를 하였다.

제 5장에서는 MFL PIG 주행속도 및 가스관 착자에 의한 검출신호 왜곡이 발생하는데 이에 대한 보정법에 대하여 기술하였다. 5.1절과 5.2절은 속도 기전력 및 자화량이 고려된 유한요소해석에 대하여 기술하였으며, 5.3절은 가스관 착자에 의한 신호보정에 대하여 5.4절은 PIG의 주행속도에 의한 신호보정에 대하여 기술하였다. 5.5절은 MFL PIG의 이동에 따른 검출신호의 영향에 대하여 분석하였다.

제 6장에서는 실제 8인치와 30인치 배관의 실험 및 결과에 대하여 기술하였다.

제 7장에서는 본 연구내용에 대하여 요약정리 하였다.

제 2장 3차원 유한요소법에 의한 MFL PIG의 검출신호 계산

2.1 MFL PIG 시스템

MFL PIG는 Fig. 2.1과 같이 가스관의 부식 등으로 인한 결함을 검출한다. 이 방법은 요크와 영구자석을 이용한 자기시스템으로 가스관을 충분히 포화시킨 후 결함으로 인해 발생하는 누설 자속을 홀센서를 이용하여 검출한다.

Fig. 2.2는 MFL PIG의 개요도이다. 영구자석에서 발생된 자기장이 브러쉬와 요크를 통하여서 가스관에 전달되게 된다. 이때 영구자석의 자화량과 면적에 따라서 가스관을 적당하게 포화시키게 된다. Fig. 2.3은 MFL PIG를 유한요소법으로 해석하여 자력선을 나타낸 것이다. 가스관에 결함이 있다면 가스관의 단면적이 줄어드는 효과가 나타나므로 Fig. 2.3의 결함 아래 부분처럼 자기장이 집중되게 된다. 가스관은 이미 포화되어 있으므로 큰 누설자속이 발생하게 되고 이를 홀센서를 이용하여 검출한다. 여기서 lm 은 영구자석의 길이로 영구자석의 면적과 자속밀도를 곱한 값이 자속이 된다. 이 자속이 가스관을 포화시키게 된다. lm 은 가스관의 포화 정도에 따라 치수가 결정된다. lm 의 길이 산출 방법은 3.5절에 기술하였다.

이러한 누설자속을 계산하기 위하여 많이 사용되고 있는 것이 유한요소법(FEM; Finite Element Method)이다. 자기장에 관련된 Maxwell 방정식과 다른 보조방정식으로부터 정식화와 이산화를 시킨 다음 유한개의

요소행렬로 구성되어 행렬식을 풀어서 해를 구한다.

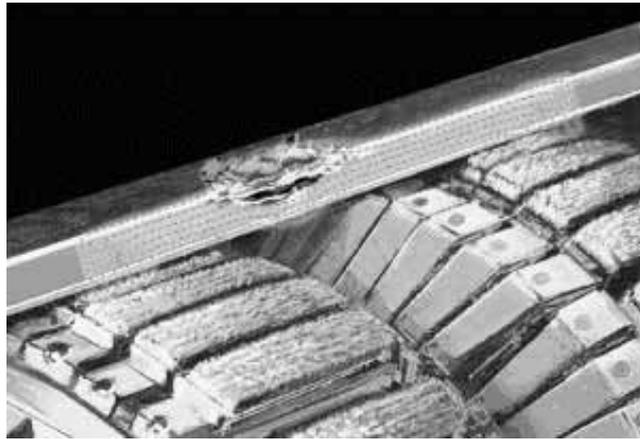


Fig. 2.1 MFL PIG with defect

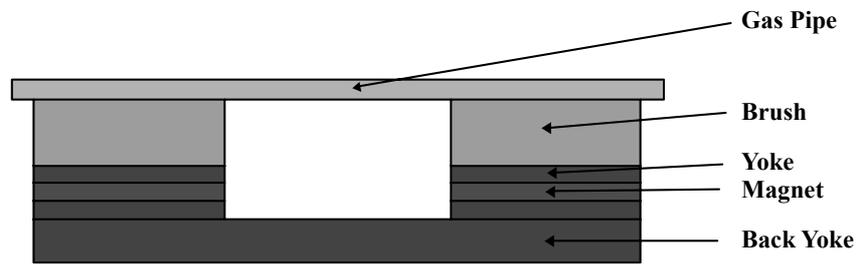


Fig. 2.2 MFL PIG diagram

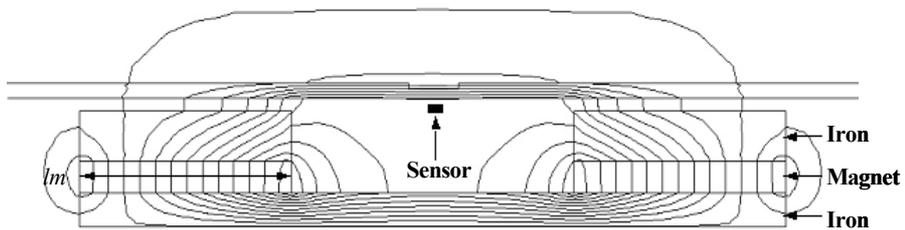


Fig. 2.3 MFL PIG computed by FEM

2.2 지배방정식(Governing equations)

변위 전류를 무시한 전자장 Maxwell 방정식과 보조 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_\theta + \vec{J}_0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.4)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.5)$$

여기서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

\vec{H} : 자기장의 세기 [A/m]

\vec{B} : 자속밀도 [Wb/m^2]

\vec{E} : 전기장의 세기 [V/m]

\vec{J}_o : 여자전류밀도 [A/m^2]

\vec{J}_θ : 와전류밀도 [A/m^2]

σ : 도전율 [V/m]

μ : 자기투자율 [H/m]

식 (2.3)으로부터 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential) \vec{A} 는 식 (2.6)의 관계로 정의되고

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.6)$$

식 (2.2)와 식 (2.6)으로부터 다음 식이 성립한다.

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (2.7)$$

여기서 ϕ 는 전기 스칼라 포텐셜(electric scalar potential)를 나타낸다. 식 (2.4), (2.5), (2.6), (2.7)을 조합하여 식 (2.1)에 대입하면 다음과 같은 편미분 방정식이 유도된다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = -\sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) + \vec{J}_o \quad (2.8)$$

여기서 ν 는 자기 저항율이며 $\frac{1}{\mu}$ 이다. 그런데 지배 방정식 (2.8)은 벡터 식으로 3개의 스칼라 방정식으로 나타낼 수 있다. 그러나 미지수는 4개 (A_x, A_y, A_z, ϕ)이므로 한 개의 수식이 더 필요하게 된다. 또 하나의 지배 방정식은 전하의 축적을 무시한 전류 연속 방정식(current continuity equation)에 식 (2.7)을 대입하여 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \left(\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \phi \right) = 0 \quad (2.9)$$

단, $\nabla \cdot \vec{J}_o = 0$ 이다.

2.3 정식화(Formulation)

2.2절에서 도출한 지배 방정식 (2.8), (2.9)에 대하여는 형상 함수(shape function)를 가중 함수(weighting function)하는 Galerkin법으로 정식화 하였다. 그리고 지배 방정식에서의 시간 미분항에 대하여는 정상 상태 해석을 하였다.

지배 방정식 (2.8)에 대한 잔차(residual) \vec{R} 는 식 (2.10)과 같다

$$\begin{aligned} \vec{R} = & \int \int \int N_i \nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) dV + j\omega\sigma \int \int \int N_i \vec{A} dV \\ & + \sigma \int \int \int N_i \nabla \phi dV - \int \int \int N_i \vec{J}_o dV \end{aligned} \quad (2.10)$$

식 (2.10)을 벡터 표시법을 적용하면 식 (2.11)과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{R} = & \int \int \int \nabla \times (N_i \nabla \times \vec{A}) dV + \int \int \int \nabla N_i \times (\nabla \times \vec{A}) dV + \\ & j\omega\sigma \int \int \int N_i \vec{A} dV + \sigma \int \int \int N_i \nabla \Phi dV - \int \int \int N_i \vec{J}_o dV \end{aligned} \quad (2.11)$$

식 (2.11)을 가우스 정리를 적용하여 간단히 하면 식 (2.12)와 같다.

$$\begin{aligned} \vec{R} = & \int \int \vec{n} \times (N_i \nabla \times \vec{A}) dS - \int \int \int \nabla N_i \times (\nabla \times \vec{A}) dV + \\ & j\omega\sigma \int \int \int N_i \vec{A} dV + \sigma \int \int \int N_i \nabla \Phi dV - \int \int \int N_i \vec{J}_o dV \end{aligned} \quad (2.12)$$

N_i : 형상함수

\vec{n} : 평면 S의 법선 벡터

$i = 1, \dots, n$

잔차 \vec{R} 의 첫 번째 항은 경계 적분항으로 직접 적분한다는 것은 매우 복잡하므로 이를 고려하지 않아도 되는 경계를 잡게 되면 잔차는 식 (2.13)과 같다.

$$\begin{aligned}
\vec{R} = & - \int \int \int \nabla N_i \times (\nabla \times \vec{A}) dV \\
& + j \omega \sigma \int \int \int N_i \vec{A} dV + \sigma \int \int \int N_i \nabla \Phi dV \\
& - \int \int \int N_i \vec{J}_o dV
\end{aligned} \tag{2.13}$$

지배 방정식 (2.9)에 대한 잔차 R_ϕ 는 식 (2.14)와 같다.

$$\begin{aligned}
R_\phi = & \int \int \int N_i \nabla \cdot (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \Phi) dV \\
= & \int \int \int \nabla \cdot N_i (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \Phi) dV \\
& - \int \int \int \nabla N_i \cdot (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \Phi) dV \\
= & \int \int N_i (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \Phi) \cdot \vec{n} dS \\
& - \int \int \int \nabla N_i \cdot (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \Phi) dV
\end{aligned} \tag{2.14}$$

잔차 R_ϕ 에서도 경계 적분항이 나타나는데 경계 적분을 고려하지 않아도 되는 경계를 잡게 되면 잔차는 식 (2.15)와 같다.

$$R_\phi = - \int \int \int \nabla N_i \cdot (j \omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla \Phi) dV \tag{2.15}$$

2.4 이산화(Discretization)

2.2절에서 정식화하여 유도한 식 (2.13), (2.15)를 이산화하기 위해 성

분 x, y, z, ϕ 로 나누면 다음과 같다.

$$R_x = \int \int \int \left(\frac{\partial N_i}{\partial y} v_z \frac{\partial A_x}{\partial y} - \frac{\partial N_i}{\partial y} v_z \frac{\partial A_y}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial z} v_y \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial N_i}{\partial z} v_y \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) dV \\ + j\omega\sigma \int \int \int N_i A_x dV + \sigma \int \int \int N_i \frac{\partial \phi}{\partial x} dV - J_x \int \int \int N_i dV \quad (2.16a)$$

$$R_y = \int \int \int \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} v_z \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial N_i}{\partial x} v_z \frac{\partial A_x}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} v_x \frac{\partial A_y}{\partial z} - \frac{\partial N_i}{\partial z} v_x \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) dV \\ + j\omega\sigma \int \int \int N_i A_y dV + \sigma \int \int \int N_i \frac{\partial \phi}{\partial y} dV - J_y \int \int \int N_i dV \quad (2.16b)$$

$$R_z = \int \int \int \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} v_y \frac{\partial A_z}{\partial x} - \frac{\partial N_i}{\partial x} v_y \frac{\partial A_x}{\partial z} + \frac{\partial N_i}{\partial y} v_x \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial N_i}{\partial y} v_x \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) dV \\ + j\omega\sigma \int \int \int N_i A_z dV + \sigma \int \int \int N_i \frac{\partial \phi}{\partial z} dV - J_z \int \int \int N_i dV \quad (2.16c)$$

$$R_\phi = -j\omega\sigma \int \int \int \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} A_x + \frac{\partial N_i}{\partial y} A_y + \frac{\partial N_i}{\partial z} A_z \right) dV \\ - \sigma \int \int \int \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) dV \quad (2.16d)$$

식 (2.16)을 이산화하기 위해 우리가 다루는 함수 분포의 영역을 Fig. 2.4처럼 유한개의 사면체 요소로 분할하고 사면체 요소내의 미지 함수 A 를 일차 함수로 근사 시킬 경우 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\vec{A}^{(\theta)} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 N_{i\theta} N_{j\theta}$$

$$\Phi^{(\theta)} = \sum_{i=1}^4 N_{i\theta} \Phi_{i\theta}$$

$$N_{i\theta} = \frac{1}{6V^{(\theta)}} (a_{i\theta} + b_{i\theta}x + c_{i\theta}y + d_{i\theta}z)$$

$$V^{(\theta)} = \frac{1}{6} (a_{1\theta} + a_{2\theta} + a_{3\theta} + a_{4\theta})$$

$$a_{i\theta} = (-1)^i \{ x_j (y_1 z_k - y_k z_1) + x_k (y_j z_1 - y_1 z_j) \\ + x_1 (y_k z_j - y_j z_k) \}$$

$$b_{i\theta} = (-1)^i \{ y_j (z_k - z_1) + y_k (z_1 - z_j) + y_1 (z_j - z_k) \}$$

$$c_{i\theta} = (-1)^i \{ z_j (x_k - x_1) + z_k (x_1 - x_j) + z_1 (x_j - x_k) \}$$

$$d_{i\theta} = (-1)^i \{ x_j (y_k - y_1) + x_k (y_1 - y_j) + x_1 (y_j - y_k) \}$$

(2.17)

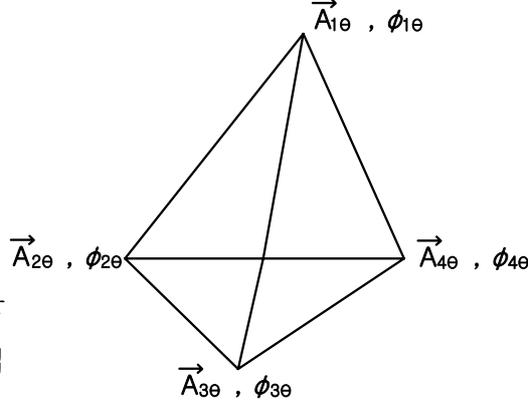


Fig. 2.4 Tetrahedron element

이러한 관계식을
식 (2.16)에 대입
하여 이산화하면
다음과 같이 된다.

$$R_{xi} = \frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} \sum_{j=1}^4 \{ (c_i c_j + d_i d_j) A_{xj}^\theta - c_i b_j A_{yj}^\theta - d_i b_j A_{zj}^\theta \} \quad (2.18a)$$

$$+ j\omega\sigma \frac{V^\theta}{20} \sum_{j=1}^4 (1 + \delta_{ij}) A_{xj}^\theta + \frac{\sigma}{24} \sum_{j=1}^4 b_j \Phi_j^\theta - \frac{V^\theta}{4} J_{ox}^\theta$$

$$R_{yi} = \frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} \sum_{j=1}^4 \{ -b_i c_j A_{xj}^\theta + (b_i b_j + d_i d_j) A_{yj}^\theta - d_i c_j A_{zj}^\theta \} \quad (2.18b)$$

$$+ j\omega\sigma \frac{V^\theta}{20} \sum_{j=1}^4 (1 + \delta_{ij}) A_{yj}^\theta + \frac{\sigma}{24} \sum_{j=1}^4 c_j \Phi_j^\theta - \frac{V^\theta}{4} J_{oy}^\theta$$

$$R_{zi} = \frac{1}{36 V^\theta} \frac{1}{\mu_o \mu_r} \sum_{j=1}^4 \{ -b_i d_j A_{xj}^\theta - c_i d_j A_{yj}^\theta + (c_i c_j + b_i b_j) A_{zj}^\theta \} \quad (2.18c)$$

$$+ j\omega\sigma \frac{V^\theta}{20} \sum_{j=1}^4 (1 + \delta_{ij}) A_{zj}^\theta + \frac{\sigma}{24} \sum_{j=1}^4 d_j \Phi_j^\theta - \frac{V^\theta}{4} J_{oz}^\theta$$

$$R_{\phi_i} = -j\omega\sigma \frac{V}{24} \sum_{j=1}^4 (b_i A_{xj} + c_i A_{yj} + d_i A_{zj}) \quad (2.18d)$$

$$- \frac{\sigma}{36 V^\theta} \sum_{j=1}^4 \{ (b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j) \Phi_j \}$$

이것으로부터 도체 영역에서는 16×16 요소행렬(element matrix), 공기 영역에서는 $\sigma = 0$ 이므로 12×12 요소행렬을 구성할 수 있게 된다. 행렬은 식 (2.19)와 같이 나타낸다.

$$[K_{ij}][U_j] = [F_j] \quad (2.19)$$

여기서

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} k^{xx} & k^{xy} & k^{xz} & k^{x\phi} \\ k^{yx} & k^{yy} & k^{yz} & k^{y\phi} \\ k^{zx} & k^{zy} & k^{zz} & k^{z\phi} \\ k^{\phi x} & k^{\phi y} & k^{\phi z} & k^{\phi\phi} \end{bmatrix}, \quad U_j = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ \phi \end{bmatrix},$$

$$F_j = \frac{V^\ominus}{4} \begin{bmatrix} J_{ox}^\ominus \\ J_{oy}^\ominus \\ J_{oz}^\ominus \\ 0 \end{bmatrix}$$

그리고

$$k^{xx} = \frac{1}{36 V^\ominus} \frac{1}{\mu_o \mu_r} (c_i c_j + d_i d_j) + j\omega\sigma \frac{V^\ominus}{20} (1 + \delta_{ij})$$

$$k^{xy} = -\frac{1}{36 V^\ominus} \frac{1}{\mu_o \mu_r} c_i c_j$$

$$k^{xz} = -\frac{1}{36 V^\ominus} \frac{1}{\mu_o \mu_r} d_i d_j$$

$$k^{x\phi} = \frac{\sigma}{24} b_j$$

$$k^{yx} = -\frac{1}{36 V^\ominus} \frac{1}{\mu_o \mu_r} b_i c_j$$

$$k^{yy} = \frac{1}{36 V^\ominus} \frac{1}{\mu_o \mu_r} (b_i b_j + d_i d_j) + j\omega\sigma \frac{V^\ominus}{20} (1 + \delta_{ij})$$

$$k^{yz} = -\frac{1}{36 V^\ominus} \frac{1}{\mu_o \mu_r} d_i c_j$$

$$k^{y\phi} = \frac{\sigma}{24} c_j$$

$$k^{zx} = -\frac{1}{36 V^\ominus} \frac{1}{\mu_o \mu_r} b_i d_j$$

$$k^{zy} = -\frac{1}{36 V^\ominus} \frac{1}{\mu_o \mu_r} c_i d_j$$

$$k^{zz} = \frac{1}{36 V^\ominus} \frac{1}{\mu_o \mu_r} (c_i c_j + b_i b_j) + j\omega\sigma \frac{V^\ominus}{20} (1 + \delta_{ij})$$

$$k^{z\phi} = \frac{\sigma}{24} d_j$$

$$k^{\phi x} = \frac{\sigma}{24} b_i$$

$$k^{\phi y} = \frac{\sigma}{24} c_i$$

$$k^{\phi z} = \frac{\sigma}{24} d_i$$

$$k^{\phi\phi} = -j \frac{1}{\omega} \frac{1}{36 V^\ominus} (b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j)$$

이다. 이를 전 요소에 대하여 조립하여 계 행렬(system matrix)을 만들고
경계 조건을 대입한 후 행렬식을 풀어서 해석한다.

제 3장 MFL PIG 시스템의 최적 설계

자기누설탐상 검출신호 해석을 하기 위하여 기초연구를 수행하였다. 2차원과 3차원에 대한 비교, 선형과 비선형의 비교, 여러개의 다발들로 빗살구조로 되어있는 브러쉬의 투자율 산출, 센서 이동시의 해석과 요크 이동시의 해석에 대하여 연구하였다. 소프트웨어는 Vector Fields사의 유한요소 해석 프로그램인 OPERA를 사용하여 계산하였다.

3.1 2차원 해석과 3차원 해석의 비교 검토

2차원은 3차원의 어느 3가지 방향중에서 한쪽 축을 무한이 길다고 생각하여 2차원으로 해석하는 방법이다. 장점은 3차원으로 해석한 것 보다 미지수의 수가 작으므로 계산속도가 빠르다. 그러나 한쪽축이 무한이 길 수 없으므로 오차가 발생하게 된다. 3차원으로 해석한 것은 장점으로서는 정확한 계산결과를 얻을 수 있지만 단점으로 미지수의 개수가 많고 요소의 개수가 많이 때문에 계산시간이 오래 걸린다.

본 연구에서는 계산량이 많은 3차원 해석을 계산이 빠른 2차원 해석으로 대체할 수 있는가에 대하여 검토하였다. Fig. 3.1은 MFL PIG의 2차원과 3차원에 대하여 가스관과 요크에 자속밀도를 비교한 것이며 Fig. 3.2는 2차원에서 해석한 자력선과 3차원의 표면에서의 자기장의 분포를 나타내었다.

실제는 요크의 폭보다 가스관의 폭이 크나 2차원에서는 이것에 대한 설정이 되지 않으므로 같다고 놓고 해석을 하였을 경우 Fig. 3.1과 같은 경우처럼 2차원에서는 가스관이 높게 나타나지만 실제로 3차원에서는 가

스관의 폭이 요크보다 크므로 자기회로법에서 자속은 같지만 폭이 큰 만큼 요크 보다 가스관의 면적의 비가 3차원이 2차원보다 크므로 가스관의 자기장은 줄어들게 된다. 즉 본 대상 시스템은 2차원 해석시 큰 오차가 수반되므로 본 연구에서는 모든 해석을 3차원으로 해석하였다.

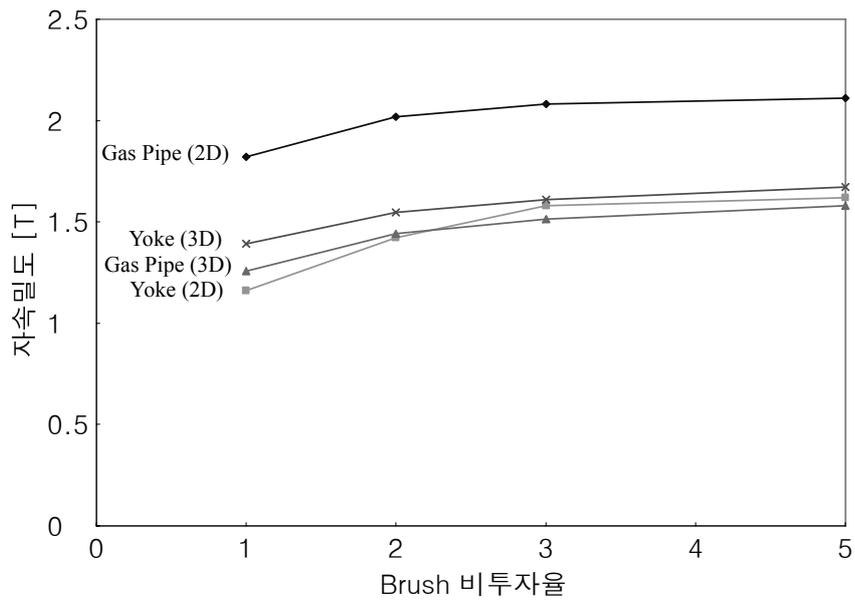
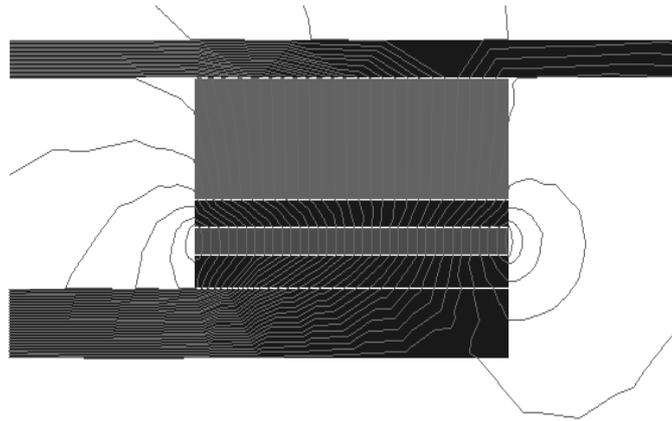
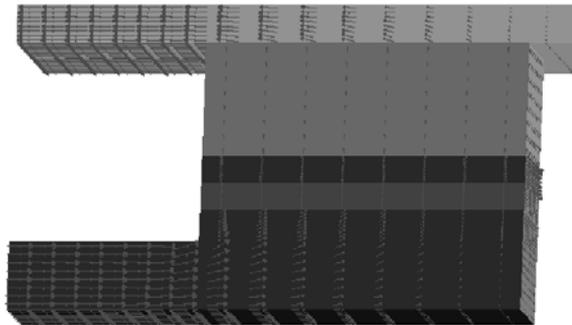


Fig. 3.1 MFL signals according to the relative permeability of the brush



(a) 2D analysis



(b) 3D analysis

Fig. 3.2 Magnetic flux leakage computed by 2D/3D FEM

3.2 MFL PIG의 비선형 해석에 대한 검토

Fig. 3.3과 Table 3.1, Table 3.2는 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 Table 3.1과 같이 가스관과 요크에의 자속밀도가 4[T]이상의 비현실적인 높은값이 나온다. 가스관과 MFL PIG의 요크부분은 선형 재질이 아니다. 그러므로 재료에 해당하는 자기포화곡선을 입력하여 비선형 해석을 하여야 한다. 즉, MFL PIG 시스템을 해석할 경우 반드시 비선형 해석을 하여야한다. 따라서 본 연구는 Fig. 3.4와 같은 실제 자기포화곡선을 적용하여 모든 해석을 비선형으로 해석하였다.

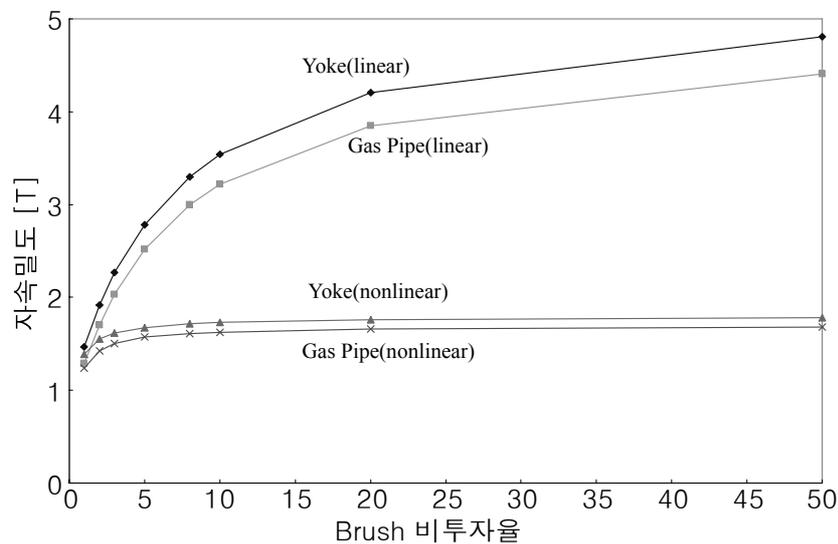


Fig. 3.3 Comparisons of MFL PIG signal in linear and signal in non-linear

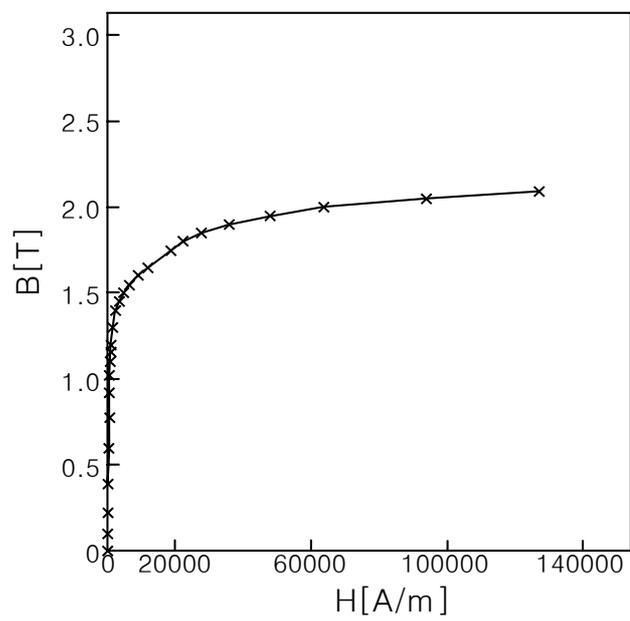


Fig. 3.4 The magnetic saturation curve

Table 3.1 Magnetic flux densities inside the gas pipe in 3D linear analysis

[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	0.084	5.207
500	4.900	0.871	1.055	1.099	5.316
1000	4.950	0.811	1.068	1.106	5.366

Table 3.2 Magnetic flux densities inside the gas pipe in 3D non-linear analysis

[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

3.3 브러쉬의 투자율 처리

Fig. 3.5는 브러쉬의 개요도를 나타낸 것이다. 브러쉬는 여러개의 다발들이 빗살구조로 되어있다. 브러쉬의 투자율을 산출할 경우 한가닥의 자기포화곡선은 산출할 수 있으나 빗살구조인 경우에는 산출하기 어렵고 또한 브러쉬와 가스관 사이의 air gap, 브러쉬와 MFL PIG의 접합면, 그리고 MFL PIG 운행중에 가스관과 이격이 발생하게 된다. 브러쉬의 투자율을 산출하려면 이 모든 것을 고려해야 한다. 그러나 이처럼 모든 것을 고려한 브러쉬의 투자율을 산출한다는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구는 브러쉬의 투자율을 가능한 가장 낮은 경우로부터 가장 높은 경우 까지 브러쉬의 투자율을 가정하여 비투자율의 범위를 1~1000까지를 해석하였다.

