



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2013年 8月  
博士學位 論文

異種센서를 利用한 磁氣 벡터  
카메라 開發 및 應用

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金正玟

異種센서를 利用한 磁氣 벡터  
카메라 開發 및 應用

Development and Application of a Magnetic Vector  
Camera using Heterogeneous Magnetic Sensors

2013 年 8 月 23 日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金正玟

# 異種센서를 利用한 磁氣 벡터 카메라 開發 및 應用

指導教授 李 鎮 伊

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함

2013 年 4 月






朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 正 玟



# 金正玟의 博士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校 教授	<u>고낙응</u> 
委員	朝鮮大學校 教授	<u>조광현</u> 
委員	朝鮮大學校 教授	<u>이진이</u> 
委員	國防大學校 教授	<u>신기수</u> 
委員	(주)네드텍 部長	<u>전정희</u> 

2013年 6月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>제 1 장 서 론</b> .....	<b>1</b>
제 1 절 연구배경.....	1
제 2 절 연구목표.....	10
<b>제 2 장 이론적 배경</b> .....	<b>13</b>
제 1 절 누설자속탐상법 .....	14
1. 원리 .....	14
2. 유한요소해석에 의한 3차원 벡터장 .....	17
제 2 절 와전류탐상법.....	22
1. 원리 .....	22
2. 유한요소해석에 의한 3차원 벡터장 .....	26
제 3 절 자기벡터카메라용 자기센서의 검토.....	30
1. Hall 센서 .....	31
2. AMR 센서.....	34
3. GMR 센서.....	41
4. 특성 비교.....	44
제 4 절 자기카메라 및 자기벡터카메라 .....	48
1. 자기카메라의 원리.....	49
가. 스캔형 자기카메라.....	50
나. 면적형 자기카메라.....	52
다. 보빈형 자기카메라.....	55
2. 자기벡터카메라의 원리 .....	57
가. 스캔형 자기벡터카메라.....	58
나. 면적형 자기벡터카메라.....	64

제 3 장 이중센서를 이용한 자기벡터카메라.....	69
제 1 절 3축 AMR 센서를 이용한 벡터장 측정.....	70
1. 강자성체 강판 표면 결함 검출.....	71
2. 규소강판의 자구 관찰.....	76
제 2 절 Hall 센서와 AMR센서를 이용한 벡터장 측정.....	81
1. 강자성체 강판 표면 결함 검출.....	82
제 3 절 Hall 센서와 GMR센서를 이용한 벡터장 측정.....	84
1. 강자성체 강판 표면 결함 검출.....	84
2. 규소강판의 자구 관찰.....	89
제 4 장 자기벡터카메라를 이용한 비파괴검사 응용.....	93
제 1 절 냉연강판 개재물 검출.....	94
1. 배경.....	94
2. 전용 자기벡터카메라 개발 및 응용.....	96
3. 실험 및 고찰.....	99
제 2 절 소구경 배관 열교환기 내부 및 외부 부식 검출.....	102
1. 배경.....	102
2. 전용 자기벡터카메라 개발 및 응용.....	104
3. 실험 및 고찰.....	107
제 5 장 결 론.....	116
REFERENCE.....	119

# 표목차

Table 2 -1 Various conditions for numerical analysis (MFLT) .....	19
Table 2 -2 Various conditions for numerical analysis (ECT).....	28
Table 4 -1 Size and shape of each crack on a cupro-nickel 90/10 .....	107
Table 4 -2 Size and shape of each crack on a titanium alloy .....	108
Table 4 -3 Conductivity of the primary metal.....	112
Table 5 -1 Performance characteristic comparison:.....	118

# 도목차

Fig. 1 -1 Crack occurrence and progression .....	2
Fig. 1 -2 Propagation processes of cracks caused by stress and corrosion .....	2
Fig. 1 -3 Accident case: express train (ICE) accident in Germany .....	3
Fig. 1 -4 Accident case: hole in 737 forces Southwest to ground 79 planes.....	3
Fig. 1 -5 Accident case: UH-1H helicopter crash .....	4
Fig. 1 -6 Accident case: fuel tank explosion of natural gas city bus.....	4
Fig. 1 -7 Early detection of the damage by the NDT technique .....	5
Fig. 1 -8 Detectable effects that reach the inspection period .....	6
Fig. 1 -9 Magnetic camera examples .....	8
Fig. 1 -10 Principles of 3-D magnetic vector visualization .....	11
Fig. 2 -1 Principle of magnetic flux leakage.....	14
Fig. 2 -2 3D analysis model .....	18
Fig. 2 -3 Vector field of the magnetic flux density .....	20
Fig. 2 -4 Vector field of the magnetic flux density .....	20
Fig. 2 -5 Principles of eddy current testing.....	23
Fig. 2 -6 Magnetic field variation according to the induced current.....	25
Fig. 2 -7 3D analysis model .....	27
Fig. 2 -8 Vector field of the current density .....	28
Fig. 2 -9 Vector field of the current density .....	29
Fig. 2 -10 Hall effect.....	31
Fig. 2 -11 Hall sensor and its equivalent circuit .....	32
Fig. 2 -12 Signal amplifier circuit diagram for the Hall sensor .....	33
Fig. 2 -13 Most sensitive direction: Hall sensor vs. AMR sensor.....	34
Fig. 2 -14 Anisotropic magnetoresistive effect.....	35
Fig. 2 -15 Basic pattern and equivalent circuit of a vertical type AMR sensor .....	36
Fig. 2 -16 Full bridge pattern and equivalent circuit of a vertical type AMR sensor.....	37
Fig. 2 -17 Output characteristic curve for the vertical type AMR sensor .....	37
Fig. 2 -18 Signal amplifier circuit diagram for the vertical type AMR sensor .....	37
Fig. 2 -19 AMR variation with angle $\theta$ .....	38
Fig. 2 -20 AMR sensor barber pole bias .....	39
Fig. 2 -21 Output characteristic curve for the AMR sensor with barber pole bias .....	40
Fig. 2 -22 Signal amplifier circuit diagram for the AMR sensor with barber pole bias.....	40
Fig. 2 -23 Principles of GMR .....	41
Fig. 2 -24 Photograph and equivalent circuit of AA004-01.....	42

Fig. 2 -25 Output characteristic curve for AA004-01 .....	43
Fig. 2 -26 Output characteristic curve: Hall vs. V-AMR vs. B-AMR vs. GMR.....	45
Fig. 2 -27 Sensitivity: Hall vs. V-AMR vs. B-AMR vs. GMR.....	45
Fig. 2 -28 Hysteresis loop.....	47
Fig. 2 -29 Hysteresis error: Hall vs. V-AMR vs. B-AMR vs. GMR.....	47
Fig. 2 -30 Magnetic camera .....	49
Fig. 2 -31 Linearly Integrated Hall Sensor array .....	50
Fig. 2 -32 Scan-type magnetic camera block diagram.....	51
Fig. 2 -33 Area-type Integrated Hall Sensor array .....	52
Fig. 2 -34 Equivalent circuit of AIHaS .....	53
Fig. 2 -35 Area-type magnetic camera block diagram.....	54
Fig. 2 -36 Cylindrical-type Integrated Hall Sensor array .....	55
Fig. 2 -37 Bobbin-type magnetic camera block diagram.....	56
Fig. 2 -38 Combination of LIHaS and LIGaS .....	59
Fig. 2 -39 Block diagram for a scan-type magnetic vector camera .....	60
Fig. 2 -40 Scan-type magnetic vector camera software .....	61
Fig. 2 -41 3-Axis AMR sensor.....	62
Fig. 2 -42 Block diagram for a single sensor scan-type magnetic vector camera.....	63
Fig. 2 -43 Single sensor scan-type magnetic vector camera software .....	63
Fig. 2 -44 Principles of 3-D magnetic vector visualization .....	64
Fig. 2 -45 Structural superimpose for an area-type magnetic vector camera using AIHaS and AIA-S .....	65
Fig. 2 -46 Structural superimpose for an area-type magnetic vector camera using AIHaS and AIG-S .....	66
Fig. 2 -47 Block diagram for an area-type magnetic vector camera.....	67
Fig. 2 -48 Area-type magnetic vector camera software .....	68
Fig. 3 -1 Specimen (SS400).....	71
Fig. 3 -2 Experimental equipment for SS400 .....	71
Fig. 3 -3 Visualization of magnetic field vectors around artificial cracks .....	74
Fig. 3 -4 (a) Silicon steel specimen and (b) experimental equipment.....	76
Fig. 3 -5 Visualization of magnetic field vector around magnetic domain.....	79
Fig. 3 -6 Principle of magnetic domain wall movement.....	80
Fig. 3 -7 Experimental equipment .....	82
Fig. 3 -8 Visualization of magnetic field vectors around artificial cracks .....	83
Fig. 3 -9 Experimental equipment for SS400 .....	84
Fig. 3 -10 Visualization of magnetic field vectors around artificial cracks .....	87
Fig. 3 -11 Experimental equipment for silicon steel.....	89
Fig. 3 -12 Visualization of magnetic field vectors around magnetic domains .....	92
Fig. 4 -1 Applications of cold-rolled steel sheets.....	94
Fig. 4 -2 1-D Hall and GMR magnetic vector camera.....	96
Fig. 4 -3 1-D Hall and GMR magnetic vector camera equivalent circuit.....	96
Fig. 4 -4 Block diagram for a scan-type magnetic vector camera .....	97

Fig. 4 -5 Scan-type magnetic vector camera software.....	98
Fig. 4 -6 Specimen(cold-rolled steel sheet) .....	99
Fig. 4 -7 Experimental equipment for cold-rolled steel sheet.....	100
Fig. 4 -8 Visualization of magnetic field vectors around inclusion .....	101
Fig. 4 -9 Visualization of the magnetic flux density after post-processing.....	101
Fig. 4 -10 The pipe break accident of the Hamaoka atomic power plant .....	102
Fig. 4 -11 Combination of CIHaS and CIG-S.....	105
Fig. 4 -12 Block diagram for a bobbin-type magnetic vector camera .....	105
Fig. 4 -13 Cylindrical coordinate system.....	106
Fig. 4 -14 Small-bore piping specimen made of cupro-nickel 90/10.....	107
Fig. 4 -15 Small-bore piping specimen made of titanium alloy.....	108
Fig. 4 -16 Experimental equipment .....	109
Fig. 4 -17 Bobbin-type magnetic vector camera software.....	109
Fig. 4 -18 Fequency vs. Standard depth of penetration .....	111
Fig. 4 -19 Visualization of magnetic field vectors around stress corrosion cracks in the copper alloy piping specimen.....	113
Fig. 4 -20 Visualization of magnetic field vectors around stress corrosion cracks in the titanium alloy piping specimen.....	114
Fig. 4 -21 Characteristic comparison of the signal-to-noise ratio.....	115

## 기호 설명

AIHaS	Area Integrated Hall Sensor array
AMR	Anisotropic Magnetoresistive
B-AMR	AMR Barber Pole Bias
CMRR	Common Mode Rejection Ratio
DAQ	Data Acquisition device
ECCS	Emergency Core Cooling System
ECT	Eddy Current Testing
FC	Flux Concentrators
FEM	Finite Elements Method
FSO	Full Scaled Operational Region
GMR	Giant Magnetoresistive
HPCI	High Pressure Coolant Injection
IC	Integrated Circuit
ISI	In-Service Inspection
LIHaS	Linearly Integrated Hall Sensor array
MFL	Magnetic Flux Leakage
MFLT	Magnetic Flux Leakage Testing
MR	Magnetoresistive



MT	Magnetic particle Testing
MURX	Relative permeability
NDT&E	Nondestructive Testing and Evaluation
PSI	Pre-Service Inspection
PT	Penetrant Testing
RHRS	Residual Heat Removal System
RMS	Root Mean Square value
RSVX	Electrical resistivity
SCC	Stress Corrosion Cracking
V-AMR	Vertical type AMR
VLSI	Very Large Scale Integration

## 아래 첨자

$B$	Magnetic flux density[Wb/m <sup>2</sup> ]
$B_G$	The magnetic flux density measured value by the GMR sensor
$B_{MVC}$	The magnetic flux density measured value by the Magnetic Vector Camera
$B_{VA}$	The magnetic flux density measured value by the Vertical type AMR sensor
$B_r$	Residual Magnetic Flux Density[Wb/m <sup>2</sup> ]
$C_1, C_2$	Coefficient
$G$	Gauss(1G = 1Oe = 10 <sup>-4</sup> T)
$H$	Magnetic flux density[A/m]
$H_c$	Coercive force
$H_m$	Magnetic Saturation Point
$J$	Current density[a/m <sup>2</sup> ]
$J_s$	Current density of source[a/m <sup>2</sup> ]
$J_e$	Current density of eddy current[a/m <sup>2</sup> ]
$M$	Magnetization[A/m]
$Oe$	Oersted
$p$	Input voltage
$T$	Tesla
$V_{cc}$	Input voltage

$V_G$	Output voltage of GMR sensor
$V_H$	Hall Voltage
$V_{out}$	Output voltage
$V_{VA}$	Output voltage of Vertical type AMR sensor
$x_m$	Magnetic susceptibility
$\Delta d_s$	The distance between heterogeneous sensor
$\mu$	Permeability[H/m]
$\mu_0$	Permeability in free space[H/m]
$\mu_r$	Relative permeability
$\sigma$	Conductivity[V/m][S/m]

# ABSTRACT

## Development and Application of a Magnetic Vector Camera using Heterogeneous Magnetic Sensors

Jungmin Kim  
Advisor: Prof. Jinyi Lee, Ph.D.  
Dept. of Control and Instrumentation Eng.  
Graduate School of Chosun University

Some of the direct causes of damage to a wide range of structures from large-component structures such as airplanes, thermoelectric and nuclear power plants, oil refineries, and manned space stations, to ultra-small members such as integrated circuit (IC) packages and very large scale integration (VLSI), are material degradation, corrosion, and the initiation and growth of fatigue. In particular, defects within large-component structures may cause huge losses of human lives, economic losses, pollution, and damage to the reputation of a nation. If such defects are detected at an early stage and steps such as maintenance and replacement of components are taken to correct or avoid such damage, not only is safety guaranteed during the design lifetime but the lifespan can also be extended from the perspective of damage tolerance.

The initiation and growth of defects can be divided into cases where introduced defects grow and cases where defects are created and grow by a random cause after the operation of the structures or devices. Further, in each case, harmful defects are to be detected and fixed through pre-service inspection (PSI) and in-service inspection (ISI). With respect to PSI and ISI, among the non-destructive tests and evaluation techniques that detect whether a defect exists and if it does, then detect its location, size, form, and dispersion as well, techniques that are better at detecting surface flaws are methods that use electromagnetic principles, such as

magnetic particle testing method (MT), magnetic flux leakage testing method (MFLT), and the eddy current testing method (ECT) and surface inspection methods like the penetrant testing method (PT).

The magnetic particle testing method requires pre-conditioning and post-conditioning processes before and after the test and continuously uses magnetic particles that are consumable, and although it can assess the length of a flaw, its disadvantage is that it cannot assess the depth or the width of a defect. The magnetic flux leakage inspection method is more advanced than the magnetic particle inspection method in terms of quantitative evaluation and can detect flaws and their location, form, and size by measuring the dispersion of the magnetic field via magnetic sensors; this method is being developed further and applied in developed countries such as Japan, Germany, and the U.S. However, because the magnetic field dispersion is measured using a high-accuracy scanner, problems such as detection speed, spatial resolution, and the liftoff limit along with the temperature dependence arise and need to be dealt with quickly. Moreover, the test cannot be applied in cases of paramagnetic material or metals when ferromagnetic materials are mixed with paramagnetic materials. The eddy current testing method energizes the subject with an induced current, and by measuring the impedance difference according to whether or not a flaw exists, it can evaluate whether a flaw exists as well as its location, form, and size. However, because this method uses the same scan method as the MFLT, there is a limit to the detection speed and spatial resolution, and arrays numerous sensors taking into consideration the inter-sensor interference. Moreover, in cases where ferromagnetic materials are mixed with a paramagnetic material, the presence of sectional magnetic material may be misunderstood as a mitotic defect or a large defect may be mistaken for a sectional magnetic material.

The penetrant testing method uses osmotic pressure; it is used in the diaphragm and the rotor journals in nuclear power plants. However, similar to the magnetic particle inspection method, this method also requires pre-conditioning and post-cleaning; further, it is hard to

implement automation or quantitative evaluation by using this method.

Therefore, a national brand of non-destructive testing equipment, which does not use consumables such as magnetic particles; does not need pre-conditioning or post-processing for tests; has low power consumption; can detect surface flaws, dihedral defects, and internal defects within metallic structures composed of ferromagnetic, paramagnetic, or a mixture of ferromagnetic and paramagnetic materials at high speed and high spatial resolution in a wide area irrespective of the structural form; can be interpreted quantitatively; and most of all, has excellent field applicability, needs to be developed using only domestic technology. The technology developed for this purpose is the magnetic camera.

The magnetic camera, which observes the dispersion of the magnetic field, is one of the cutting-edge IT technologies that can be applied in the field of non-destructive tests, and thus far, many studies on the development of such a technology have been conducted. The flaw detection capability of the magnetic camera depends on the sensor size (0.2 mm), array spacing (0.52~1.04 mm), and sensitivity (approx. 100  $\mu$ T), and as a result, the use of this camera is limited to the detection and evaluation of flaws that are more than 1~2 mm in length. Therefore, according to the current camera technology, flaws that are more than 2 mm in length can be detected, and to detect flaws that are 50~500  $\mu$ m in length, a nano-magnetic sensor implementation is mandatory for increasing the spatial resolution and sensitivity of the sensor. Further, in the quantitative evaluation of defects, because only the vertical dispersion of the magnetic field of the specimen is utilized, if the diversification of information, or real-time visualization of the three-dimensional magnetic field vector is realized and a non-destructive quantitative evaluation algorithm is developed using the abovementioned technology, relatively smaller flaws are expected to be detected and evaluated with greater accuracy.

Therefore, in this thesis, we aim to develop the technology that measures three-dimensional magnetic field vectors to acquire more information, array more sensors, and have greater spatial resolution, higher sensitivity, and lower noise ratio to detect

micrometer-length flaws including temperature aging.

Meanwhile, a three-dimensional magnetic field vector dispersion can be realized by scanning the available three-dimensional magnetic sensors onto two-dimensional flat surfaces and reconstructing it by acquiring the triaxial magnetic field vector's spatial dispersion. The core of such technology is in semiconductor processes that accurately align the sensor-type face of the sensors of the same type and specification along the XYZ-orthogonal coordinate axes. Hence, to align tens and thousands of magnetic sensors in a matrix form, limitations with respect to spatial resolution and minimum wiring must be solved.

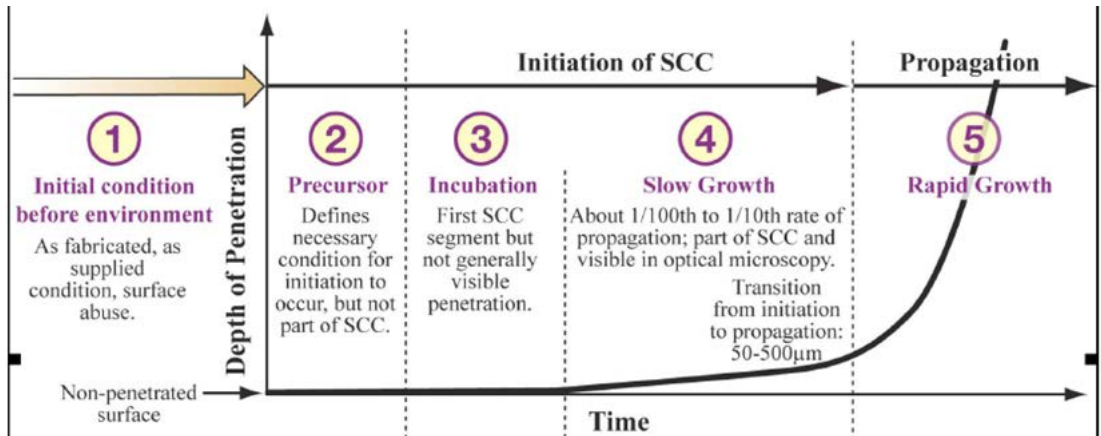
Therefore, in this paper, we propose a technique for acquiring a real-time video of a three-dimensional magnetic vector by expanding the existing two-dimensional sensor array technology. In other words, the existing real-time magnetic field visualization device (magnetic camera) densely arranges hall sensors two-dimensionally along a wafer, and by cross-wiring power cables and signal cables along the wafer according to each one's original patented technology, the components vertical of the sensor can be visualized in real time. Further, according to the original technology described above, along with hall sensors, magneto resistance sensors (MR, GMR, and AMR) can be arranged using similar technology. Meanwhile, unlike the hall sensors, the MR, GMR, and AMR sensors measure the components horizontal of the sensor surface; therefore, by using a dual structure that arranges hall sensors for the Z-axis measurement and magneto resistance sensors for the XY-axis measurement, an X-Y-Z-axis triaxial magnetic field vector component can be measured using the dense array.

# 제 1 장 서 론

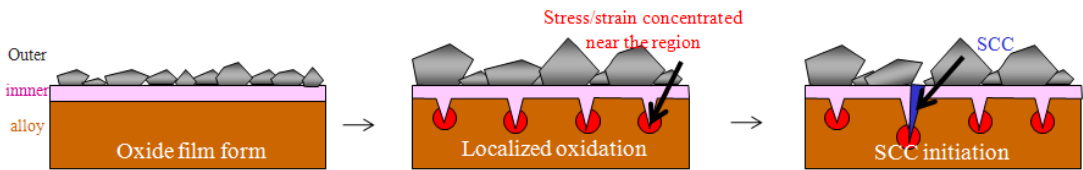
## 제 1 절 연구배경

항공기를 비롯하여 화력, 원자력 발전, 석유정제, 유인 우주스테이션, 로켓 엔진 등의 대형 기기 구조물로부터, 집적회로(IC, Integrated Circuit) 패키지, 초고밀도 집적 회로(VLSI, Very Large Scale Integration) 등의 초소형부재에 이르기까지 손상의 직접적인 원인 중 하나는 재료열화, 부식, 피로(이하 결함)의 발생 및 성장에 의한 것이 많다. 이때 결함의 발생 및 성장은 Fig. 1-1에 나타낸 바와 같이 Precursor 단계에서 Incubation 단계를 거쳐 Slow growth 및 Rapid Growth 단계를 거치게 된다. 여기에서는 특히 부식(Corrosion)과 응력(Stress)이 공존하는 경우, 즉 응력부식균열(SCC, Stress Corrosion Cracking)을 예로 든 것이다. 해당 구조물이 고온, 고압, 부식 및 피로 환경에 노출되기 전 단계, 즉 생산, 조립 및 운송 도중에 발생한 손상은 비교적 경미한 것으로서, 사용 전 검사(PSI, pre-service inspection)를 통하여 사용 유무를 판단할 수 있다. 또한, 사용이 가능하다고 판단된 것은 결함을 검출할 수 없는 단계인 Initial condition before environment 단계에 해당된다. 한편, SCC 생성의 초기단계인 Precursor에서는 Fig. 1-2에 나타낸 바와 같이 산화막이 성장한 후, 산화막과 산화막 사이의 미소한 틈새로 응력 및 변형이 집중(stress/strain concentrated near the region)되는 한편, 국부적인 산화(localized oxidation)가 발생하게 된다. 이때, 외부에서 가해지는 응력(stress)에 의하여 산화막의 일부가 탈락되고, 해당 영역에서 또 다른 산화막이 발생하는 Incubation 단계에서 SCC가 발생한다. 이러한 초기 SCC는 온도, 하중, 부식 등의 환경에 의하여 점차 진전하게 된다. 이러한 결함은 초기 발생에서부터 길이가 50~500  $\mu\text{m}$  까지는 비교적 느리게 성장(slow growth)하게 되는데, 일반적으로 Rapid Growth 단계에 비하여 약 1/100~1/10 정도의 속도로 진전하게 된다. 한편, 운용중인 기기 구조물의 incubation, slow growth, rapid growth의 각 단계에서의 결함을 검사하는 것을 특히 운용 중 검사(ISI, in-service inspection)라 한다.[1-10]



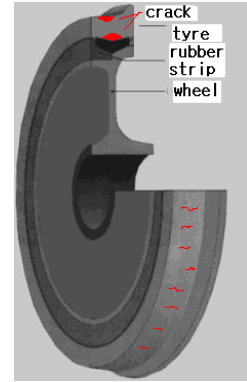


**Fig. 1 -1 Crack occurrence and progression**  
(자료출처: Roger W. Staehle, 2010)



**Fig. 1 -2 Propagation processes of cracks caused by stress and corrosion**  
(자료출처: T. Shoji & Y. Takeda, 2010)

대형 기기 구조물에 존재하는 SCC를 포함한 피로 및 부식 등은 결과적으로 막대한 인명피해, 경제적 손실, 환경오염 및 국가적 위상 추락을 유발할 수 있다. 한 예로, 1998년 6월 3일 독일 Eschede에서 발생한 ICE (Inter-City Express) 고속열차 탈선사고는 동력차 뒤에 위치한 1번 객차의 차륜 내측부위에 발생한 결함으로 인한 차륜 파괴에 의한 것으로 신뢰성 있는 차륜 진단 시스템이 있었다면 일어나지 않았을 사고이며, 결과적으로 사망 101명, 중상자 108명의 인명피해를 일으킨 바 있다.[11]



**Fig. 1 -3 Accident case: express train (ICE) accident in Germany**  
 (자료출처: 철도안전정보포탈 사고사례자료)



**Fig. 1 -4 Accident case: hole in 737 forces Southwest to ground 79 planes**  
 (자료출처: [http://www.airtravelinfo.kr/xe/air\\_news/54407](http://www.airtravelinfo.kr/xe/air_news/54407))

또한, 2011년 4월 1일 운항 중이던 미국 사우스웨스트항공 737기가 항공기 동체 상단에 가로 12.7 mm, 세로 2.5 mm 정도의 구멍이 발생하여 비상 산소 호흡기를 사용해야 할 만큼 위급한 상황으로 인하여 인근 유마(Yuma)공항에 비상 착륙하는 사고가 발생하였다. 사고의 원인은 노후 된 비행기의 정비 불량이며 사고 후 동일 기종 79대중 5대에서 유사균열이 발견된 바 있다.

이러한 사고 사례는 국내에서도 발생하고 있다. 한 예로, 2008년 2월 20일에 육군 204 항공대대 소속 UH-1H 헬기가 응급환자 긴급 후송지원 요청을 받고 비행에 나섰으며, 후송 후 복귀 도중 추락하여 육군 장병 7명이 사망하는 사고가 발생하였다. 도입된지 오래되어 노후된 UH-1H 헬기는 1990년 이후 10여건의 추락 사고로 30여명의 탑승자가 사망하였다.



**Fig. 1-5 Accident case: UH-1H helicopter crash**

(자료출처: 연합뉴스, 2008년 2월 21일)



**Fig. 1-6 Accident case: fuel tank explosion of natural gas city bus**

(자료출처: 연합뉴스, 2010년 8월 9일)

또한, 2010년 8월 9일 서울특별시 성동구 행당역 인근에서 천연가스(CNG)를 연료로 사용하는 시내버스의 연료탱크가 폭발하는 사고가 발생하여 17명이 부상을 입었고, 1명은 발목이 골절되는 중상을 입었다. 사고의 원인은 차량의 노후화에 따른 연료탱크 손상으로 인한 연료밸브 오작동이었으며, 사고 후 동일 기종의 전 차량은 신형으로 대차된후 폐차되었다.

한편, 이들 손상을 조기에 발견하여 정비 및 교체등과 같은 조치를 취하면, 설계수명까지 안정적 사용은 물론 손상허용공학(Damage Tolerance)적 관점에서 수명을 연장(Fig. 1-7, Fig. 1-8)하여 사용할 수 있다.[12] 일반적으로 손상허용공학(Damage Tolerance)에서는 피로시험을 통하여 구조물의 허용할 수 있는 결함크기(tolerance size, Fig. 1-8에서는 critical crack size로 표기됨)를 결정한다. 또한, 구조물에 존재하는 결함의 크기가 허용크기를 초과하면 급격히 진전(rapid growth)하여 파단에 이르게

된다. 따라서, ISI 검사주기( $N_{INSP}$ )는 Fig. 1-8에 나타낸 바와 같이 검출가능결함크기 ( $a_{INSP}$ , Inspectable crack length)에서 허용결함크기(critical crack size)에 이르는 시간(life from inspectable crack length to safety limit)의 50%를 기준으로 한다. 따라서, System 1 (Fig. 1-8(a))에 비하여 보다 작은 손상을 검출하고 정량적으로 평가할 수 있는 System 2(Fig. 1-8(b))를 이용하여, 검사신뢰도의 고도화( $a_{INSP}$ 의 최소화) 및 검사주기의 장기화( $N_{INSP}$ 의 확장)가 가능하다. 즉, slow growth 단계의 보다 작은 손상을 검출하고 평가함으로써 (1) 검사결과에 보다 높은 신뢰성을 부여할 수 있으며, (2) 예측할 수 없었던 작은 손상도 검출할 수 있다는 장점을 가지는 한편, (3) 검사주기의 확장에 의한 막대한 경제적 이득(검사 경비 및 시간의 절감, 검사를 위한 운전정지 횟수 감축)을 얻을 수 있게 된다.

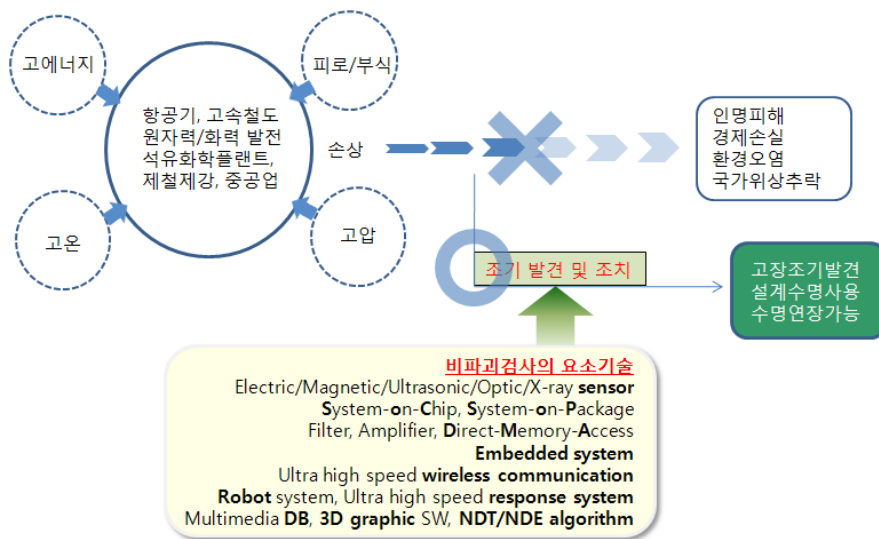


Fig. 1 -7 Early detection of the damage by the NDT technique

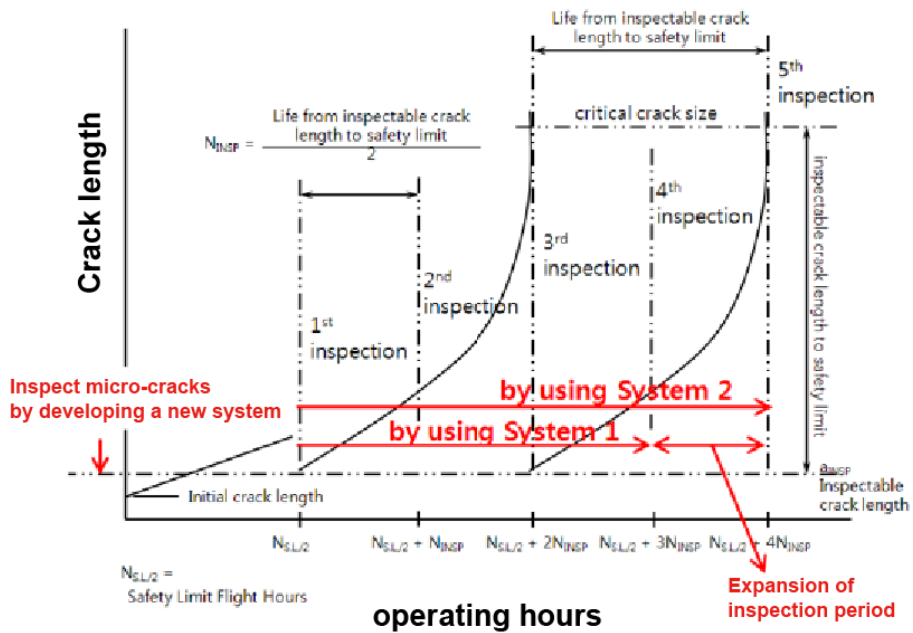
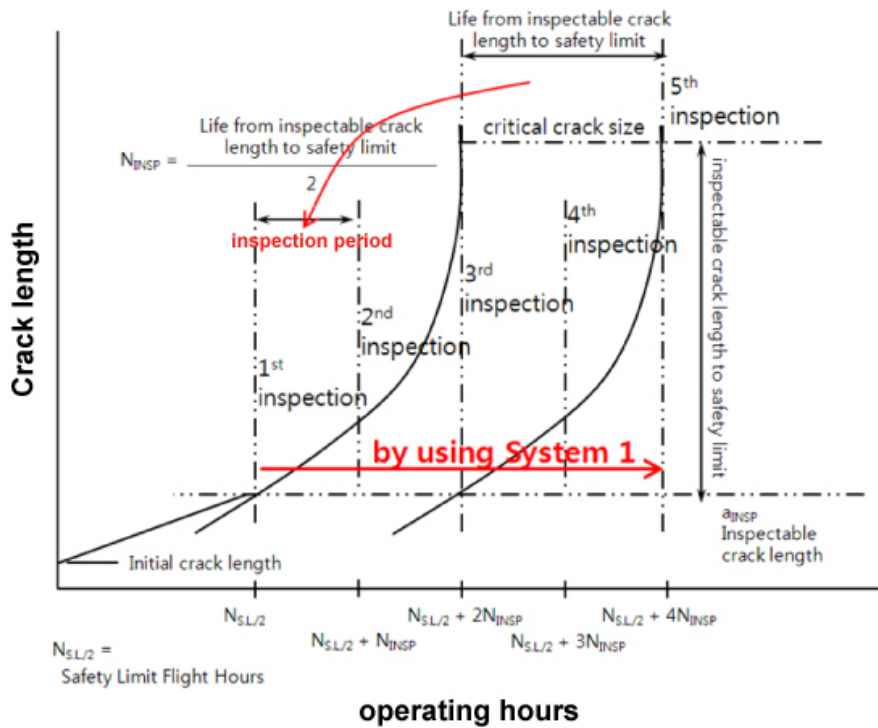


Fig. 1-8 Detectable effects that reach the inspection period

한편, 전술한 바와 같이 결함의 발생과 성장은 (1) 제조과정에 있어서 도입된 결함이 성장하는 경우와, (2) 가동 후에 임의의 원인에 의하여 발생하고 성장하는 경우로 나누어 질 수 있으며, 각각에 대하여 PSI와 ISI에 의하여 적절하게 유해한 결함을 검출하고 보수하도록 하고 있다. PSI 및 ISI에 있어서 소재, 부품 및 제품 등을 파괴하지 않고, 결함의 유무, 위치, 크기, 형상, 분포상태 등을 조사하는 비파괴검사 및 평가기술(NDT&E, Nondestructive Testing and Evaluation)에 있어서, 보다 빠른 속도(Real time)로, 보다 작은 결함을, 시험편의 세정 없이, 비접촉식으로 측정하면서, 결함 깊이를 정량 평가하고, 데이터베이스화할 수 있는 새로운 기술이 필요하다.

비파괴검사 및 평가기술 중 특히 표면결함의 검출에 유리한 기법이 자분탐상법(MT, magnetic particle testing), 누설자속탐상법(MFLT, magnetic flux leakage testing), 와전류탐상법(ECT, eddy current testing)과 같은 전자기적인 원리를 이용한 검사법과 침투탐상법(PT, penetrant testing)과 같은 표면탐상법이다.

자분탐상법(MT)은 한 예로 원전 2차 계통설비의 터빈 블레이드 표면검사, 다이아프램, Rotor Coupling 표면과 같은 터빈 설비 검사에 적용되고 있으나, 검사 전 후에 전처리 및 후처리 공정이 필요하며, 소모품인 자분을 지속적으로 활용하고 있으며, 결함의 길이는 알 수 있으나 폭과 깊이와 같은 정량평가가 곤란하다는 단점이 있다.[13-15] 누설자속탐상법(MFLT)은 MT에 비하여 정량 평가면에서 보다 발전된 형태로서, 자기 센서에 의하여 자기장의 분포를 측정함으로써 결함의 유무, 위치, 형상 및 크기 등을 평가할 수 있는 기술로써, 일본, 독일 및 미국등과 같은 선진국을 중심으로 개발 적용되고 있다. 그러나, 고정도의 스캐너에 의하여 자기장의 분포를 측정하기 때문에 탐상속도, 공간분해능, 리프트오프의 한정 및 온도 의존성 등은 시급히 해결해야 할 문제이며, 특히 상자성체 또는 강자성체와 상자성체가 혼재된 금속의 경우에는 적용하기 힘들다는 단점이 있다.[16-22] 와전류 탐상법(ECT)은 시험체에 유도전류를 인가하고, 결함 유무에 따른 임피던스의 차이를 측정함으로써, 결함의 유무, 위치, 형상 및 크기 등을 평가할 수 있는 기술이다.[23-26] 그러



나, MFLT와 마찬가지로 스캔방식을 적용하고 있기 때문에 탐상속도 및 공간분해능에 한계가 있으며, 센서간의 간섭에 기인하여 여러 개의 센서를 배열하는 데 한계가 있다. 또한, 강자성체와 상자성체 조적이 혼재되는 경우(오스테나이트계 스테인레스강, 니켈코팅 인코넬)에는 국부적인 자성체의 존재를 유사결함으로 오해 또는 큰 결함을 국부적인 자성체의 존재로 오해할 수 있다.[27, 28] 침투탐상법(PT)은 삼투압현상을 이용한 것으로써, 원전에서는 다이아프램 및 Rotor Journal등에서 적용하고 있다.[29] 그러나, 자분탐상법과 마찬가지로 전처리 및 후처리 공정이 필요하며, 정량평가 및 자동화가 곤란하다.

따라서, 자분과 같은 소모품을 사용하지 않고, 검사를 위한 전처리 및 후처리 공정을 없앨 수 있으며, 적은 전력소모로, 강자성체, 상자성체 및 강자성체와 상자성체가 혼재된 금속의 구조물에 존재하는 표면결함, 이면결함, 내재결함을 구조물의 형상에 관계없이, 넓은 영역에서 고속, 고공간분해능으로 탐상 가능하고, 정량 해석도 가능하고, 무엇보다 현장 적용성이 탁월한 새로운 순수 국산 원천 기술에 의한 고유 브랜드의 비파괴검사장비를 개발해야 한다. 이러한 소기의 목적을 달성하기 위하여 개발된 기술이 자기카메라(Magnetic camera)이다.[30-37]

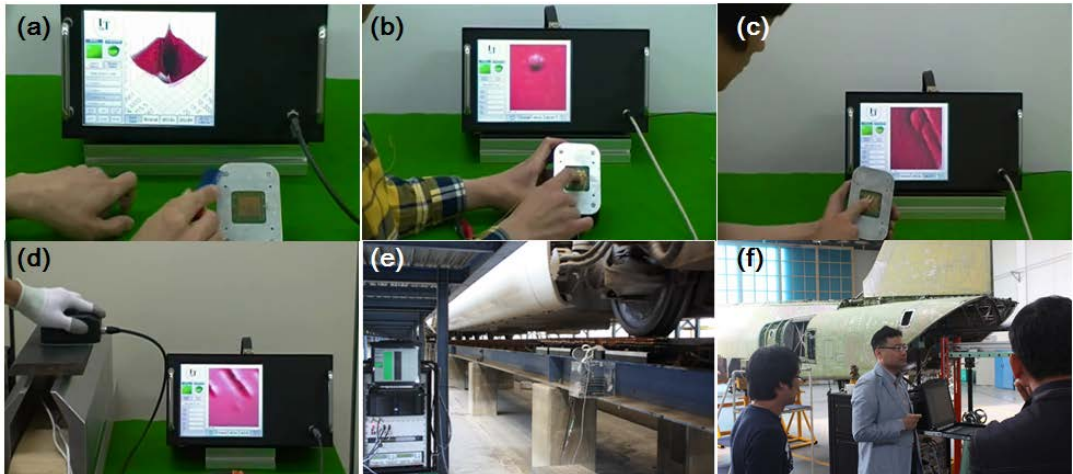


Fig. 1 -9 Magnetic camera examples

자기카메라 기술은 자기장의 분포를 관찰하여 비파괴검사 분야에 적용할 수 있는 첨단 IT 기술의 하나로서, 지금까지 많은 연구를 통하여 원천기술을 확보하고 있다. 한 예로, Fig. 1-9는 지금까지 개발된 자기카메라 기술의 예를 나타낸다. Fig. 1-9(a)는  $32 \times 32$ 개의 Hall 센서를 2차원으로 배열하여 영구자석 주변의 자기장을 실시간으로 가시화한 예를 나타낸다. 또한, Fig. 1-9(b)는 약 100 Hz 의 교류 자기장을 가시화하고 있는 영상이다. 현재까지 20 kHz 까지의 전자기장의 분포를 5~6 frames/sec 의 속도로 가시화할 수 있는 기술이 개발되어 있다. Fig. 1-9(c)는 페이퍼 클립의 잔류자화를 영상화한 것으로서, 미소영역의 미소자기장을 실시간으로 검출하고 가시화할 수 있음을 보여준다. 이러한 기술은 비파괴검사에 응용될 수 있으며, 한 예로 Fig. 1-9(d)는 자화된 강자성체 구조물의 표면결함을 실시간으로 검출하고, 평가할 수 있음을 보여준다. 또한, Fig. 1-9(e)는 한국형고속열차(KTX)의 차륜의 건전성을 실시간으로 평가하기 위한 시스템으로서, 약 100만개의 Hall 센서가 레일에 매립되어 고속열차가 센서영역을 통과할 때 차륜담면의 건전성을 전수 검사할 수 있다. Fig. 1-9(f)는 장기운영항공기의 인테이크(Intake, Air inlet duct)를 검사하기 위하여 개발한 스캔형 자기카메라의 한 예를 보여준다.