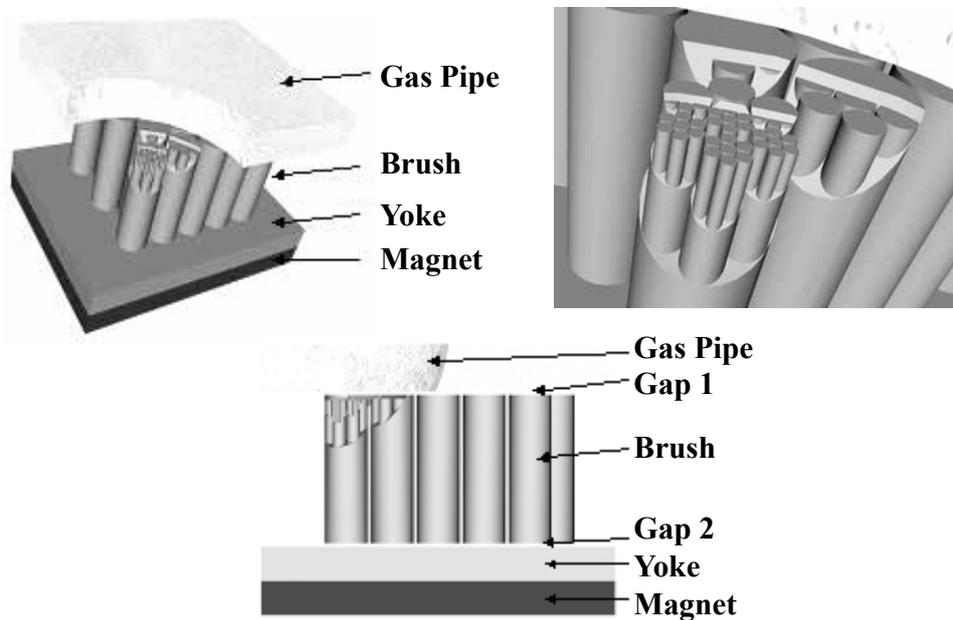


Fig. 3.5 Brush diagram

3.4 센서 이동 해석과 요크 이동 해석 검토

비파괴검사 방식의 MFL PIG는 가스관을 지나가면서 가스관의 부식 등으로 인한 결함을 검출하는 장치이다. 가스관의 누설자속을 해석하기 위해서는 해석하고자하는 위치에 MFL PIG를 옮기면서 해석을 실시하여야 한다. 이 경우 해석에 많은 시간을 요하게 된다.

본 연구에서는 MFL PIG를 옮기면서 해석하고자하는 위치에 대하여 그 해석 결과와 결함이 홀센서 위에 있을 때의 진행경로의 자기장을 해석하여 이 두 가지 경우에 검토하였다. 또한 본 연구에서는 Fig. 3.6과 같이 홀 센서 측정지점을 MFL PIG의 가운데 지점과 한쪽으로 치우친 경우 두 가지에 대하여 해석하였으며, 그리고 가스관과 홀센서 사이의 이격 거리도 3[mm]와 5[mm]에 대하여 각각의 경우에 대하여 검토하였다.

해석결과는 Fig. 3.7, Fig. 3.8, Fig. 3.9, Fig. 3.10과 같다. 해석결과 MFL PIG를 이동하면서 해석한 결과와 결함이 홀 센서 위에 있을 때 진행경로의 자기장을 해석한 결과가 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 많은 시간이 요하는 MFL PIG를 각각의 지점에 대하여 해석하는 방법대신에 결함이 홀 센서 위에 있을 때 진행경로의 자기장을 해석하는 방법으로 수행하였다.

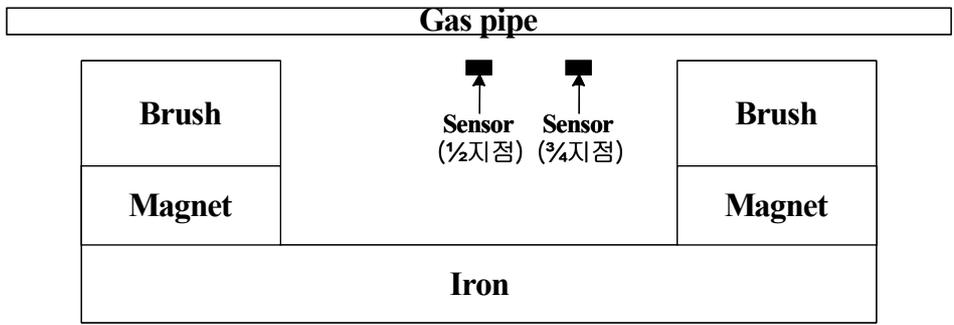
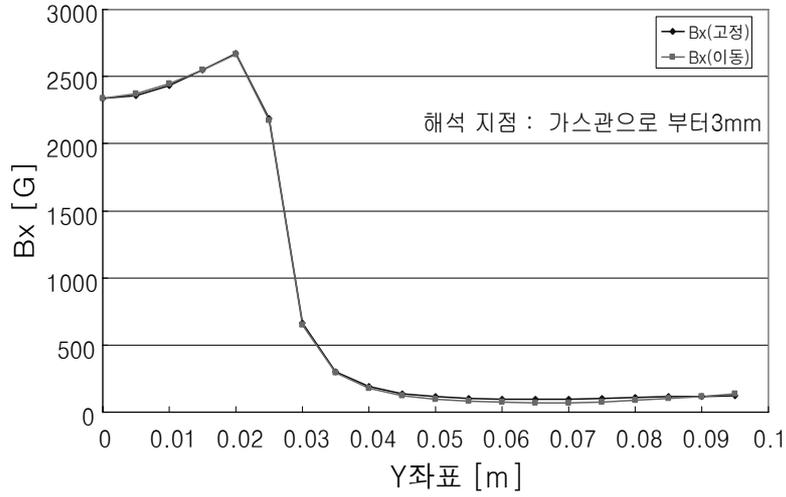
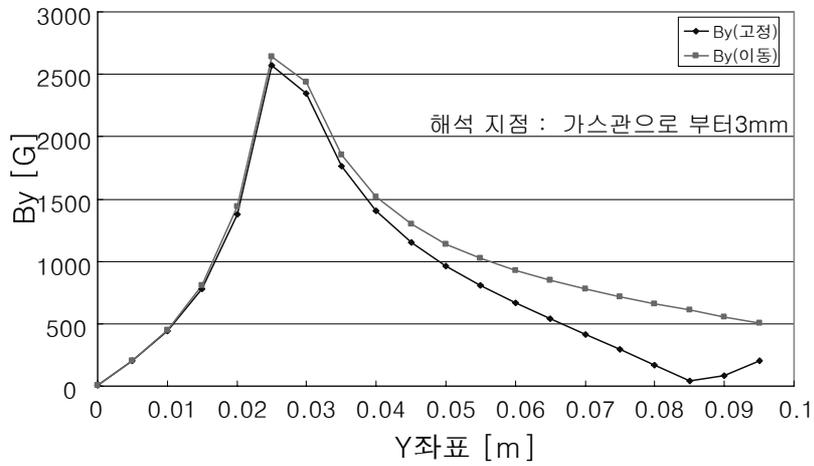


Fig. 3.6 Analysis points of MFL PIG

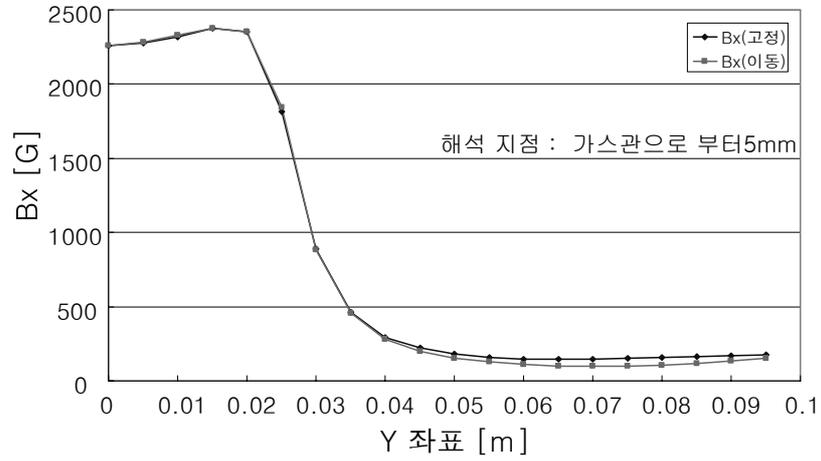


(a) Bx(Radial component)

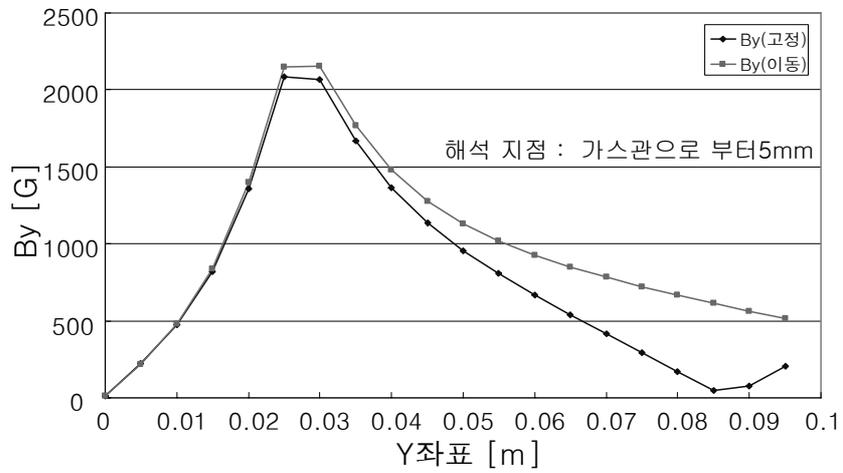


(b) By(Axial component)

Fig 3.7 Analysis of MFL which is 3mm far from hall sensor in R axis and hall sensor is center in Z axis.

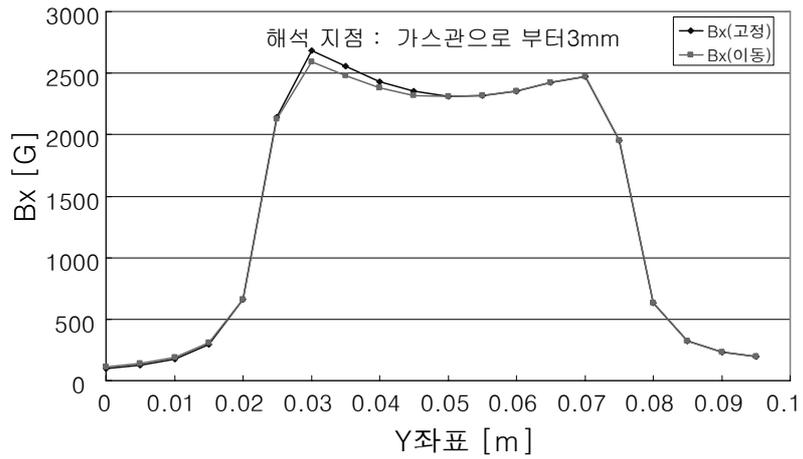


(a) Bx(Radial component)

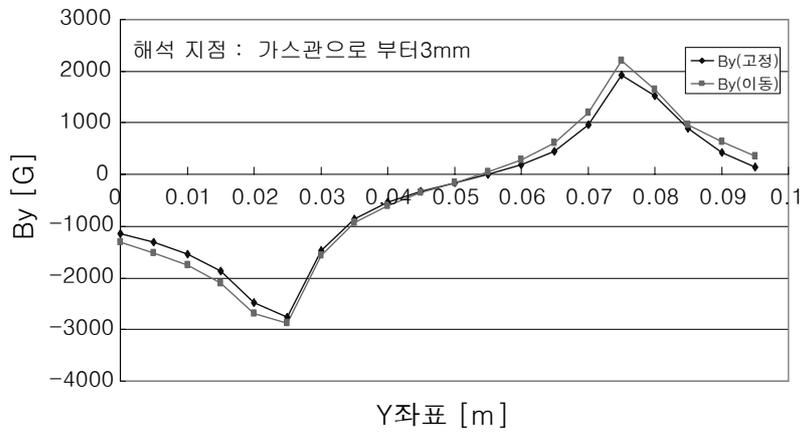


(b) By(Axial component)

Fig 3.8 Analysis of MFL which is 5mm far from hall sensor in R axis and hall sensor is center in Z axis.

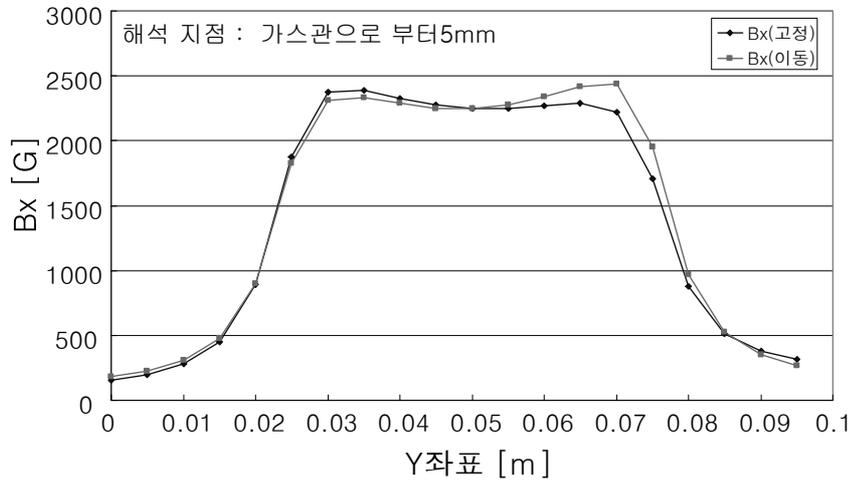


(a) Bx(Radial component)

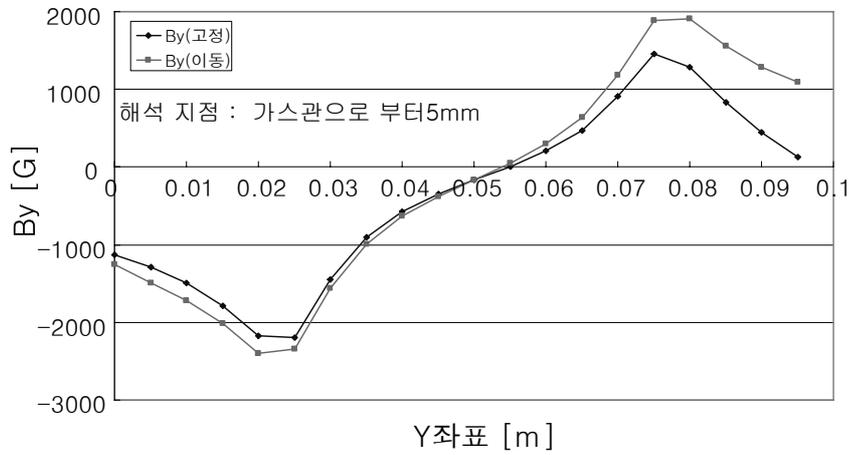


(b) By(Axial componet)

Fig 3.9 Analysis of MFL which is 3mm far from hall sensor in R axis and hall sensor is three quarters in Z axis.



(a) Bx(Radial component)



(b) By(Axial component)

Fig 3.10 Analysis of MFL which is 5mm far from hall sensor in R axis and hall sensor is three quarters in Z axis.

3.5 자기포화 시스템의 비선형 설계

MFL PIG는 자기포화를 가지는 비선형 시스템이다. 선형과는 달리 특별한 포화설계가 필요하다. 또한 MFL 신호에 의한 결함의 감지정도를 높이기 위해 최적화 설계를 해야 한다. 자기포화 시스템의 비선형 최적화 설계를 누설계수 λ 가 최대가 되는 최적의 동작점 선정으로 설정하였다.

3.5.1 가스관의 자기 포화 최적화 설계

(1) 가스관의 자기포화곡선

가스관과 MFL PIG의 요크부분은 선형 재질이 아니다. 그러므로 재료에 해당하는 자기포화곡선을 입력하여 비선형 해석을 하여야 한다. 따라서 본 연구는 모든 해석을 비선형으로 실시하였다.

(2) 가스관의 포화정도

Fig. 3.12는 MFL PIG의 3차원 해석 부분을 나타내었다. 자기장이 가스관의 중심부분에 집중됨을 알 수 있다. MFL PIG의 각 부분에 대한 3차원 비선형 해석결과는 Table 3.3에 나타내었다. 브러쉬의 비투자율을 1-100까지 변화 시켰을 때 가스관의 자속밀도는 1.57 ~ 1.81[T]로 가스관을 포화정도는 적당하다.

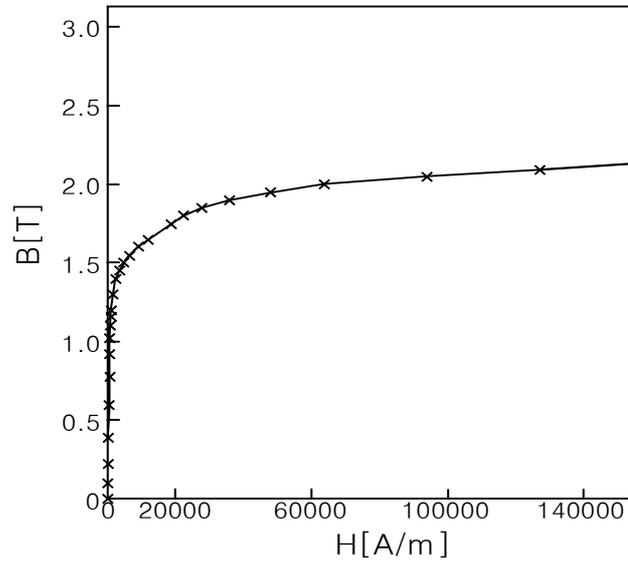


Fig. 3.11 The magnetic saturation curve in pipeline

Table 3.3 Magnetic flux densities inside the gas pipe in 3D non-linear analysis

[단위 : T]

투자율 \ 위치	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

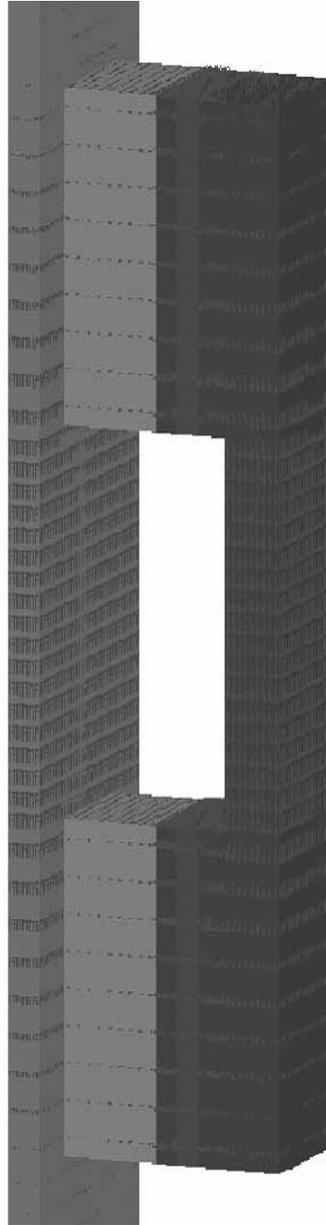


Fig. 3.12 3D analysis of MFL PIG

(3) 가스관 적정 포화 설계

Fig. 3.13은 가스관 결함에 대한 개요도이다. 여기서 Φ_a 는 가스관의 결함이 없는 부분 아래의 누설 자속이며, Φ_c 는 가스관의 결함이 있는 부분 아래의 누설 자속이다. Φ_b 와 Φ_d 는 각각 결함의 없을 때 와 있을 때의 가스관 내부의 자속이다.

Fig. 3.14는 검출지점의 자기포화곡선을 나타낸다. 결함이 있는 영역의 경우 자기장은 증가하게 된다. 만약 가스관이 포화되지 않으면 Φ_b 와 Φ_d 는 같게 된다. 그렇게 되면 가스관 내부의 자속 밀도는 B_{q1} 에서 B_{q2} 로 변하게 된다. 만약 가스관이 포화되면 가스관 내부의 자속 밀도는 B_{p1} 에서 B_{p2} 로 변하게 된다. $B_q - B_p$ 은 누설 자속과 비례한다. 그래서 Φ_d/Φ_a 에 비례하는 누설 계수를 λ 라 하면 식 (3.1)처럼 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{B_{q2} - B_{p2}}{B_{q1} - B_{p1}} \quad (3.1)$$

Fig. 3.15는 case I은 동작점이 낮게 설정되어 부족포화의 경우, case III은 동작점이 높게 설정되어 과포화의 경우, case II는 적절한 동작점으로 적절한 포화의 경우이다. case I인 Fig. 3.15(a)의 경우는 동작점이 낮게 설정되어 부족포화가 될 경우 가스관은 포화되지 않아서 결함이 있어도 누설 자속의 발생이 적다. 즉, 누설자속 Φ_c 의 크기와 비례하는 누설계수 λ 의 크기도 작다. case III은 Fig. 3.15 (c)의 경우처럼 동작점이 높게 설정되어 과포화가 될 경우 결함에 의한 누설자속 Φ_c 는 크나 결함이 없는 경우 누설자속 Φ_a 도 크다. 그래서 누설 자속의 변화 Φ_d/Φ_a 인 누설계수 λ 의 크기도 작다. case II의 경우는 Fig. 3.15(b)의 경우가 최적이다. 이 경우는 결함이 없는 경우는 가스관의 포화가 적게 되어 결함

이 없는 경우의 누설자속 Φ_a 는 작다. 결함이 있을 경우는 가스관의 면적이 작아져 결함에 의한 누설자속 Φ_c 는 커지게 된다. 즉, 누설 자속의 변화 Φ_d/Φ_a 인 누설계수 λ 의 크기도 크다. 그래서 영구자석과 요크를 이용한 자기회로 시스템의 최적설계는 측정 영역에서 누설계수 λ 값을 최대로 하는데 있다.

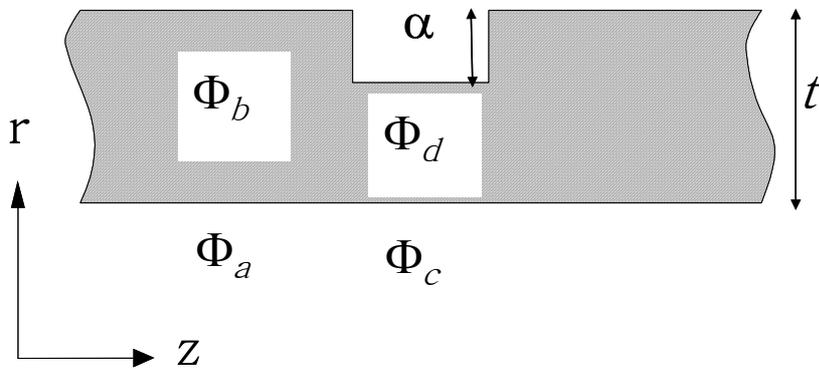


Fig. 3.13 Magnetic flux with defect in gas pipeline

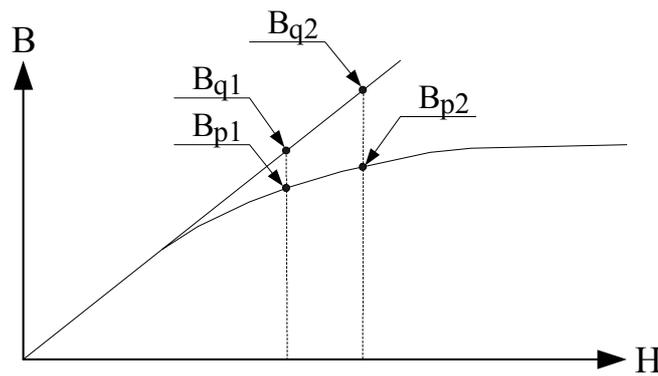
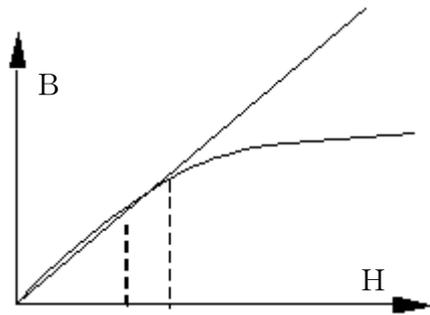
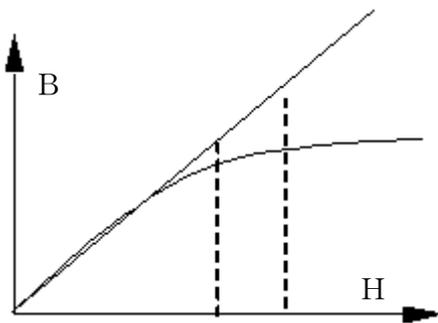


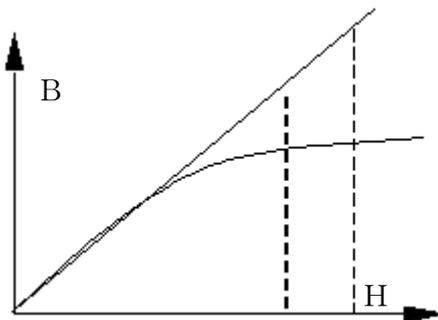
Fig. 3.14 The magnetic saturation curve



(a) Case I



(b) Case II



(b) Case III

Fig. 3.15 Three cases of the operating point and λ

Fig. 1.3은 비파괴 검사 시스템인 MFL PIG의 자기장의 분포를 나타낸다. 총 자속은 식 (3.2)와 같다.

$$\Phi = \Phi_a + \Phi_b = \Phi_c + \Phi_d = B_m \cdot l_m \cdot w \quad (3.2)$$

B_m : 영구자석의 자속밀도

l_m : 영구자석의 길이

w : 영구자석의 폭

최적의 영구자석의 크기는 누설계수 λ 가 최대가 되도록 설계하여야 된다. Fig. 3.15에서 누설계수 λ 를 구하면 식 (3.3)과 같다.

$$\lambda = \frac{\Phi_c}{\Phi_a} = \frac{\Phi - \Phi_d}{\Phi - \Phi_b} = \frac{B_m \cdot l_m - B_d \cdot (t - a)}{B_m \cdot l_m - B_b \cdot t} \quad (3.3)$$

최적의 영구자석의 길이는 식 (3.4)와 같다.

$$l_m = \frac{B_d \cdot (t - a) - B_b \cdot t \cdot \lambda}{B_m \cdot (1 - \lambda)} \quad (3.4)$$

B_b : 결함이 없는 가스관의 자속밀도

B_d : 결함이 있는 가스관의 자속밀도

제 4장 가스관 결함에 의한 검출신호 분석

본 절에서는 3장의 연구를 바탕으로 2장에서 유도한 3차원 자기 유한 요소법을 이용하여 실제 가스관의 결함에 의하여 센서부에 누설되는 MFL 신호를 해석하였다. 결함의 신호도 성분별로 3차원 결함신호이며 이에 대한 영향을 검토하고, 결함의 모양, 크기, 깊이 등에 따른 신호의 형태를 분석하고 신호로부터 결함을 합성한다.

4.1 결함에 의한 검출신호 분석을 위한 기초연구

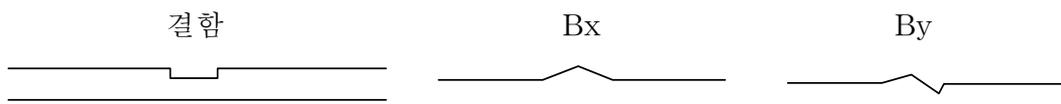
결함의 길이, 깊이, 폭에 대한 누설자기장의 검출신호 형태를 해석하였다. 결함의 깊이에 따른 신호의 모양은 Fig. 4.1과 같으며, 결함의 길이에 따른 신호의 모양은 Fig. 4.2와 같다. Fig. 4.1과 같은 결함 길이에 대해 결함의 깊이가 증가할 경우 신호의 크기가 증가함을 볼 수 있으며, Fig. 4.2와 같은 결함 깊이에 대해 결함의 길이가 증가할 경우 신호의 크기와 파형이 왜곡됨을 알 수 있다. 대체로 결함의 깊이 증가에 따라 신호의 크기가 증가하고, 결함의 길이에 따라 신호의 극치의 폭이 증가하나 비례한다고는 말할 수 없으며, 누설 자기장에 영향을 미치는 요소를 고려한 해석이 필요함을 알 수 있다.

Fig 4.1은 결함 깊이에 따른 결함과 신호들을 나타내었다. 결함의 깊이가 10[%], 50[%], 90[%]일 때 검출신호들을 나타낸 것이다. 결함의 깊이가 증가 할수록 검출신호가 증가한다는 것을 알 수 있으며, 정량적인 값은 4.7절에 나타내었다. Fig. 4.2는 결함의 길이 방향 모양에 따른 신호를 해석한 것이다. Fig. 4.2는 결함의 깊이는 일정하고 결함의 길이를 1t, 2t,

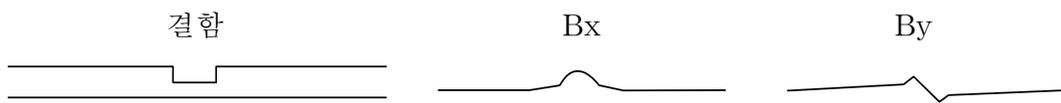
3t로 증가시킬때 검출신호를 나타내었다. 결함 길이가 증가하면 최대값은 증가하지 않고 결함신호의 폭은 증가한다. 정량적인 값은 4.6절에 나타내었다.

Fig. 4.3과 같은 결함을 유한요소해석을 하면 Fig. 4.4와 Fig. 4.6과 같은 신호를 얻을 수 있다. 해석한 신호의 배열을 입체적으로 표현하면 Fig. 4.5와 Fig. 4.7처럼 결함의 모양을 매우 잘 재현함을 알 수 있다. Fig. 4.4에서 Fig. 4.7의 결과를 보면 가스관의 법선 방향의 신호(Bx)보다 가스관의 접선 방향의 신호(By)에 의한 신호가 결함의 모양을 보다 잘 재현하고 있다. Fig. 4.3은 결함의 두가지 형태의 마름모꼴에 대하여 나타내고 있다. Fig. 4.3(a)는 움푹 들어간 형태의 마름모꼴의 형태이며 Fig. 4.3(b)는 흠이 패인 마름모꼴의 형태의 결함들을 나타낸다.

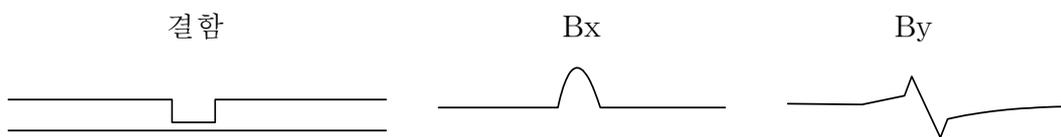
Fig. 4.3(a)형태에 대하여 신호를 해석하면 Fig. 4.4와 같은 해석 파형을 얻을 수 있고 이것을 가시화 시키면 Fig. 4.5와 같은 가시화할 수 있다. Fig. 4.5(a)는 법선 방향의 신호(Bx)를 가시화한 것이며, Fig. 4.5(b)는 접선방향의 신호(By)를 가시화한 것이다. Fig. 4.3(b)형태에 대하여 신호를 해석하면 Fig. 4.6과 같은 해석 파형을 얻을 수 있고 이것을 가시화 하면 Fig. 4.7과 같이 가시화할 수 있다. Fig. 4.7(a)는 법선 방향의 신호(Bx)를 가시화한 것이며, Fig. 4.7(b)는 접선방향의 신호(By)를 가시화한 것이다. 신호를 가시화 하면 결함의 형태가 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) Defect depth 10%

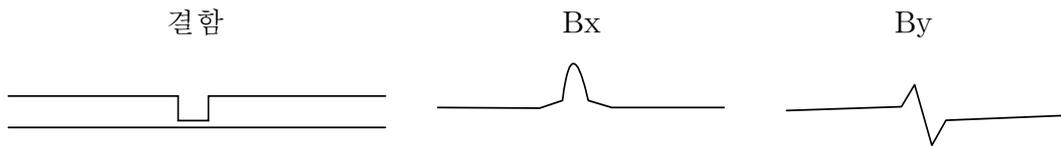


(b) Defect depth 50%

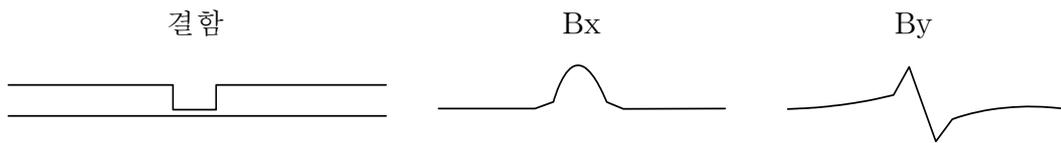


(c) Defect depth 90%

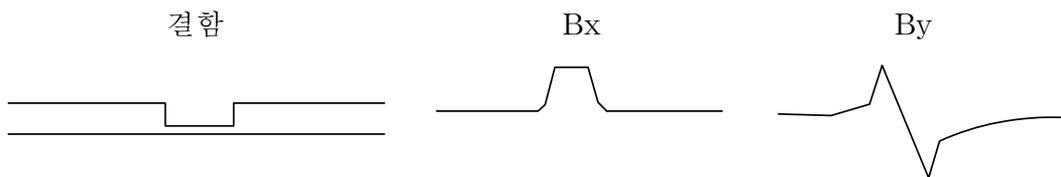
Fig. 4.1 Analysis signals according to depth of defect



(a) Defect length $1t$



(b) Defect length $2t$



(c) Defect length $3t$

Fig. 4.2 Analysis signals according to length of defect

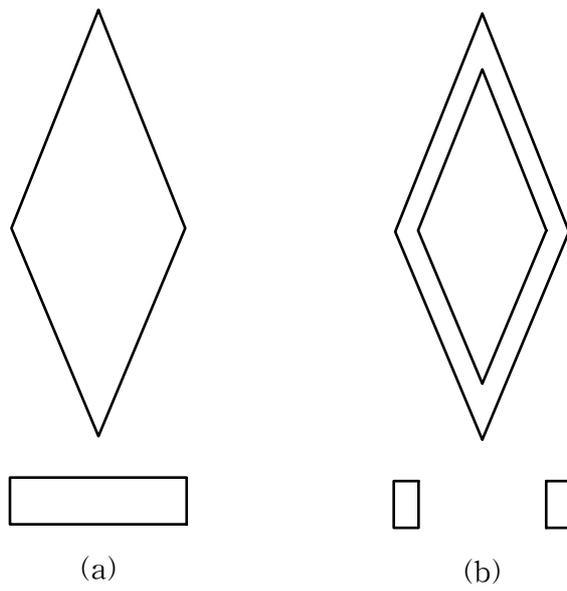
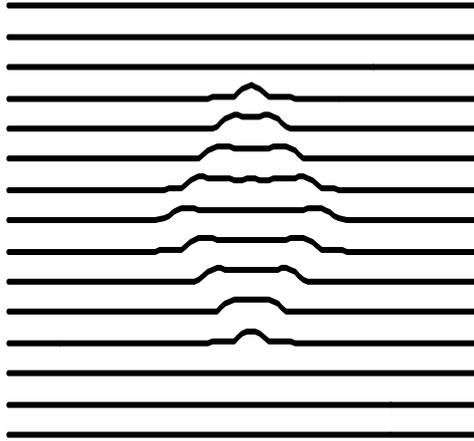


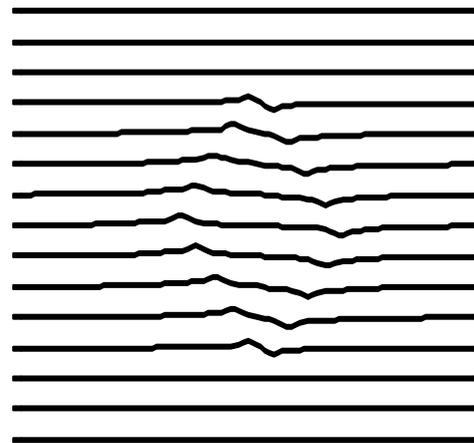
Fig. 4.3 Rhombic defect of two type

(a) Hollowed rhombic defect

(b) Grooved rhombic defect

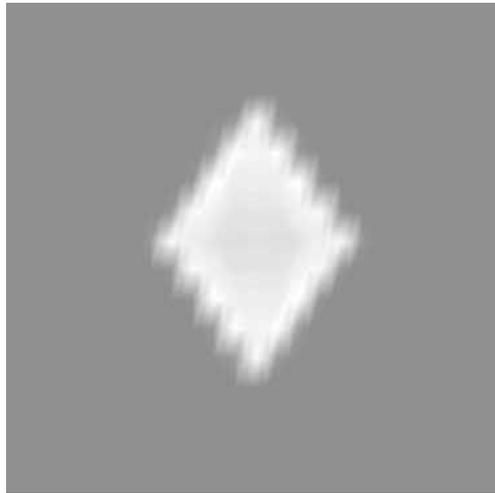


(a) Bx

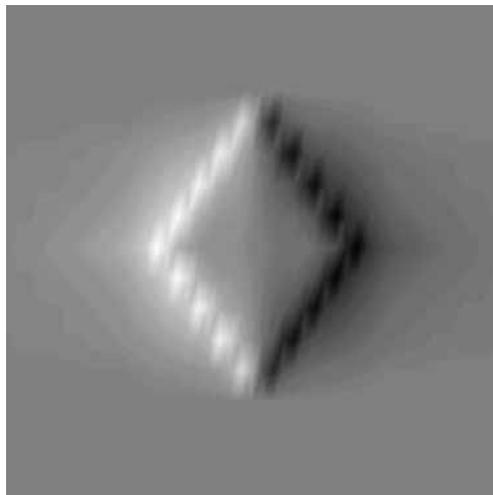


(b) By

Fig. 4.4 Detected MFL signals and constructed images of an artificial hollowed rhombic defect.(The size and depth of the defect is $3t \times 3t$ and $0.9t$ where the thickness t of pipe is $17.5[\text{mm}]$)

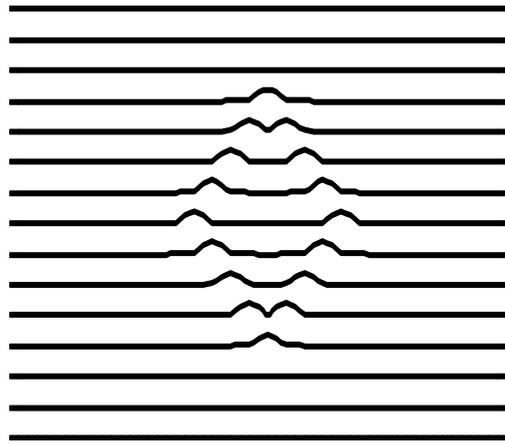


(a) B_x

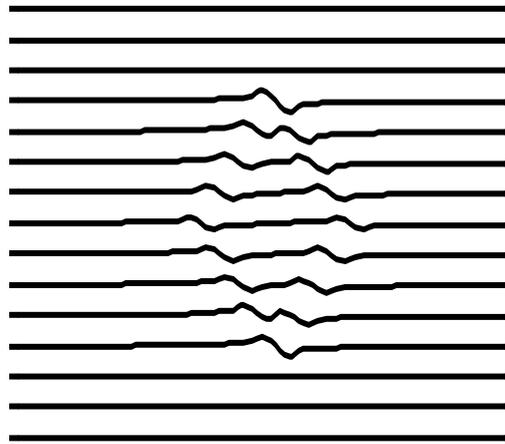


(b) B_y

Fig. 4.5 Constructed images of the signals from hollowed rhombic defect.(The size and depth of the defect is $3t \times 3t$ and $0.9t$)

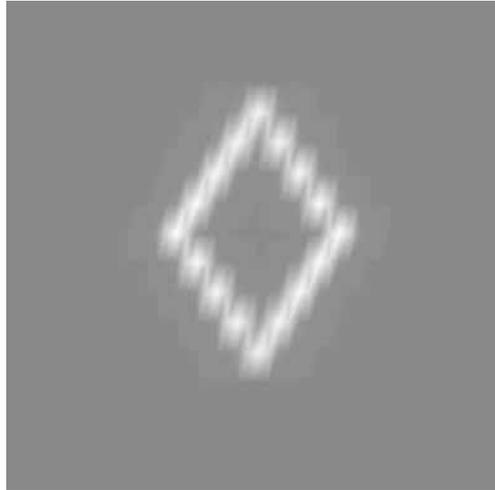


(a) Bx

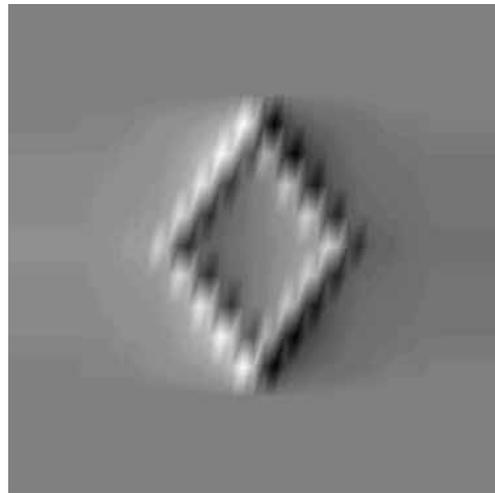


(b) By

Fig. 4.6 Detected MFL signals and Constructed images of an artificial grooved rhombic defect.(The size of the groove width is $0.5t$)



(a) Bx



(b) By

Fig 4.7 Constructed images of the signals from grooved rhombic defect.(The size of the groove width is $0.5t$)

4.2 MFL PIG의 도면

Fig. 4.8은 MFL PIG의 도면이다. 여기서 사용된 영구자석의 크기는 가로 180[mm], 세로 82[mm], 높이 32[mm]이며 재질은 Nd자석이다. MFL PIG의 도면을 가지고 여러 가지 경우에 대하여 설계된 MFL PIG의 유효성을 검토하기 위하여 3차원 비선형 유한요소법을 도입한다.

4.3 결함에 의한 3차원 신호

Fig. 4.9는 MFL PIG를 결함이 있을 경우 3차원 해석한 것이다. 여기에 사용된 영구자석은 잔류자속이 1.1[T]의 큰 값을 가지는 Nd자석이다. 그러나 실제로는 감자계로 인하여 0.7[T]의 자기장을 발생한다. 이것이 가스관을 통과하게 되면 가스관의 단면적이 영구자석 및 브러쉬의 단면적보다 상대적으로 작으므로 1.7[T] 정도의 큰 값으로 포화되게 된다. Fig. 4.9처럼 결함이 있을 경우 자기장이 결함이 있는 부분으로 집중되는 것을 알 수 있다. 이 경우 결함이 있는 부분의 가스관은 자기 포화되어 누설자속이 발생하게 된다. 이것을 검출하여 가스관 결함 여부를 판정한다.

4.4 센서의 성분별 검출신호

MFL PIG의 센스 모듈내에는 3개의 홀센서가 들어있다. 각각의 센서의 방향은 3가지 방향으로 결함을 검출한다. 따라서 본 연구에서는 3가지 방향에 대하여 각각의 신호성분을 해석하였다. 이것을 가시화를 하여

결함을 나타내고자 하였다. Fig. 4.10, Fig. 4.11, Fig. 4.12는 3가지 방향의 신호를 3차원 그래프로 나타내었고, 가시화 하였다. Fig. 4.10, Fig. 4.11, Fig. 4.12의 (a)의 진행방향과 (b)의 가로축은 Z축을 나타내며 (a)의 원주방향과 (b)의 세로축은 원주방향, 즉 θ 방향을 나타낸다. 실제 결함의 크기는 52.5×52.5 [mm²]이며 결함이 가스관의 두께의 90%이며 이것을 가시화한 것과 실제 결함이 잘 일치함을 알 수 있다.

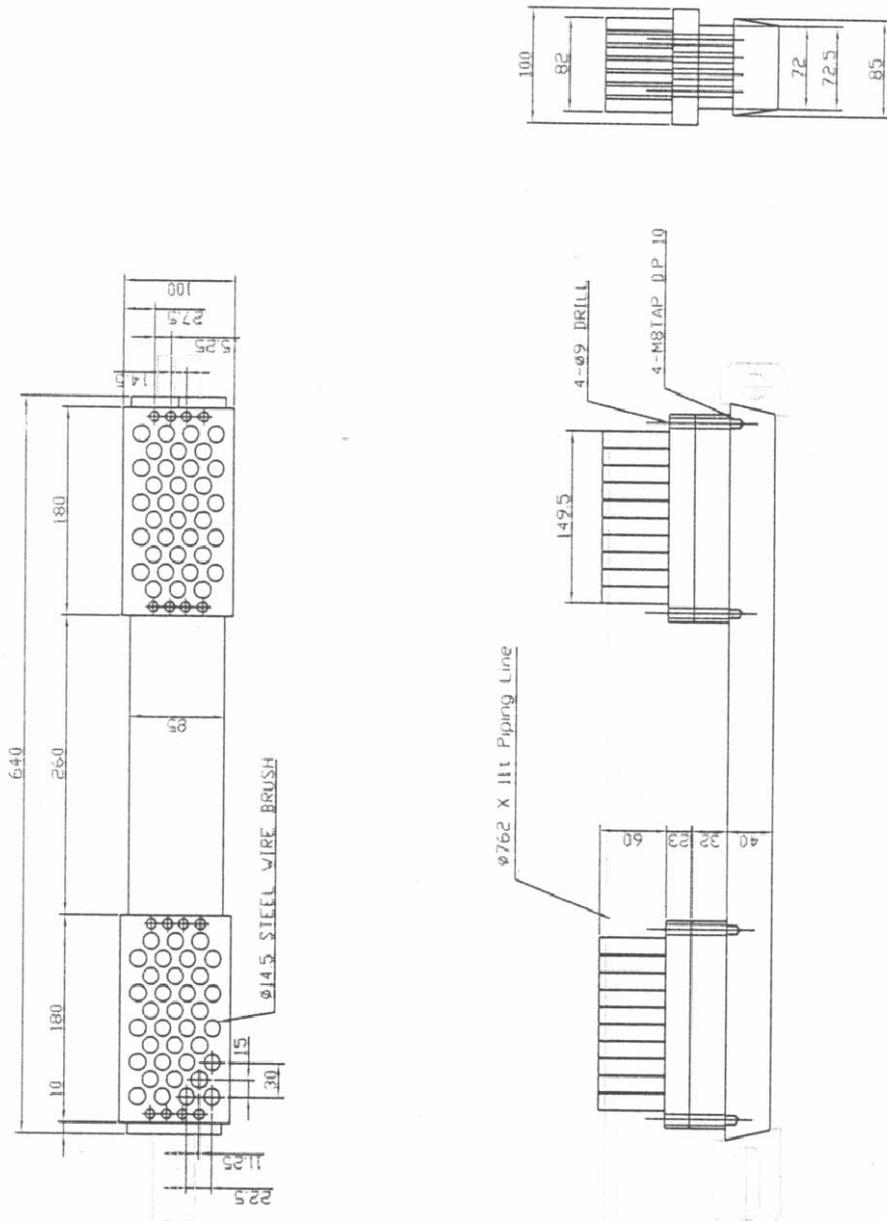


Fig 4.8 A drawing of MFL PIG[6]

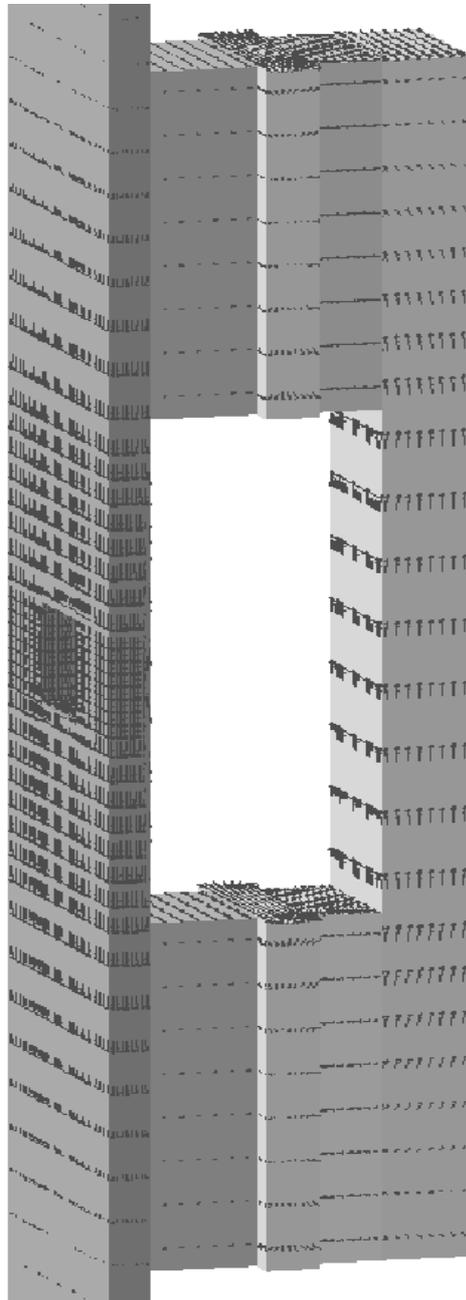
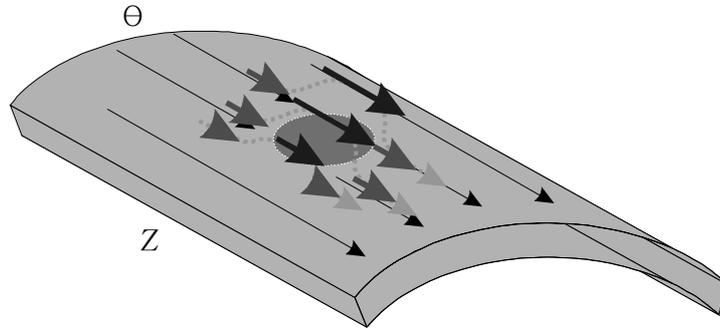
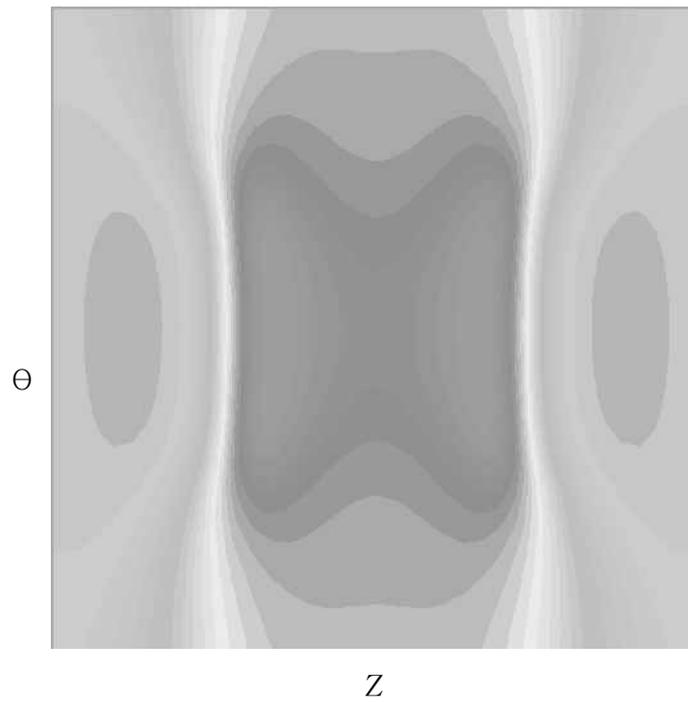


Fig. 4.9 Analysis of MFL FIG with defect by 3D



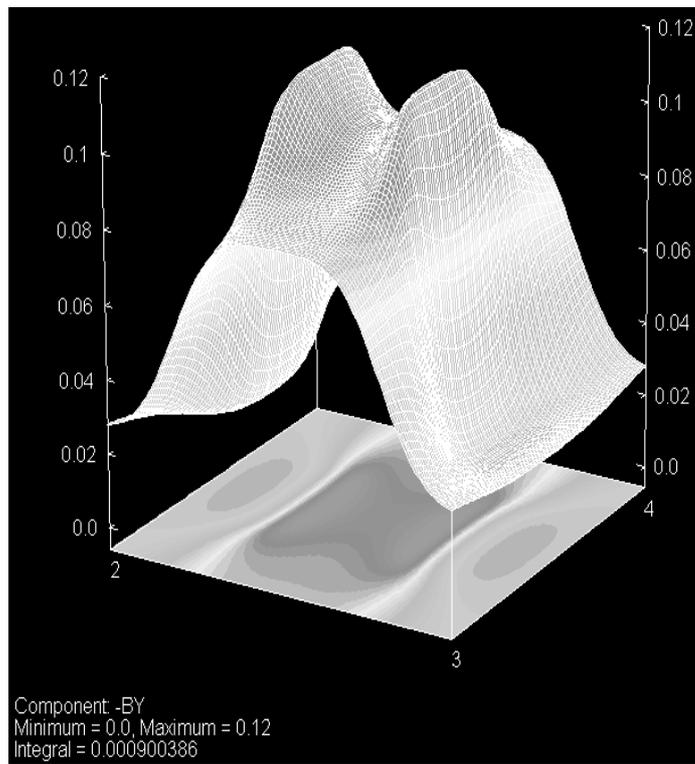
(a) Axial components of MFL PIG



(b) MFL image of axial component

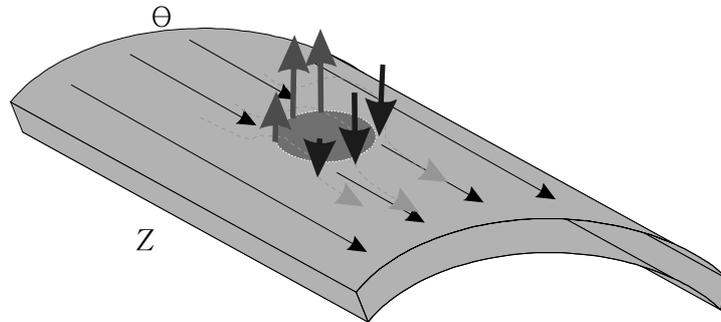
Fig. 4.10 Analysis MFL signals by axial component

(Min: 195[G], Max:1100[G])

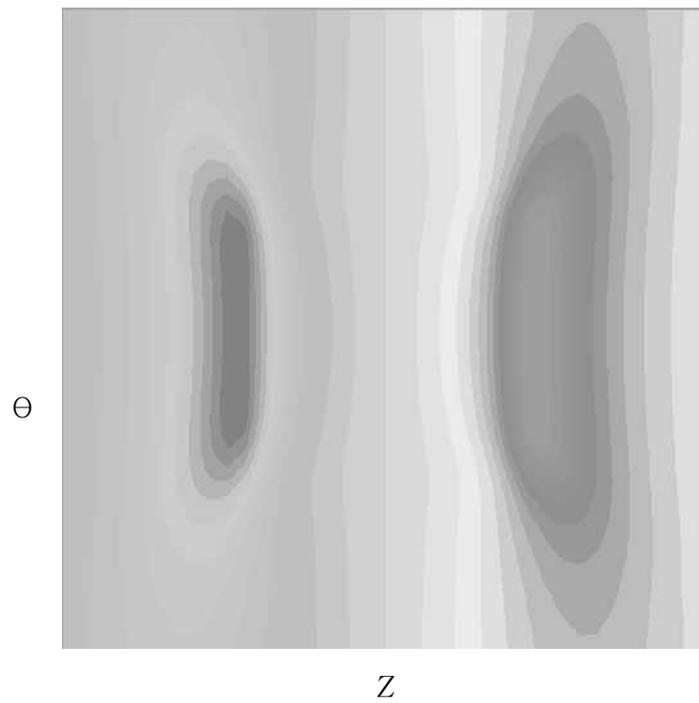


(c) MFL Signals of axial component

Fig. 4.10 continued



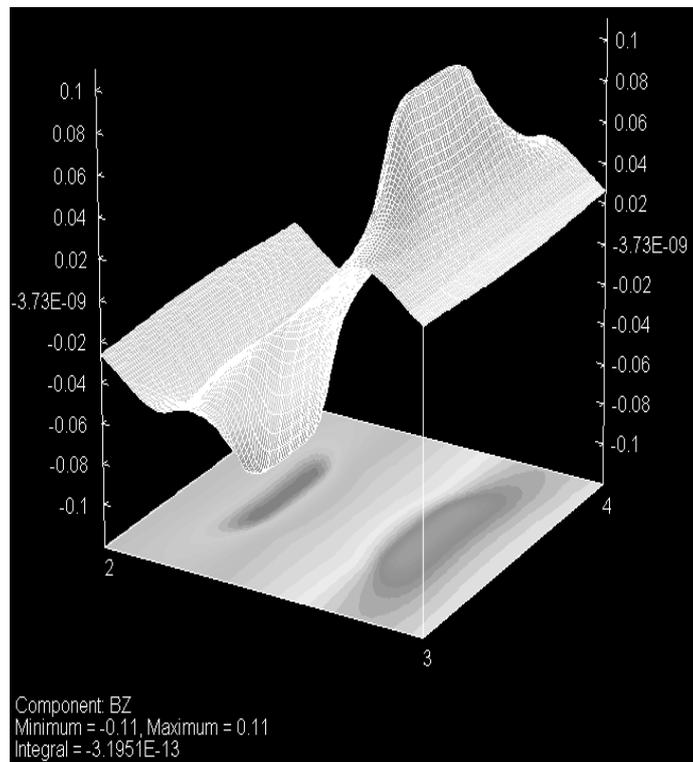
(a) Radial components of MFL PIG



(b) MFL image of radial component

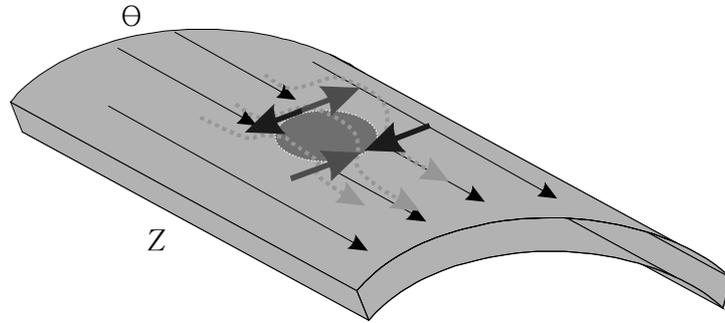
Fig. 4.11 Analysis MFL signals by radial component

(Min: -1000[G], Max: 1000[G])

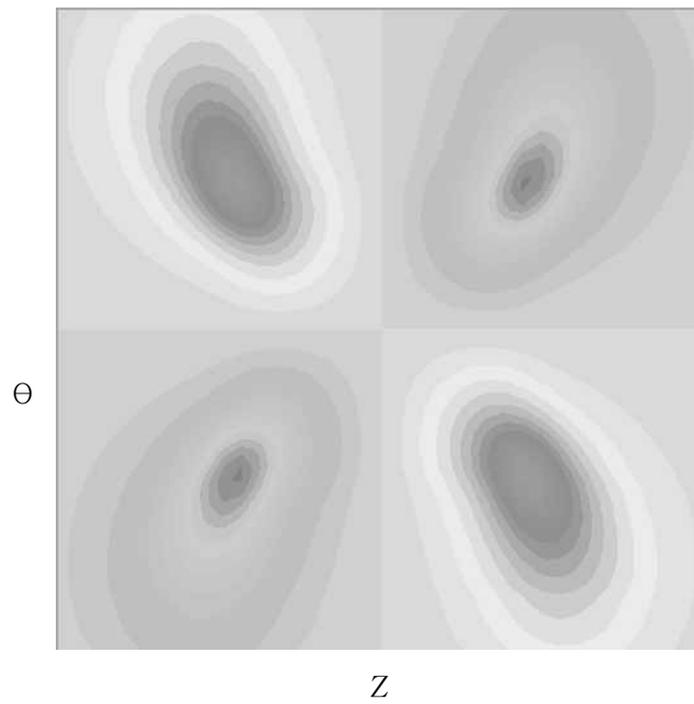


(c) MFL Signals of radial component

Fig. 4.11 continued



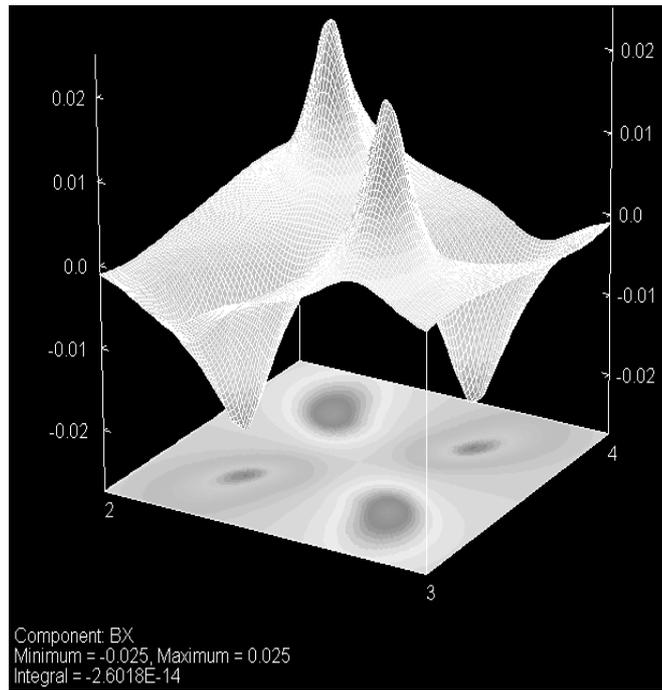
(a) Circumferential components of MFL PI Γ