이렇듯 국내에서 개발되어 세계적인 원천기술을 보유하고 있는 자기카메라의 결함탐상능력은 센서크기(0.2 mm), 배열간격(0.52 ~ 1.04 mm) 및 감도(약  $100 \mu T$ )에 의존하며, 결과적으로 길이 1 ~ 2 mm 이상인 결함의 탐상 및 평가에 국한되어 활용되어지고 있다. 따라서, 현재의 자기카메라 기술에 의하면, 그림 1의 ⑤Rapid Growth 단계인 2 mm 이상의 결함을 검출할 수 있으며, ④Slow Growth 단계인 50~500  $\mu m$  의 결함을 검출하기 위해서는 센서 공간분해능과 감도 향상을 위한 연구가 필수적이다. 또한, 결함을 정량 평가할 때, 시험편에 수직인 방향의 자기장의 분포만을 활용하므로, 정보의 다양화, 즉 3차원 자기장 벡터의 실시간 가시화 및 이를 이용한 비파괴정량해석 알고리즘을 개발한다면, 보다 작은 결함을 보다 정확하게 검출하고, 평가할 수 있을 것으로 기대하고 있다.



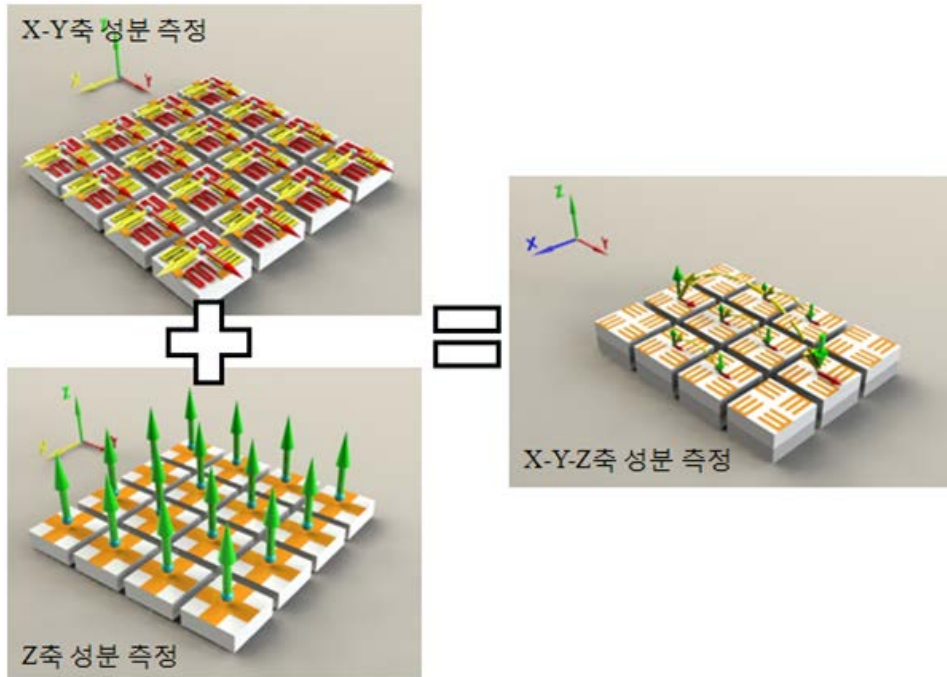
## 제 2 절 연구목표

본 논문은 경년열화를 포함한 마이크로미터 단위의 손상을 검사하기 위해서 (1) 보다 높은 감도 및 낮은 잡음비로, (2) 보다 높은 공간분해능을 가지면서, (3) 보다 많은 센서를 배열하는 한편, (4) 더 많은 정보를 취득하기 위한 3차원적인 자기장 벡터의 분포를 측정하는 원천기술을 개발하는 것을 그 목적으로 한다.

한편, 3차원 자기장 벡터의 분포는 시판되는 3차원 자기센서(예를 들면 AK8973S, Asahi Kasei Microdevices, 2007)를 2차원 평면상에서 스캔하여 3축 자기장 벡터의 공간적인 분포를 획득하여 재구성함으로써 얻을 수 있다. 이러한 기술의 핵심은 동일한 종류 및 사양의 센서의 감자면(most sensitive direction)을 XYZ-직교좌표축에 정밀하게 정렬하는 반도체 공정 기술이며, 결과적으로 수천~수만 개의 3차원 자기센서를 matrix 형태로 배열하기 위해서는 공간분해능의 한계 및 배선의 최소화를 해결해야 한다. 한 예로 시판중인 상기 AK8973S를 이용하여  $32 \times 32$ 개의 정방형으로 배열할 경우에 최소 2.5 mm의 공간분해능에  $80 \times 80 \text{ mm}^2$ 인 정방영역의 자기장 벡터를 획득할 수 있으며, 한 예로 현재의 자기카메라의 공간분해능인 780  $\mu\text{m}$ 를 획득할 수 없다. 또한, 상기 AK8973S는 15개의 핀으로 구성되어 있으므로, 타 연구그룹의 방식대로라면  $32 \times 32$ 개의 정방형 배열에서는 총 15,360개의 배선을 필요로 하며, 결과적으로 최소 16층 이상의 PCB가 필요하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 본 연구그룹에서 보유하고 있는 종래의 2차원 센서배열 기술을 확대하여 2차원 및 3차원 자기벡터 영상을 실시간으로 획득하는 방안을 제안하였다. 즉, 종래의 실시간 자기장 가시화 장치(자기카메라)는 Hall 센서를 웨이퍼상에 2차원으로 조밀하게 배열하고, 각자 고유의 원천특허기술에 의하여 웨이퍼상에 전원선 및 신호선을 교차 배선함으로써, 센서면에 수직방향의 성분을 실시간으로 가시화할 수 있다. 또한, 본 원천기술에 의하면 Hall 센서뿐만 아니라 자기저항센서(GMR, AMR)도 유사한 기술로 배열 가능하다. 한편, GMR, AMR 센서 등은 Hall 센서와는 달리 센서면에 수평방향의 성분을 측정하므로, Fig. 1-10의 좌측 하단

에서 보는 바와 같이, Z축 측정을 위한 Hall 센서배열과 좌측 상단에서 보는 바와 같이 XY축 MR센서배열의 2중 구조에 의하여 X-Y-Z축 3차원 자기장 벡터 성분을 조밀한 배열로 측정(Fig. 1-10 우측)할 수 있다.



**Fig. 1-10 Principles of 3-D magnetic vector visualization**

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 제1장은 서론이며, 제2장에서는 본 3차원 자기벡터카메라(Magnetic vector camera)가 비파괴검사분야에서 활용될 예정인 누설자속 탐상법 및 와전류탐상법의 원리를 간단히 소개한다. 이때 수치해석에 의하여 결함의 존재 및 형상에 따라 3차원 벡터장이 어떠한 형태로 나타나는지 확인하였다. 또한, Z축 성분을 검출하기 위한 Hall 센서 및 X 축 또는 Y 축 성분을 검출하기 위한 AMR, GMR 센서의 이론적 고찰, 감도, 선형성, 측정범위 및 히스테리시스 특성에 대하여 구체적으로 서술하였다. 또한, Hall 센서와 AMR, GMR 센서에 의하여 측정될 자기장 벡터의 타당성을 검토하기 위하여 3축 AMR 센서에 의한 자기장 벡터를 비교 분석하였다. 제2장의 마지막 절에서는 자기카메라의 원리 및 자기벡터카메라

의 원리를 각각 서술하고, 센서의 배열에 따라 분류되는 스캔형, 면적형 및 보빈형 자기카메라 및 자기벡터카메라에 대하여 소개하였다.

제3장에서는 이중센서를 이용한 자기벡터카메라에 의한 강자성체 강판 표면 결함 검출 및 규모강판의 자구관찰에 대해 서술한다.

제4장은 스캔형 자기벡터카메라에 의하여 냉연강판 개재물을 검출한 예와 함께, 소구경 배관 열교환기 내부 및 외부 부식을 검출한 예를 제시함으로써, 본 3차원 자기벡터카메라의 유용성을 검증하였다.

제5장은 결론이다.

## 제 2 장 이론적 배경

비파괴검사방법 중 MFLT와 ECT는 전자기적 현상을 이용하여 검사 대상체의 결함을 검출하고 평가하는데 유용한 검사방법이다. 결함 주변에서의 전자기적 현상을 정성적으로 표현하고 정량적으로 평가하기 위해서는 결함에 의한 전자기장의 변화를 관찰할 필요가 있다. MFLT는 강자성체인 검사 대상체에 인가한 자기장의 변화를 검출하는 방법으로 정자기문제(magnetostatic problem)로 인식하여 해석할 수 있으며, ECT는 도체인 검사 대상체에 인가한 전기장에 의한 변화를 검출하는 방법으로 와전류 문제로 인식하여 해석할 수 있다.

본 연구에서는 결함 주변에 발생하는 자기벡터 분포를 해석하기 위해 유한요소법(FEM, Finite elements method)을 이용하였다. FEM은 연속체인 대상물을 유한개의 요소로 분할하여 각 영역에 관하여 근사해법에 기하여 계산을 해나가는 수치계산 방법이다. 복잡한 단성, 구조해석 등의 문제를 해결하기 위해 시작되었으나, 1970년대 이후 구조해석뿐만 아니라 유체해석, 열 해석, 자장해석 등에서 가장 널리 보급된 수치 해석 방법으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 상용화된 수치해석프로그램인 ANSYS(Ver.11.0 SP1 UP20070830, EMAG)를 이용하여 해석하였다. 또한, 수치해석 결과를 검증하고 이중 자기센서를 이용한 자기벡터카메라의 유용성을 확인하기 위해 Hall 센서, GMR센서 및 AMR센서를 이용하여 실증 실험을 하였다.

본 장에서는 FEM에 의한 수치해석의 결과를 소개하고, 실증 실험에 사용한 각 자기센서의 이론적 고찰, 감도, 선형성, 측정범위, 바이어스 및 히스테리시스오차, 구성회로 및 배율 계산법에 대하여 서술하였으며, 자기벡터카메라의 원리뿐만 아니라 자기벡터카메라의 모태인 자기카메라의 원리도 서술하였다.

# 제 1 절 누설자속탐상법

## 1. 원리

강자성체인 검사 대상체에 자기장을 인가하여 자화시키면 검사대상체에 자속 (magnetic flux)의 흐름이 발생한다. 이때, 결함, 불순물 등으로 인해 자속의 흐름이 흐트러지게 되고, 인가된 자기장에 의해 검사 대상체의 자속밀도(단위 면적에서 자속의 양, magnetic flux density)가 높으면 자속의 일부가 외부공간으로 누설된다. 이것을 누설자속(MFL, magnetic flux leakage)이라고 한다. 이와 같은 MFL의 분포와 강도를 자기 센서에 의하여 측정하고, 전기적 신호를 변환시켜 결함, 불순물 등을 검출 및 평가하는 방법이 누설자속탐상법(MFLT, magnetic flux leakage testing)이다.

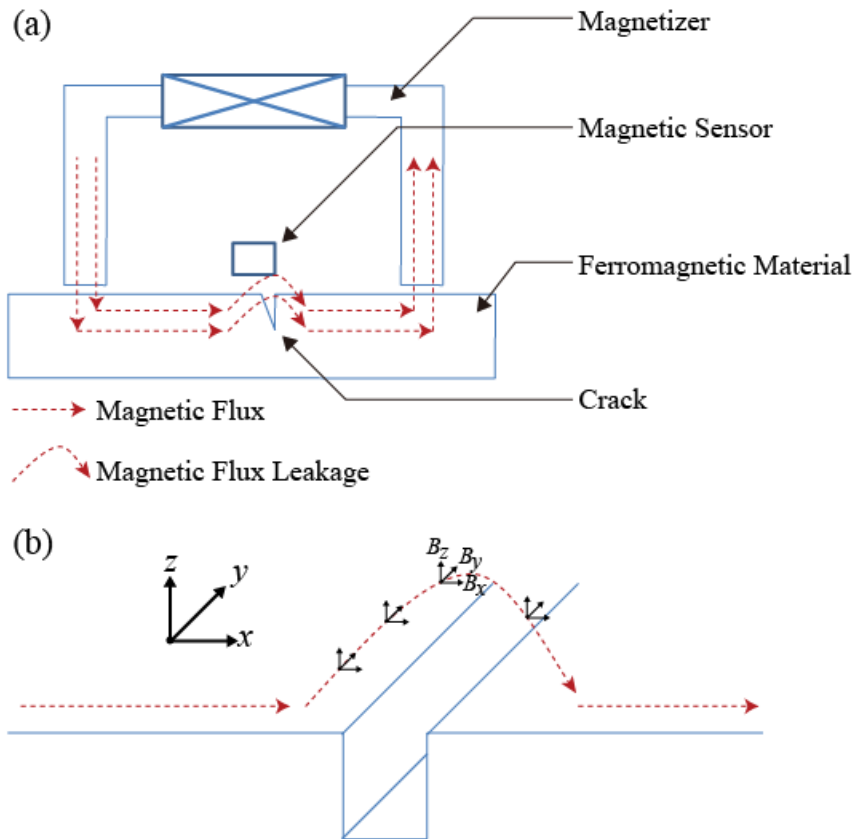


Fig. 2-1 Principle of magnetic flux leakage

Fig. 2-1은 강자성체인 검사 대상체 표면에 존재하는 결함에 의해 자속이 누설 되는 현상을 나타낸다. Fig. 2-1(a)와 같이 외부의 자화기를 통해 자기장을 인가하여 검사 대상체에 자속의 흐름을 생성한다. 이때, 강자성체 속의 자속밀도  $B$ (magnetic flux density,  $[\text{Wb}/\text{m}^2]$ )는 외부 자기장의 세기  $H$ (magnetic field intensity,  $[\text{A}/\text{m}]$ )와 강자성체의 자화  $M$ (magnetization,  $[\text{A}/\text{m}]$ )의 합성으로 표현할 수 있으며, 그 관계식은 Eq. (1)~(3) 과 같다.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

$$M = \chi_m H \quad (2)$$

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi_m)H \quad (3)$$

Eq. (1) 에서  $\mu_0$  는 진공 속의 투자율(permeability,  $[\text{H}/\text{m}]$ )이다. Eq. (2)와 같이 자화 세기  $M$ 은 외부 자기장의 세기  $H$ 와 비례하며, 그 비례상수를  $\chi_m$  으로 표기하고 자화율(magnetic susceptibility)이라 한다. Eq. (1)과 Eq. (2)에 의해 Eq. (3)을 표현 할 수 있으며, 자화율이 1보다 매우 큰 강자성체는 작은 외부 자기장의 세기로도 충분한 자속밀도를 갖기 때문에 자화율이 1과 거의 유사한 상자성체 보다 누설자속 탐상법을 적용하기가 용이하다는 것을 알 수 있다.

한편, 강자성체 속에 발생한 자속의 흐름은 결함 등과 같은 불연속적인 면으로 인하여 외부 공간으로 누설되게 되며, Fig. 2-1(b)에 도시한 것과 같은 직각좌표계로 정의할 수 있다. 강자성체에서 외부 공간으로 누설된 자속의 한 점은  $x$ 축 방향으로 향하는  $\hat{i}$ ,  $y$ 축 방향으로 향하는  $\hat{j}$ ,  $z$ 축 방향으로 향하는  $\hat{k}$ 의 벡터 성분과 그 크기를 가지는  $B_x, B_y, B_z$ 로 표현할 수 있으며, Eq. (4)와 같다.

$$\vec{B} = B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k} \quad (4)$$

MFLT는 누설되는 자속량이 강자성체의 표면으로부터의 거리의 역 비례하여 감소하기 때문에 자기센서와 표면과의 거리(lift-off)를 일정하게 유지해야 하고, 유

지하는 거리 또한 한정적일 수 밖에 없는 단점이 있다. 또한, 상자성체 또는 강자성체와 상자성체가 혼재된 금속의 경우에는 충분한 자속이 발생되지 않거나 혼재된 강자성체로 인한 결함의 판별 오류 등의 문제로 인하여 적용하기 힘든 단점이 있다. 일례로, 오스테나이트계 스테인레스강은 내식성, 내산화성과 같은 우수한 특성을 가진 소재이지만, 제작시 발생하는 국부적인 자성물질( $\delta$ -ferrite)로 인하여 MFLT에서는 결함으로 오인할 수 있어 결함의 검출 및 평가에 어려움을 겪고 있다. 이러한, 문제점들을 해결하기 위해 일본, 독일, 프랑스, 미국 등과 같은 선진국에서는 많은 연구가 진행되고 있으며, 저자가 속한 연구그룹에서도 고속으로 이동하는 강판소재의 결함탐상, 고온환경에서의 결함 탐상, 자동 lift-off 유지를 적용한 결함탐상 등 많은 연구를 진행하고 있으며, 몇몇 연구는 현장 적용 실험을 하고 있을 정도로 높은 수준의 연구완료 단계에 이르러 있다.[28, 38, 39]

## 2. 유한요소해석에 의한 3차원 벡터장

MFLT는 강자성체 자기장을 인가하고, 결함 주변에서 발생하는 누설자속을 검출하는 방법으로 자기벡터포텐셜(magnetic vector potential) 방법에 의해 정자기문제(magnetostatic problem)로 인식할 수 있다. 이러한 정자기문제는 맥스웰방정식(Maxwell equation)을 이용하여 형상, 물질상수, 경계조건을 감안하여 풀 수 있으며, 정자기문제를 풀기 위한 맥스웰방정식은 다음과 같다.[40-42]

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (7)$$

여기에서  $\vec{H}$  는 자기장의 세기(magnetic field intensity),  $\vec{B}$  는 자속밀도(magnetic flux density),  $\vec{J}$  는 전류밀도(current density),  $\vec{B}_r$  은 잔류자속밀도(residual magnetic flux density),  $\mu$  는 투자율(permeability)이다.

위의 맥스웰방정식을 풀기 위하여 상용화된 수치해석 프로그램인 ANSYS (Ver.11.0 SP1 UP20070830, EMAG)를 이용하였으며, Fig. 2-2와 Table 2-1은 해석대상체의 수치해석을 위한 모델링을 나타낸다. 그림에서와 같이 요크형 전자석을 이용하여 정자기장을 인가하였으며, 자기센서와 시험편사이의 간격을 표현하고자 측정영역(sensing area)에서 누설자속을 해석하였다. 또한, 일반적으로 누설자속탐상에서 자기장 방향에 따라 결함 검출능이 차이가 나는데, 이는 결함의 길이 방향과 자기장 방향에 따라 누설되는 자속의 양과 관계가 있다. 이러한 현상을 해석하기 위해 결함의 길이 방향이 자기장 방향과 수직인 경우와 수평인 경우를 각각 모델링하여 해석을 수행하였다.



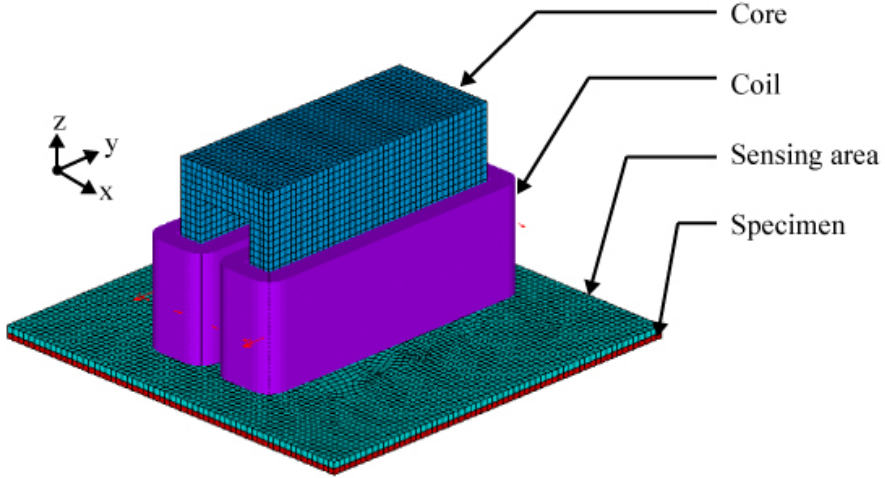


Fig. 2-2 3D analysis model

Table 2-1은 수치해석에 적용한 각 요소들에 대한 물질상수와 경계조건을 나타낸다. 표에서 RSVX는 전기 저항율(electrical resistivity)을 나타내며 단위는  $\Omega \cdot m$  이다. MURX는 비투자율( $\mu_r$ , relative permeability)로서 물질의 투자율  $\mu$  와 진공의 투자율  $\mu_0$  와의 비를 나타내며, 자성체에서는 1보다 아주 큰 값을 얻게 된다. 비투자율의 관계식은 Eq. (8)과 같다.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (8)$$

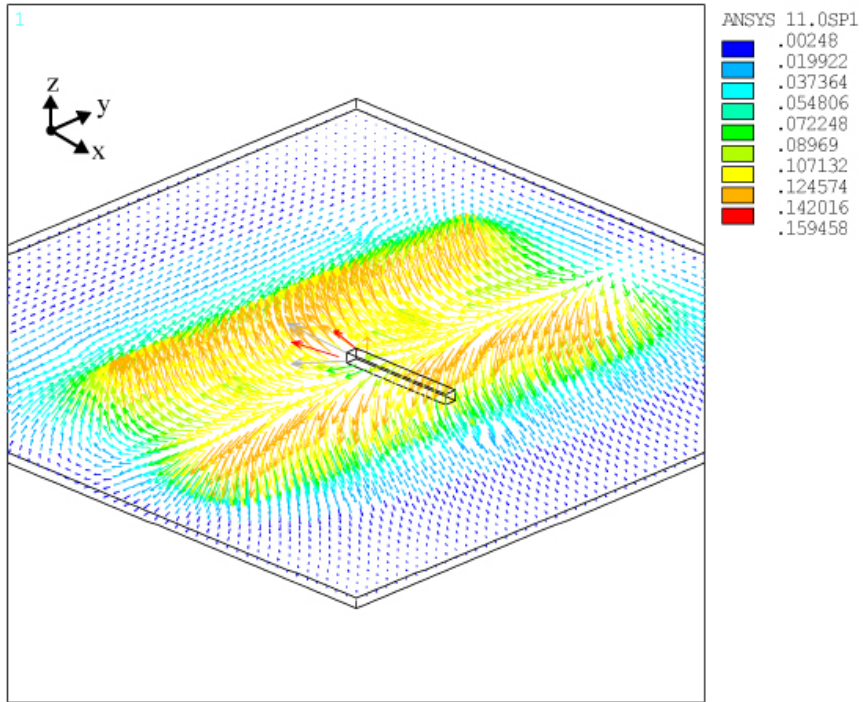
Fig. 2-2에서 자화방향은 x축 방향이며, z축 방향은 시험편에 수직한 방향이다. 자화기의 y축 방향의 길이가 40 mm, x축 방향의 폭은 16 mm, z축 방향의 높이는 27 mm이고 두께가 3.5 mm로 모델링하고, 비투자율이 250이고 전기 저항율이  $1.6 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$  인 뮤 합금(mu-metal, 니켈 · 철 · 구리 합금)으로 가정하였다. 자화기의 양쪽 자극에는 6.7 mm 두께와 16 mm 높이로 2개의 코일이 감겨 있으며, 두 코일에는 직류전류 4.08 A(ampere) 를 적용 하였다. 코일에 직류전류를 입력하였을때 시험편에 x방향으로 자기장이 인가된다. 또한, 시험편은  $60 \times 60 \times 0.8$  mm 의 크기로 모델링하고, 시험편 중앙에 깊이가 0.8 mm 이고 폭이 0.1 mm, 길이가 10 mm 인 결

함을 상정하였다. 시험편은 비투자율과 전기 저항율이 각각 4000,  $8 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$  인 강자성체 재료로 가정하였고, 해석에서의 lift-off는 1 mm 이다. Fig. 2-3과 2-4는 상술한 조건으로 수치해석을 한 결과를 나타내며, 3차원 벡터장으로 표현을 하였다.