(b) MFL image of circumferential component

Fig. 4.12 Analysis MFL signals by circumferential component

(Min: -216[G], Max: 216[G])

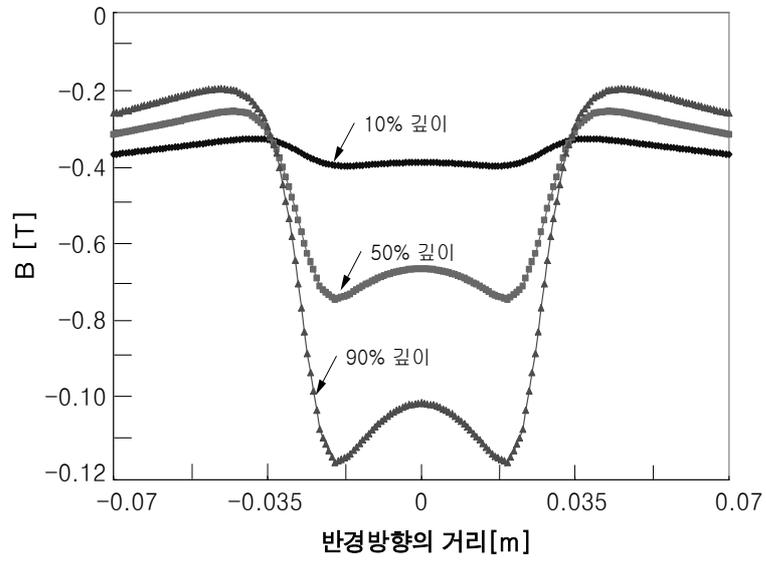


(c) MFL signals of circumferential component

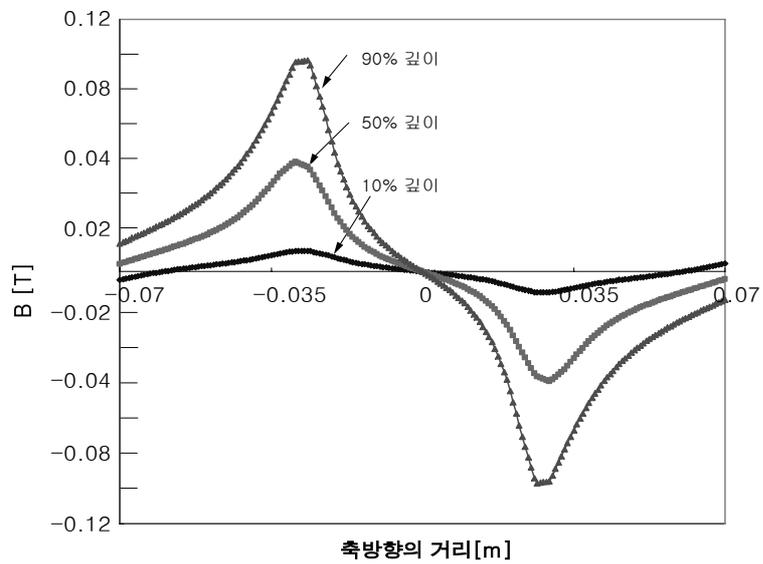
Fig. 4.12 continued

4.5 결함 깊이에 의한 신호

Fig. 4.13은 MFL PIG의 결함의 깊이에 따른 해석 결과이다. 기준 결함 $3t \times 3t(52.5[\text{mm}] \times 52.5[\text{mm}])$ 일 때 진행방향의 신호는 결함의 깊이가 10[%]일 때 394[G], 50[%]일 때 734[G], 90[%]일 때 1100[G]의 값을 얻었으며, 축방향의 신호는 결함의 깊이가 10[%]일 때 -99~99[G], 50[%]일 때 -519~519[G], 90[%]일 때 -1000~1000[G]의 값을 얻었으며, 원주방향의 신호는 결함의 깊이가 10[%]일 때 -12~12[G], 50[%]일 때 -79~79[G], 90[%]일 때 -216~216[G]의 값을 얻었다. 이것은 홀센서의 측정범위와 측정감도를 선택하는데 중요한 요소가 된다. 본 해석의 결과로써 홀센서의 범위는 1000[G], 홀센서의 측정감도는 10[%]결함을 검출하고자 할 때 방향에 따라 12~100[G]의 측정감도가 요구된다. 여기에 적합한 홀센서는 Allegro사의 3507L 선형 홀센서이다. 이 홀센서를 6장의 실험에 사용하였다. 결함의 깊이가 깊을수록 해석결과도 큰 것을 알 수 있다. 이러한 해석결과를 바탕으로 각각의 경우에 대하여 홀센서의 측정값만으로도 결함의 깊이를 산출할 수 있으며, 이를 가시화함으로써 결함의 모양을 합성할 수 있다. 결함의 길이는 축방향의 최대점의 길이 또는 반경방향의 최대값과 최소값의 거리를 계산하면 얻을 수 있다. 가스관의 폭은 축방향과 반경방향의 신호를 보거나, 또는 원주방향의 신호로부터 산출한다. 결함의 깊이는 검출신호의 최대값으로부터 산출한다. 6.5절 결함의 길이, 폭, 깊이의 판정에서 설명을 추가하였다.



(a) Radial component



(b) Axial component

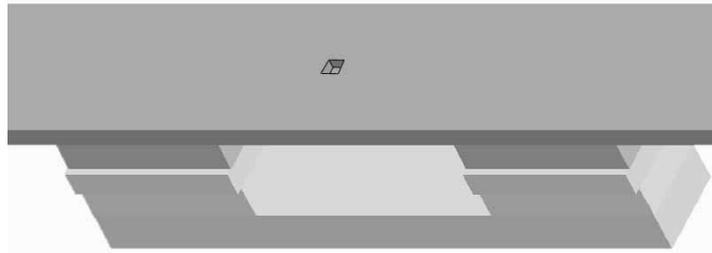
Fig. 4.13 MFL PIG signals according to defect depth

4.6 결함 크기에 의한 신호

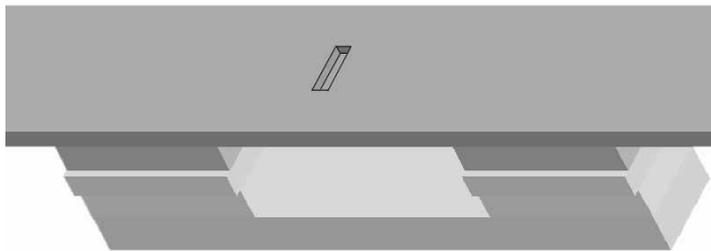
Fig. 4.14와 Fig. 4.15는 결함의 크기에 따른 해석결과이다. 결함이 크기가 커지면 MFL 신호의 크기와 형태도 변함을 알 수 있다. 결함의 깊이가 증가하면 최대값은 증가하지 않고, 검출신호의 길이가 증가하는 것을 알 수 있다. 결함의 폭이 증가하면 검출신호의 크기도 증가함을 알 수 있다.

4.7 결함의 가시화

결함의 깊이에 따라서 계산된 신호를 다시 가시화한 것이 Fig. 4.16, Fig. 4.17, Fig. 4.18이다. 해석결과 결함이 크면 클수록 검출되는 자기장이 크므로 가시화한 것 또한 결함 존재 여부를 알 수 있다. 결함 깊이가 큰 것은 홀센서의 범위를 결정하는 요소이다. 홀센서의 범위는 결함이 100[%]일 때보다도 더 큰 값을 가져야 한다. 검출하고자 하는 결함의 최소 깊이는 홀센서의 분해능을 결정하는 요소이다. 홀센서의 분해능은 검출하고자 하는 최소깊이의 신호변화를 감지 할 수 있어야 한다. 홀센서의 분해능은 검출하고자 하는 최소깊이의 신호변화보다도 작아야 검출이 가능하다.

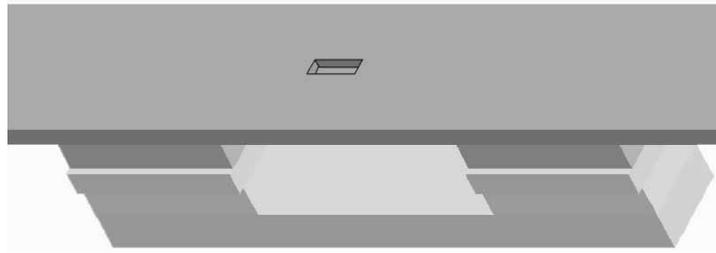


(a) defect size $1t \times 1t$

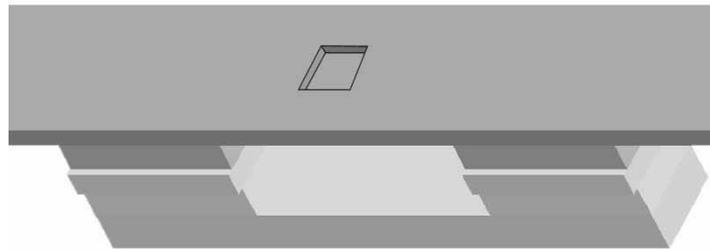


(b) defect size $1t \times 3t$

Fig. 4.14 Type of defect size

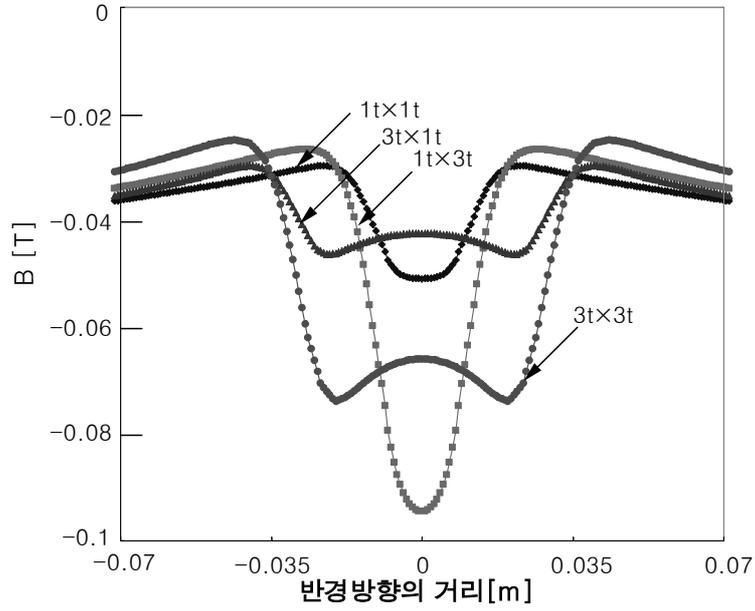


(c) defect size $3t \times 1t$

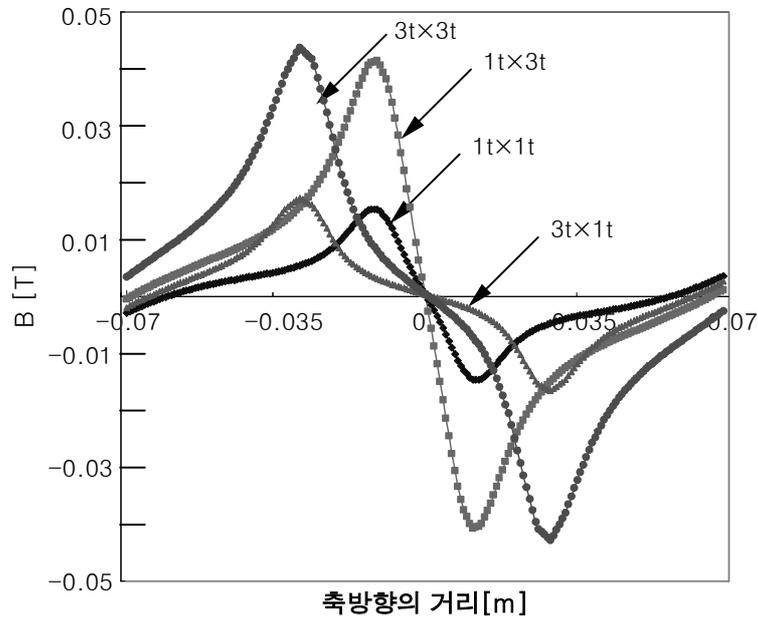


(d) defect size $3t \times 3t$

Fig. 4.14 continued

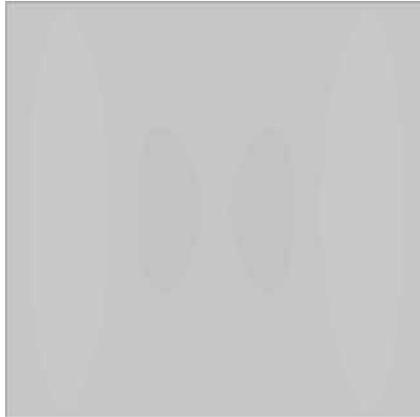


(a) B_x (Radial component)

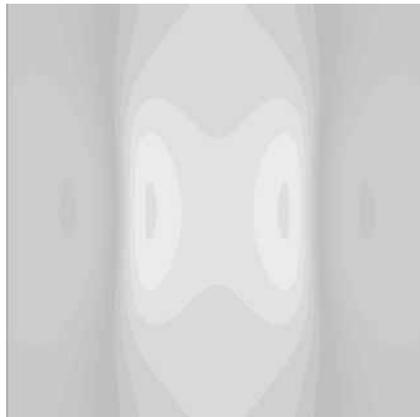


(b) B_y (Axial component)

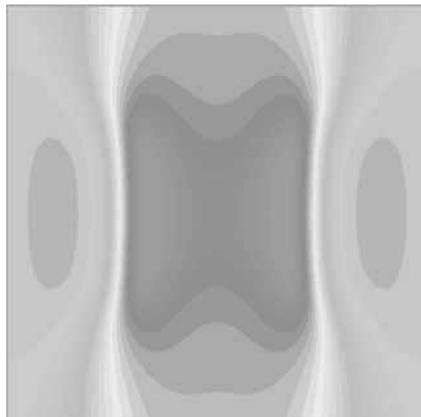
Fig. 4.15 MFL PIG signals according to the defect



(a) Defect depth 10[%]
(Min: 324[G], Max: 394[G])

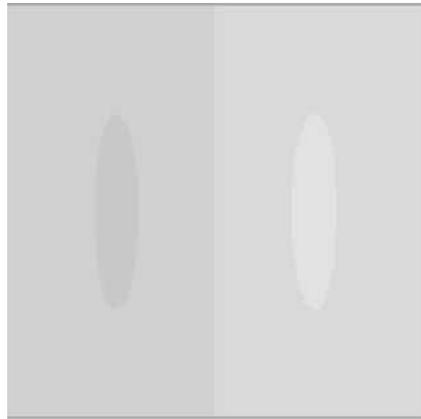


(b) Defect depth 50[%]
(Min: 254[G], Max: 734[G])

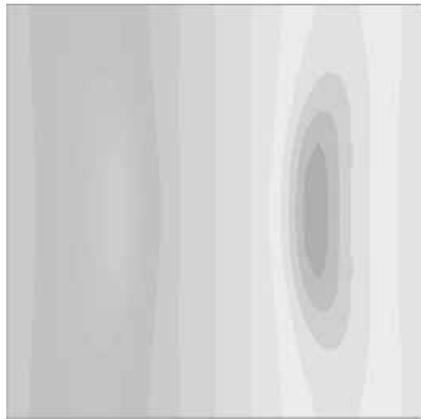


(a) Defect depth 90[%]
(Min: 195[G], Max: 1100[G])

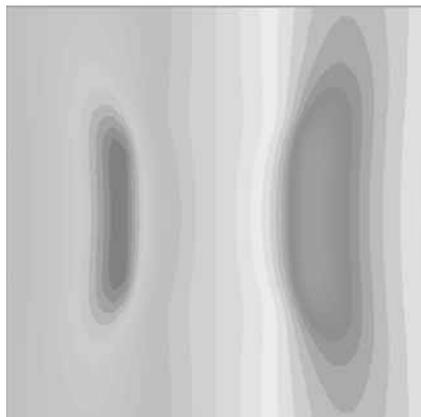
Fig. 4.16 Image of defect depth by axial component



(a) Defect depth 10[%]
(Min: -99[G], Max: 99[G])

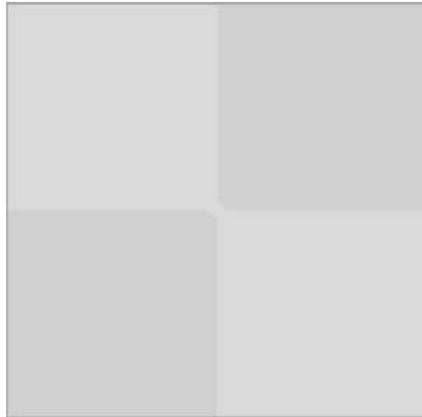


(b) Defect depth 50[%]
(Min: -519[G], Max: 519[G])

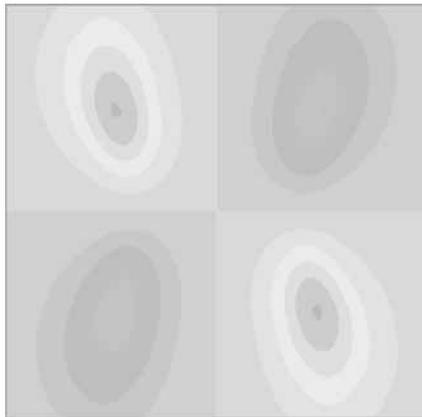


(c) Defect depth 90[%]
(Min: -1000[G], Max: 1000[G])

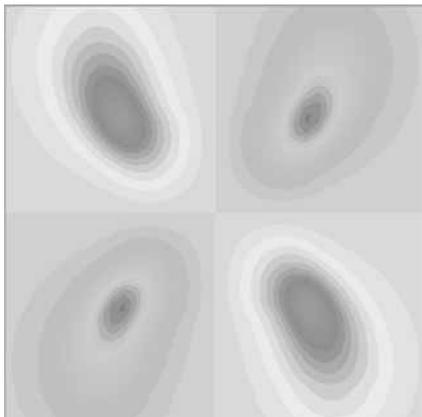
Fig. 4.17 Image of defect depth by radial component



(a) Defect depth 10[%]
(Min: -12[G], Max: 12[G])



(b) Defect depth 50[%]
(Min: -79[G], Max: 79[G])



(c) Defect depth 90[%]
(Min: -216[G], Max: 216[G])

Fig. 4.18 Image of defect depth by circumferential component

4.8 MFL PIG의 분석

본 절에서는 Fig. 4.8과 같이 주어진 도면을 MFL PIG 시스템이 결함을 감지하기 위하여 필요한 요건을 정리하였다. 이를 위해서는 다음 세 가지가 검토되어야 한다. 첫째 가스관은 적절히 포화되었는가, 둘째 홀센서의 범위는 적당한가, 셋째 홀센서의 분해능은 적당한가를 검토하였다.

첫째, 가스관의 포화여부는 도면 Fig. 4.8과 같이 설계된 MFL PIG 시스템에서 3차원 비선형 유한요소 해석 결과 자기장이 브러쉬 투자율을 고려한 결과를 3.5절의 Table 3.3과 같은 결과를 얻었다. 가스관의 결함이 없는 경우 가스관의 자속밀도는 1.51 ~ 1.87[T]으로 계산되었으며 이 값은 가스관을 적절히 포화시키고 있다.

둘째, 홀센서의 범위는 해석결과 축 방향과 반경 방향의 홀센서는 -1500 ~ 1500[G]정도를 검출할 수 있는 홀센서를 사용해야 하며, 원주 방향을 검출하는 홀센서는 -500 ~ 500[G]정도의 범위면 모든 범위의 결함을 검출 가능하다.

셋째, 홀센서의 분해능이 결함에 따른 신호변화를 감지할 수 있는가이다. 10%의 결함을 검출하고자 할 때 축 방향은 신호변화가 70[G], 반경 방향은 신호변화가 100[G], 원주 방향은 신호변화가 10[G]이다. 따라서 축 방향과 반경 방향은 홀센서의 분해능이 50[G]정도이면 10[%]정도의 결함을 검출할 수 있다. 그러나 원주 방향의 홀센서의 분해능은 50[G]일 때는 10[%]의 결함이 있을 경우 홀센서의 분해능이 신호변화보다 5배정도 크므로 검출할 수 없다. 원주 방향의 10[%] 결함을 검출하고자 한다면 홀센서의 분해능은 최대 10[G]이하가 되어야 한다.

제 5장 PIG 주행속도 및 가스관 착자에 의한 왜곡신호 보정법

MFL PIG는 빠른 속도로 가스관을 주행하면서 MFL 신호를 측정하여 기록하게 된다. 이때 기록된 신호는 PIG의 주행에 따라 왜곡되어 있다. PIG의 주행에 따라 MFL 신호를 왜곡시키는 요인으로서는 여러 가지가 있으나 그 중 가장 큰 요인은 첫째, 가스관에 인가되는 강한 자기장으로 인하여 가스관이 착자되어 발생하게 되는 왜곡과, 둘째는 빠른 속도로 이동시 가스관에서 불가피하게 발생하는 속도 기전력에 의한 와전류로 인한 왜곡과, 셋째 가스관의 stress에 의한 왜곡과, 넷째 PIG의 주행에 따른 noise로 인한 왜곡 등이 있다.

따라서 검출된 신호를 왜곡에 대하여 보정하여 실제 신호를 검출하여야 한다. 본 절에서는 가스관의 착자에 의한 영향을 분석하고, 속도 기전력에 의한 와전류가 발생시키는 자기장에 의한 신호의 영향을 분석함으로써 신호 보정의 기본 자료를 축적하고자 한다.

5.1 PIG의 주행 속도에 의한 유한요소 해석

PIG가 주행함에 따라 가스관이 착자되며, 속도 기전력에 의하여 와전류가 발생하게 된다. 따라서 착자와 속도 기전력을 포함하는 유한요소법은 아래와 같이 유도된다.

변위전류와 유도전류를 무시할 수 있는 정자계에서 성립하는 Maxwell 방정식과 그 보조방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (5.1)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}') \quad (5.2)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (5.3)$$

여기서 μ_0 는 진공에서의 투자율(permeability), \vec{A} 는 자기 벡터 포텐셜이다. 비선형 현상이 없는 문제에서 자화량은 자화율 χ 로서

$$\vec{M}' = \chi \vec{H} \quad (5.4)$$

와 같이 표현되지만 해석 영역내에 비선형 특성을 갖는 매질이 포함되어 있는 경우에는 자화량은 자계의 세기나 자속밀도에 관한 단순한 식으로 표현되지 않으므로 미지수로 남겨두어야 한다. 일반적으로 자화량 M' 은 외부의 자계가 제거되면 사라지는 가역항(reversible component : χH)과 외부의 자계가 제거되어도 사라지지 않고 자발자화 특성을 갖는 비가역항(irreversible component : M)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{M}' = \chi \vec{H} + \vec{M} \quad (5.5)$$

식 (5.5)을 식 (5.2)에 대입하면

$$\vec{H} = v\vec{B} - v_r\vec{M} \quad (5.6)$$

와 같은 식을 얻는다. 여기서 $v = 1/\mu$, $\mu = \mu_0\mu_r$, $v_r = 1/\mu_r$, $\mu_r = 1 + \chi$ 이다. 이것을 식 (5.1)에 대입 하면 식 (5.6)의 관계로부터

$$\nabla \times (v \nabla \times \vec{A}) = \vec{J} + v_r \nabla \times \vec{M} \quad (5.7)$$

회전에 의한 벡터 관계식과 coulomb 게이지로부터 식 (5.8)과 같은 지배 방정식을 얻는다.

$$-(\nabla \cdot v \nabla) \vec{A} = \vec{J} + v_r \nabla \times \vec{M} \quad (5.8)$$

속도에 의해 발생하는 와전류의 전류밀도 J_v 로 나타내면

$$\vec{J}_v = \sigma v \times \vec{B} \quad (5.9)$$

로 나타낼 수 있고, 매질을 고려하면 \vec{B} 와 \vec{H} 는

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5.10)$$

로 나타낼 수 있고, 식 (5.10)을 식 (5.3)에 대입하여 \vec{H} 에 대하여 풀면

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (5.11)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (5.11)을 식 (5.1)에 대입하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (5.12)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (5.12)를 영구자석에 의한 보자력 \vec{H}_c 를 적용하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \vec{H}_c \right) = \vec{J} \quad (5.13)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (5.13)에 속도에 의한 와전류 \vec{J}_v 를 적용하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \vec{H}_c \right) = \vec{J} - \sigma \vec{v} \times \nabla \times \vec{A} \quad (5.14)$$

로 나타낼 수 있다.

5.2 속도기전력 및 자화량이 고려된 유한요소 정식화

해석영역을 고정 경계조건과 자연경계조건으로 나누고 고정 경계에서 고정경계조건을 만족시키며 한번 미분 가능한 가중함수 W 를 식 (5.8)에 곱한후 전체 영역에서 적분하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\int_{\Omega} W\{(\nabla \cdot v \nabla) \vec{A} + \vec{J} + v_r \nabla \times \vec{M}\} d\Omega = 0 \quad (5.15)$$

Green 정리와 경계조건으로부터

$$\int_{\Omega} \{-v \nabla W \nabla \cdot \vec{A} + W \vec{J} - v_r \nabla W \times \vec{M}\} d\Omega = 0 \quad (5.16)$$

를 얻는다.

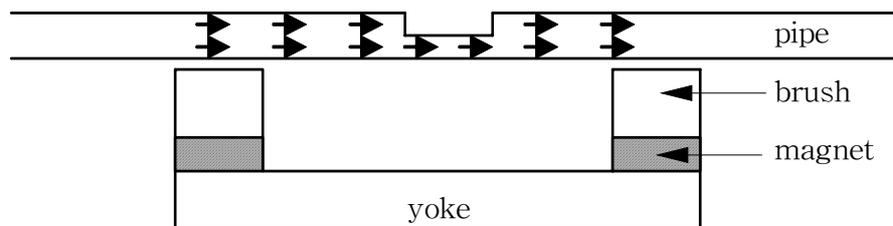
$$[K_v][A] = [f] + [f_m] \quad (5.17)$$

해석영역을 유한개의 요소로 나누고 이를 식 (5.17)처럼 행렬식으로 나타낼 수 있다. 이 행렬식에서 해를 구함으로써 요소내의 자기 벡터 포텐셜을 구할수 있다. MFL을 이용한 비파괴검사시스템은 자기포화 곡선을 이용하는 비선형 문제이므로 오차가 일정값 이하로 될 때까지 식 (5.14)를 유한요소법으로 계속 반복 계산하여야 한다.

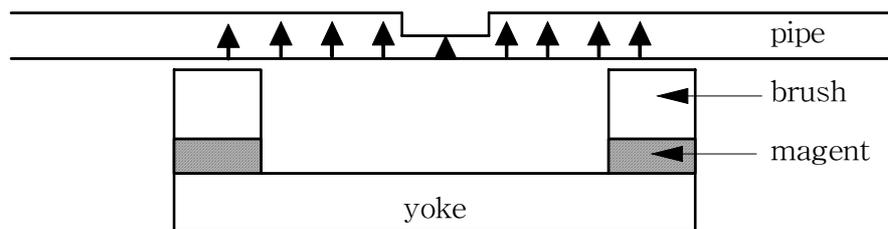
5.3 가스관 착자에 의한 신호 보정

가스관의 착자는 횡방향 착자와 종방향 착자로 나눌수 있으며, Fig. 5.1(a)는 횡방향 착자의 개요도이며, Fig. 5.1(b)는 종방향 착자의 개요도이다. Fig. 5.2(a)에서 횡방향 착자에 의한 자력선이며 Fig. 5.2(b)는 종방향 착자에 의한 자력선이다. Fig. 5.2의 화살표는 착자방향을 나타낸다.

Fig. 5.3는 횡방향 착자에 의한 영향이다. 횡방향 착자에 의한 왜곡은 축 방향과 반경 방향 모두 신호를 증가시키는 왜곡이 발생한다. 이 이유는 횡방향으로의 착자는 인가되는 자기장의 방향과 같으므로 검출신호를 증가시키게 됩니다. Fig. 5.4는 종방향 착자에 의한 영향이다. 종방향 착자에 의한 왜곡은 축 방향과 반경 방향 모두 신호를 왜곡시키는 형태로 나타난다. 이것은 인가되는 자기장의 방향과 수직이 되므로 검출신호를 왜곡시키게 된다.

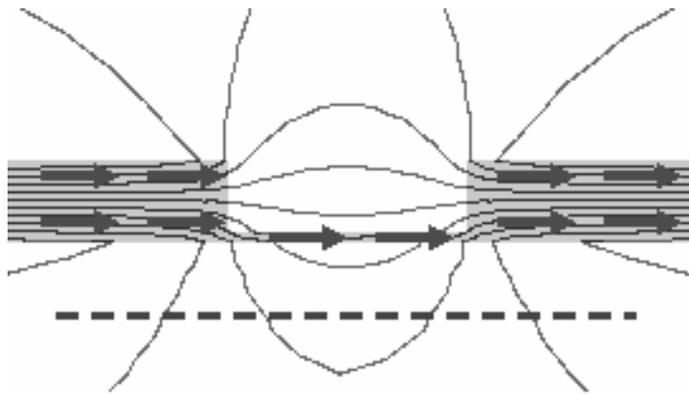


(a) Diagram of the axial component magnetization

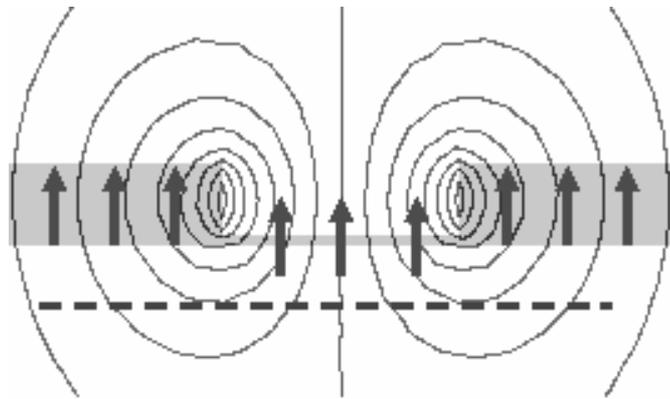


(b) Diagram of the radial component magnetization

Fig. 5.1 Diagram of the magnetization

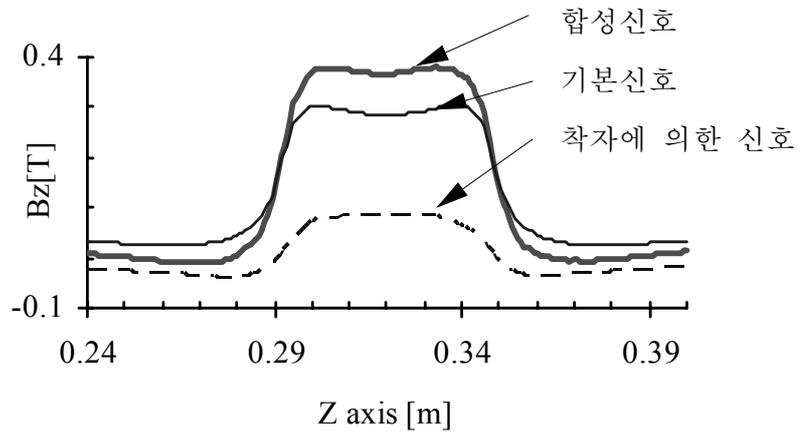


(a) Flux line of the axial component magnetization

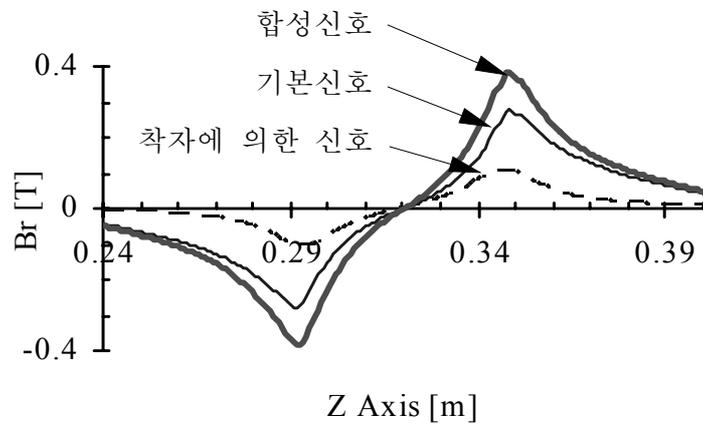


(b) Flux line of the radial component magnetization

Fig. 5.2 Flux line of the magnetization

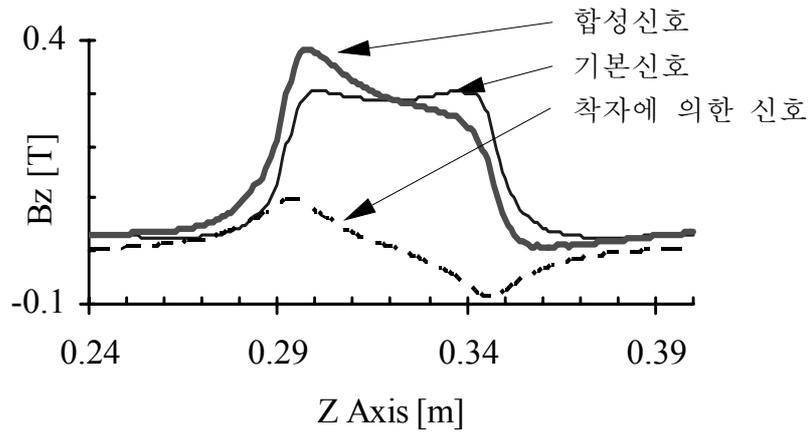


(a) Axial component MFL signals

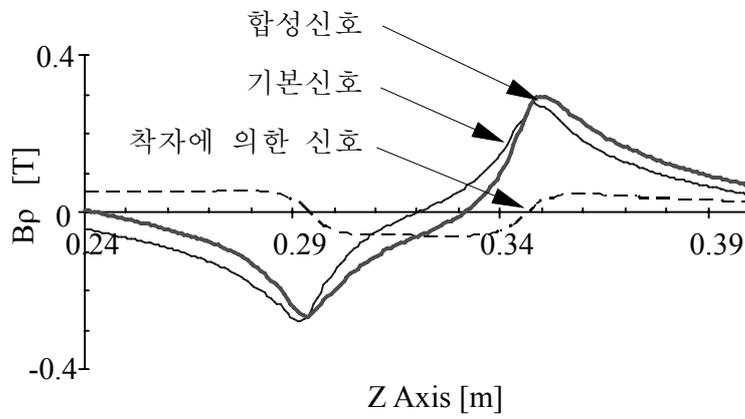


(b) Radial component MFL signals

Fig. 5.3 Effects of the axial component remanent magnetization



(a) Axial component MFL signals



(b) Radial component MFL signals

Fig. 5.4. Effects of the radial component remanent magnetization

5.4 PIG 주행속도에 의한 신호 보정

본 절에서는 PIG의 주행으로 인하여 속도 기전력이 발생하게 된다. 이로 인해 가스관 내부 표면에 와전류가 발생하게 되고, 이 와전류로 인하여 자기장이 왜곡된다. 실제 결함에 의한 신호를 검출하기 위해서는 검출신호에서 와전류에 의한 왜곡을 제거하여야 한다.

PIG 주행시 가스관 내부 표면의 와전류, 자력선의 변화, 가스관 표면의 자속밀도의 변화, 검출신호와 실제 결함에 의한 신호를 분석하여 주행속도에 따라 검출신호 보상에 관하여 연구하였다. PIG의 주행속도는 4[m/s]가 기준이며 실제 이동 속도는 0 ~ 10[m/s]이다.

주행 속도에 따라서 와전류 크기가 변화하게 된다. 주행속도에 인하여 가스관의 속도 기전력에 의한 와전류가 발생하고 와전류에 의한 자기장이 측정 신호파형을 왜곡시킨다.

PIG가 정지해 있다면 자기장의 변화가 없으므로 속도 기전력이 발생하지 않는다. PIG가 주행하면 Fig. 5.6처럼 PIG의 브러쉬가 지나가는 가스관 내부의 표면은 와전류가 나타나게 된다.

이 와전류는 속도가 증가할수록 증가함을 알 수 있으며 이것은 검출신호를 왜곡시키게 된다. 또한 와전류의 크기는 주행속도에 비례한다.

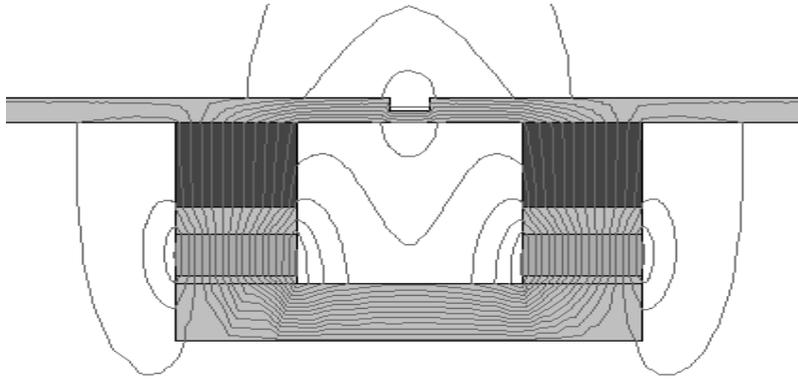
Fig. 5.5(a)는 정지시 MFL PIG의 자력선이며, Fig. 5.5(b)는 MFL PIG가 4[m/s]로 이동시 자력선이다. Fig. 5.5(b)와 같이 PIG가 오른쪽으로 진행할 양쪽 브러쉬의 오른쪽은 자기장이 감소하려는 방향으로 와전류가 발생하고, 왼쪽은 증가하려는 방향으로 와전류가 발생한다. 그러나 양쪽 브러쉬의 자기장의 방향이 반대이므로 Fig. 5.6처럼 와전류의 회전 방향은 반대가 된다. Fig. 5.7은 주행속도에 변화에 따른 가스관 내부 표면의

반경 방향의 자속밀도이며, Fig. 5.8은 주행속도 변화에 따른 가스관 내부 표면의 축 방향의 자속밀도이다.

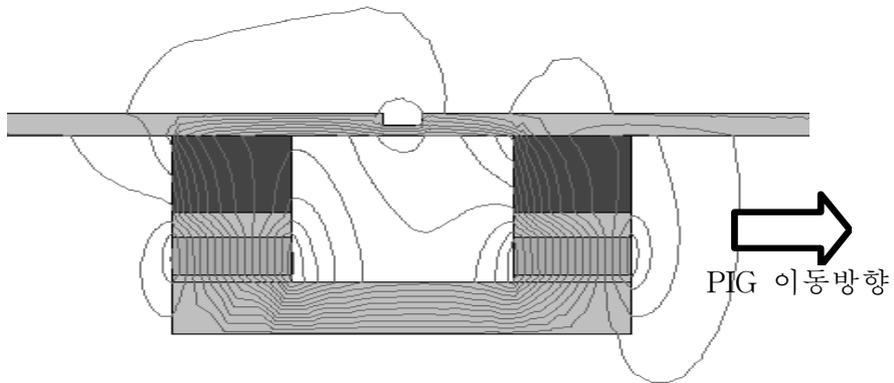
FIG 주행속도가 증가할수록 자기장의 왜곡도 영향도 증가함을 알 수 있으며 오른쪽으로 진행할 경우 브러쉬 오른쪽은 점점 자기장이 감소하고 반대로 브러쉬의 왼쪽은 자기장이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5.9(a)는 속도가 증가할 경우 저속 운행시(1-2m/s)로 이동시는 최대값은 변하지 않고 파형의 왜곡이 발생하나 속도가 증가함에 따라 최대값도 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5.9(b)는 주행속도에 의한 축 방향 신호를 나타내었다. 속도가 증가할 경우 파형이 왜곡됨을 알 수 있다. Fig. 5.9(a)를 Fig. 5.10처럼 축 방향의 자기장의 최대값과 기울기로 나타내었다. 실제 검출된 신호를 주행 속도에 의한 왜곡을 보상하여야만 결함에 의한 신호를 검출할 수 있다.

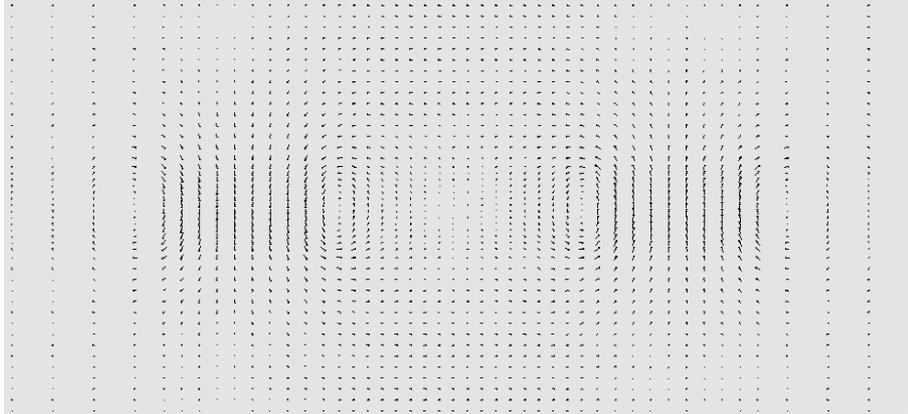


(a) The result of $v=0$ [m/s]

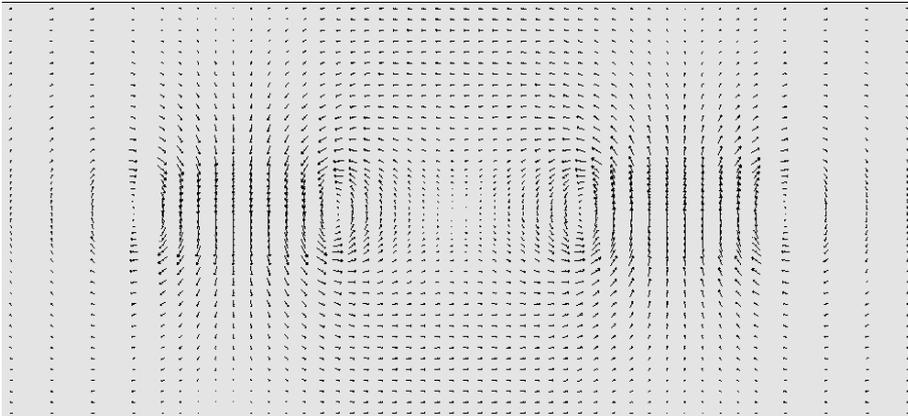


(b) The result of $v=4$ [m/s]

Fig. 5.5 Distortion of the flux line because of the PIG speed

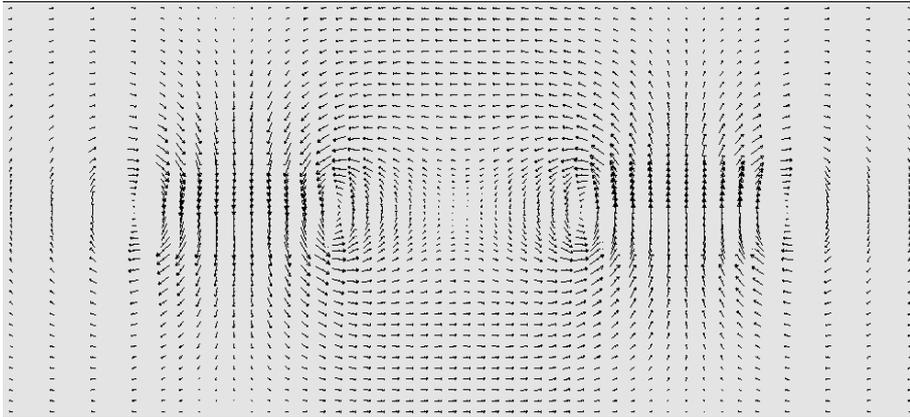


(a) The result of $v= 2\text{m/s}$

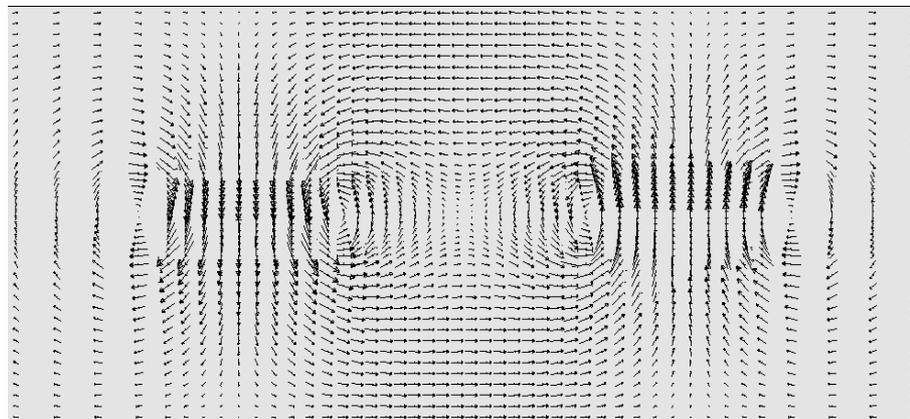


(b) The result of $v= 4\text{m/s}$

Fig. 5.6 Eddy current on the pipe surface

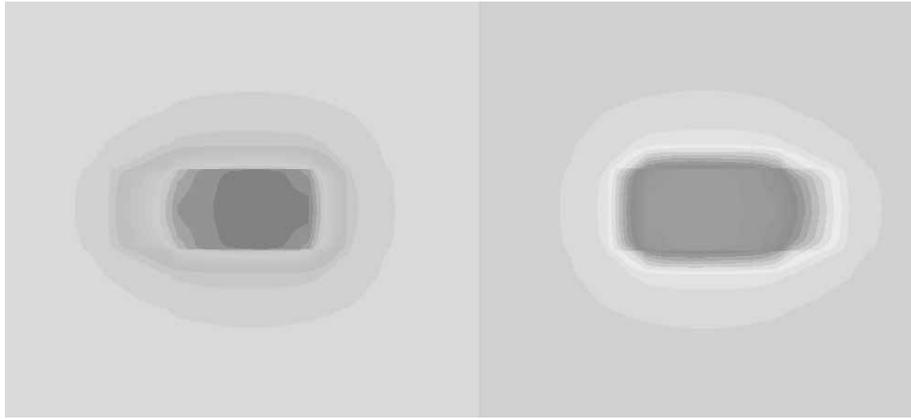


(c) The result of $v=6$ [m/s]

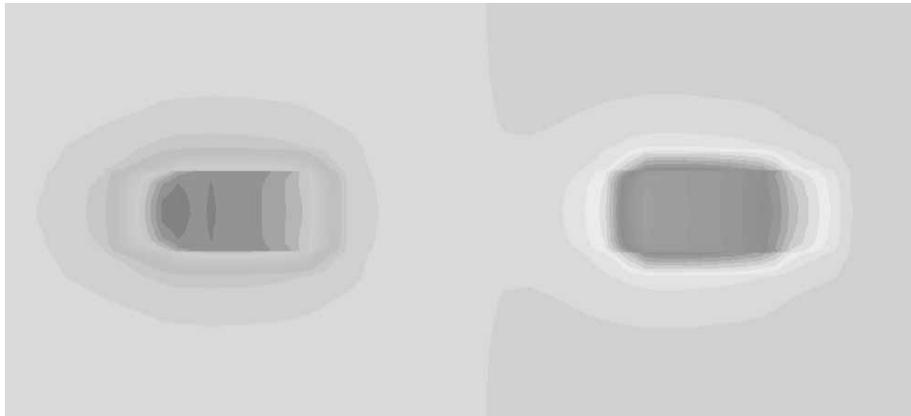


(d) The result of $v=10$ [m/s]

Fig. 5.6 continued

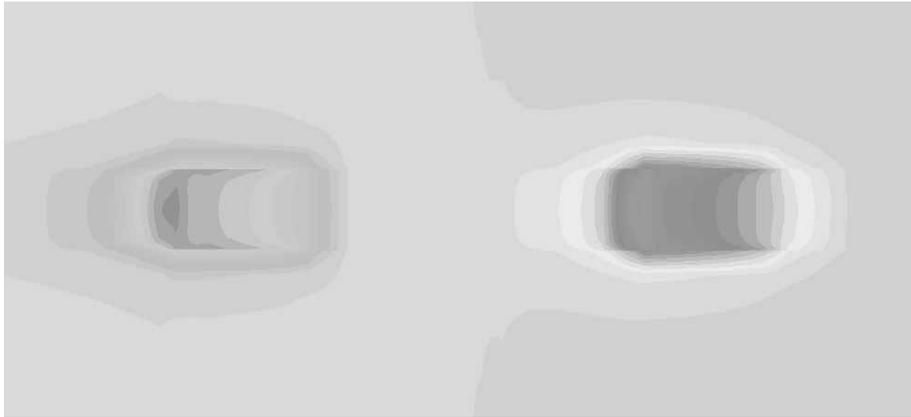


(a) The result of $v=0$ [m/s]

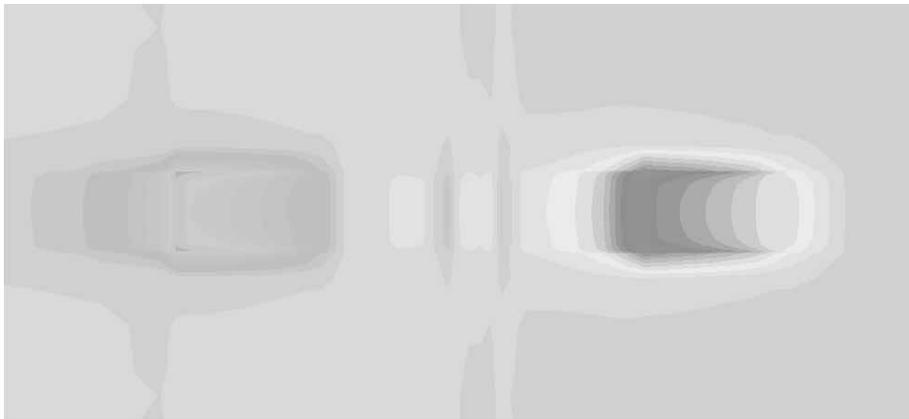


(b) The result of $v=1$ [m/s]

Fig. 5.7 Changes of the radial component magnetic fields according to the PIG speed

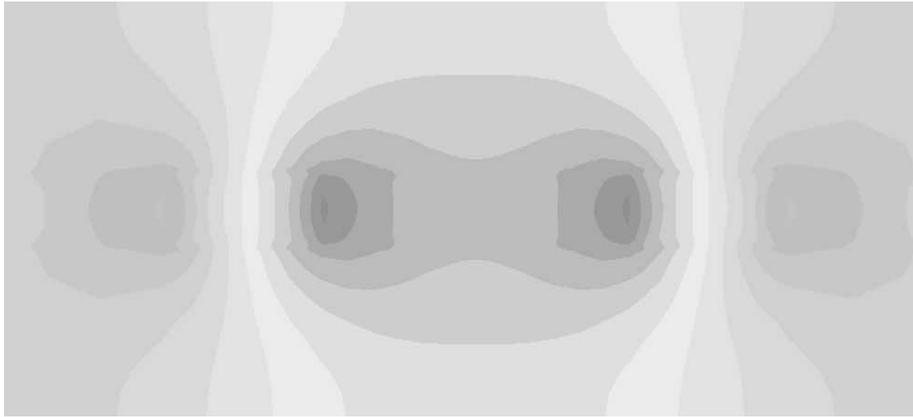


(c) The result of $v=2$ [m/s]



(d) The result of $v=4$ [m/s]

Fig. 5.7 continued

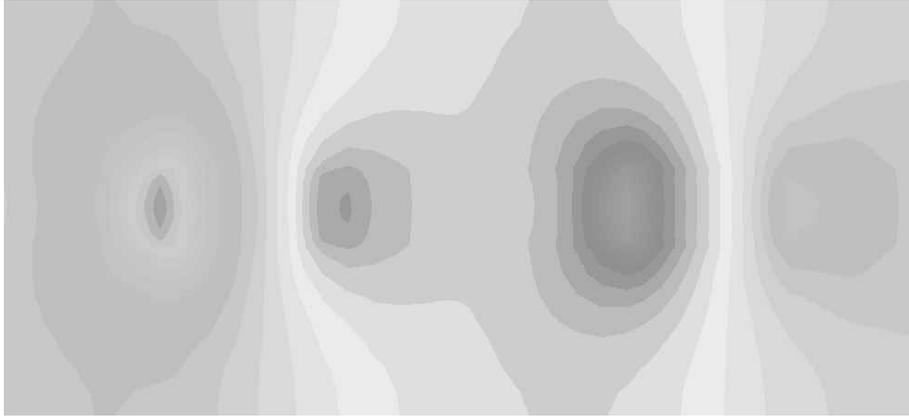


(a) The result of $v=0$ [m/s]

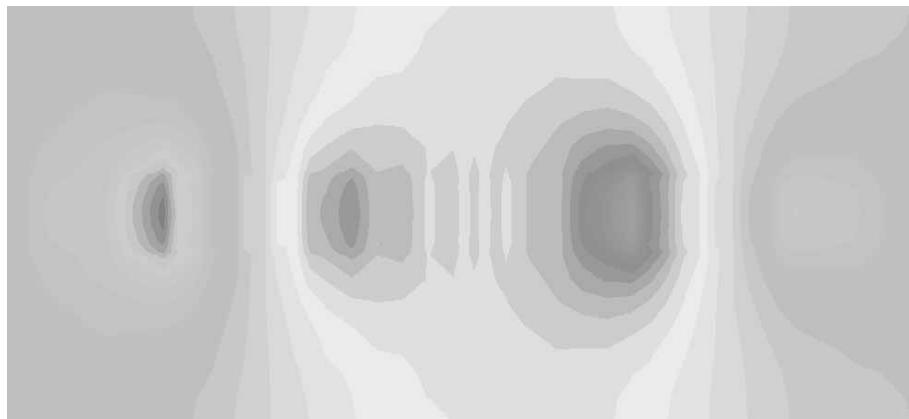


(b) The result of $v=1$ [m/s]

Fig. 5.8 Changes of the axial component magnetic fields according to the PIG speed

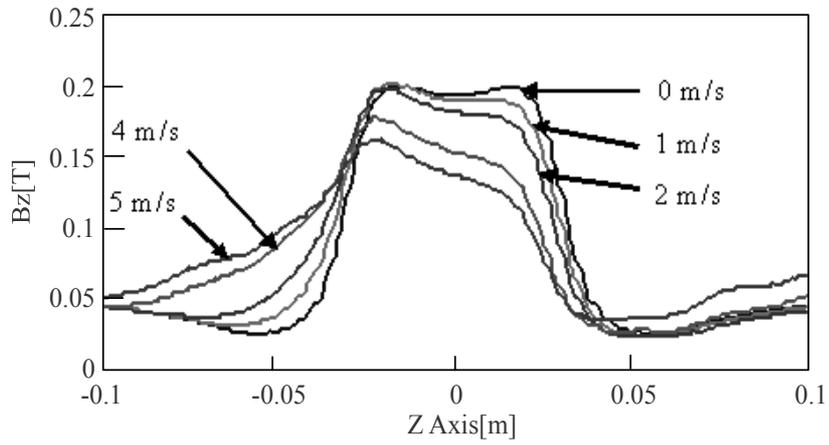


(c) The result of $v=2$ [m/s]

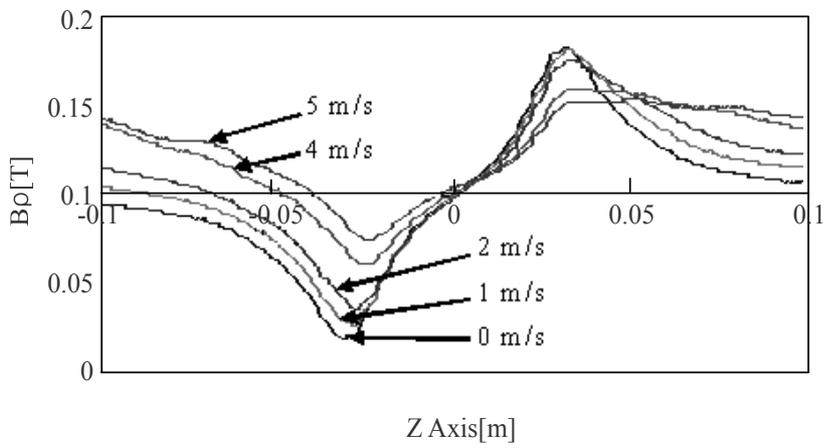


(d) The result of $v=4$ [m/s]

Fig. 5.8 continued



(a) Axial component of the MFL



(a) Radial component of the MFL

Fig. 5.9 Effect of the PIG speed

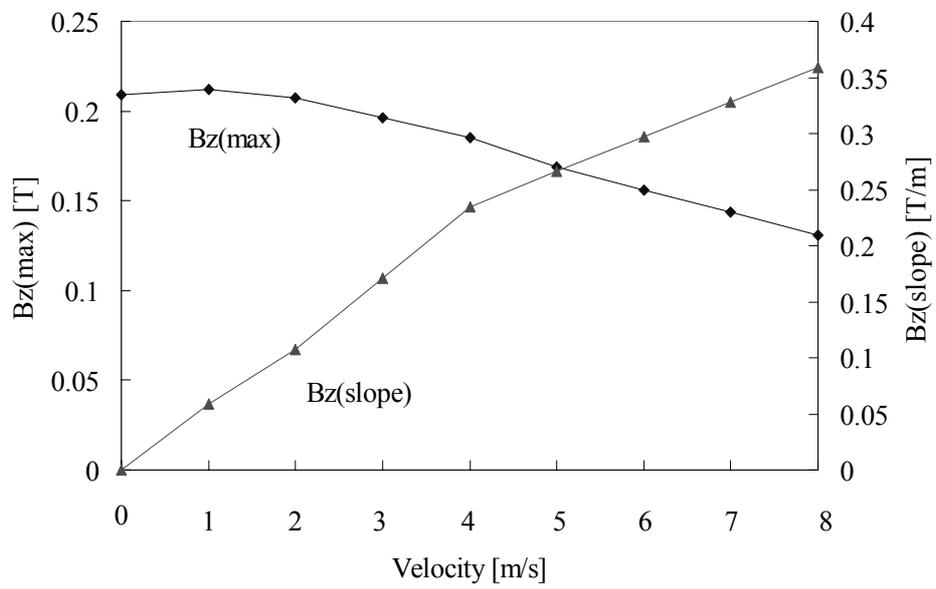


Fig. 5.10 Maximum field and slop according to the PIG speed

5.5 MFL PIG의 이동에 따른 검출신호 영향과 분석

지하 매설 가스관의 PIG 이동에 따른 검출신호의 왜곡에 대하여 분석하였다. 비선형 3차원 유한요소법을 사용하여, 가스관의 결함이 있을 경우 결함의 크기, 깊이에 따른 결함 신호를 예측 가능하다. 그러나 실제 가스관을 통과한 신호는 가스관의 착자에 의한 영향과 속도에 의한 와전류에 의하여 왜곡이 발생하게 된다. 횡방향 착자에 의한 영향은 신호를 증가 시키는 방향으로 작용하고, 종방향 착자의 경우는 신호를 왜곡시킨다. 실제 신호를 착자에 의한 왜곡을 보상하여 결함에 의한 신호를 검출할 수 있으며, 결함에 따른 크기와 깊이를 산출할 수 있다. 센서 이동 속도 4[m/s]가 기준이며 실제 이동 속도는 0 ~ 10[m/s]이다. 이동 속도가 증가함에 따라 가스관의 속도 기전력에 의한 와전류가 발생하고 와전류에 의한 자기장이 측정 신호 파형을 왜곡시킨다. 또한 진행중에 발생하는 잡음등에 의해서도 신호는 왜곡되게 된다.

신호 보정은 진행중에 발생하는 잡음등이 보통 고주파이므로 저역필터를 통과시키고, 이를 속도에 따른 와전류에 의한 신호의 왜곡을 보상하고, 착자에 의한 신호 왜곡을 보상하여 실제 결함에 의한 신호를 검출할 수 있으며, 이것의 크기와 폭등으로 결함의 깊이와 크기를 산출할 수 있다.

제 6장 실험 및 결과

6.1 8인치 배관의 실험 및 결과검토

8인치 시험 PIG를 8인치 표준배관(외경 216[mm], 두께 5.85[mm])의 결함을 검사하도록 설계되었다. 자기장은 Nd자석을 사용하여 인가하였으며, 배관의 직경을 고려하여 길이가 짧은 10[mm] 정도의 브러시를 사용하였고 센서헤드에는 축, 반지름, 원주방향의 자기장을 측정할 수 있는 센서 3개가 한조를 이루게 하고, 3조 총 9개의 센서가 헤드에 설치하였다. 센서는 2축 시스템을 사용하여 항상 배관과 평평하게 움직이도록 하였으며 자기검출 센서로는 Allegro 3507L 선형 홀센서를 사용하였다. 이러한 요크를 60°간격으로 원주방향으로 5개를 구성하였으며 이 요크에는 3개의 센서헤드가 붙어있다. 따라서 총 45개의 센서가 시험 제작된 피그에 부착되어있다. Fig. 6.1은 8인치 배관과 결함의 사진이다. Fig. 6.2는 배관 검사후에 빠져나온 PIG의 모습이다. 가스관에 나타날 수 있는 결함을 Table 6-1과 같이 가스관에 제작하였다. 결함은 가스관의 축방향으로 A, B, C, D, E, F, G, H, I조로 나누었고 각각 30°씩 기울어져 있다. 예를 들어 A1결함은 축방향으로의 길이 35[mm], 원주방향으로의 폭 35[mm], 깊이 3.4[mm] 그리고 결함의 중심은 관의 왼쪽 끝에서부터 465[mm]에 위치하고 있다. Fig. 6.3은 8인치 배관의 센서의 위치이며, Fig. 6.4는 8인치 배관의 표준결함모양 및 위치를 나타내었다.