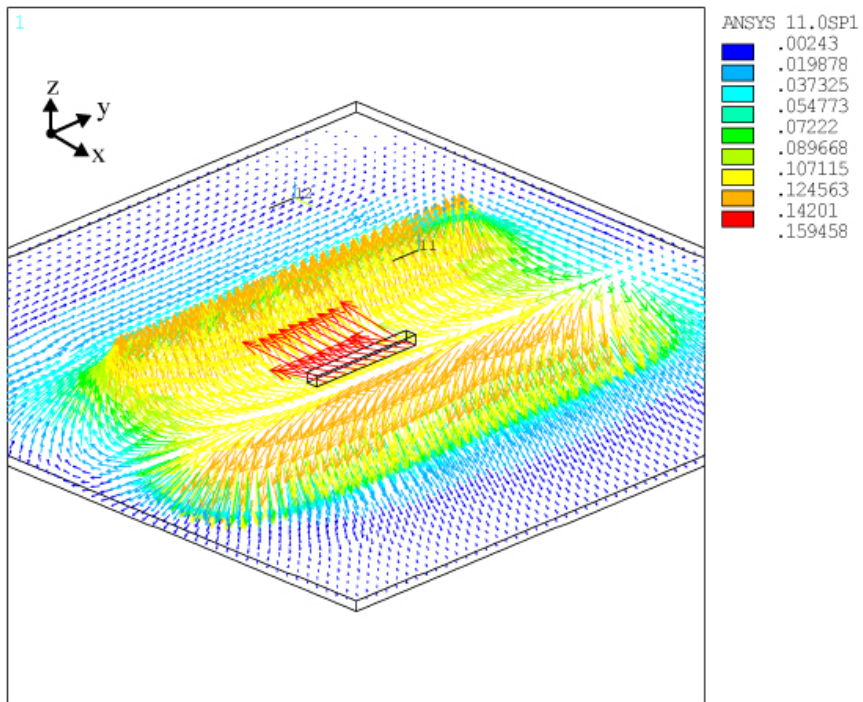
**Table 2 -1 Various conditions for numerical analysis (MFLT)**

Item	Material	Properties	Size [mm]	Mesh size [mm]	Ansys model
Specimen	Steel	MURX 4000 RSVX 8e-6	60 × 60 × 0.8	1	SOLID117
Core	Mu-metal	MURX 250 RSVX 1.6e-7	16 × 40 × 27	1	SOLID117
Coil	Copper	MURX 1	6.7 × 44 × 16 2 coils x 200 turns x 4.08 A	1	SOURCE36
Sensing Area	Air	MURX 1	60 × 60 × 1	1	SOLID117
Crack	Air	MURX 1	1 × 10 × 1	1	SOLID117
Magnetic fluid filled in crack	Magnetic fluid	MURX 20	1 × 10 × 0.8	1	SOLID117
Environment	Air	MURX 1	74 × 80 × 42	5	SOLID117

MURX: Relative Permeability, RSVX: Electrical Resistivity [ $\Omega \cdot m$ ]



**Fig. 2 -3 Vector field of the magnetic flux density**



**Fig. 2 -4 Vector field of the magnetic flux density**

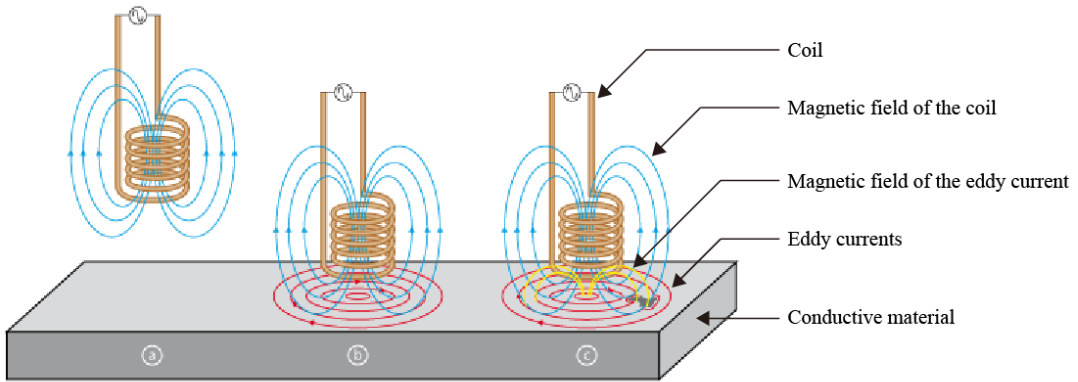
수치해석 결과에서 보는 바와 같이 요크형 전자석에 의해 발생한 자기장은 시험편의 표면을 따라 요크형 전자석 자극(x축 방향)에서부터 y축 방향으로 분포하게 되고, 시험편의 불연속적인 면, 즉 결함으로 인해 누설자속이 발생함을 알 수 있다. 이때, 누설자속은 불연속적인 면의 크기(결함의 단면적)에 비례하여 발생하는 것을 알 수 있는데, 결함의 길이방향과 자기장의 방향이 수직일 때 그 크기가 최대가 되며, 수평일 때는 최소가 된다. 다시 말해서, 결함의 길이 방향과 동일한 방향으로 자기장 방향(x축 방향)이 형성되면, 결함의 최소 불연속면과 대면하게 되므로 누설자속 또한 최소가 된다.(Fig. 2-3) 반면에, 결함의 길이 방향과 수직인 방향으로 자기장 방향이 형성되면, 결함의 최대 불연속면과 대면하게 되어 최대의 누설자속이 발생한다.(Fig. 2-4) 따라서, 특정한 방향으로 결함이 가늘게 발생하는 검사 대상체에 MFLT를 이용하여 결함을 검출할 경우 자기장의 방향을 결함의 길이방향과 수직하게 하여 결함을 검출하는 것이 유리함을 알 수 있다.

## 제 2 절 와전류탐상법

### 1. 원리

와전류탐상검사(ECT, Eddy Current Testing)는 대상 시험체에 와전류를 유도하여 전류와 재질 사이의 상호 작용을 관찰하여 시험체의 상태를 분석하는 비파괴검사 기술로서 검사 시 탐촉자가 시험체에 접촉되지 않고 고속으로 검사가 가능하기 때문에 주변 운전환경이 방사선 피폭 등과 같이 검사자에게 위대한 원자력발전소 기기의 비파괴검사에 널리 적용되고 있다. ECT는 그 용도가 다양한 기술로서 주로 두께가 얇은 재질에 사용이 되며 두꺼운 재질의 경우 와전류 침투능력의 제한으로 인해 검사가능 재질의 부피는 얇은 표면층에 제한된다. 또한, 결함검사 외에 전기적 및 자기적 변화에 의한 기계적 및 금속학적 특성을 간접적으로 측정하는데 사용할 수 있으며, 와전류 흐름에 영향을 미치는 두께, 곡률, 탐촉자와 재질간 거리 등의 기하학적 영향을 측정할 수 있다. ECT에서 미세한 변수의 영향으로 중요한 정보를 방해하거나 잘못 해석할 수 있기 때문에 잠재적으로 많은 변수들이 본 기술의 장점 및 단점으로 작용할 수 있다. 실제로 신뢰성 있는 검사결과를 얻기 위해서는 와전류 흐름에 영향을 미치거나 탐촉자 임피던스에 영향을 줄 수 있는 모든 인자들을 고려해야 한다.[43]

와전류(Eddy current)는 시간에 따라 변화하는 자속에 의해 도체에 유도된 원형의 전류이다. Fig. 2-5 와 같이 교류전류를 코일에 인가하면 전류가 흐르는 수직방향으로 교류자장이 발생하게 된다. 이때, 도체에는 도체를 관통하는 교류자장에 반발하는 기전력이 생긴다. 이러한 현상을 전자기 유도라 하며 이 기전력에 의해 도체에 형성된 전류를 와전류라 한다. 도체에 유도된 와전류는 코일의 자장과는 반대 방향으로 약한 자장을 생성시키는데 와전류가 대상 시험체의 불연속이나 재질의 변화 등으로 흐트러지면 이 자장의 강도가 변하게 되어 코일의 임피던스 변화에 영향을 미친다. 이 코일의 임피던스 변화를 측정함으로써 와전류 변화를 관찰하고 이를 분석하여 시험체의 상태를 평가하는 것이 와전류탐상법이다.



- a. The alternating current flowing through the coil at a chosen frequency generates a magnetic field around the coil.
- b. When the coil is placed close to an electrically conductive material, an eddy current is induced in the material.
- c. If a flaw in the conductive material disturbs the eddy current circulation, the magnetic coupling with the probe is changed and a defect signal can be read by measuring the coil impedance variation.

**Fig. 2-5 Principles of eddy current testing**  
 (자료출처: <http://www.olymps-ims.com>)

일반적인 ECT는 와전류 작용에 의해서 발생한 코일의 임피던스 또는 제2의 코일에 일어나는 전압 변화의 검출을 기초로 한 것이며, 검사 대상체를 탐상하거나 측정신호를 분석할 때 전문적인 지식을 필요로 한다. 저자가 속한 연구그룹에서는 ECT의 대체기술로 국산원천기술인 교류형 자기카메라를 이용한 와전류 비파괴검사법을 제안하였으며,[38, 44] 본 연구에서도 동일한 원리를 이용한 연구를 수행하였다. 그 원리는 와전류에 의해 발생하는 자기장 분포의 변화를 자기 센서를 이용하여 측정하는 것이다. 와전류는 시간에 따라 변하는 자기장에 의해 유도된 전류이다. 즉, Fig. 2-6(a)와 같이 요크형 자화기에 교류 전류를 인가하면 자극과 자극 사이에 교류 자기장이 발생하고, 교류 자기장의 수직방향으로 유도 전류가 흐르게 된다. 유도 전류는 결함에 의해 왜곡이 되고, 왜곡된 유도전류에 의해 변하는 자기장의 분포(Fig. 2-6(b))를 자기센서로 측정하여 결함을 검출 및 평가한다. 이와 같은 방법은 전자기장의 시간에 따른 변화를 고려해야 하므로 기본 방정식으로 Eq. (9)~(10)와 같이 물질 속의 맥스웰 방정식을 따른다.

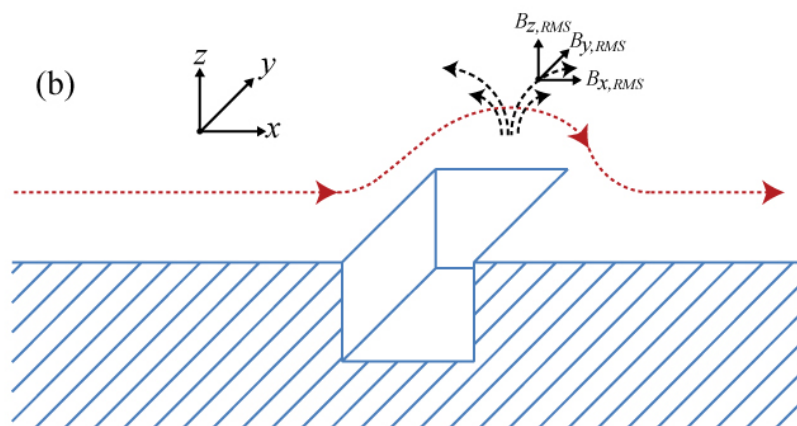
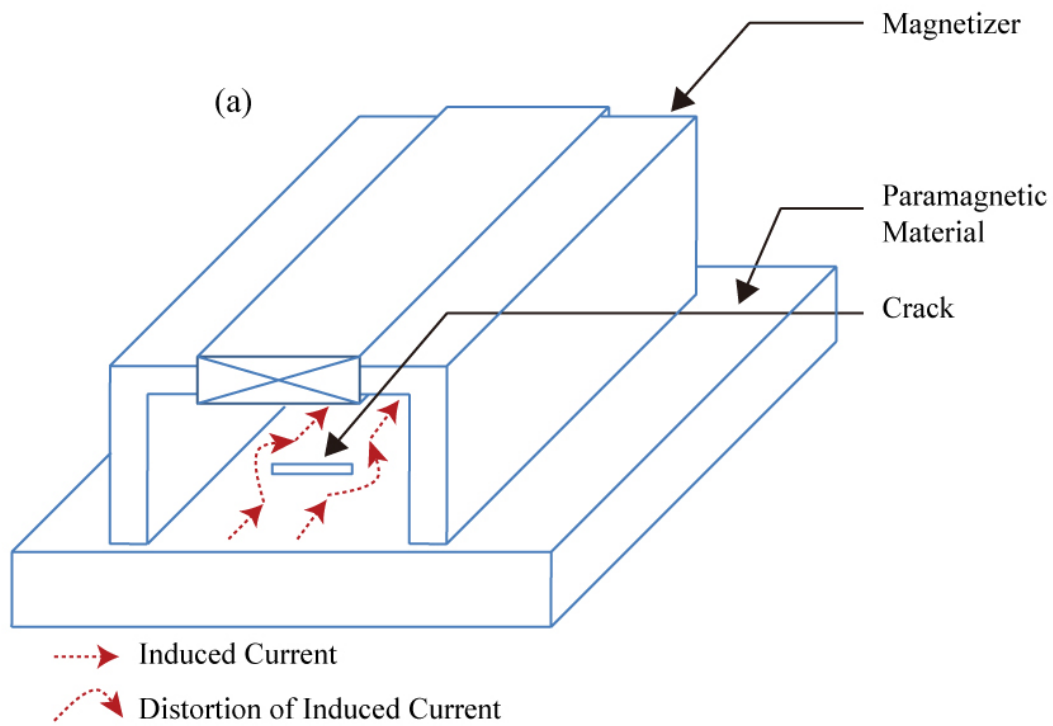
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (9)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (10)$$

여기서  $J$  는 자유 전류밀도이고  $\frac{\partial D}{\partial t}$  는 변위 전류밀도이다.

정자기장(magnetostatic field)에 의해 결함을 검출하는 MFLT와는 다르게 동자기장(dynamic magnetic field)에 의해 결함을 검출하는 방법은 자기센서에 의해 획득한 교류 신호를 이용하여 결함을 검출 및 평가한다. 획득한 교류 신호는 신호의 용이한 분석을 위하여 교류 신호의 실효치(RMS, Root Mean Square value)로 변환한다. 또한, 스칼라 값인 RMS에 대해 편미분 연산자를 적용하게 되면, 스칼라계에 대한 공간에서 최대 증가율에 대한 크기와 방향을 나타내는 벡터가 된다. 본 연구에서는 상술한 스칼라와 벡터의 관계에 근거하여 직각좌표계에서 교류 신호에 의한 스칼라 함수  $B_{RMS}$  를 Eq. (11)과 같이 벡터로 표현하였다.

$$\nabla B_{RMS} = \frac{\partial B_{x,RMS}}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial B_{y,RMS}}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial B_{z,RMS}}{\partial z} \hat{k} \quad (11)$$



**Fig. 2 -6 Magnetic field variation according to the induced current**



## 2. 유한요소해석에 의한 3차원 벡터장

ECT는 전자기적으로 와전류문제이며, 유한요소법을 이용하여 수치해석하기 위하여, 맥스웰방정식에서 관계식들을 정리하면 Eq. (12) ~ (16)과 같다. 이때, 해석하고자 하는 교류 전류의 주파수가 1 kHz 이므로 시간에 따른 전기장의 변화가 미미하여 변위전류는 무시하였다.[45, 46]

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (12)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (13)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (14)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (15)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (16)$$

여기서,  $\vec{B}$  는 자속밀도,  $\vec{H}$  는 자계의 세기,  $\vec{E}$  는 전기계의 세기이며,  $\vec{J}$  는 총 전류밀도,  $\vec{J}_s$  는 전원 전류밀도,  $\vec{J}_e$  는 와전류밀도이다. 또한,  $\mu$  는 자기 투자율,  $\sigma$  는 전기 도전율이다.

위의 맥스웰방정식을 풀기 위하여 상용화된 수치해석 프로그램인 ANSYS (Ver.11.0 SP1 UP20070830, EMAG)를 이용하였으며, Fig. 2-7과 Table 2-2은 해석대상체의 수치해석을 위한 모델링과 물질상수, 경계조건을 나타낸다. 그림에서와 같이 요크형 자화기를 이용하여 교류자기장을 인가하였으며, 자기센서와 시험편사이의 간격을 표현하고자 측정영역(sensing area)에서 수치 해석하였다. 또한, 대상체 표면에 유도된 전류는 방향에 따라 누설되는 양이 차이가 나는데, 이는 결함의 길이 방향과 전기장 방향에 기인한 것이다. 이러한 현상을 해석하기 위해 결함의 길이 방향이 전기장 방향과 수직인 경우와 수평인 경우를 각각 모델링하여 해석하였다.

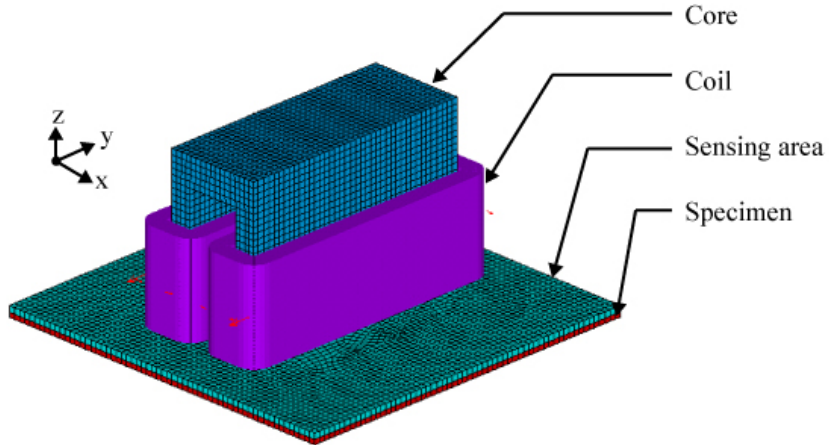


Fig. 2-7 3D analysis model

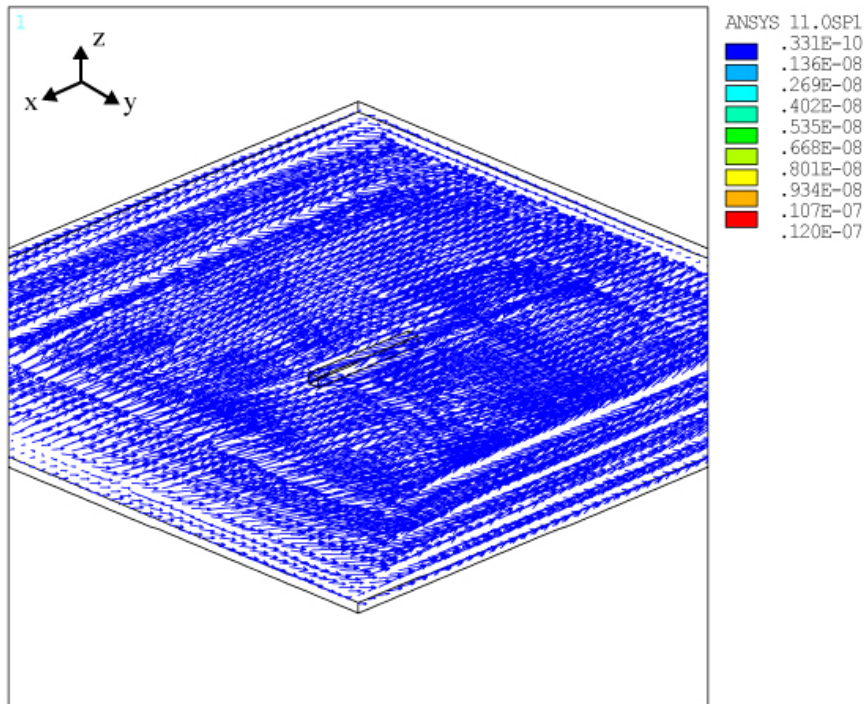
Table 2-2는 수치해석에 적용한 각 요소들에 대한 물질상수와 경계조건을 나타낸다. 표에서 RSVX는 전기 저항율(electrical resistivity)을 나타내며 단위는  $\Omega \cdot m$  이며, MURX는 비투자율( $\mu_r$ , relative permeability)로서 물질의 투자율  $\mu$  와 진공의 투자율  $\mu_0$  와의 비를 나타내며, 전술한 바와 같이 자성체에서는 1보다 아주 큰 값을 얻게 된다. 비투자율의 관계식은 전술한 Eq. (8)과 같다.