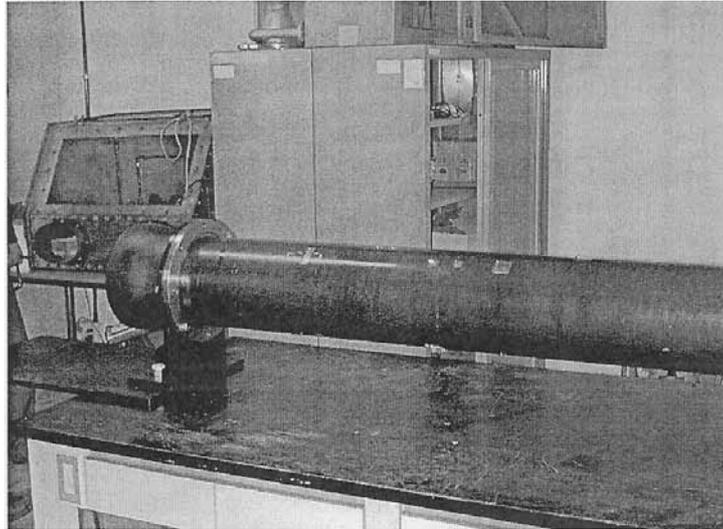


Fig. 6.1 8 inch pipeline and defect[6]

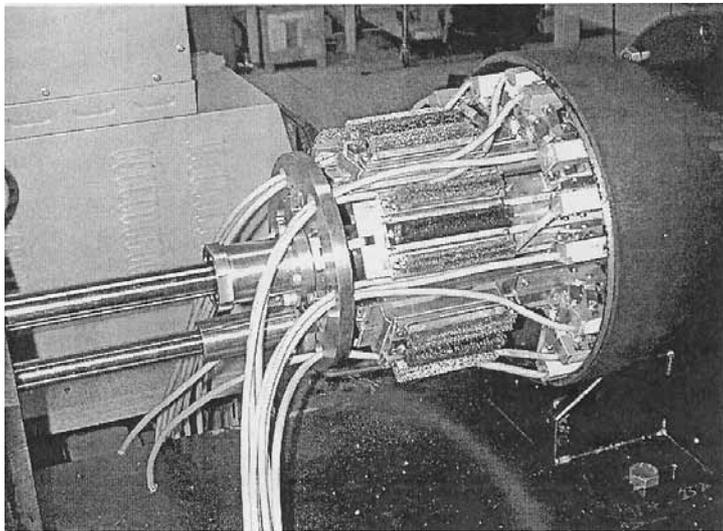


Fig. 6.2 PIG after pigging[6]

Table 6.1 Standard defects on 8 inch pipeline surface[6]

[단위 : mm]

		A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	길이	35	35	35	35	17	52	52	52	18
	폭	35	17	35	35	17	52	52	52	18
	깊이	3.4	2	2	0.5	1.8	1.3	0.5	0.6	0.7
	위치	465	315	465	315	465	315	315	315	465
2	길이	17	17	53	17	54	17	18	18	34
	폭	17	17	53	17	54	17	18	18	34
	깊이	2	2.5	5	1.8	3.2	4.8	1.6	2.9	4.6
	위치	560	725	615	735	615	715	465	765	615
3	길이	17	17	17	17	17		52		18
	폭	17	17	35	17	5.7		52		1.8
	깊이	2.3	2.5	1.7	2	2		1.8		1.7
	위치	615	765	915	765	915		615		915
4	길이	17						18		
	폭	52						2.5		
	깊이	2						1.8		
	위치	915						915		

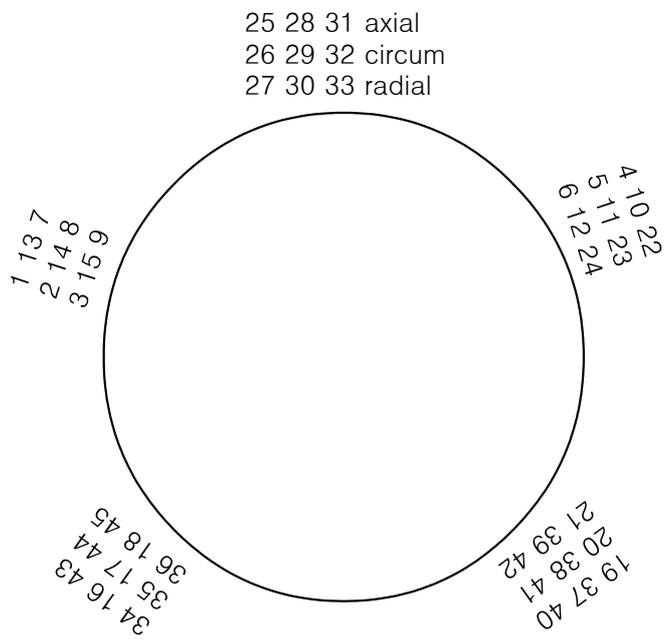


Fig. 6.3 Sensor position of 8 inch pipeline[6]

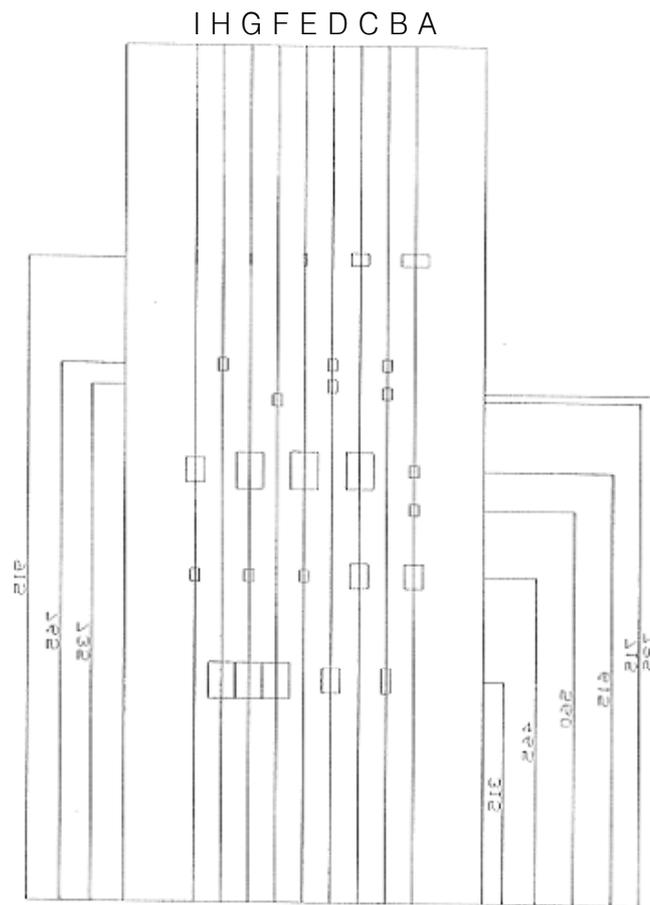


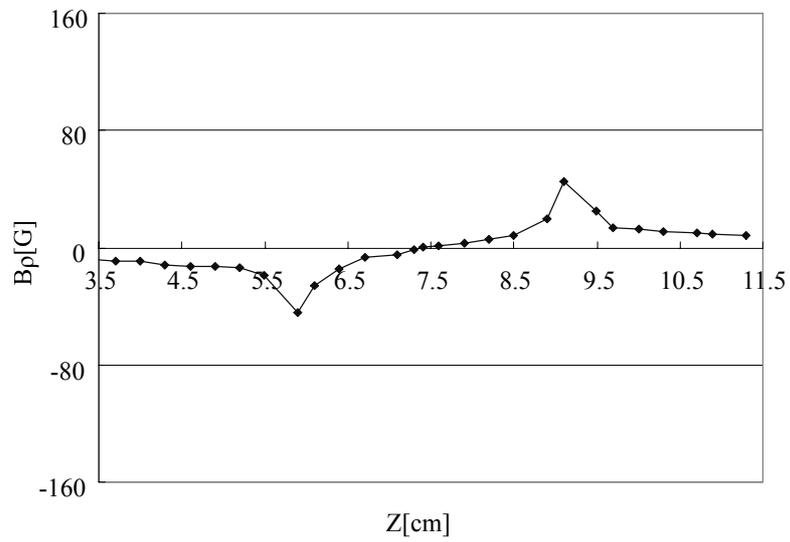
Fig. 6.4 Standard defect, shape and position of 8 inch pipeline[6]

Fig. 6.5는 8인치 배관 표면에 새긴 표준결함 중에 A1결함에 대한 실험결과이다. A1 결함은 6t×6t×0.5t의 결함이며, Fig. 6.5(a)는 해석과형이며 Fig. 6.5(b)는 측정된 실제 과형이다. Table 6.2는 결함의 규격과 결과의 대한 비교로써 계산치 보다 측정치의 신호의 크기는 작게 나왔으며, 결함의 크기는 유사함을 알 수 있다. 이러한 결과는 결함이 10[%], 20[%], 30[%], 50[%], 100[%]일때의 해석값과 실제 측정값을 Fig. 6.6에 나타내었다. 계산된 해석값보다 실제 측정값이 작게 나타남을 알 수 있다.

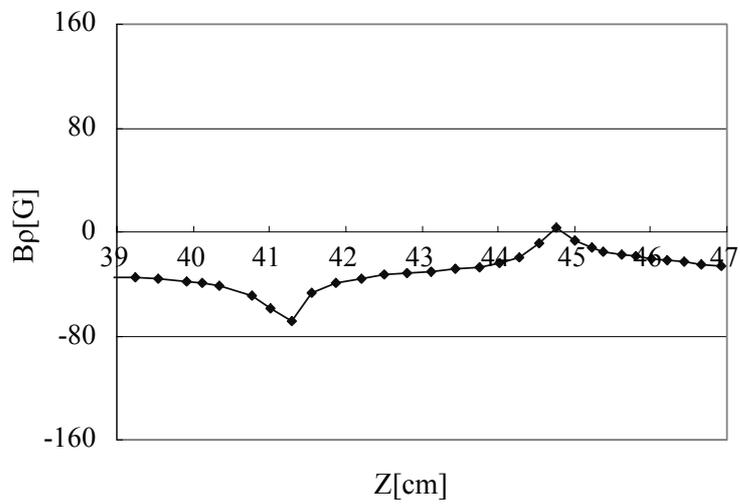
Table 6.2 Defect size and measurement of defect A1

[단위 : mm]

결함A1	규격	모델링	제작	계산치	측정치
길이	6t(34.8)	6t(34.8)	6.03t(35)	신호의 폭:	신호의 폭:
깊이	50%(2.9)	50%(2.9)	59%(3.4)	33	34.69
폭	6t(34.8)		6.03t(35)	신호의 크기 89.4[Oe]	신호의 크기 72.26[Oe]



(a) A calculated value



(b) A measured value

Fig. 6.5 Calculated and measured of defect A1

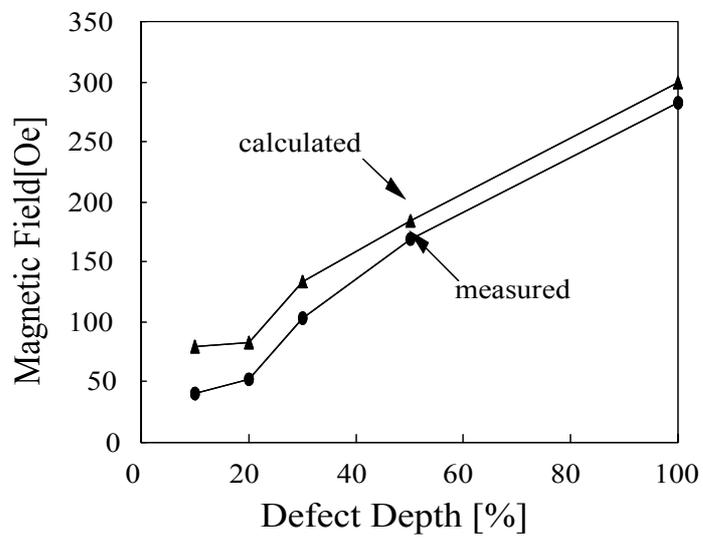


Fig. 6.6 The magnitude of the MFL signals with respect to defect depth

6.3 30인치 배관의 실험 및 결과검토

Fig. 6.7 이하의 실험결과는 한국 가스공사에서 제작한 MFL PIG 자료이다. 이것을 Fig. 6.9의 pull rig에서 시험하였다. Fig. 6.7의 브러쉬 사이에 있는 것이 센서 모듈이며 Fig. 6.8은 센서 모듈을 확대한 것이다. 한 개의 센서 모듈 안에는 반경 방향, 축 방향, 원주 방향 각각 3개씩 9개의 홀센서와 한 개의 와전류 센서가 들어있다. PIG는 전체 64개의 센서 모듈로 구성되어 있다. 각 방향 당 192개의 홀센서로 총 576개의 홀센서와 64개의 와전류 센서로 구성되어 있으며 각각의 신호들이 2진 형태로 저장되게 된다. Fig. 6.9는 pull bed gas pipe의 사진이며 가스관 표면에 12개의 결함이 제작하여 직접 실험하였다.

Fig. 6.10, Fig. 6.11, Fig. 6.12는 실제 결함들의 사진이다. Table 6.4는 pull bed gas pipe의 결함들이며 각각의 결함들에 대한 크기는 아래에 표시하였다. Fig. 6.13은 축신호를 나타낸 것이며 Fig. 6.14는 이것을 이미지로 나타낸 것이다. Fig. 6.15는 반경신호를 나타낸 것이며 Fig. 6.16는 이것을 이미지로 나타낸 것이다. 결함에 해당되는 부분은 원으로 표시를 하였다. 결함을 자세히 검출하기 위하여 각각의 결함들에 대하여 Fig. 6.17에서 Fig. 6.30에 (a)는 검출신호, (b)는 2차원 이미지처리, (c)는 3차원 이미지처리를 하였다. Table 6.4는 반경 방향의 결함 신호 분석결과 이면 Table 6.5는 축 방향의 결함 신호 분석이다. MFL PIG에서 저장된 데이터로부터 결함을 검출하는데 Table 6.4와 6.5는 가시화로 결함 유무는 알 수 있지만 오차가 많다. 이것은 보정을 실시하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 실제 데이터를 프로그램을 사용한 자동검출 방법과 직접 확인하는 수동 검출 방법으로 결함유무를 판정한다.

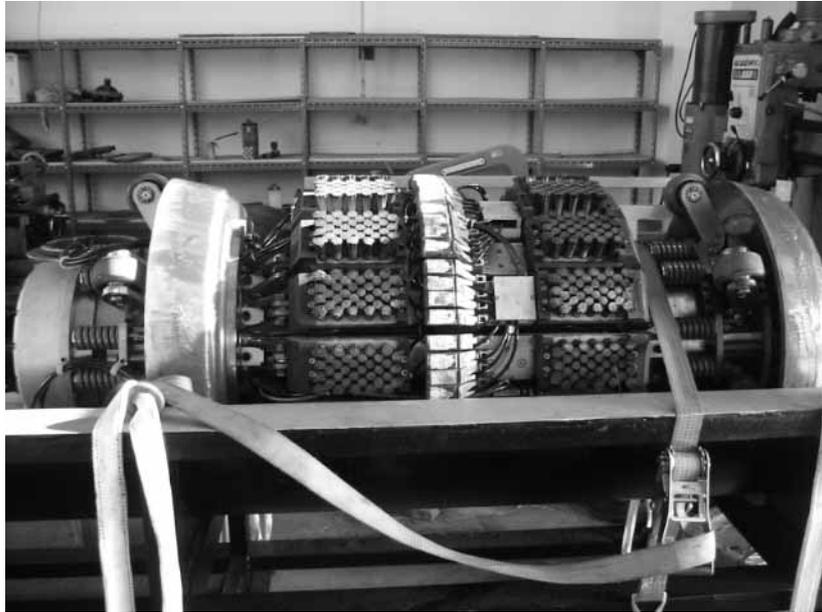


Fig. 6.7 MFL PIG[6]



Fig. 6.8 Hall sensor module[6]



Fig. 6.9 Pull Bed Gas Pipe[6]



Fig. 6.10 3t×3t×0.2t defect[6]



Fig. 6.11 $0.5t \times 0.5t \times \text{hole}$ defect[6]



Fig. 6.12 $2t \times 1t \times 0.4t$ defect[6]

Table 6.3 Defect position of Pull Bed Gas
Pipe[6]

	10		3	8	
4		2			12
	9		5	7	
11		1			6

결함의 크기

- ① 1t×1t×0.4t
- ② 2t×2t×0.3t
- ③ 3t×3t×0.2t
- ④ 1t×1t×0.4t(내부결함)
- ⑤ 1t×1t×0.6t
- ⑥ 1t×1t×0.2t
- ⑦ 0.5t×0.5t×0.4t
- ⑧ 0.5t×0.5t×관통
- ⑨ 1t×2t×0.4t
- ⑩ 2t×1t×0.4t
- ⑪ 1t×3t×0.4t
- ⑫ 1t×1t×0.4t

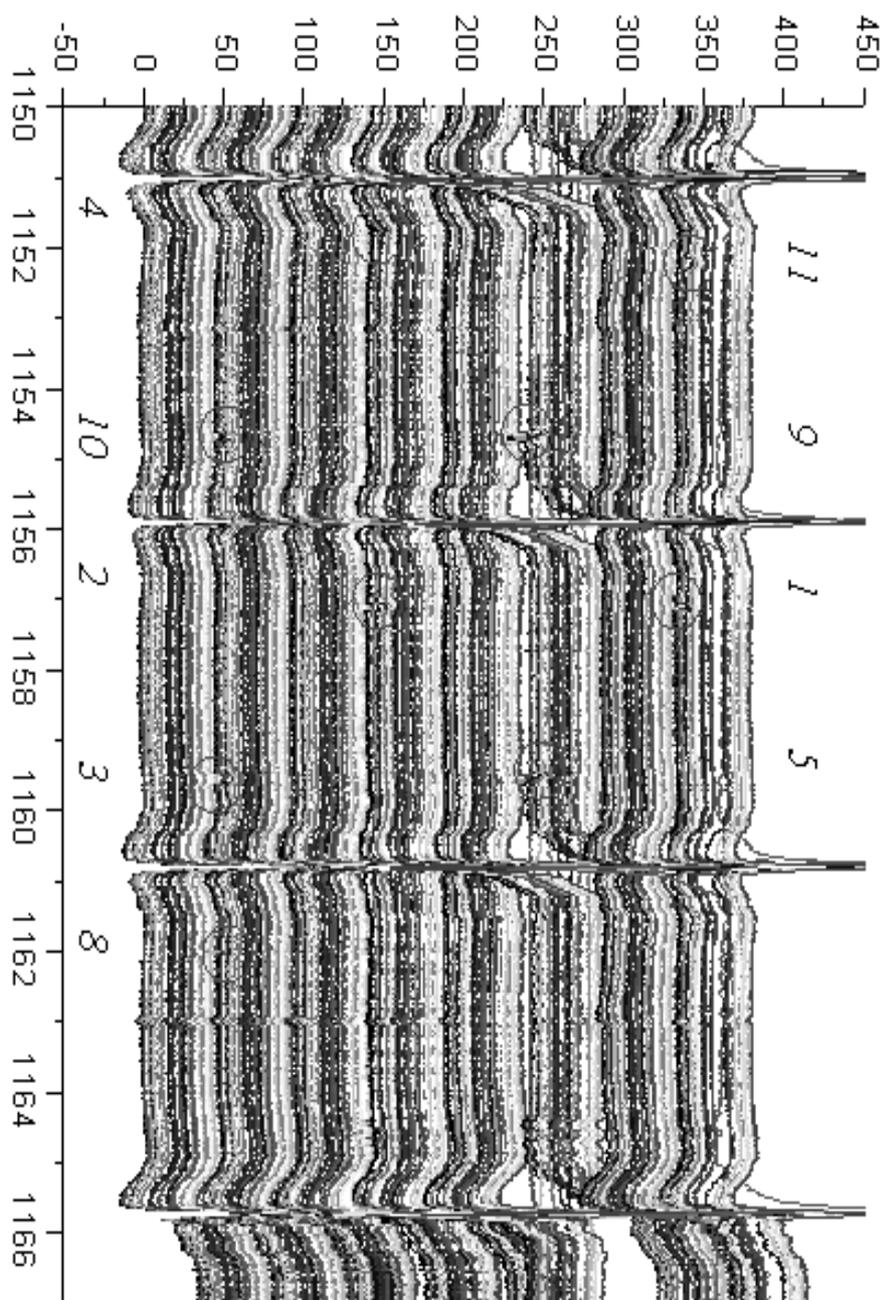


Fig. 6.13 Axial signals

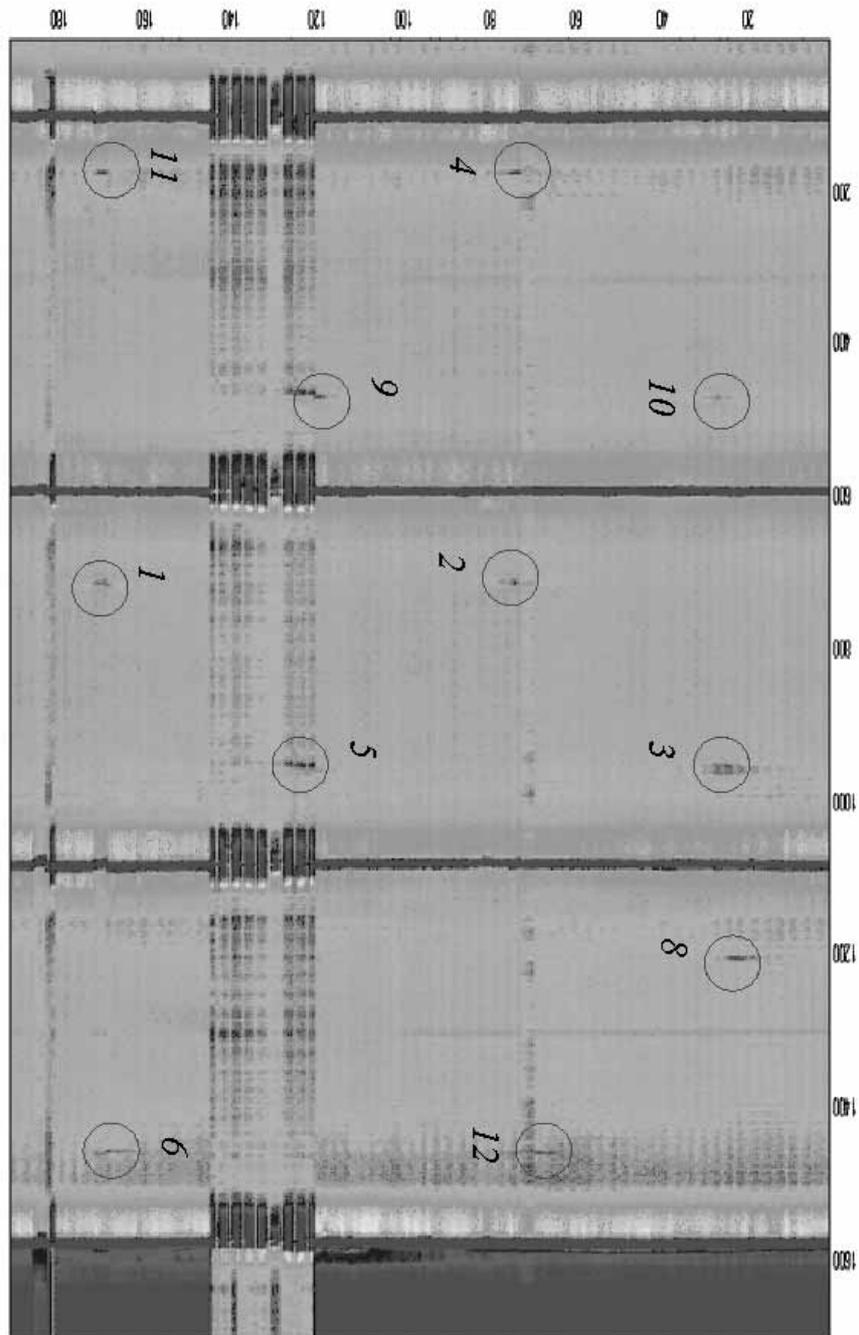


Fig. 6.14 Constructed images of the axial signals

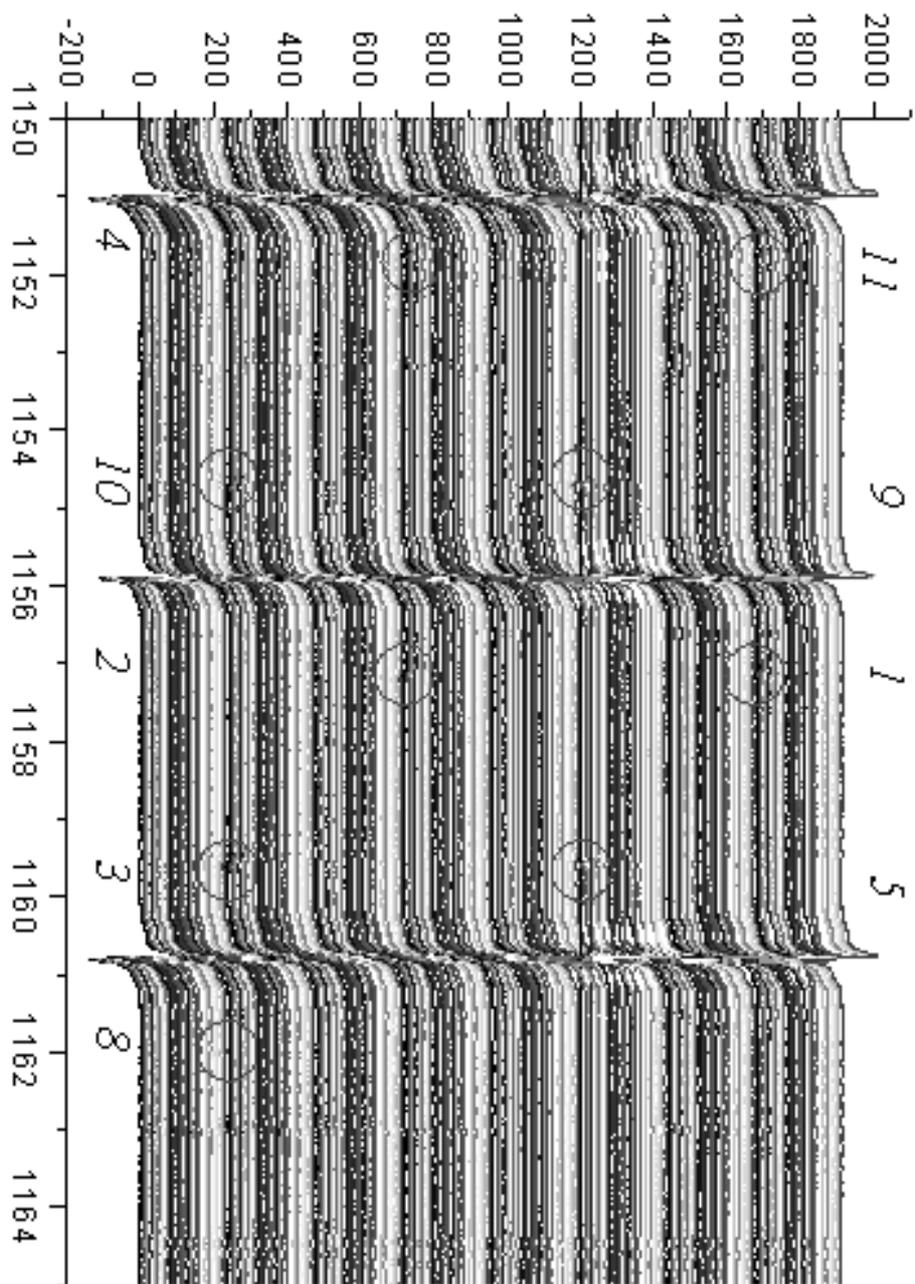


Fig. 6.15 Radial signals

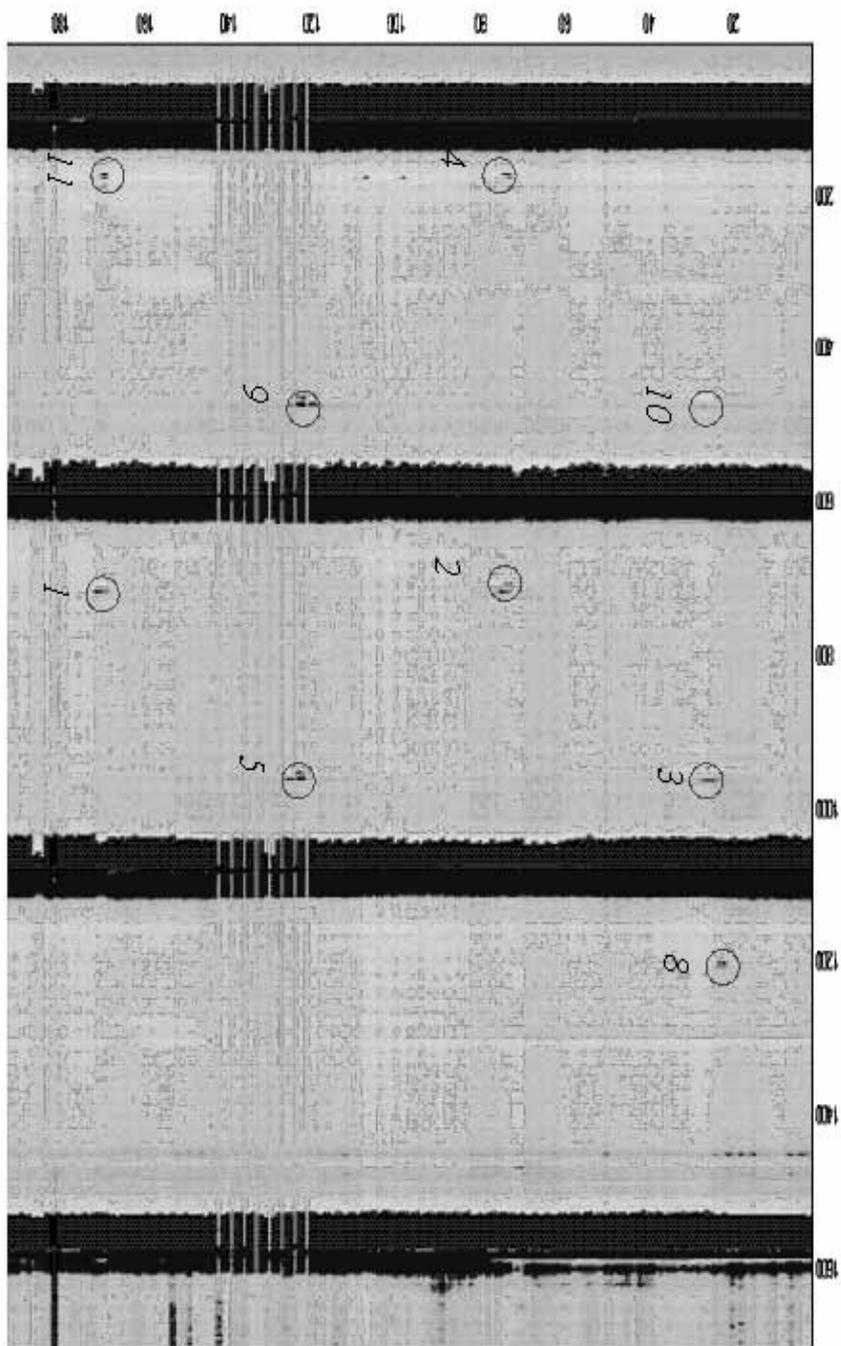
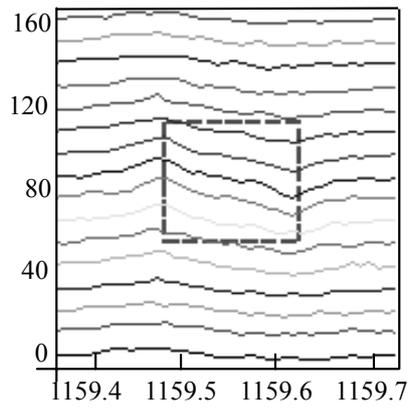
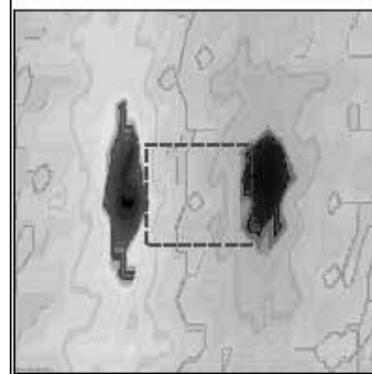


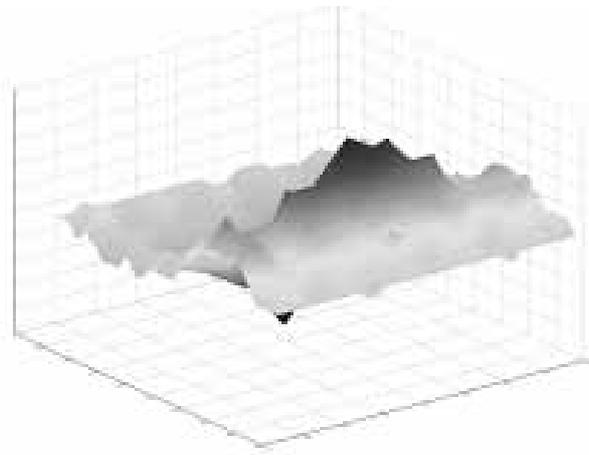
Fig. 6.16 Constructed images of the axial signals



(a) Signals

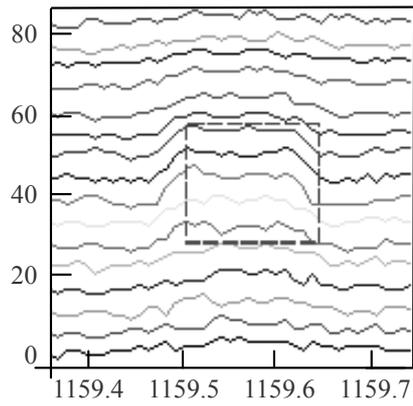


(b) Constructed images

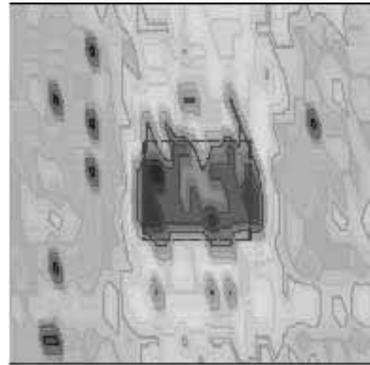


(c) Constructed images of 3D

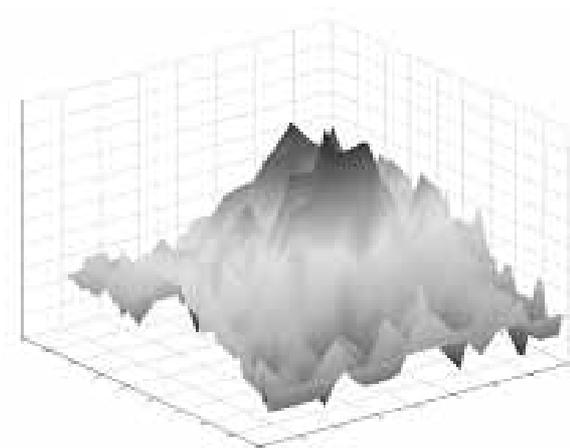
Fig. 6.17 Analysis of radial component(defect size $3t \times 3t \times 0.2t$,
 $B_{p-p}=70.6[G]$)



(a) Signals

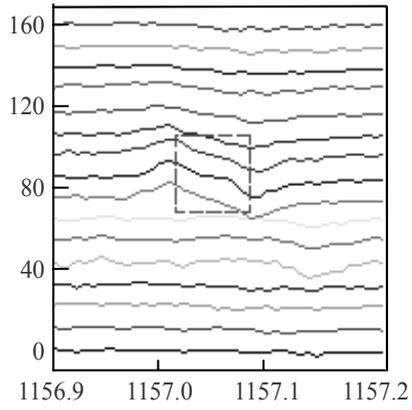


(b) Constructed images

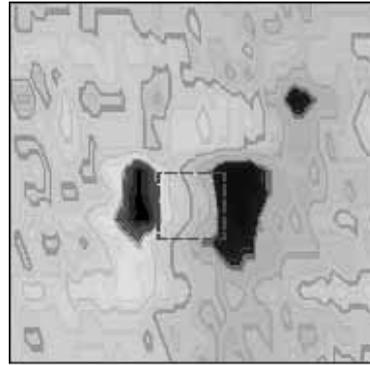


(c) Constructed images of 3D

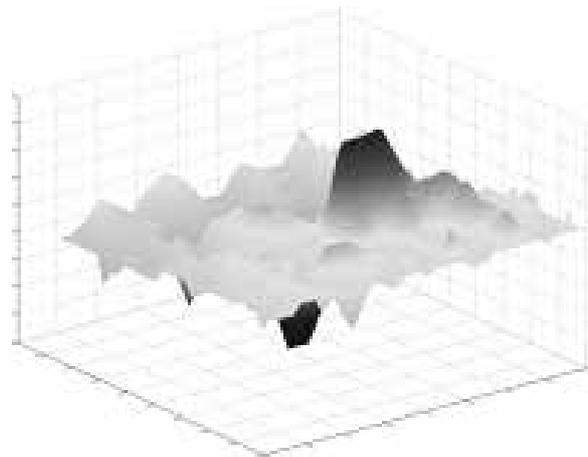
Fig. 6.18 Analysis of axial component(defect size $3t \times 3t \times 0.2t$,
 $B_p - p = 39.2[G]$)



(a) Signals

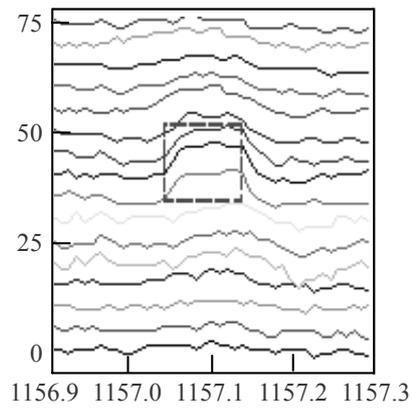


(b) Constructed images

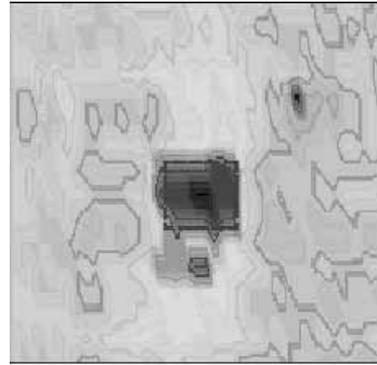


(c) Constructed images of 3D

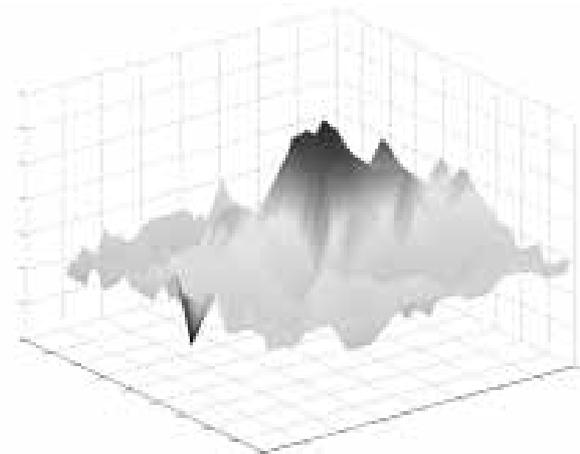
Fig. 6.19 Analysis of radial component(defect size $2t \times 2t \times 0.3t$,
 $B_p - p = 66.7[G]$)



(a) Signals

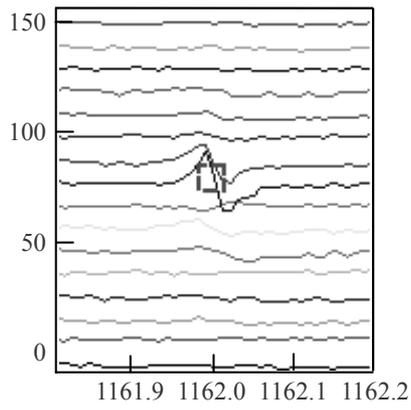


(b) Constructed images

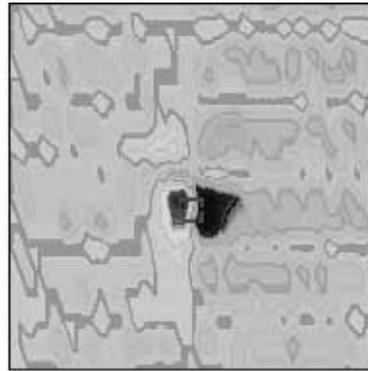


(c) Constructed images of 3D

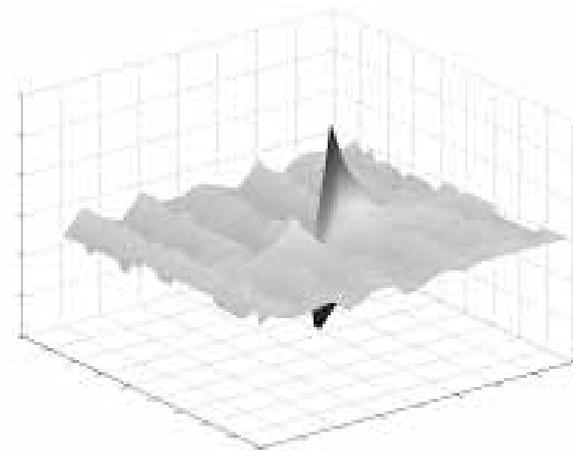
Fig. 6.20 Analysis of axial component(defect size $2t \times 2t \times 0.3t$,
 $B_p - p = 35.3[G]$)



(a) Signals

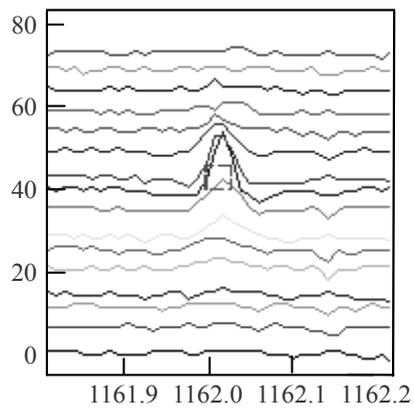


(b) Constructed images

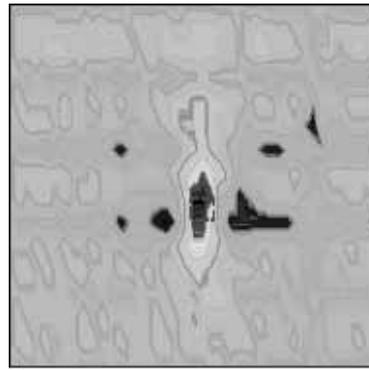


(c) Constructed images of 3D

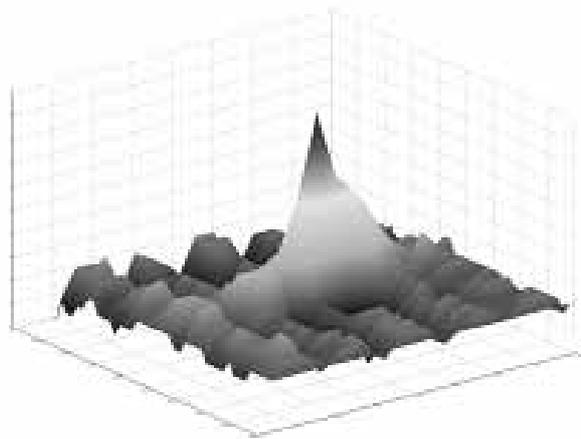
Fig. 6.21 Analysis of radial component(defect size $0.5t \times 0.5t \times \text{hole}$,
 $B_{p-p} = 101.96[G]$)



(a) Signals

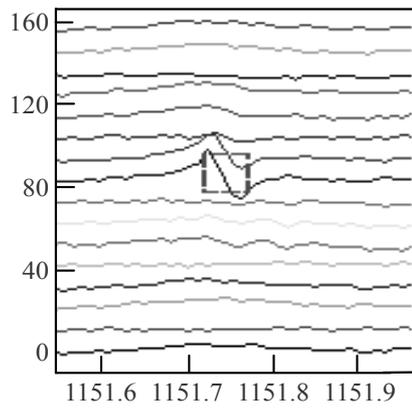


(b) Constructed images

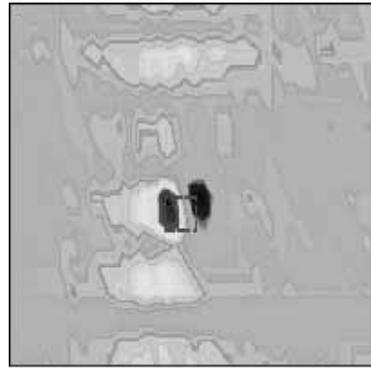


(c) Constructed images of 3D

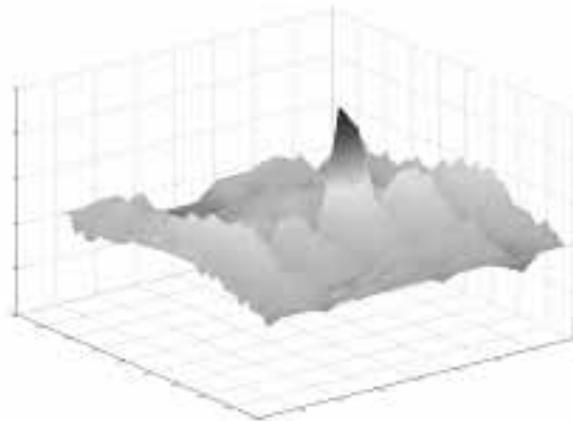
Fig. 6.22 Analysis of axial component(defect size $0.5t \times 0.5t \times \text{hole}$,
 $B_{p-p}=70.58[G]$)



(a) Signals

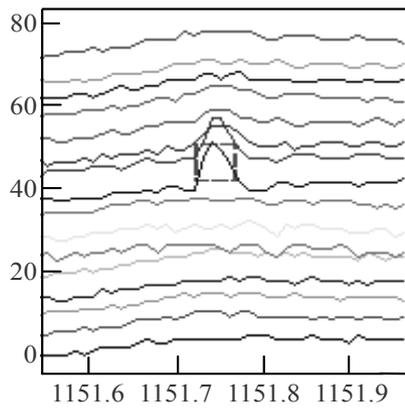


(b) Constructed images

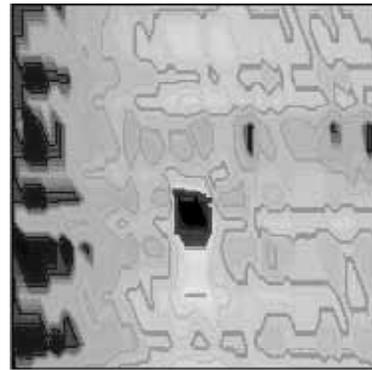


(c) Constructed images of 3D

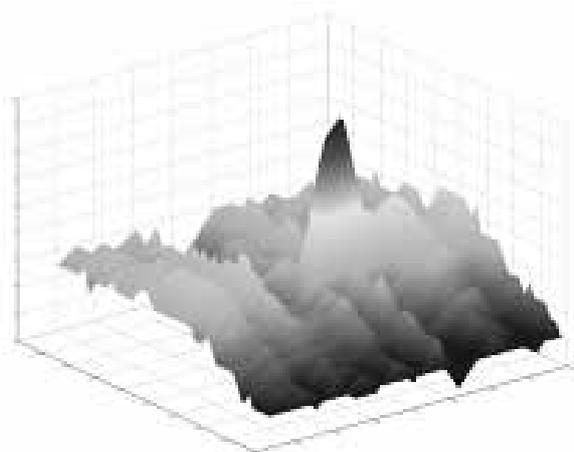
Fig. 6.23 Analysis of radial component(defect size $1t \times 1t \times 0.4t$,
 $B_{p-p} = 90.19[G]$)



(a) Signals

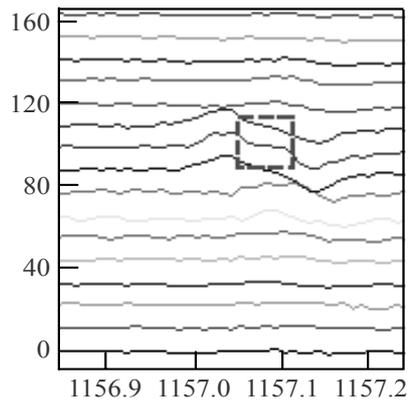


(b) Constructed images

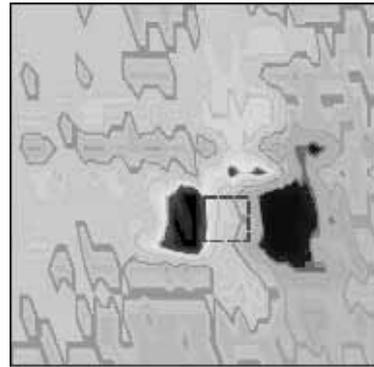


(c) Constructed images of 3D

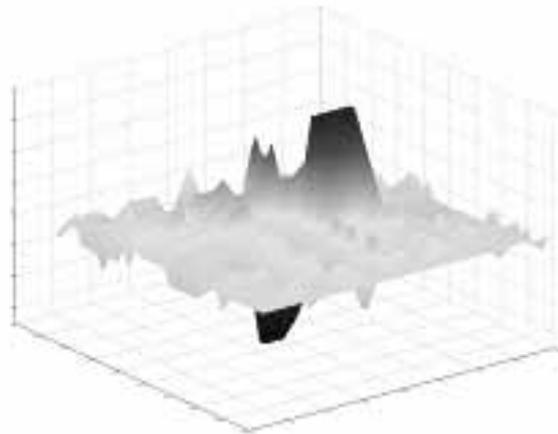
Fig. 6.24 Analysis of axial component(defect size $1t \times 1t \times 0.4t$,
 $B_p - p = 54.9[G]$)



(a) Signals

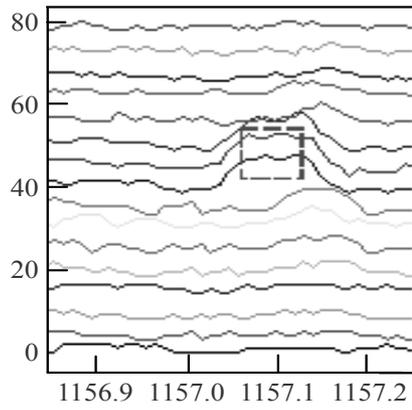


(b) Constructed images

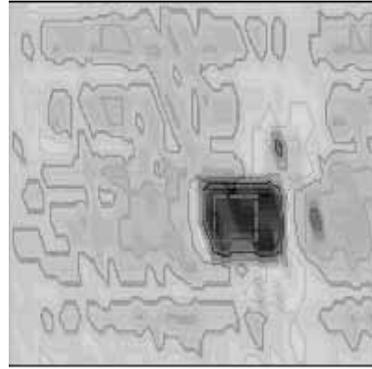


(c) Constructed images of 3D

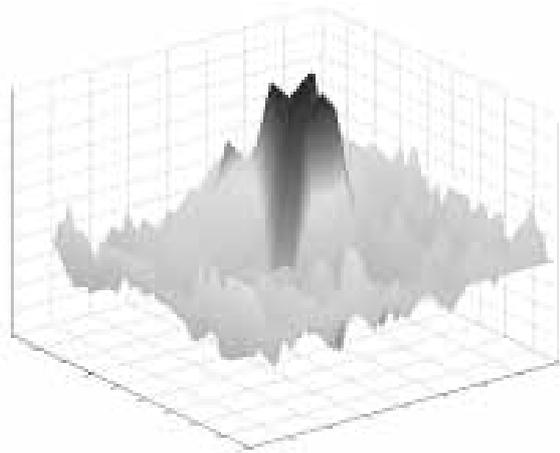
Fig. 6.25 Analysis of radial component(defect size $1t \times 1t \times 0.4t$,
 $B_p - p = 62.7[G]$)



(a) Signals

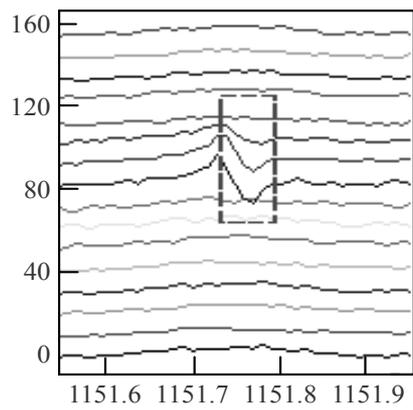


(b) Constructed images

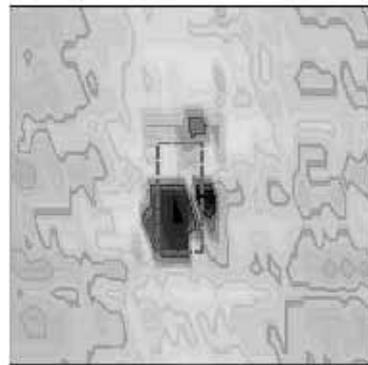


(c) Constructed images of 3D

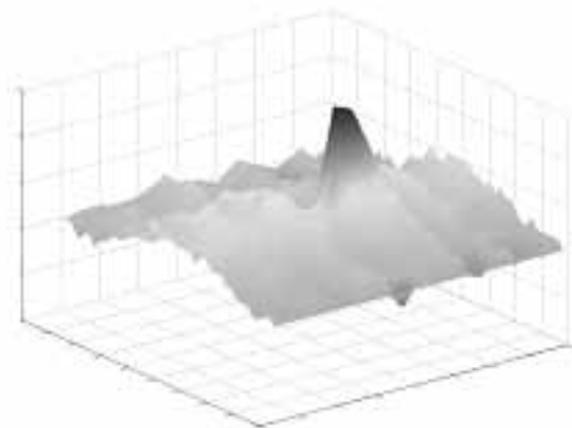
Fig. 6.26 Analysis of axial component(defect size $1t \times 1t \times 0.4t$,
 $B_p - p = 35.3[G]$)



(a) Signals

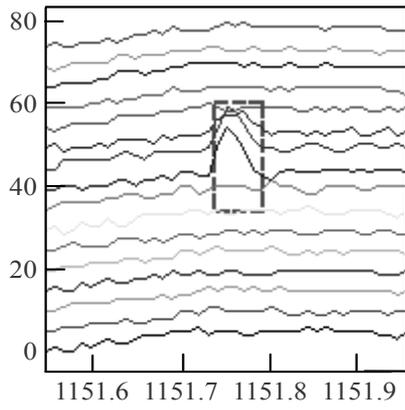


(b) Constructed images

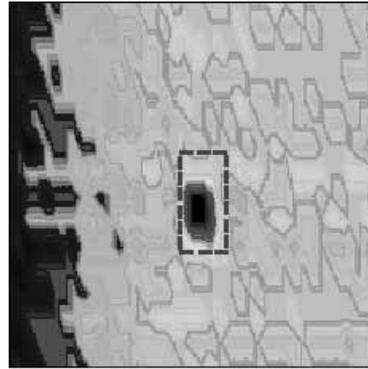


(c) Constructed images of 3D

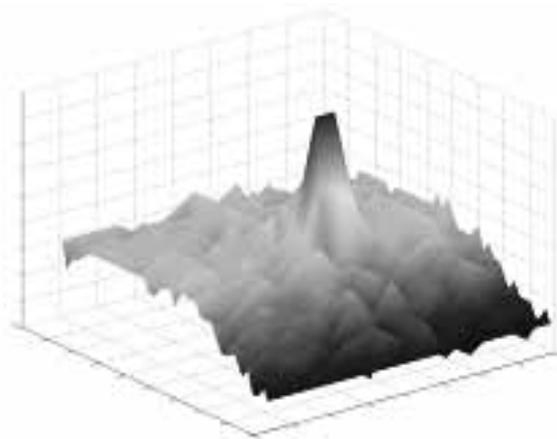
Fig. 6.27 Analysis of radial component(defect size $1t \times 3t \times 0.4t$,
 $B_p - p = 90.2[G]$)



(a) Signals

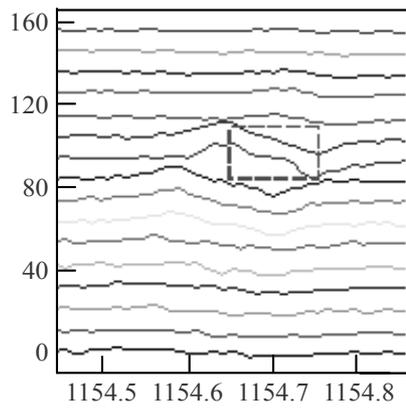


(b) Constructed images

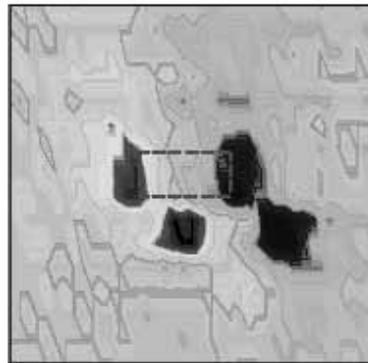


(c) Constructed images of 3D

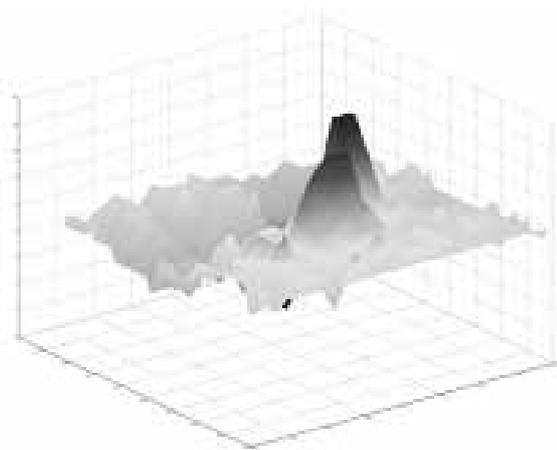
Fig. 6.28 Analysis of axial component(defect size $1t \times 3t \times 0.4t$,
 $B_p - p = 27.45[G]$)



(a) Signals

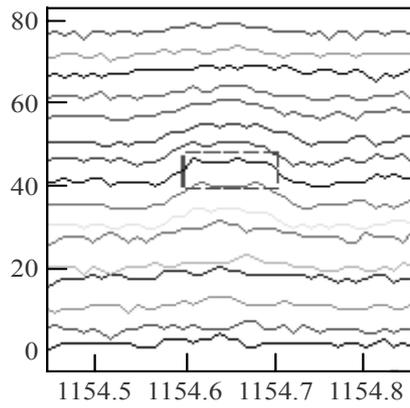


(b) Constructed images

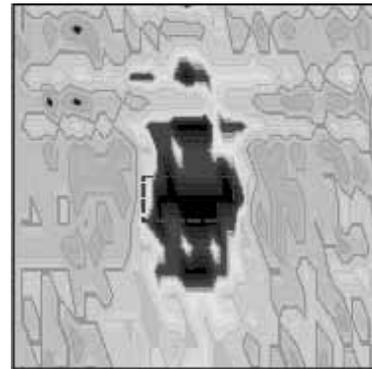


(c) Constructed images of 3D

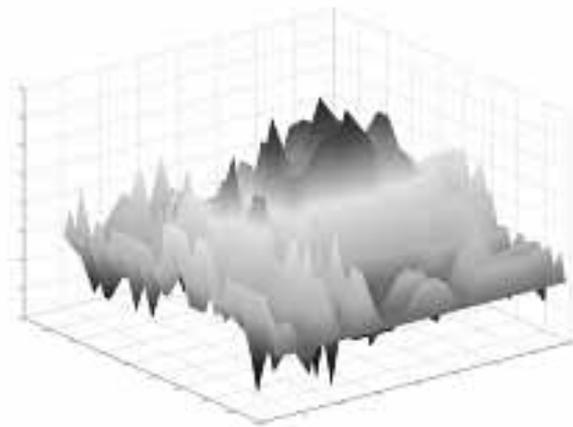
Fig. 6.29 Analysis of radial component(defect size $2t \times 1t \times 0.4t$,
 $B_p - p = 54.9[G]$)



(a) Signals



(b) Constructed images



(c) Constructed images of 3D

Fig. 6.30 Analysis of axial component(defect size $2t \times 1t \times 0.4t$,
 $B_p - p = 27.45[G]$)

Table 6.4 Analysis of defect signals by radial component

결 함	방향	반경		
		길이[mm]	t로 환산	백분율
3t×3t×0.2t	L	64.09	3.6t	122[%]
	W	62.45	3.6t	119[%]
2t×2t×0.3t	L	45.24	2.5t	129[%]
	W	37.4	2.1t	106[%]
0.5t×0.5t×관통	L	15.08	0.86t	172[%]
	W	12.49	0.7t	142[%]
1t×1t×0.4t (내부결함)	L	18.85	1.1t	107[%]
	W	12.49	0.7t	71[%]
1t×1t×0.4t	L	37.7	2.1t	214[%]
	W	24.98	1.4t	142[%]
1t×3t×0.4t	L	18.8	1.07t	107[%]
	W	18.7	1.1t	35[%]
2t×1t×0.4t	L	33.9	1.9t	96.8[%]
	W	31.2	1.8t	178[%]

Table 6.5 Analysis of defect signals by axial component

결 합	방향	측		
		길이[mm]	t로 환산	백분율
3t×3t×0.2t	L	64.09	3.6t	122[%]
	W	62.45	3.6t	119[%]
2t×2t×0.3t	L	45.24	2.5t	129[%]
	W	37.4	2.1t	106[%]
0.5t×0.5t×관통	L	15.08	0.86t	172[%]
	W	12.49	0.7t	142[%]
1t×1t×0.4t (내부결합)	L	18.85	1.1t	107[%]
	W	12.49	0.7t	71[%]
1t×1t×0.4t	L	37.7	2.1t	214[%]
	W	24.98	1.4t	142[%]
1t×3t×0.4t	L	18.8	1.07t	107[%]
	W	18.7	1.1t	35[%]
2t×1t×0.4t	L	33.9	1.9t	96.8[%]
	W	31.2	1.8t	178[%]

6.3 결함의 길이, 폭, 깊이 판정

각각의 신호로부터 결함의 크기와 깊이를 산출하여야 한다.