Fig. 2-7에서 자기장 방향은 x축 방향이며, z축 방향은 시험편에 수직인 방향이다. 자화기의 y축 방향의 길이가 40 mm, x축 방향의 폭은 16 mm, z축 방향의 높이는 27 mm이고 두께가 3.5 mm로 모델링하고, 비투자율은 250, 전기 저항율은  $1.6 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$  인 뮤 합금(mu-metal, 니켈·철·구리 합금)으로 가정하였다. 자화기의 양쪽 자극에는 10.5 mm 두께와 16 mm 높이로 2개의 코일이 감겨 있으며, 두 코일에는 주파수 1 kHz의 교류전류 0.28 A<sub>rms</sub>를 적용 하였다. 코일에 교류전류를 입력하였을 때 시험편에 x방향으로 교류자기장이 인가된다. 또한, 시험편은  $60 \times 60 \times 0.8$  mm 의 크기로 모델링하고, 시험편 중앙에 깊이가 0.8 mm 이고 폭이 0.1 mm, 길이가 10 mm 인 결함을 상징하였다. 시험편은 비투자율과 전기 저항율이 각각 4000,  $8 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$  인 강자성체 재료인 철강으로 가정하였고, 해석에서의 lift-off는 1 mm 이다. Fig. 2-8과 2-9는 상술한 조건으로 수치해석을 한 결과를 나타내며, 3차원 벡터장으로 표현을 하였다.

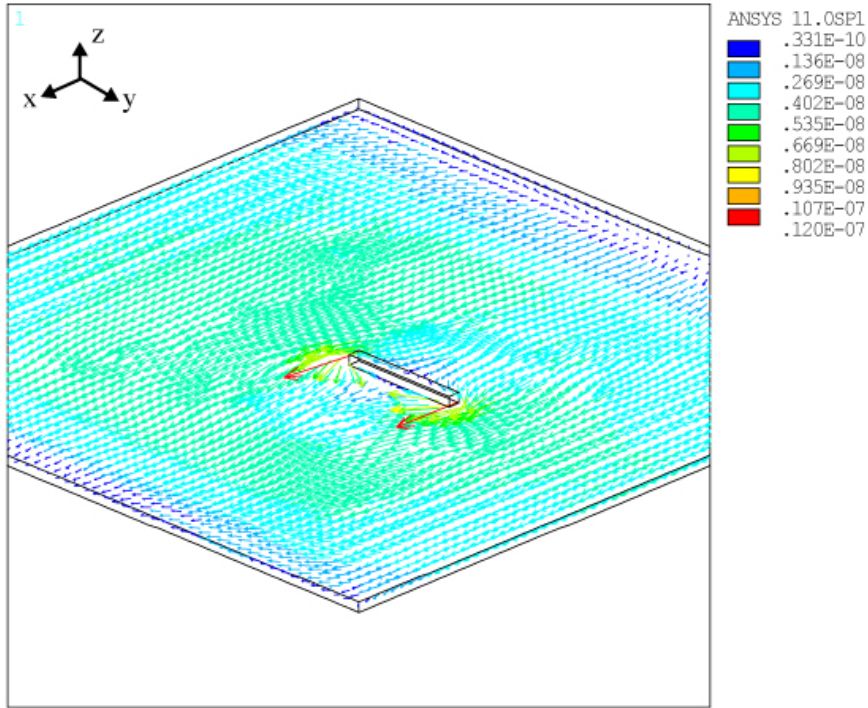
**Table 2-2 Various conditions for numerical analysis (ECT)**

Item	Material	Properties	Size [mm]	Mesh size [mm]	Ansys model
Specimen	Steel	MURX 4000 RSVX 8e-6	60 × 60 × 0.8	1	SOLID117
Core	Mu-metal	MURX 250 RSVX 1.6e-7	16 × 40 × 27	1	SOLID117
Coil	Copper	MURX 1	10.5 × 44 × 16 2 coils × 100 turns 0.28 A @ 1kHz	1	SOLID117
Sensing Area	Air	MURX 1	60 × 60 × 1	1	SOLID117
Crack	Air	MURX 1	1 × 10 × 1	1	SOLID117
Environment	Air	MURX 1	74 × 80 × 42	5	SOLID117

MURX: Relative Permeability, RSVX: Electrical Resistivity [ $\Omega \cdot m$ ]



**Fig. 2-8 Vector field of the current density**



**Fig. 2-9 Vector field of the current density**

수치해석 결과에서 보는 바와 같이 요크형 전자석에 의해 발생한 교류전기장은 시험편의 표면을 따라 y축 방향으로 분포하게 되고, 시험편의 불연속적인 면, 즉 결함으로 인해 왜곡이 발생함을 알 수 있다. 이때, 교류전기장의 왜곡은 불연속적인 면의 크기(결함의 단면적)에 비례하여 발생하는 것을 알 수 있는데, 결함의 길이방향과 전기장의 방향이 수직일 때 그 크기가 최대가 되며, 수평일 때는 최소가 된다. 다시 말해서, 결함의 길이 방향과 전기장 방향(y축 방향)이 수평(Fig. 2-8)일 때 보다 결함의 길이 방향과 전기장 방향이 수직(Fig. 2-9)일 때가 많은 전기장의 왜곡을 유도할 수 있다. 이러한 결과로부터, 특정한 방향으로 결함이 가늘게 발생하는 검사 대상체에 결함을 검출할 경우 전기장의 방향을 결함의 길이방향과 수직하게 하여 결함을 검출해야 보다 유리하다.

### 제 3 절 자기벡터카메라용 자기센서의 검토

자기 센서는 원리적 측면에서의 관점으로 자기장을 측정하는 센서로 분류를 하고 있으나, 좀 더 포괄적인 의미로 “자기적 현상을 이용한 센서”로 인식하는 것이 더 바람직 할 것이다. 자기 센서가 단순하게 자기장을 감지하여 유용한 전기 신호로 변환시켜 주는 것뿐만 아니라, 자기적 현상을 이용하여 비자기적 신호(예를 들자면 각도, 속도, 전류, 회전 등)를 전기적 신호로 변환시키기 위한 중개자 역할을 하기 때문이다.

방향을 지시하는데 사용한 나침반에서 인공위성의 자세제어에 사용되는 Flux-gate 센서에 이르기까지 대부분의 자기 센서의 이용되는 자기적 현상은 19세기에서 20세기에 발견된 것으로, 새로운 원리의 자기 센서 개발보다는 새로운 자성재료의 개발, 새로운 센서의 설계, 개발된 센서의 응용 및 최적화 등을 통하여 자기 센서의 특성 향상에 많은 노력을 하고 있다. 또한, 급속도로 발전하는 IT 기기의 개발동향에 맞추어 자기 센서 또한, 저전력화, 소형화, 사용 편의성,  $\mu$ -processor와의 용이한 인터페이스를 갖춘 지능형 센서의 개발이 이루어지고 있다.

이러한, 자기 센서는 그 응용 분야가 개인용 IT 기기, 공장 자동화, 자동차, 고속열차 및 항공 우주분야 등 매우 넓으며, 그 중에서 홀 효과와 자기저항 효과를 이용한 자기 센서는 크기, 가격 및 특성이 우수하여 가장 많이 사용되고 있다. 또한, 반도체 집적화 공정 기술에 의해 집적화가 가능하므로 다차원 또는 다기능을 가진 자기 센서로도 활용된다. 본 연구에서도 이러한 장점을 활용하여 홀 효과를 이용한 Hall 센서와 자기저항 효과를 이용한 AMR, GMR 센서를 사용하여 자기벡터 카메라를 개발하였다. 본 절에서는 상술한 각 센서의 원리 및 신호증폭회로, 출력 특성 등에 대하여 서술하였다.

## 1. Hall 센서

홀 효과 현상을 이용한 홀 센서는 전류가 흐를 수 있는 반도체 물질에 전류를 흐르게 하고 전류에 직각인 방향으로 외부 자기장을 인가하면 Lorentz Force가 전자의 흐름에 작용하게 되어 전자 분포의 왜곡이 발생하게 된다. 이로 인해 출력 양단에는 전위차가 발생하고 이를 측정하여 홀 센서의 출력전압( $V_H$ , 이하 홀 전압)을 알 수 있으며, 그 크기는 센서 면에 수직으로 입사하는 외부자장의 세기에 비례하게 된다. 홀 센서에 사용되는 반도체 물질로서는 비소화갈륨(GaAs), 비소화인듐(InAs), 안티몬화인듐(InSb), 게르마늄(Ge) 등이 있으며, GaAs와 InSb이 가장 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 높은 공간분해능을 확보하기 위하여 국내기업에서 판매하는 홀 센서를 Ni-Zn ferrite wafer에 집적되어 있는 상태에 자체 개발한 패턴을 증착하여 주문 제작하였다.

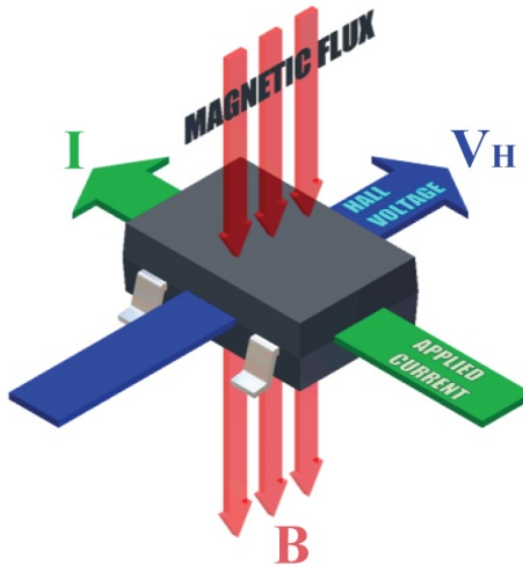
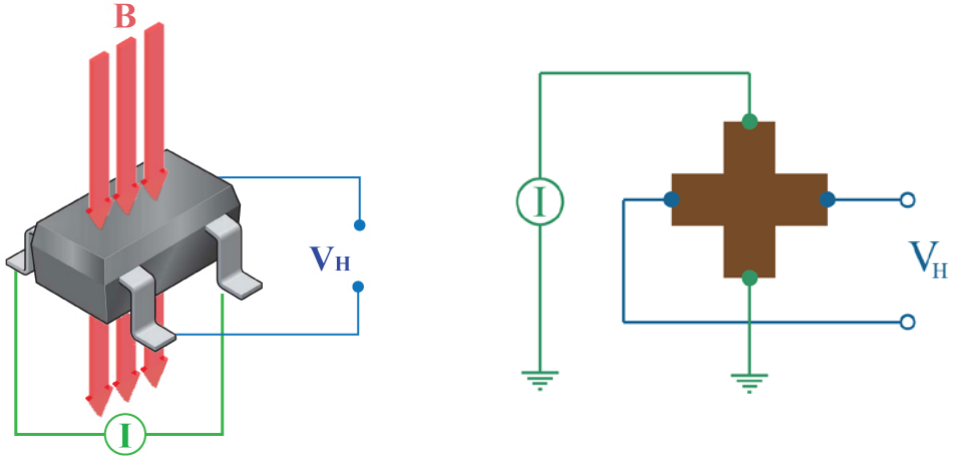


Fig. 2-10 Hall effect

(자료출처: <http://www.allegromicro.com/en/products/design/an/an295044.pdf>)



**Fig. 2-11 Hall sensor and its equivalent circuit**

(자료출처: <http://www.allegromicro.com/en/products/design/an/an295044.pdf>)

본 연구에서 사용한 홀 센서는 InSb 반도체 물질을 이용한 것으로, 출력전압이 크고 강자계에서 사용할 수 있으며, 직선성이 좋지만, 에너지 밴드 갭이 작아 동작 범위가 작고 온도에 대한 출력특성이 나쁘다. Fig. 2-11은 홀 센서를 구동시키기 위하여 사용한 기본 회로를 나타내며, 정전류 구동 방식이다. 온도 특성이 개선되는 정전압 구동 방식을 사용할 수도 있으나, 외부 자계의 강도에 따라 내부 저항의 변화가 커져 직선성이 나빠지는 단점이 있다. 정전류 구동시의 홀 전압( $V_H$ )은 Eq. (17)로 나타낸다. 여기서  $k$ 는 홀 상수이며,  $\theta$ 는 감자면(most sensitive direction)에 입사되는 자기장의 각도이다.

$$V_H = k \cdot I \cdot B \cdot \cos \theta \quad (17)$$

상술한 정전류 구동에 의한 Hall 센서의 출력전압 즉, 전위 차이를 차동식 연산증폭기를 이용하여 측정한다. 고정밀 차동 증폭을 위하여 높은 동상신호제거비(CMRR, Common Mode Rejection Ratio)를 갖는 INA128를 도입하여 Fig. 2-12와 같은 회로를 구성하였다. INA128는 한 개의 외부 저항( $R_G$ )을 연결하는 것만으로도 쉽게 0~80 dB의 이득 값을 얻을 수 있다. 차동 증폭 회로에 연결되는 두 개의 전압 플로어( $A_1$ ,  $A_2$ )들은 작은 오차를 가지면서도 높은 입력 임피던스를 보인다. 또한, 구동

저항이  $R_G$ 이상으로 불균형 되는 것을 허용할 수 있다. 한편, 차동 증폭회로의 이득은 Eq. (18)에 나타난 바와 같이  $R_5 = R_7$ ,  $R_8 = R_9$ 일 때  $R_5$ 과  $R_8$ 에 의하여 결정된다.[47]

이러한 구조는 열전대의 증폭, 의료 계측용, 데이터 수집 등에 사용되며, 우수한 동특성을 가지고 있다는 점에서 저잡음 고속 자기카메라의 증폭 회로로 도입하였다.

$$Gain = \frac{R_8}{R_5} \left( 1 + \frac{2R_4}{R_G} \right) = \frac{40k\Omega}{40k\Omega} \left( 1 + \frac{2 \cdot 25k\Omega}{R_G} \right) = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (18)$$

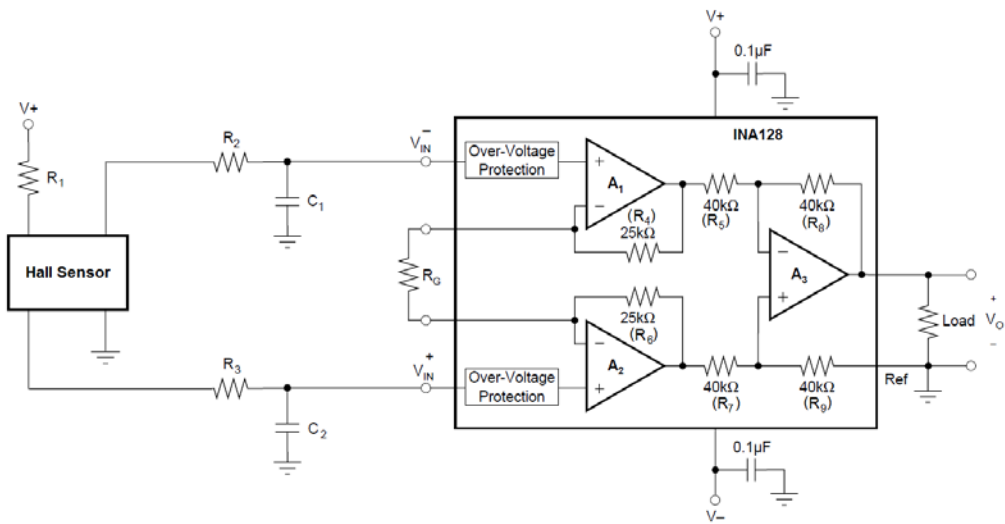
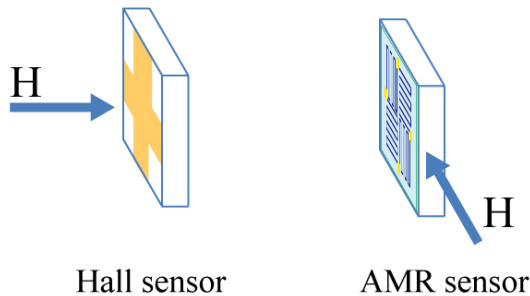


Fig. 2 -12 Signal amplifier circuit diagram for the Hall sensor



## 2. AMR 센서

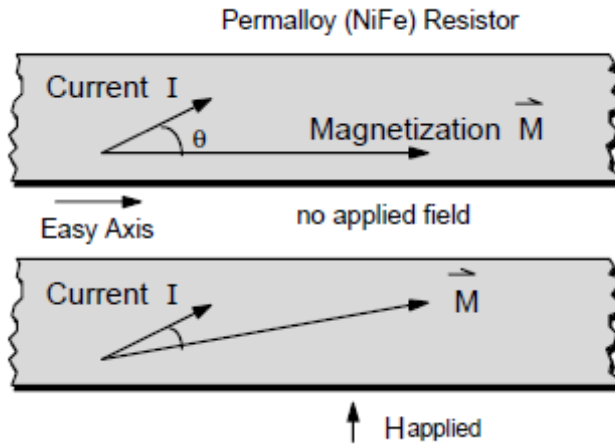
자기저항효과를 이용한 자기저항(MR, Magnetoresistive) 센서는 외부 자장에 의해 저항이 변화하는 현상을 이용한 자기 센서이다. 일반적으로 반도체 MR센서와 강자성체 MR센서로 분류된다. 반도체 MR센서로 사용되는 반도체 물질들은 비소화갈륨(GaAs), 비소화인듐(InAs), 안티몬화인듐(InSb) 등이 있으며, 감도 특성이 우수한 InSb가 가장 많이 사용되고 있다. 강자성체 MR센서로 사용되는 강자성체 재료는 니켈(Ni)과 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)과 철(Fe)을 이용한 금속박막이며, 니켈(Ni)과 철(Fe)을 이용한 MR센서가 많이 사용되고 있다. 반도체 MR센서는 홀 센서와 같이 감자면(most sensitive direction)에 수직인 감자방향(減磁方向)을 가지며, 강자성체 MR센서는 감자면(most sensitive direction)에 수평방향으로 감자방향(減磁方向)을 가진다. 본 연구에서는 홀 센서와 중첩 또는 결합하여 사용할 수 있는 수평방향으로 자기장을 측정할 수 있는 강자성체 MR센서를 사용하여 자기벡터카메라를 시 제작하였다.



**Fig. 2-13 Most sensitive direction: Hall sensor vs. AMR sensor**

강자성체 자기저항 센서는 자기장 인가에 따라 재료의 저항 값이 감소하는 부정 자기저항효과(negative magnetoresistive effect)와 소자 내 전류의 방향과 인가자계의 방향에 따라 저항 값이 변하는 이방성 자기저항 효과(anisotropic magnetoresistive effect)가 있다. Fig. 2-14은 니켈(Ni)과 철(Fe)을 이용한 금속박막(permalloy)에서의 이방성 자기저항 효과를 나타낸 것이다. Permalloy 박막의 길이방향에 수직으로 자계

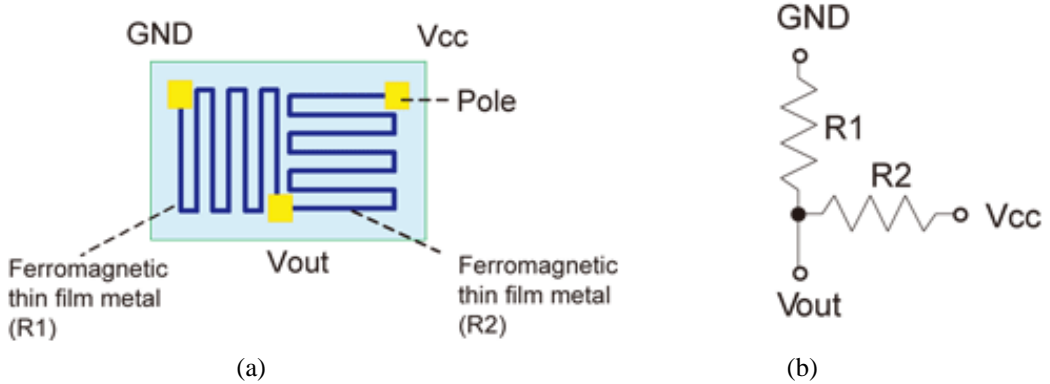
가 인가되면, 자화벡터의 방향이 변하여 저항의 변화를 일으키게 된다. 이때, Permalloy 박막내 전류 방향과 자화벡터 방향이 평행일 때 저항이 최대가 되고, 수직일 때 최소가 된다. 일반적으로 이방성 자기저항 효과를 이용한 자기센서를 이방성 자기저항(AMR, Anisotropic Magnetoresistive) 센서라고 한다.



**Fig. 2-14 Anisotropic magnetoresistive effect**  
 (자료출처 : <http://www.magneticsensors.com/literature.php>)

AMR 센서는 실리콘 기판 상에 금속박막을 증착하고, 저항 스트립으로서 패터닝하여 제작한다. Fig. 2-15(a)는 두개의 금속박막 패턴을 수직과 수평으로 배치하고 직렬로 연결하여 제작한 AMR 센서이다. 이와 같은 패턴의 조합으로 제작한 AMR 센서를 수직 타입 AMR(V-AMR, Vertical type AMR) 센서라고 한다. Fig. 2-15(a)는 기본형 패턴의 V-AMR 센서이다. V-AMR 센서의 출력전압은 Fig. 2-15(b)의 등가회로에 의해 Eq. (19)로 표현할 수 있다. [48]

$$V_{out} = \left( \frac{R1}{R1 + R2} \right) V_{CC} \quad (19)$$

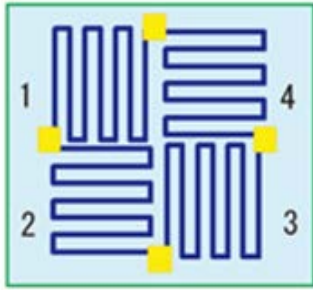


**Fig. 2-15 Basic pattern and equivalent circuit of a vertical type AMR sensor**  
 (자료출처 : [http://www.hkd.co.jp/english/amr\\_tec\\_suichoku/](http://www.hkd.co.jp/english/amr_tec_suichoku/))

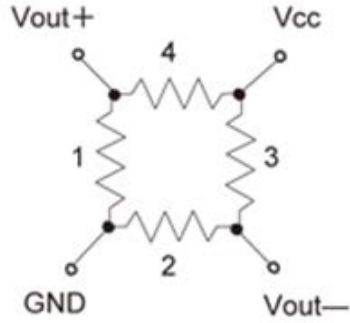
Fig. 2-16(a)는 Fig. 2-15의 기본형 패턴을 대칭으로 배치하여 제작한 V-AMR 센서이다. 각 저항 스트립을 인가되는 자계의 수평과 수직으로 배치하여 제작하였다. 등가회로로 나타내면 Fig. 2-16(b)와 같은 저항 브릿지 회로로 나타낼 수 있다. V-AMR 센서의 출력특성은 Fig. 2-17과 같이 자기장 극성에 대한 판별은 가능하지 않으며, 출력신호세기가 최대 수십 mV로서 미소한 신호레벨을 가진다. 그러므로, 고정밀 차동연산증폭기를 사용하여 출력전압을 측정하여야 한다. Fig. 2-18은 본 연구에서 실제 사용한 회로를 나타내며, 출력이득은 동일한 차동연산증폭기를 사용한 홀 센서와 같이 전술한 Eq. (18)에 의해 얻어진다. 외부 자기장에 의한 자기장 변화( $B_{VA}$ )와 V-AMR 센서의 출력전압( $V_{VA}$ ) 특성은 Fig. 2-17과 같으며, Eq. (20)과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_{VA} = C_1 \times p \times (1 - e^{-B_{VA}^2}) + C_2 \quad (20)$$

여기에서  $C_1$ 과  $C_2$ 는 상수이며,  $p$ 는 센서의 입력전압이다.

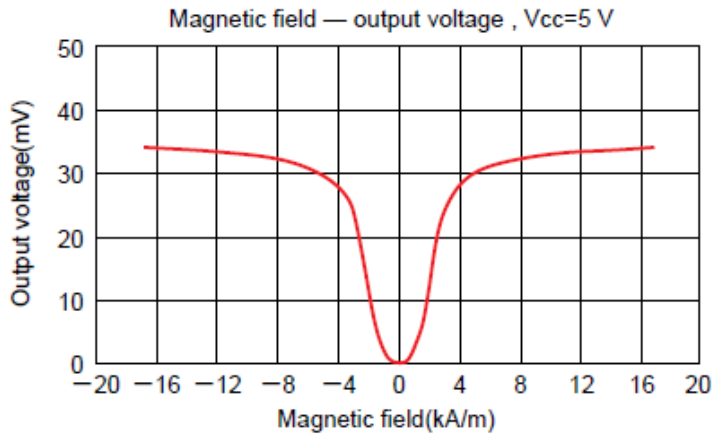


(a)

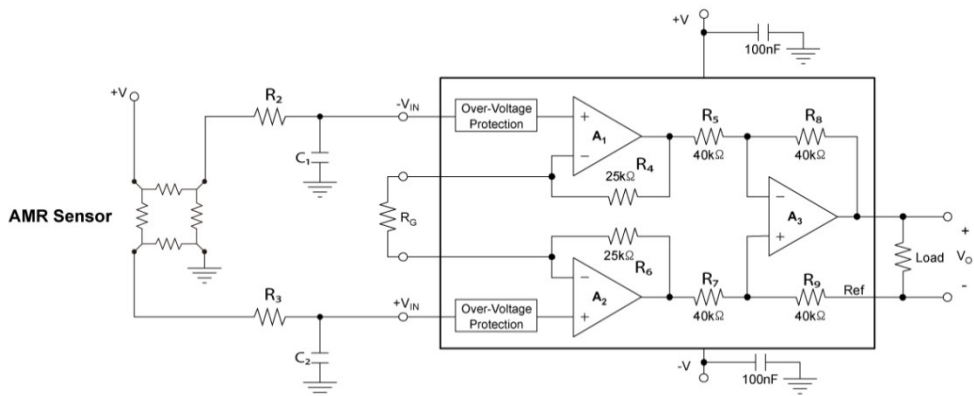


(b)

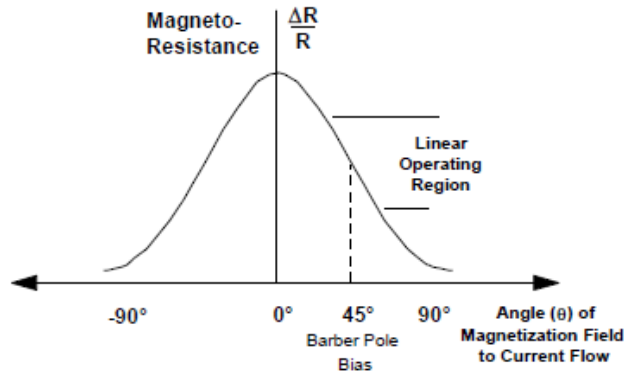
**Fig. 2-16 Full bridge pattern and equivalent circuit of a vertical type AMR sensor**  
 (자료출처 : [http://www.hkd.co.jp/english/amr\\_tec\\_suichoku/](http://www.hkd.co.jp/english/amr_tec_suichoku/))



**Fig. 2-17 Output characteristic curve for the vertical type AMR sensor**



**Fig. 2-18 Signal amplifier circuit diagram for the vertical type AMR sensor**



**Fig. 2-19 AMR variation with angle  $\theta$**

(자료출처 : <http://www.magneticsensors.com/literature.php>)

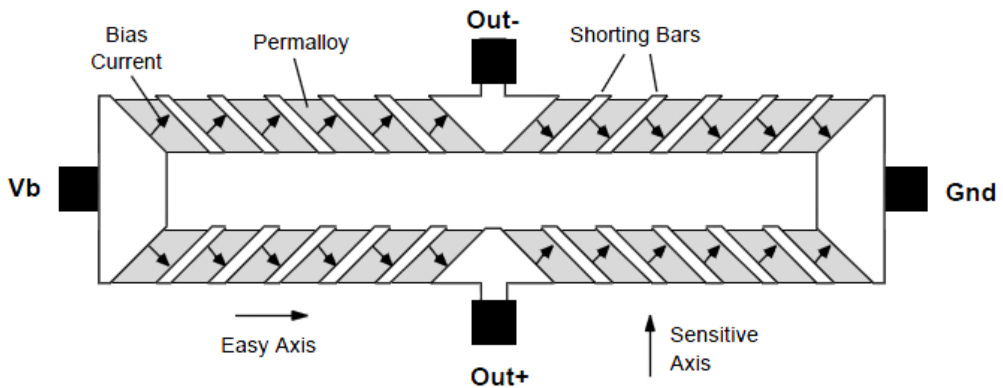
상술한 AMR 센서는 Fig. 2-14에서 나타낸 바와 같이 외부 자계가 없는 상태에서 자화방향과 금속박막의 길이방향이 평행하도록 제작되며, 자화방향과 전류의 방향은  $\theta$  만큼의 각도를 가지고 있다. 외부자계가 인가되면 자화방향이 변하게 되어 전류 방향과 이루는 각도  $\theta$  가 변하게 되어 자기저항의 변화에 영향을 미친다. Fig. 2-19는 전류 방향과 이루는 각도  $\theta$  에 의한 자기저항의 변화를 나타낸 것이다. 전류의 방향과 자계의 방향이 평행하면 자기저항 값이 최대가 되고, 교차할 경우에는 최소가 됨을 보이고 있다. 이때, 각도  $\theta$  가  $45^\circ$  인 지점에서 일정한 구간의 출력특성이 선형적이라는 것을 알 수 있으며, 이는 자기장 극성과 강도를 동시에 측정 할 수 있는 AMR 센서를 제작하는데 매우 중요한 원리로 사용된다.[49]

Fig. 2-20은 상술한 원리를 적용한 바버폴 바이어스(barber pole bias) 구조를 가진 AMR 센서이다. Honeywell사에서 개발한 이 구조는 전류가 하나의 단락 바에서 다음 단락 바까지 가장 짧은 경로로 흐르고, 자화 방향과  $45^\circ$ 를 이루어 배치되어 있어  $\pm 10$  [Oe] 외부 자기장 영역에서 저항 변화가 선형적이다. 외부 자기장 영역에서 자기장에 의한 자기장 변화( $B_{BA}$ )와 B-AMR 센서의 출력전압( $V_{BA}$ ) 특성은 Fig. 2-21과 같으며, Eq. (21)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{BA} = a \times p \times B_{BA} + b \quad (-10 \text{ Oe} < B_{BA} < +10 \text{ Oe}) \quad (21)$$

여기에서  $a$ 와  $b$ 는 상수이며,  $p$ 는 센서의 입력전압이다.

이와 같은 AMR 센서는 선택적인 구간에서 동작하기 때문에 Fig. 2-21에 나타난 바와 같이 동작범위가 매우 협소하여 낮은 자계에서도 쉽게 포화되므로 신호증폭용 차동연산증폭기를 선택할 때 주의가 필요하다. 본 연구에서는 홀 센서와 수직 타입 AMR 센서에 사용한 고정밀 차동연산증폭기보다 신호입력에 대한 오프셋 전압과 전류 특성 및 온도변화에 의한 오프셋 전압 변화가 적은 고정밀 차동연산증폭기(Fig. 2-22)를 사용하였으며, 증폭이득은 외부저항의 값에 의해 결정되며 관계식은 Eq. (22)와 같다.



**Fig. 2 -20 AMR sensor barber pole bias**

(자료출처: <http://www.magneticsensors.com/literature.php>)

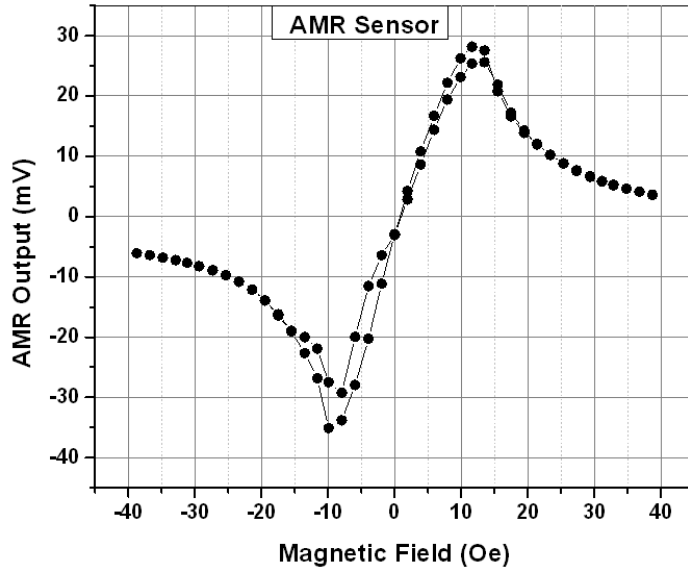


Fig. 2-21 Output characteristic curve for the AMR sensor with barber pole bias

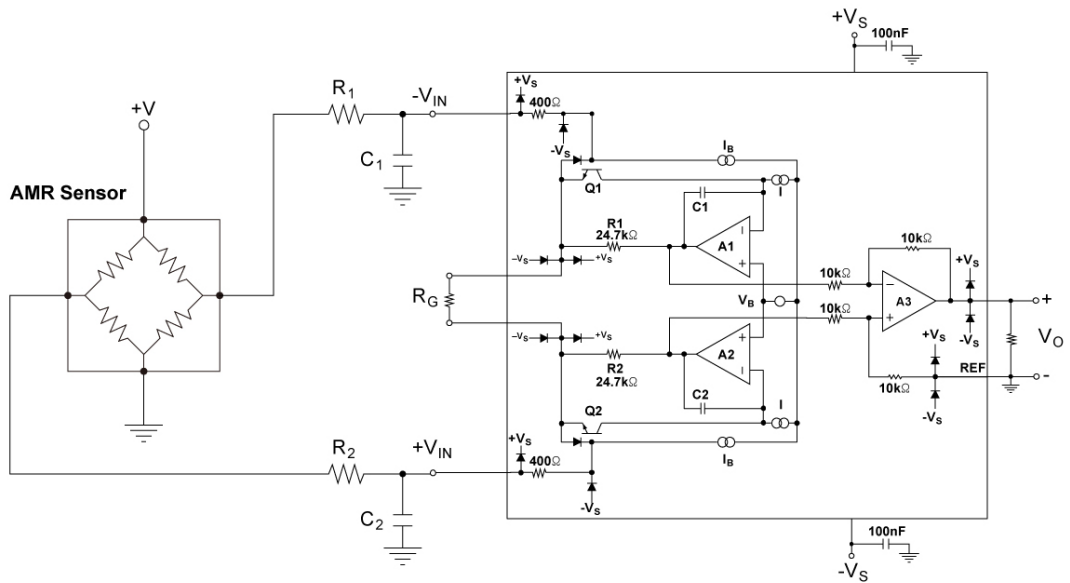


Fig. 2-22 Signal amplifier circuit diagram for the AMR sensor with barber pole bias

$$Gain = 1 + \frac{49.4k\Omega}{R_G} \quad (22)$$

### 3. GMR 센서

상술한 이방성 자기저항 효과는 자기 저항 변화율이 약 2% ~ 3% 정도로 미비한 자기저항률을 보이지만, 거대자기저항(GMR, Giant Magnetoresistive) 효과를 이용한다면 수 배에서 수십 배 더 큰 자기저항 변화율을 얻을 수 있다. GMR은 1988년 유럽의 물리학자에 의하여 발견되어 많은 연구자들의 관심을 끌게 되었으며, 처음 이 현상이 발견된 후 많은 연구자들의 폭발적인 관심 속에 급속도로 실질적인 응용 연구가 이루어졌다.[50-53]

GMR 효과는 Fig. 2-23과 같이 일반적으로 자성체 사이에 비자성체가 존재하는 형태의 다층 박막 구조로 비자성체에 의해 자성체 층이 격리된 구조이다. 비자성체 층으로부터 자성체 층이 적절한 거리만큼 떨어져 격리되어 있을 경우, 이 자성체 층들 사이에 강자성 상호작용이 약해지거나, 수직 상호작용 또는 반강자성 상호작용이 유발되어 자화 모멘트 방향이 서로 달라지는 현상이 나타나며, 이로 인하여 자화 모멘트 배열의 무질서 증가와 함께 저항이 증가한다. 이때, 자성체 층과 비자성체 층의 두께에 의해 GMR 특성이 결정되며, 비자성체 층의 두께가 더 예민하게 영향을 미친다.[54-56]

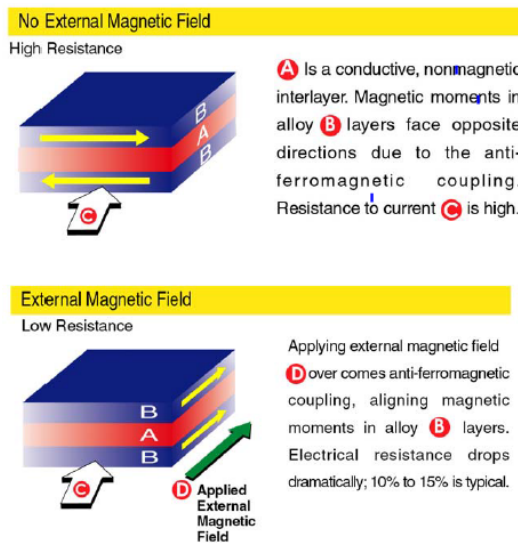


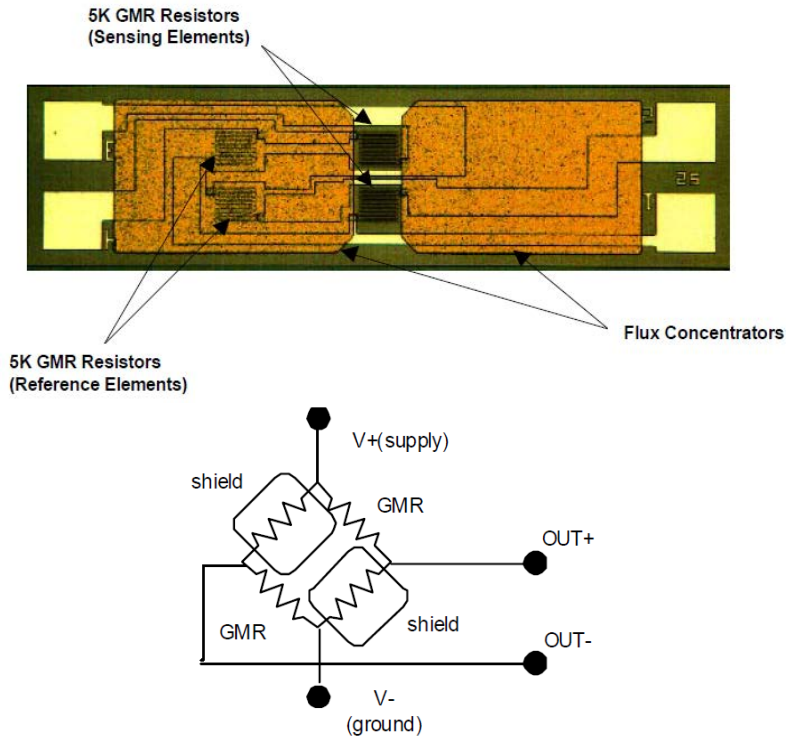
Fig. 2-23 Principles of GMR

(자료출처 : GMR Sensor Catalog by NVE Corporation)



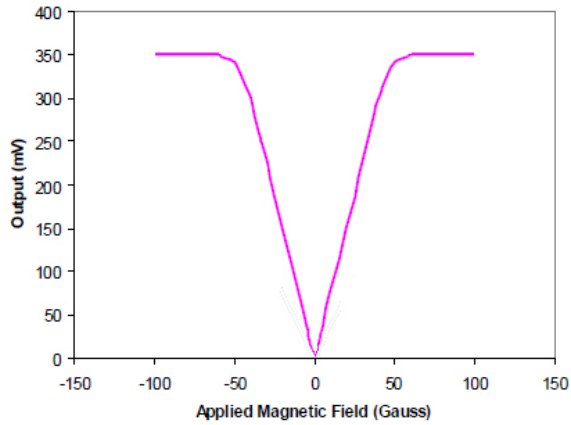
Fig. 2-24는 상술한 GMR 효과를 이용하여 제작한 GMR 센서(AA004-01, by NVE Corporation)의 실사와 블록다이어그램이다. 크기가 가로 1.4 mm, 세로 0.35 mm 정도의 초소형으로 플립칩(Flip chip) 형태로 제작되어 판매된다. 4개의 GMR을 휘스톤브릿지로 배치한 구조이며, 중앙에 위치한 두개의 GMR은 자기장 측정용이며, 왼쪽에 위치한 GMR은 신호출력을 위한 기준 GMR이다. 또한, 제작사만의 노하우가 적용되어 우수한 특성을 가지는데, 플럭스 컨센트레이터(FC, Flux Concentrators)라고 불리는 특수한 구조물을 이용하여 기준 GMR을 외부자기장으로부터 영향을 받지 않도록 차폐를 하며, 각 GMR 사이에 저자기저항 경로를 형성시켜 우수한 특성을 가지도록 한 것이다. 이 제작공법에 대한 경험적 제작공식은 Eq. (23)과 같다.[57]

$$\text{Field at sensor elements} \cong (\text{Applied Field})(60\%)(\text{FC length} / \text{gap between FCs}) \quad (23)$$



**Fig. 2-24 Photograph and equivalent circuit of AA004-01**  
(자료출처: GMR Sensor Catalog by NVE Corporation)

상술한 GMR 센서의 외부 자기장에 의한 자기장 변화( $B_G$ )와 GMR 센서의 출력전압( $V_G$ ) 특성은 Fig. 2-25와 같으며, 외부자기장의 극성에 상관없이 동일한 출력을 나타낸다. 또한, 포화영역에 인접한 영역과 0에 인접한 일부 영역을 제외한 영역(5 ~ 35 Gauss)에서 선형적인 출력특성을 가지며, Eq. (24)와 같이 표현할 수 있다. 여기에서  $C_1$ 과  $C_2$ 는 상수이다.