먼저 결함의 길이는 반경 신호로부터 Fig. 6.31처럼 최고와 최저의 깊이를 산출하는 방법이 가장 타당한 것으로 보인다. 결함의 폭 산출은 홀 센서의 수량이 무한하지 못하므로 신호의 최대 크기의 일정한 비율 이상을 폭으로 판정해야 하는데 최대 신호 옆의 신호의 크기의 여부에 따라 달라지므로 본 결과에서는 검출신호의 끝단의 절반으로 판정하였으며 축방향의 길이 산출은 최대 점을 잇는 것을 길이로 하는 방법과 최대 크기의 일정한 비율 이상을 길이로 산정하는 방법 등이 있으며 차후 결함의 폭 산출 방법에 관한 연구가 더 진행되어야 할 것으로 보인다. 결함의 깊이에 대한 연구는 PIG 신호의 전처리 후에 반경방향과 축방향의 신호로 판정할 것인지, 반경방향과 축방향과 원주방향의 신호를 모두를 가지고 판정할 것인지 이에 대한 연구가 필요하다.

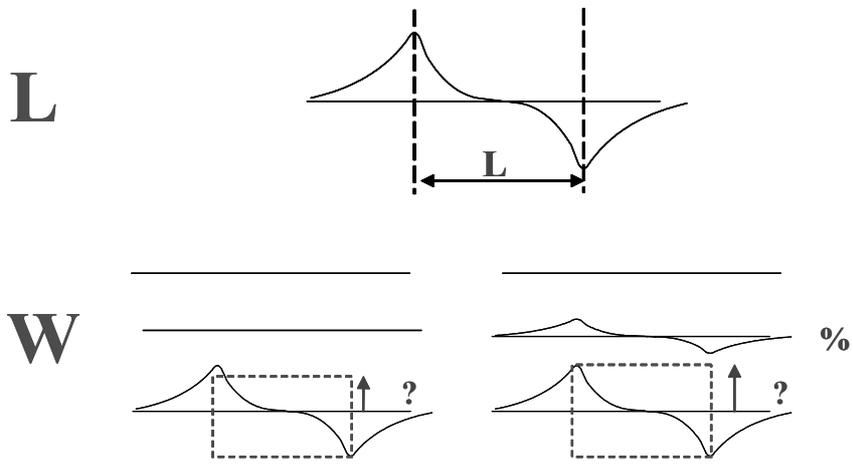


Fig. 6.31 Calculated length and width of radial component

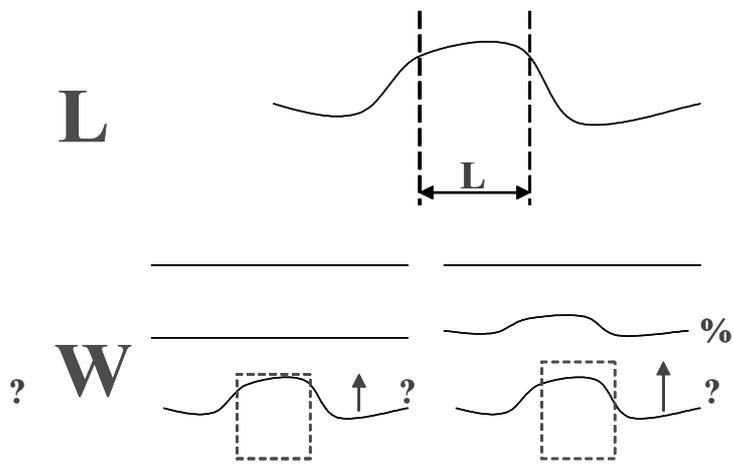


Fig. 6.32 Calculated length and width of axial component

제 7장 결 론

본 논문에서는 자기누설탐상(MFL: Magnetic Flux Leakage) 방식의 비파괴 시스템에 관하여 연구하였다. MFL 방법은 비파괴 검사 시스템으로 영구자석과 요크를 이용하여 가스관을 포화시켜 결함이 있을 경우 누설자속을 검출하여 결함을 검출하는 방법이다.

현재 부식으로 인한 결함이 가스관의 두께의 10%까지 검출이 가능하다. 그러나 가스관을 검사하는 기업들은 결함이 가스관의 두께의 5%이하의 정교한 결함 검출을 요구하고 있다.

본 논문에서는 가스관의 적정한 포화점을 설정하기 위하여 누설계수 λ 와 동작점을 제안하였다. 누설계수 λ 는 결함이 있는 가스관의 누설자속 Φ_c 과 결함이 없는 가스관의 누설자속 Φ_a 의 비율이며, 동작점은 누설계수 λ 에 해당되는 자기장의 범위이다. 3가지 경우의 동작점을 선정하였으며 case I의 경우는 동작점이 낮게 설정되어 부족포화가 되어 가스관은 포화되지 않아서 결함이 있어도 누설 자속의 발생이 적어 누설자속 Φ_c 의 크기와 비례하는 누설계수 λ 의 크기도 작았으며, case III은 동작점이 높게 설정되어 과포화가 되어 결함에 의한 누설자속 Φ_c 는 크나 결함이 없는 경우 누설자속 Φ_a 도 크다. 그래서 누설 자속의 변화 Φ_c/Φ_a 인 누설계수 λ 의 크기도 작았다. case II의 경우가 최적으로 결함이 없는 경우는 가스관의 포화가 적게 되어 결함이 없는 경우의 누설자속 Φ_a 는 작고, 결함이 있을 경우는 가스관의 면적이 작아져 결함에 의한 누설자속 Φ_c 는 커지게 되므로 누설 자속의 변화 Φ_c/Φ_a 인 누설계수 λ 의 크기도 크다. 그래서 누설계수 λ 를 최대로 하는 동작점을 영구자석으로 설정하였

다.

자기 누설에 대한 해석방법은 비선형 3차원 유한 요소법을 사용하였으며, 가스관의 결함이 있을 경우 결함의 크기, 깊이에 따른 결함 신호를 해석하여 가시화 시켰다. 그러나 PIG 주행시 가스관을 통과한 신호는 가스관의 착자에 의한 영향과 속도에 의한 와전류에 의하여 왜곡등이 발생하게 된다.

본 논문에서는 PIG의 주행에 의해 발생하는 와전류에 의한 왜곡과 가스관의 착자에 의한 왜곡을 보상하여 실제 결함에 의한 신호를 검출하는 방법에 관하여 연구하였다. MFL PIG의 주행시 PIG내의 영구 자석으로 인한 잔류자화로 인하여 가스관은 착자가 된다. 이때 가스관의 횡방향 착자에 의한 영향은 인가되는 자기장의 방향과 같으므로 검출신호의 크기를 증가시키는 방향으로 작용하고, 종방향 착자의 경우는 인가되는 자기장과 수직 방향이므로 검출신호 자체를 왜곡시킨다.

PIG 주행으로 인하여 속도 기전력이 발생하게 되고 이로 인해 가스관 내부 표면에 와전류가 발생하게 되고, 이 와전류는 측정신호의 파형을 왜곡시킨다. 착자에 의한 신호왜곡이 주행속도와 무관한것과 달리 와전류에 의한 신호왜곡은 주행속도에 비례하므로, 본 연구에서는 PIG주행 속도에 따른 자력선의 변화, 가스관 표면의 자속밀도는 PIG가 오른쪽으로 진행할 경우 브러쉬의 오른쪽의 자기장은 감소하고 왼쪽은 증가하는 것을 자력선과 와전류 분포로 설명하였고, MFL PIG의 주행에 의한 왜곡 신호를 MFL PIG의 주행속도, 검출신호의 최대값, 검출신호의 기울기 등으로부터 왜곡성분을 추정하여 보정함으로써 실제신호를 검출하였다.

본 연구의 방법들은 8인치와 30인치의 시험배관에 적용한 결과 예측치와 실험치가 잘 일치하였다.

본 연구의 결과는 MFL 방식을 이용한 비파괴 검사의 결함검출 능력

향상에 유용할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] A. E. Crouch, "In-Line Inspection of Natural Gas Pipelines," *Gas Research Institute Topical Report GRI-91/0365*, pp. 12-16, 1993.
- [2] G. S. Park, S. Y. Hahn, K. S. Lee, and H. K. Jung, "Implementation of Hysteresis Characteristics using Preisach Model with M-B Variables," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 29 , no. 2, pp. 1542-1545, Mar. 1993.
- [3] K. K. Tandon, "MFL Tool Hardware for Pipeline Inspection," *Materials Selection & Design*, pp. 75-79, Feb. 1997.
- [4] H. Haines et. al., "Advanced MFL Signal Analysis Aids Pipe Corrosion Detection," *Pipeline & Gas Industry*, pp. 49-63, Mar. 1999.
- [5] D. L. Atherton and M. G. Daly, "Finite Element Calculation of Magnetic Leakage Detector Signals," *NDT International*, vol. 20, no. 4, pp. 235-238, Aug. 1987.
- [6] MFL탐지 인텔리전트 피그 및 지오메트리 피그개발 연구보고서, 한국가스공사, 2002.
- [7] J. Bruce Nestleroth, Steven W. Rust, and David A. Burgoon, "Determining Corrosion Defect Geometry from Magnetic Flux Leakage PIG Data," *The NACE International Annual Conference and Exposition CORROSION 96*, no. 44, pp. 1-11, 1996.
- [8] G. S. Park, P. W. Jang, and Y. W. Rho, "Optimum Design of a Non-Destructive Testing System to Maximize Magnetic Flux

- Leakage," *Journal of Magnetism*, vol. 6, no. 1, pp. 31-35, Mar. 2001.
- [9] Gwan Soo Park and Eun-Sik Park, "Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage Type NDT," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 37, no. 2, pp. 1277-1280, Mar. 2002.
- [10] Brown, B.H. et. al., "Electrical impedance changes in the human thorax," *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 41(8), pp 729-734, 1994.
- [11] H. D. Hong and M. D. Fox, "Magnetic Backprojection Imaging of the vascular lumen," *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 42(1), pp. 102-108, 1995.
- [12] G. S. Park, P. W. Chang, and Y. K. Kim, "Sensitive Detection of the Defect Signals in MFL Type NDT," *Proceedings of the Ninths Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, pp. 181, Milwaukee, U.S.A, June 4-7 2000.
- [13] G. S. Park, P. W. Chang, and Y. W. Rho, "Optimum Design of the Non-Destructive Testing System to Maximize the Magnetic Flux Leakages," *Journal of Magnetism*, vol.6, no.1, pp. 31-35, Mar. 2001.
- [14] M. Katoh, K. Nishio, and M. Abe, "Simulation of Quantification of Surface Breaking Flaw with Serveral cross Sectional Shapes by Magnetic Leakage Flux Testing," *in Proc. 1st U.S.-Jpn. Symp. Advances in NDT*, pp. 61-66, 1996.
- [15] Y. Gotoh and N. Takahashi, "3-D Nonlinear Eddy Current Analysis of Factors Affectng Evaluation of Alternating Flux Leakage Testing," *in Applied Electromagnetics and Mechanics, T.*

- Takagi and M. Uesaka, Eds. Tokyo, Japan: JSAEM, pp. 253-254, 2001.*
- [16] Y. Gotoh and N. Takahashi, "3-D Nonlinear Eddy Current Analysis of Alternating Flux Leakage Testing—Analysis of one Crack and two Cracks," *IEEE Trans. on Magn.* vol. 38, no. 2, pp. 1209-1212, 2002.
- [17] F. Foerster, "Nondestructive Inspection by the Method of Magnetic Leakage Fields. Theoretical and Experimental Foundations of the Detection of Surface Cracks of Finite and Infinite Depth," *Defektoskopiya*, vol. 18, pp. 3-25, 1982.
- [18] Y. Zhang, K. Sekine, and S. Watanabe, "Magnetic Leakage Field due to Sub-Surface Defects in Ferromagnetic Specimens," *NDT & E Int.*, vol. 28, pp. 67-71, 1995.
- [19] C. Edwards and S. B. Palmer, "The Magnetic Leakage Field of Surface-Breaking Cracks," *J. Phys. D:Appl. Phys.*, vol. 19, pp. 671-675, 1995.
- [20] L. N. Krotov, A. S. Shleenkov, R. S. Melnik, and V. E. Shcherbinin, "Computer Modeling of Magnetic Fields of Defects. The two-Dimensional Problem," *Rus. J. Nondestruct. Test.*, vol. 31, pp. 671-675, 1995.
- [21] W. Lord, J. M. Bridges, W. Yen, and R. Palanisamy, "Residual and Active Leakage Fields around Defects in Ferromagnetic Materials," *Mater Eval.*, vol. 36, pp. 47-54, 1978.
- [22] S. Ratnajeevan, "Inverse Problem Methodology and Finite Elements in the Identification of Cracks, Sources, Materials, and

- their Geometry in Inaccessible Locations," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 27, pp. 3433-3443, 1969.
- [23] A. C. Bruno, "Imaging Flaws in Magnetically Permeable Structures using the Truncated Generalized Inverse on Leakage Fields," *J. Appl. Phys.*, vol. 82, pp. 5899-5906, 1997.
- [24] A. C. Bruno, L. C. Miranda, C. H. Barbarosa, and G. S. Kuhner, "Image Reconstruction of Spherical Inclusions in Ferromagnetic Structures using the Generalized Inverse," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 34, pp. 2912-2915, Sep. 1998.
- [25] G. McFall and R. Miracky, "A Noise-Tolerant Solution to the Magneto-Static Inverse Problem for Nondestructive Evaluation," *J. Appl. Phys.*, vol. 74, pp. 2036-2045, 1993.
- [26] K. Miyata, K. Miya, and T. Sugira, "Crack Shape Recognition Based on T-method," in *9th Int. Conf. Nondestructive Evaluation in the Nuclear Industry*, pp. 351-356, 1988.
- [27] K. Hanasaki and K. Tsukada, "Application of Image Restoration Filter to two-Dimensional Measurements of Magnetic Flux Leakage Field around a Surface Flaw," in *1st U.S.-Jpn. Symp. Advances in Nondestructive Testing*, pp. 183-186, 1996.
- [28] S. Leonard and D. L. Atherton, "Calculations of the Effects of Anisotropy on Magnetic Flux Leakage Detector Signals," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 32, pp. 1925-1909, May 1996.
- [29] P. A. Ivanov, V. Zhang, C. H. Yeoh, L. Udpa, Y. Sun, S. S. Udpa, and W. Lord, "Magnetic Flux Leakage Modeling for Mechanical Damage in Transmission Pipelines," *IEEE Trans. on*

- Magn.*, vol. 34, pp. 3020–3023, Sep. 1998.
- [30] L. Udpa, S. Mandayam, S. Udpa, Y. Sun, and W. Lord, "Development in Gas Pipeline Inspection Technology," *Mater. Eval.*, vol. 54, pp. 462–472, 1996.
- [31] K. Pesola, U. Tenner, J. Nenonen, P. Endt, H. Brauer, U. Leder, and T. Katila, "Multichannel Magnetocardiographic Measurements with a Physical Thorax Phantom," *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 37, pp. 2–7, 1999.
- [32] M. Fuchs, R. Drenckhahn, H. A. Wischmann, and M. Wagner, "An Improved Boundary Element Method for Realistic Volume Conductor Modeling," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 45, pp. 980–997, Aug. 1998.
- [33] D. M. Schmidt, J. S. George, and C. C. Wood, "Bayesian Inference Applied to the Electromagnetic Inverse Problem," *Hum. Brain Map.*, vol. 7, pp. 195–212, 1999.
- [34] M. Fuchs, M. Wagner, T. Kohler, and H. A. Wischmann, "Linear and Nonlinear Current Density Reconstructions," *J. Clin. Neurophysiol.*, vol. 16, pp. 267–295, 1999.
- [35] K. Matsuura and Y. Okabe, "Selective Minimum-norm Solution of the Biomagnetic Inverse Problem," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 44, pp. 608–615, Jan. 1997.
- [36] M. Huang, R. Aron, and C. A. Shiffman, "Maximum Entropy Method for Magnetoencephalography," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 44, pp. 98–102, Jan. 1997.
- [37] R. D. Pascual-Marqui, "LORETA in 3D Solution Space," *ISBET*

- Newsletter*, vol. 6. pp. 22-28, 1995.
- [38] T. Kohler, A. Theiben, M. Wagner, H. A. Wischmann, and M. Fuchs, "Maximum Entropy in Current Density Imaging," *Biomed. Tech.*, vol. 42, pp. 49-52, 1997.
- [39] P. C. Hansen. "Analysis of Discrete Ill-posed Problems by Means of the L-curve," *SIAM Rev.*, vol. 34, pp. 561-580, 1992.
- [40] M. Ziolkowski, J. Haueisen, H. Nowak, and H. Brauer, "Equivalent Ellipsoid as an Interpretation Tool of Extended Current Distributions in Biomagnetic Inverse Problems," *IEEE Trans. on Magn.* vol. 36, pp. 1692-1695, July 2000.
- [41] Y. S. Sun, "Influences of Velocity on Signal Responses of Magnetostatic Nondestructive Testing Tools : A Prediction from Finite Element Analysis," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 30, pp. 3308-3311, Sep. 1994.
- [42] Y. K. Shin and W. Lord, "Numerical Modeling of Moving Probe Effects for Electromagnetic Nondestructive Evaluation," *IEEE Trans. on Magn.* vol. 29, pp. 1865-1868, Mar. 1993.
- [43] J. Haueisen, A. Bottner, M. Funke, H. Brauer, and H. Nowak, "Influence of Boundary Element Discretization on the Forward and Inverse Problem in Electroencephalography and Magnetoencephalography," *Biomed. Tech.*, vol. 42, pp. 240-248, 1997.
- [44] F. Foerster, "New Findings in the Field of Nondestructive Magnetic Leakage Field Inspection," *NDT Int.*, vol. 19, pp. 3-14, 1986.

발 표 논 문

- [1] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "Design of Magnetic Fluid Linear Pump," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 35, no. 5, pp. 4058-4060, Sep. 1999. (SCI)
- [2] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "New Structure of the Magnetic Fluid Linear Pump," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3709-3711, Sep. 2000. (SCI)
- [3] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "Determination of the Curvature of the Magnetic Fluid Under the External Forces," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 38, no. 2, pp. 957-960, Mar. 2002. (SCI)
- [4] Dong Kyu Kim, Sung Ho Cho, Seoung Soo Park, Hui Ryong Yoo, Yong Woo Rho, Young Tai Kho, Gwan Soo Park, and Sang Ho Park, "Development of the Caliper System for a Geometry PIG Based on Magnetic Field Analysis," *KSME International Journal*, vol. 17, no. 12, pp. 1835-1843, 2004. (SCI)
- [5] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "Analysis of the Velocity Induced Eddy Current in MFL Type NDT," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 40, no. 3, May 2004. (SCI, In Press)
- [6] 박상호, 박관수, "지하매설 가스관의 검사를 위한 누설자속탐상 PIG 설계에 관한 연구", *비파괴검사학회지*, vol. 22, no. 2, pp. 177-186, 2002년 4월.
- [7] 박상호, 박관수, "자기누설 비파괴 탐상 시스템에서 PIG의 이동이 검

- 출신호에 미치는 영향”, *대한전기학회 논문지*, 제 52B권 10호, pp. 475-483, 2003년 10월.
- [8] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "Design of Magnetic Fluid Linear Pump," *International Magnetism Conference*, Kyongju, Korea, May 18-21, 1999.
- [9] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "New Structure of the Magnetic Fluid Linear Pump," *IEEE Intermag 2000, 2000 IEEE International Magnetism Conference*, pp. GS-02, Toronto, Canada, Apr. 9-13, 2000.
- [10] G. S. Park and S. H. Park, "Determination of the Curvature of the Magnetic Fluid under the External Forces," *The 13th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, Evain, France, July 2-5, 2001.
- [11] S. H. Park, S. H. Cho, H. R. Yoo, Y. W. Ryo, and G. S. Park, "Improvement of the Sensing Signals in Geometry PIG Callper System," *IEEE Intermag2002, 2002 IEEE International Magnetism Conference*, pp. FV-07, Amsterdam, Apr. 28 - May 2, 2002.
- [12] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "Dynamic Analysis of the Sensing Signals in Magnetic Flux Leakage type NDT," *CEFC 2002, Proceedings of the Tenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, pp. 201, Perugia, Italy, June 16-19, 2002.
- [13] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "Analysis of the Velocity Induced Eddy Current in MFL Type NDT," *The 14th*

COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Saratoga NY, USA, July 13-18, 2003.

- [14] Gwan Soo Park and Sang Ho Park, "Distortion of the Sensing Signals in MFL type NDT," *The fourth Asian Symposium on Applied Electromagnetics*, pp. 81, Seoul, Korea, Oct. 22-25, 2003,.
- [15] G. S. Park, S. H. Park, H. R. Yoo, S. H. Cho, and Y. W. Ryo, "Design of a Permanent Magnet to Maximize the Sensing Signals in Geometry PIG Caliper System," *The International Conference on Electrical Engineering*, LOTTE Hotel Jeju Island, Korea, July 7-11, 2002
- [16] 박관수, 박상호, "자성유체를 이용한 Linear Pump의 설계와 제작", 대한 전기 학회 1999년도 하계 연구 발표회 논문집, pp. 37-39, 1999년 7월 19-21일, 용평리조트, 용평.
- [17] 박상호, 박관수, "MFL(Magnetic Flux Leakage)방법을 이용한 비파괴 검사 시스템의 최적 설계", 대한 전기 학회 부산지부 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 57-64, 2001년 5월 26일, 한국해양대학교.
- [18] 박상호, 박관수, 조성호, 유희룡, 노용우, "영구 자석을 이용한 지오메트리 피그용 캘리퍼 시스템의 검출 감도 향상에 관한 연구", 대한 전기 학회 2001년도 하계 학술 대회 논문집, pp. 626-628, 2001년 7월 18-20일, 용평.
- [19] 김동규, 유희룡, 조성호, 박상호, 박승수, 박대진, 구성자, 노용우, 박관수, "지오메트리 피그용 캘리퍼 시스템 개발", 대한 기계 학회 2001년도 춘계 학술 대회 논문집, pp. 228-234, 2001년 6월 27-29일, 제주대학교.
- [20] 박상호, 박관수, "3차원 형태의 결함에 따른 누설 자기장의 영향",

대한 전기 학회 부산지회 2001년도 추계 학술 대회 논문집, D34,
2001년 11월 10일, 부경대학교.

- [21] 박상호, 박관수 “지하 매설 가스관의 부식 및 결함 탐지를 위한 비
파괴 탐상 시스템 개발에 관한 연구”, 대한 전기 학회 부산지회 2002
년도 춘계 학술 대회 논문집, pp. 11-20, 2002년 5월 11일, 부산대학
교.
- [22] 박상호, 박관수 “자기 누설 비파괴 탐상 시스템에서 PIG의 이동이
검출신호에 미치는 영향”, 대한 전기 학회 2002년도 하계 학술 대회
논문집, pp. 879-881, 2002년 7월 10-12일, 제주도 롯데 호텔.
- [23] 박상호, 박관수, “속도기전력에 의한 와전류가 자기누설 탐상신호에
미치는 영향”, 2002년도 대한전기학회 부산지회 추계학술대회 논문
집, pp. 85-88, 2002년 11월 29일, 울산대학교 산학협동관
- [24] 박상호, 박관수, “자기누설 탐상 시스템에서 PIG의 주행에 따른 와
류가 결함의 깊이 신호에 미치는 영향에 관한 연구”, 2003년도 대한
전기학회 부산지부 춘계학술대회 논문집, pp. 158-164, 2003년 5월 17
일, 동의공업대학.
- [25] 박상호, 박관수 “속도 기전력에 의한 와전류가 MFL PIG Signal에
미치는 영향”, 2003년도 하계학술연구발표회 및 한·일공동심포지엄,
pp. 248-249, 2003년 6월 19일 - 21일, 한화리조트, 부산.

수 상 경 력

- [1] 우수논문상 수상, 박상호, 박관수, “MFL(Magnetic Flux Leakage)방
법을 이용한 비파괴 검사 시스템의 최적 설계”, 대한 전기 학회 부산
지부 2001년도 춘계학술대회.
- [2] 우수논문상 수상, 박상호, 박관수, “3차원 형태의 결함에 따른 누설
자기장의 영향”, 대한 전기 학회 부산지회 2001년도 추계 학술 대회.
- [3] 좌장추천 우수논문 선정, 박상호, 박관수, “자기 누설 비파괴 형상 시
스템에서 PIG의 이동이 검출신호에 미치는 영향”, 대한 전기 학회
2002년도 하계 학술 대회.

감사의 글

너는 배우고 확신한 일에 거하라[딤후3:14절]

이렇게 논문을 쓸 수 있게 해주신 하나님께 감사드립니다.

1993년 어렵고 힘들어 보였던 대학에 첫발을 내딛게 되었습니다. 공고를 졸업하고, 삼성전자에서 3년, 군대 3년이 지난다음에도 버리지 못한 학업에 대한 열정을 가지고 한국해양대학교 전기공학과에 들어왔습니다. 학부 2학년때 전기자기학과 전기기기를 통하여서 제게 학문의 열정을 심어주셨고, 그리고 10년이 지나는 동안 저를 학문의 길로 인도하시고 학문이라는 것을 깨달도록 지도해주신 박관수 교수님께 진심으로 머리 숙여 감사드립니다.

본 논문의 지도교수를 맡아서 처음부터 끝까지 심사하시고 다듬어 주신 김윤식 교수님께 감사를 드립니다. 그리고 마지막까지 저의 논문을 검토하여 부족한 부분들을 지적해 주신 조석제 교수님께 감사드립니다. 또, 바쁘신 중에 황금같은 귀중한 시간을 내어 심사하시고 조언을 아끼지 않은 박동국 교수님, 하윤수 교수님께 감사를 드립니다.

오늘의 제가 있도록 지도해 주신 길경석 교수님, 전태인 교수님, 이성근 교수님, 장낙원 교수님께 감사드리며, 지금은 경북대에 계시는 이민호 교수님께 감사를 드립니다.

논문을 완성시키기 위해 많은 도움을 준 전기기기연구실의 박은식, 서강, 원혁, 김동석 학우와 전력전자연구실의 전일영, 김종윤, 전내석, 김창국, 전수균, 유광재, 장민규 학우와 학부생 이형석, 이의수 학우에게도 감사를 드리고 인생에 영광이 있기를 바랍니다. 항상 동고동락했던 고전

압연구실과 전기제어연구실 학우들에게도 고마운 마음을 전합니다.

프로젝트를 통하여 논문에 많은 도움을 주신 한국가스공사 노용우 부장님, 유취룡 박사님, 조성호, 김동규, 박성수 연구원과 다른 연구원들께도 감사들 드리며 청주대 장평우 교수님, 송실대 이항범 교수님께도 감사를 드립니다.

저의 처음 외국행이었던 미국 뉴욕주에서 열린 The 14th COMPUMAG Conference에서 많은 도움을 주셨던 동아대 한성진 교수님, 중앙대 김형석 교수님, 강원대 최경 교수님께 감사드리며, 나이가 가라 폭포를 같이 볼 수 있게 해준 동아대 학우들에게도 고마운 마음을 전합니다.

저의 앞날에 대한 많은 관심을 가져준 전기공학과 동기, 후배들에게도 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

저를 낳아주시고 지금까지 힘들게 길러주시고 학업의 길은 선택하였을 때 든든한 지원군이 되어주셨던 부모님께 이 논문을 바칩니다. 언제나 자식 잘되라고 꾀은일도 마지않으신 부모님 사랑합니다. 그리고 나에게 많은 도움과 힘이 되어준 수진이 내외, 상원이 내외, 수경이 내외, 수연이, 군대에 가있는 막내 상준이에게도 고마운 마음을 전합니다.

나의 20년지기로 항상 내일을 자기일 보다 더 챙기는 성흠이 내외에게도 감사를 드리고 변영로교회 박문순 감독님과 박삼열 목사님, 성도님들께도 감사를 드리며 영진교회 담임목사님과 성도님께도 감사를 드립니다. 마지막으로 너무나 작은 이 지면을 통해 언급하진 못했지만 저를 알고 있는 모든 분들의 은혜에 감사를 드립니다.

2004년 1월 1일 새해 송구영신예배를 마치고 새해를 설계하면서