**Fig. 2-25 Output characteristic curve for AA004-01**  
(자료출처: GMR Sensor Catalog by NVE Corporation)

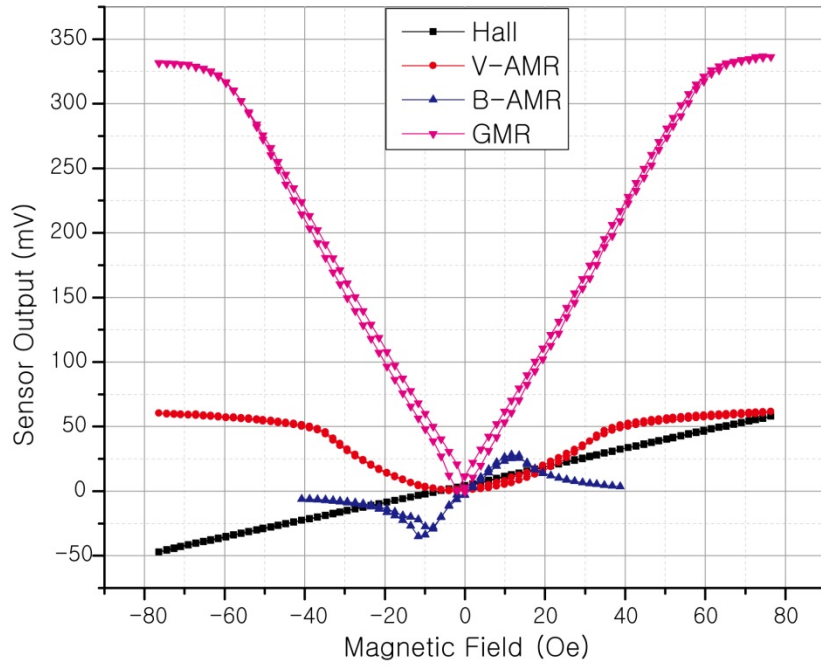
$$V_G = C_1|B_G| + C_2 \quad (-35G < B_G < -5G, 5G < B_G < 35G) \quad (24)$$

## 4. 특성 비교

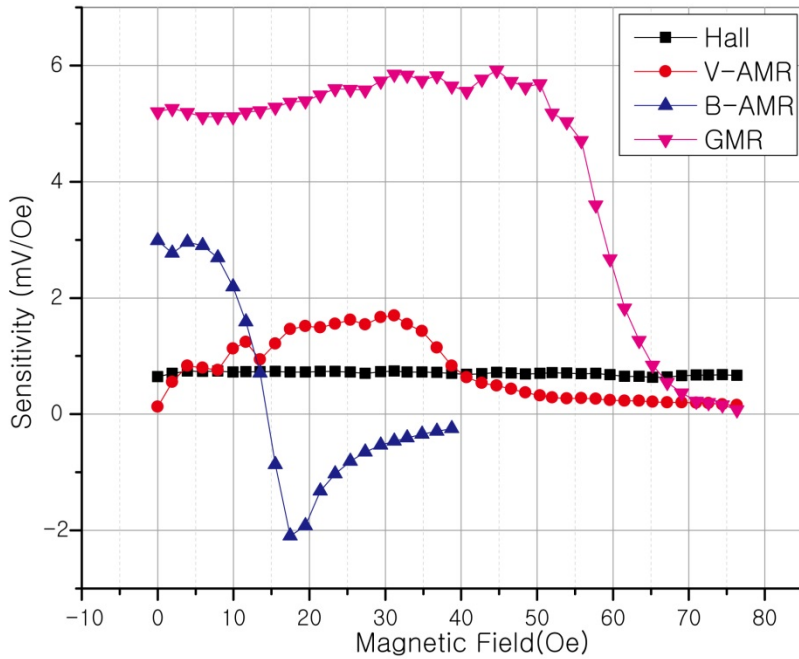
자기 센서에 사용되는 원리 및 현상은 매우 다양하며, 지금도 많은 연구자들에 의해 새로운 센서와 기술들이 개발되고 있다. 이러한 자기 센서들 중 한정적인 응용분야가 아니라 폭 넓은 응용분야에서 일반적으로 사용되는 자기 센서는 홀 효과와 자기저항 효과를 이용한 자기 센서라고 할 수 있다. 본 연구에서도 홀 센서와 자기저항 센서를 이용하여 연구를 수행하였으며, 본 절의 1항 ~ 3항을 통하여 원리 및 특성을 소개하였다. 본 항에서는 상기 자기 센서들의 감도, 히스테리시스, 선형성, 주파수응답 등과 같은 특성비교를 해보았다.

실제 시제작에 사용한 자기 센서들을 솔레노이드에 의해 자기장을 인가하였고, 고정밀 차동연산증폭기(증폭비=1V/V)를 통하여 측정하였다. Fig. 2-26은 각 센서들의 외부자기장 세기에 의한 출력응답을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Hall 센서 및 바버폴 바이어스(barber pole bias) 구조를 가진 AMR (B-AMR) 센서는 극성 판별이 가능하나, 수직 타입 AMR(V-AMR) 센서와 GMR 센서는 극성 판별이 어려움을 알 수 있다. 또한, 그림으로부터 외부자기계에 대한 각 센서의 출력특성도 알 수 있다. 즉, Hall 센서의 출력특성이 전 영역에 걸쳐 선형적으로 우수한 특성을 보이고 있다. B-AMR 센서는  $\pm 10$  Oe 의 영역에서 선형성을 보이며, V-AMR 센서는 선형성을 보이는 구간을 찾기 어려움을 알 수 있다. GMR 센서는 포화영역에 근접한 영역을 제외한  $\pm 50$  Oe 영역에서 선형성을 보이고 있다.

Fig. 2-26 으로부터 획득할 수 있는 각 센서의 외부자기계에 대한 감도를 도시하면 Fig. 2-27 과 같다. 즉, 각 센서의 감도는 Hall 센서 0.72 mV/Oe, V-AMR 센서 1.44 mV/Oe, B-AMR 센서 2.70 mV/Oe, GMR 센서 5.57 mV/Oe 로서, GMR 센서가 가장 좋은 감도 특성을 보이며 Hall 센서에 비하여 약 8배의 감도 특성을 보이고 있다



**Fig. 2-26 Output characteristic curve: Hall vs. V-AMR vs. B-AMR vs. GMR**



**Fig. 2-27 Sensitivity: Hall vs. V-AMR vs. B-AMR vs. GMR**

본 절에서 소개한 자기 센서 중 AMR 센서와 GMR 센서는 강자성체를 자성재료로 사용하는 센서이다. 강자성체는 외부 자계에 의한 자화  $M$ 이 큰 물질이다. 강자성체의 자화특성은 Fig. 2-28과 같은  $B-H$  관계 그래프를 통해 설명할 수 있다.

$a \rightarrow b$  구간처럼 초기 자계 0에서부터 천천히 자계의 세기  $H$ 를 증가하면  $B$ 는 일정한 곡선을 따라 최대 자속밀도  $B_{max}$ 에 이르러 포화(saturation)하게 된다. 이때, 포화하는 최대 자속밀도를 가지는 최대 자계 세기  $H_{max}$ 가 존재한다. 이어서, 자계의 세기를 다시 천천히 감소시킬 경우 자속밀도가 초기 증가하는  $a \rightarrow b$  구간의 곡선과 다른 곡선의 형태( $b \rightarrow c$ )를 보이며, 외부 자계의 세기를 줄여 0이 되어도 강자성체가 자화되는 자속밀도  $B_r$ 을 가진다. 이것을 잔류자속밀도(residual magnetic flux density)라고 하며, 강자성체를 재료로 하는 영구자석의 특성을 결정짓는 중요한 상수가 된다.

$c \rightarrow d$  구간처럼 다시 외부 자계의 세기를 반대방향으로 천천히 증가시킬 경우 잔류자속밀도가 0이 되도록 하는 음의 자계  $-H_c$ 가 존재하며, 이를 보자계(coercive magnetic field)라 한다.  $d \rightarrow e$  구간처럼 더욱더 자계를 반대방향으로 증가하면 자속밀도가 포화상태( $-B_{max}$ )에 이르게 되며,  $e \rightarrow f$  구간처럼 다시 자계의 세기를 줄일 때,  $b \rightarrow c$  구간의 잔류자속밀도  $B_r$ 과는 반대의 성분을 가지는 잔류자속밀도  $-B_r$ 을 가진다.  $f \rightarrow g$  구간처럼 다시 자계를 증가시키면 잔류자속밀도  $-B_r$ 을 0으로 만드는 양의 자계  $H_c$ 가 존재하며,  $g \rightarrow b$  구간처럼 더욱더 자계를 증가시키면 다시 자속밀도가 포화상태에 이르게 된다. 다시 자계를 줄이면  $b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow b$ 와 같은 일련의 과정을 통해  $B-H$  관계를 나타내는 페루프의 곡선을 얻게 된다. 이를, 자기이력곡선(magnetic hysteresis curve, 또는 히스테리시스 루프(Hysteresis Loop))라고 한다.[58]

한편, 이러한 강자성체의 자화특성은 강자성체를 자성재료로 이용하는 자기 센서를 이용하여 외부자기장의 세기가 변하거나, 동일한 외부자기장에서의 반복 측정에서 측정 오차를 발생하게 한다. 이를, 히스테리시스 오차(Hysteresis Error)라 한다. Fig. 2-29는 솔레노이드 코일에 입력하는 전류를 변화시켜 히스테리시스 특성 실험

을 한 결과이다. 반도체 물질을 이용하는 Hall 센서는 히스테리시스 오차가 매우 작지만, 강자성체를 자성재료로 사용하는 AMR 센서와 GMR 센서는 수 mV 에서 수십 mV 의 오차를 가진다.

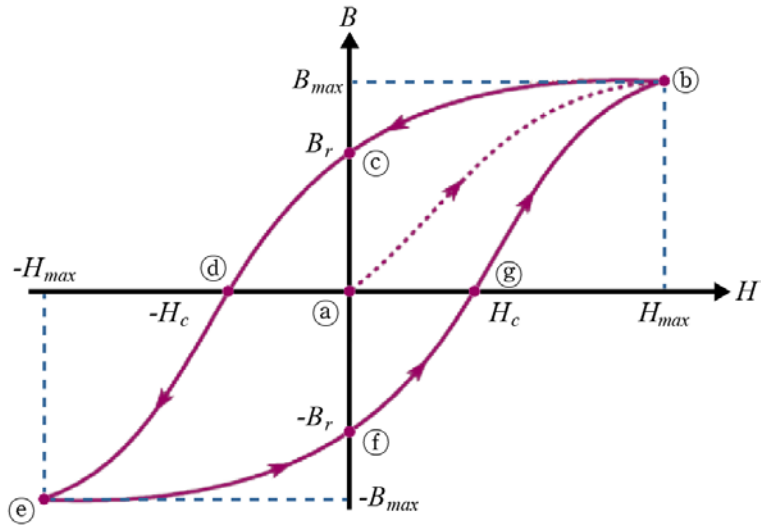


Fig. 2-28 Hysteresis loop

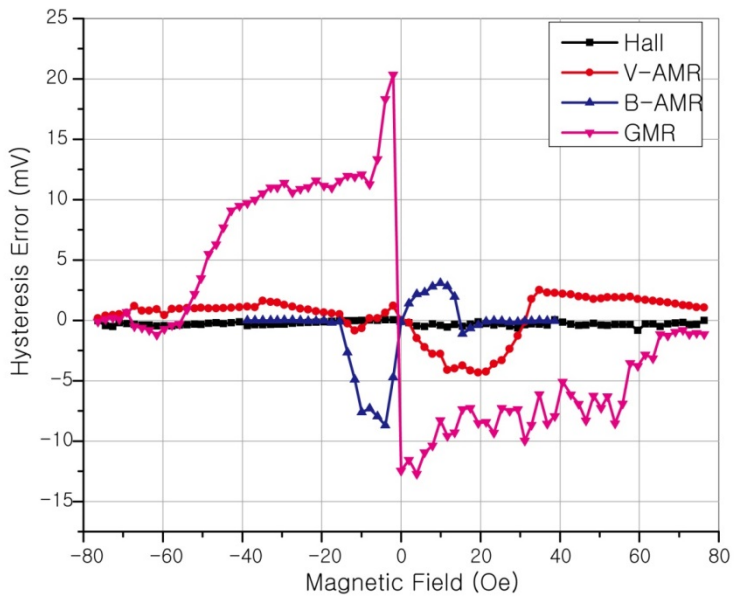


Fig. 2-29 Hysteresis error: Hall vs. V-AMR vs. B-AMR vs. GMR

## 제 4 절 자기카메라 및 자기벡터카메라

자기카메라는 전자기적 현상을 이용하여 검사 대상체의 결함을 측정 및 분석하는 비파괴검사 기술이다. 직류자기장, 교류자기장, 유도전류, 헬름홀츠코일, 지자기등과 같은 자원에 의하여 전자기장을 금속 구조물, 배관, 철근 콘크리트 구조물 및 금속성 위험물 등에 인가하면 불순물이나 결함의 의해 전자기장의 왜곡이 발생한다. 이러한 전자기장의 왜곡을 자기센서 또는 자기 센서배열에 의하여 전기신호 변환된다. 변환된 전기신호는 A/D 변환기 등의 신호처리장치를 통하여 컴퓨터에 보내져 자기장 분포를 가시화하거나 분석 및 평가를 할 수 있다.

자기카메라는 저자가 속해 있는 연구그룹의 주요 연구과제이며, 10여년 이상 꾸준히 연구개발을 해오고 있는 국산 원천기술이다. NDT 분야의 세계적인 추세인 초정밀화, 초고속화, 자동화 및 화상화가 가능하며, 일부 기술은 산업현장 적용을 위한 시운용 중일 정도로 높은 수준에 도달해 있다.

본 절에서는 자기카메라의 원리와 자기카메라의 기술을 기반으로 하여 개발한 자기벡터카메라에 대하여 서술하였다.

# 1. 자기카메라의 원리

자기카메라는 구성 면에서 광학카메라와 비슷한 면모를 보인다. 그 원리는 Fig. 2-30에 나타난 바와 같이 검사 대상체(object)에 자원(magnetic source)을 인가하면 검사 대상체에 존재하는 결함 등에 의하여 인가된 전자기장의 왜곡이 발생한다. 왜곡된 전자기장은 단일 자기 센서나 1차원 또는 2차원으로 배열된 자기 센서에 의해 측정되어 전기신호로 변환된다. 변환된 전기신호는 증폭기, A/D 변환기, 인터페이스 등을 거치며 가공되어 컴퓨터에 전송된다. 전송된 신호를 전용 소프트웨어를 이용하여 실시간으로 자기분포 영상을 가시화 하거나 분석하여 검사대상체의 결함을 검출하게 된다. 이러한 원리를 이용하는 자기카메라는 자기 센서를 이용하는 방법에 따라 스캔형 자기카메라, 면적형 자기카메라, 보빈형 자기카메라 등으로 분류된다.

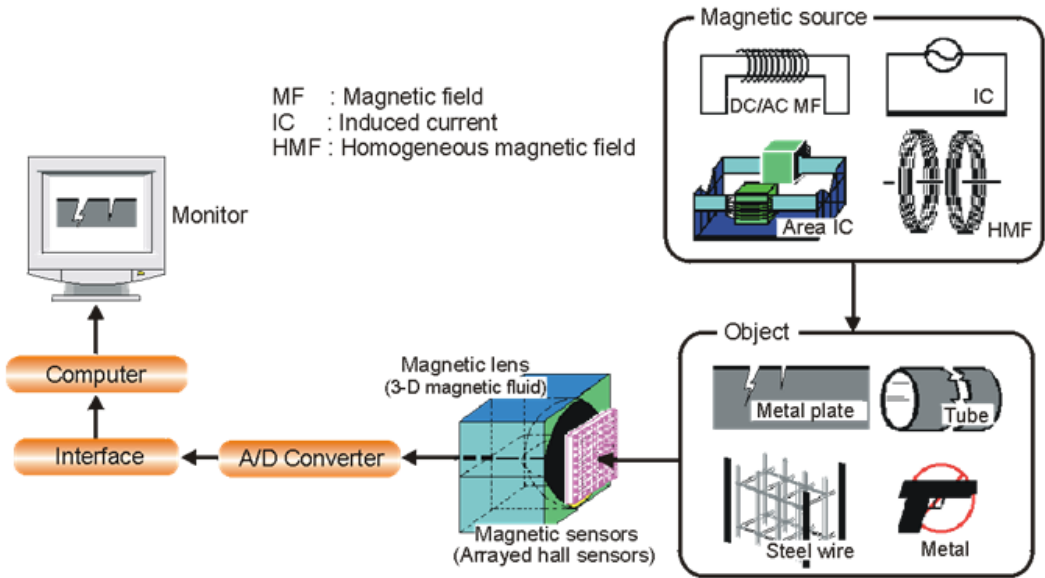


Fig. 2-30 Magnetic camera



## 가. 스캔형 자기카메라

스캔형 자기카메라는 단일 자기센서나 1차원으로 자기 센서를 선형으로 조밀하게 배열하고 고정밀 이송장치를 이용하여 검사 대상체를 1차원으로 스캔하여 자기장의 분포를 취득하는 방법이다. 자기 센서 배열시 Hall, AMR, GMR 등의 자기 센서를 사용하며, 측정하고자 하는 영역, 공간분해능, 제작비용, 아날로그-디지털 신호 변환기(A/D Converter)의 신호 입력 채널 수 등을 고려하여 보통 32개 ~ 80개의 자기 센서를 이용하여 배열한다. 자기 센서 배열시 얼마나 조밀하게 배열하는지가 결함 검출능과 직결되는 요인이기에 일반적으로 그 크기가 작은 bare chip 형태의 Hall 센서나 flip chip 형태의 GMR 센서를 사용한다.

Fig. 2-31은 스캔형 자기카메라에 사용되는 센서의 일례를 나타낸다. Fig. 2-30(a)와 같이 가로 520um, 세로 520um 크기의 Hall 센서를 520um 간격으로 64개를 선형으로 배열하고, Fig. 2-30(d)와 같이 배선하여 제작한 스캔형 자기카메라용 선형 배열 Hall 센서(LIHaS, Linearly Integrated Hall Sensor array)이다. Fig. 2-30(b)의 소형 자화기를 LIHaS와 결합하여 Fig. 2-30(c)와 같이 모듈화하여 사용할 수 있다.

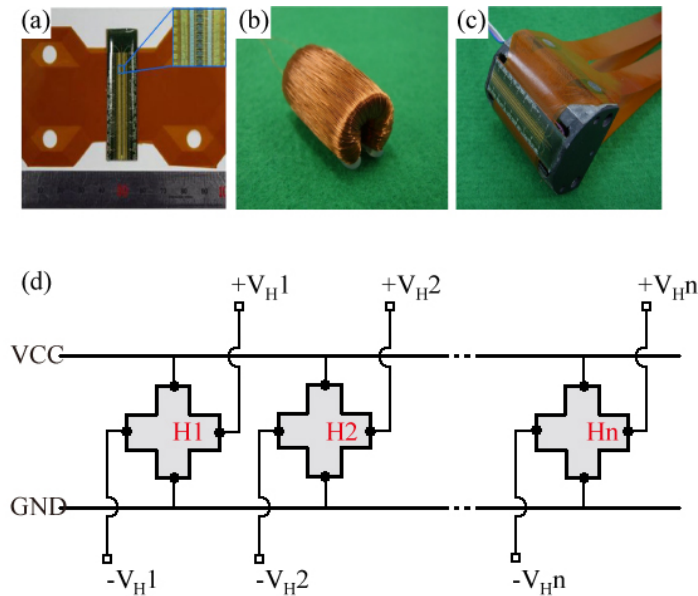


Fig. 2-31 Linearly Integrated Hall Sensor array

Fig. 2-32는 Fig. 2-31의 LIHaS를 사용할 경우의 스캔형 자기카메라의 블록다이어그램이다. LIHaS와 소형 자화기를 모듈화한 센서부는 정밀 이송장치에 장착되어 검사 대상체를 선형으로 스캐닝하여 신호를 검출한다. 검출된 신호는 필터부를 거쳐 증폭부로 전달된다. 증폭된 신호는 다기능 신호수집장치(DAQ, Data Acquisition device)를 통해 디지털신호로 변환된 후 컴퓨터로 전송되어 가시화된다. 한편, 유도된 와전류에 의한 자기장의 변화를 검출할 경우에는 검출된 교류 신호를 증폭 후 교류-직류 신호변환기(RMS-to-DC Converter)에서 신호분석 및 후처리가 용이한 직류 신호로 변환되어 다기능 DAQ로 전송된다.

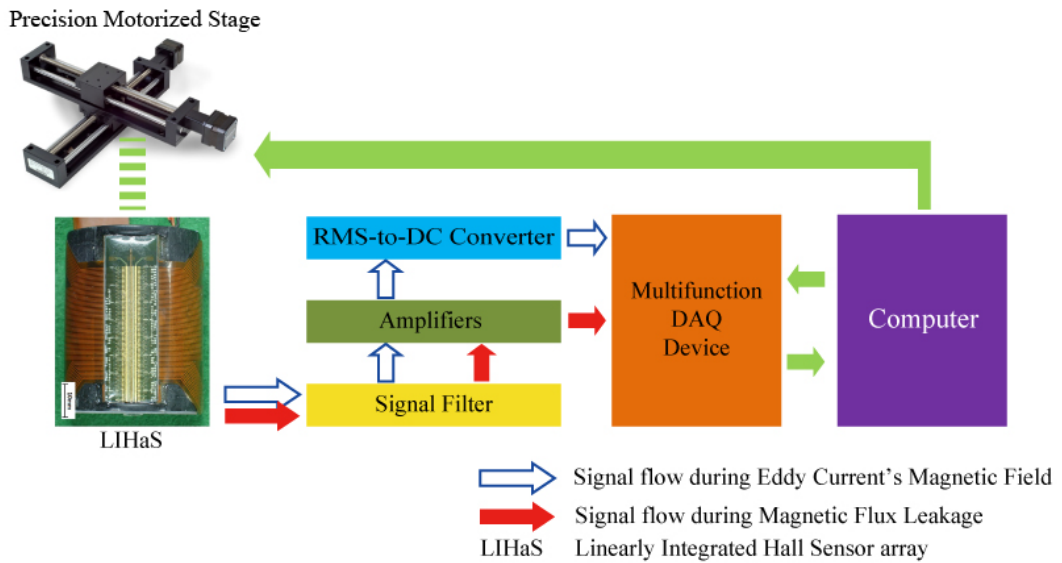
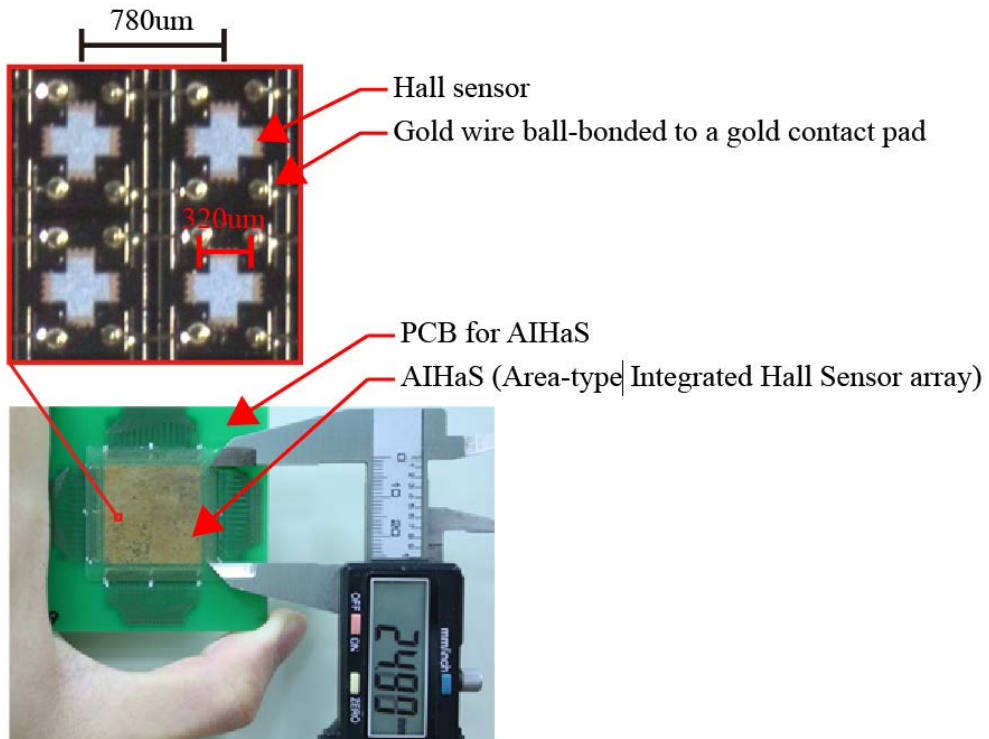


Fig. 2-32 Scan-type magnetic camera block diagram

## 나. 면적형 자기카메라



**Fig. 2-33 Area-type Integrated Hall Sensor array**

면적형 자기카메라는 자기 센서를 2차원 면적으로 배열하여 검사 대상체의 자기장 분포를 측정하는 방법이다. Fig. 2-33은 가로  $320\mu\text{m}$ , 세로  $320\mu\text{m}$  인 Hall sensor를  $780\mu\text{m}$  간격으로 행 방향으로 32개, 열 방향으로 32개 배열하고, wire ball bonding에 의하여 배선 후, 전용 PCB에 실장하여 제작한 면적형 자기카메라용 면적형 배열 Hall 센서(AIHaS, Area-type Integrated Hall Sensor array)의 한 예이다.

AIHaS에서 주목할만한 점은 최소한의 배선으로 1,024개의 Hall 센서에서 센서 간의 상호간섭 없이 자기장 분포를 취득할 수 있다는 것이다. Hall 센서는 입력단자 2개와 출력 단자 2개로 구동되는 센서이다. 원론적인 관점에서 1,024개의 Hall 센서를 구동하기 위해서는 2,048개의 입력단자와 2,048개의 출력단자가 필요하다. 하지

만, Fig. 2-34의 방법을 이용하면 64개의 입력단자와 64개의 출력단자만 가지고도 구동을 할 수가 있다. 각각의 Hall 센서는 4개의 저항을 가지는 저항 브릿지로 표현되었으며, 각 단자의 입력선이 횡축으로 연결되어 공통화 되었으며, 스위치(SW1a, SW1b, SW2a, SW2b)를 순차적으로 조정하여 입력전원(VCC 및 GND)을 순차적으로 공급받을 수 있다. 즉, SW1a와 SW1b를 ON 상태로 놓은 상태에서 다른 스위치를 OFF로 하면, 1행의 Hall 센서들만 활성화된다. 또한, SW1a와 SW1b를 OFF 상태로 놓은 상태에서 SW2a와 SW2b를 ON으로 하면, 2행의 Hall 센서들만 활성화된다. 한편,  $\pm V_{H1}$ ,  $\pm V_{H2}$ 는 상호 독립적인 출력을 나타내며, 스위치의 조정에 의하여 1행의 Hall 센서들이 활성화되었을 때 각각 1행 1열과 1행 2열의 출력신호를 상호 전기적인 간섭 없이 측정할 수 있다. 이러한 원리를 이용하면 1,024개의 Hall 센서뿐 아니라 수천 ~ 수만 개의 센서 배열에도 적용할 수 있다. Fig. 2-35는 Fig. 2-33의 AIHaS를 사용할 경우의 면적형 자기카메라의 블록다이어그램이다. 검출된 신호의 흐름은 전술한 스캔형 자기카메라와 동일하지만, 상술한 센서의 전원전압을 제어하는 스위칭부와 디멀티플렉서(DEMUX, demultiplexor)를 다기능 DAQ에서 제어하는 본 연구 그룹만의 독창적인 기술이 적용되어 있다.

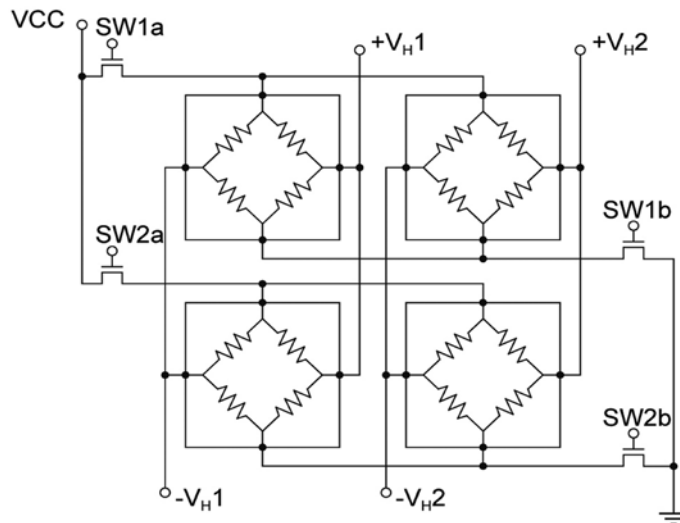


Fig. 2 -34 Equivalent circuit of AIHaS

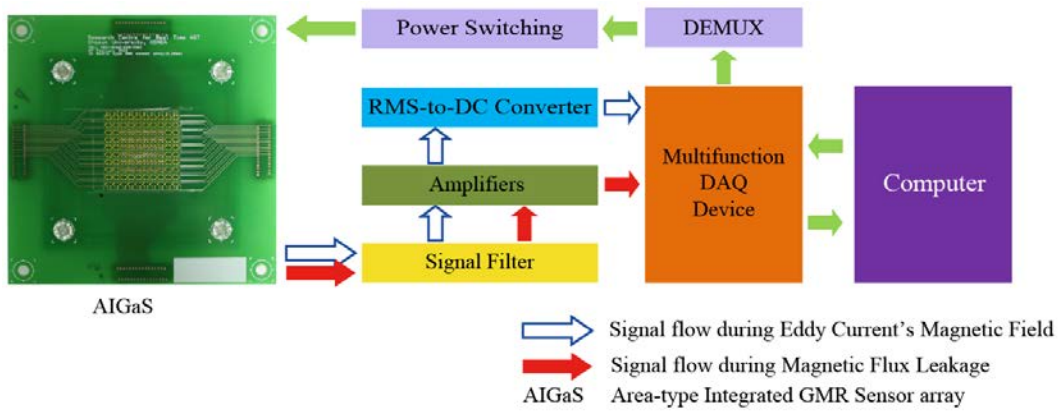
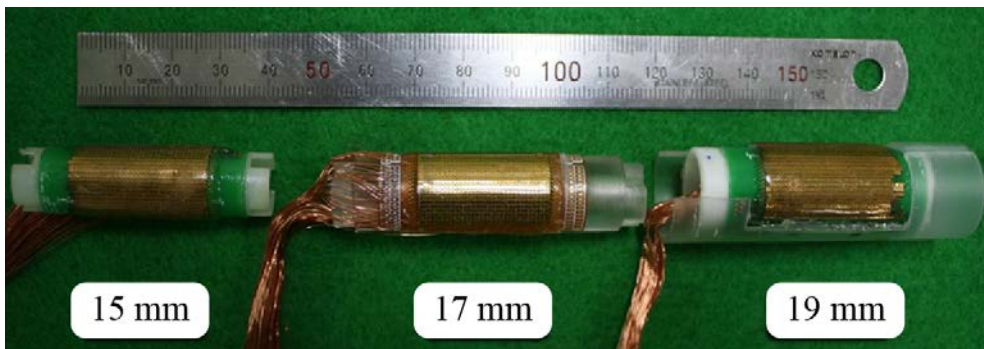


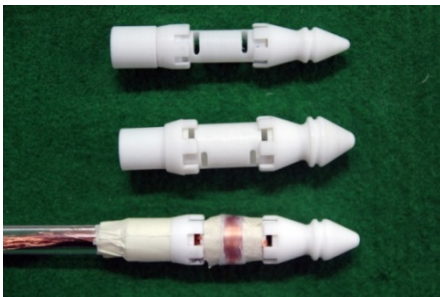
Fig. 2 -35 Area-type magnetic camera block diagram

## 다. 보빈형 자기카메라

보빈형 자기카메라는 소구경 배관 내외벽으로부터 발생하는 자기장의 분포를 측정하기 위하여, 실린더형으로 자기 센서를 배열(CIHaS, Cylindrical Integrated Hall Sensor array)하여 개발한 자기카메라이다. Fig. 2-36(a)는 가로 320um, 세로 320um 인 1,024개의 Hall 센서를 원주방향으로 32개, 축 방향으로 32개를 2차원 면적으로 배열하고, 상술한 면적형 자기카메라의 배선원리를 이용하여 제작한 보빈형 자기카메라이다. Fig. 2-36(a)는 각각 내경 15mm, 17mm, 19mm의 배관 내외벽의 자기장 분포를 측정할 수 있으며, lift-off는 0.5~1mm로 유지하도록 제작된 예를 나타낸다. Fig. 2-36(b), (c)는 스캔형 자기카메라를 응용하여 제작한 보빈스캔형 자기카메라이다. 가로 200um, 세로 200um 크기의 Hall 센서 70개를 780um 간격으로 원주곡면을 따라 배열하였다. 또한, 배열된 센서의 외부에 코일을 권선하여 배관 내벽에 자원을 인가하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2-36 Cylindrical-type Integrated Hall Sensor array

Fig. 2-37은 Fig. 2-36(c)의 CIHaS를 사용할 경우의 보빈형 자기카메라의 블록다이어그램이다. Fig. 2-36(b)의 하단과 같이 외부에 코일을 권선한 CIHaS 센서부는 정밀 이송장치에 장착되어 검사 대상체에 삽입되어 선형으로 스캐닝하여 신호를 검출한다. 검출된 신호는 필터부를 거쳐 증폭부로 전달된다. 증폭된 신호는 다기능 신호수집장치(DAQ, Data Acquisition device)를 통해 디지털신호로 변환된 후 컴퓨터로 전송되어 위치정보와 조합되어 가시화된다. 한편, 유도된 와전류에 의한 자기장의 변화를 검출할 경우에는 검출된 교류 신호를 증폭 후 교류-직류 신호변환기(RMS-to-DC Converter)에서 신호분석 및 후처리가 용이한 직류 신호로 변환되어 상술한 다기능 DAQ로 전송된다.

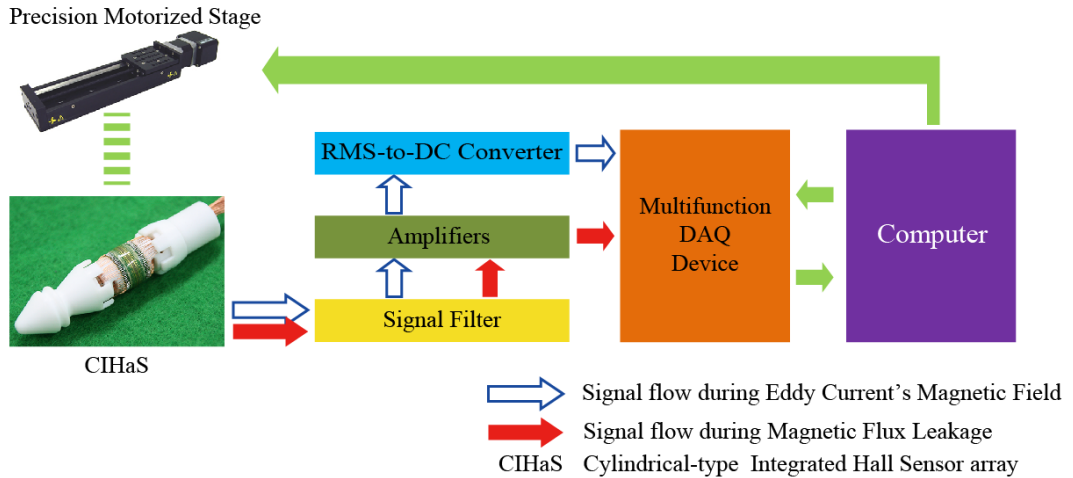


Fig. 2 -37 Bobbin-type magnetic camera block diagram

## 2. 자기벡터카메라의 원리

자기장 분포의 변화는 공간적 현상이다. 하지만, 기존의 자기카메라는 오직 측정면으로부터 한 방향(예를 들어  $z$ 축 방향)에 대한 자기장 분포만을 측정한다. 본 연구에서는 기존의 자기카메라에 다른 방향( $x$  또는  $y$  축 방향, 또는  $x$ - $y$  축 방향 모두)에 대한 자기장 분포를 측정할 수 있는 자기 센서를 결합시켜 측정면에 대하여 공간적으로 자기장의 분포를 취득 할 수 있는 자기벡터카메라를 제안한다. 전술한 바와 같이 수직방향으로 감자면을 가지는 Hall 센서와 수평방향으로 감자면을 가지는 GMR 또는 AMR 센서를 각각 선형으로 평행하게 배열하거나, 2차원 면적형으로 배열하여 중첩시켜 자기장 분포의 수직성분과 수평성분을 동시에 측정할 수 있다. 여기에서 전자는 스캔형 자기벡터카메라라고 하며, 후자는 면적형 자기벡터카메라라고 한다. 이와 같이 감자방향이 다른 이중 자기센서를 조합하여 개발한 자기카메라를 자기벡터카메라라고 한다.

자기벡터카메라에 의해 검출된 신호는 직각좌표계에서 Eq. (25)와 같이 벡터  $\vec{B}_{MVC}$ 로 표현할 수 있으며, 수직성분인  $B_z$ 는 Hall 센서에 의해 검출된 신호이며, 수평성분  $B_x$ 는 AMR 또는 GMR 센서에 의해 검출된 신호를 나타낸다.  $B_y$ 는 AMR 또는 GMR 센서를  $xy$ 평면상에서  $90^\circ$  회전하여 검출할 수 있다.

$$\vec{B}_{MVC} = B_x\hat{i} + B_y\hat{j} + B_z\hat{k} \quad (25)$$



## 가. 스캔형 자기벡터카메라

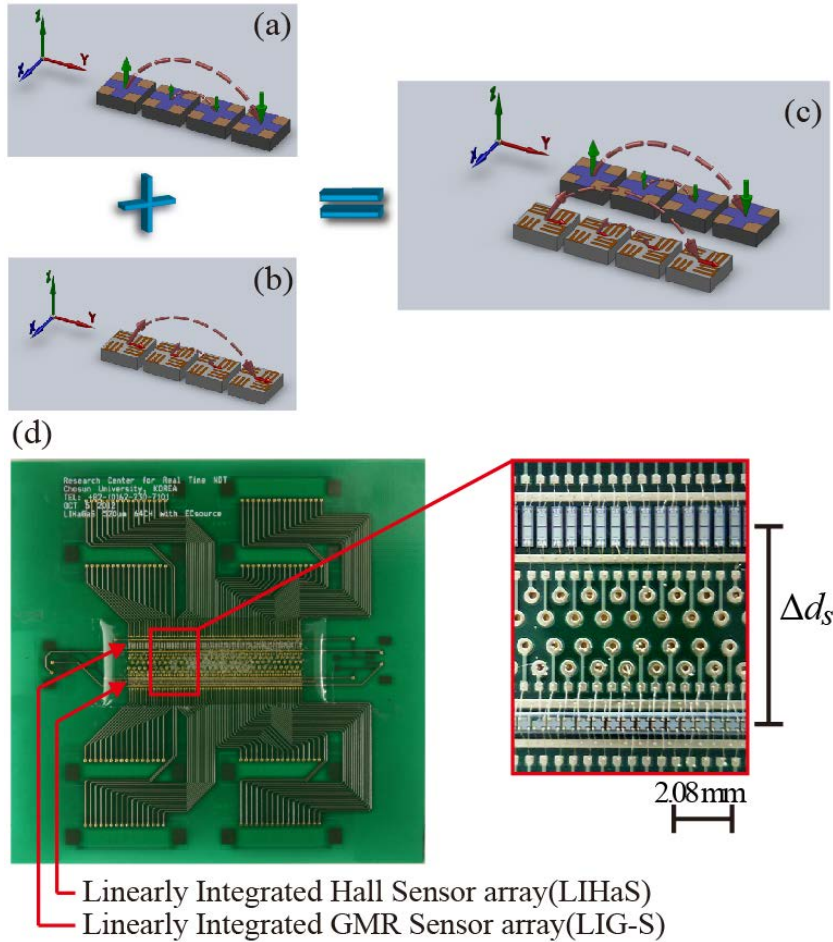
### (1) 선형 배열 스캔형 자기 벡터 카메라

감자방향이 다른 자기센서를 선형으로 1차원 배열하여 결합한 후 고정밀 이송장치를 이용하여 자기장 벡터의 분포를 측정하는 방법이 스캔형 자기벡터카메라이다. Fig. 2-38은 센서의 감자면에 수직방향(z축 방향)으로 감자방향을 가지는 Hall 센서(Fig. 2-38(a))와 수평방향(x축 방향)으로 감자방향을 가지는 GMR 센서(Fig. 2-38(b))를 결합하여 시제작한 스캔형 2차원 자기벡터카메라(Fig. 2-38(c),(d))의 일레이다. 각각의 자기 센서를  $520\mu\text{m}$  간격으로 64개를 선형배열하고 평행하게 위치시켜 자기장 분포를 측정한다. 이때, Hall 센서 선형배열(LIHaS)과 GMR 센서 선형배열(LIG-S, Linearly Integrated GMR Sensor array)은 신호 배선 처리를 위한 최소한의 공간(이격거리( $\Delta d_s$ ))을 두고 위치한다. Hall 센서와 GMR 센서의 외부자기장과 출력전압에 대한 관계식 Eq. (17), Eq. (24)와 상술한 Eq. (25)를 이용하여 Eq. (26)으로 표현할 수 있다.

$$\vec{B}_{MVC} = B_y \hat{j} + B_z \hat{k} = \left( \pm \left| \frac{C_2 + V_G}{C_1} \right| \right) \hat{j} + \frac{V_H}{k \cdot I \cdot \cos \theta} \hat{k} \quad (26)$$

한편, Hall 센서와 GMR 센서의 배열방향을 y라고 하고, 배열방향에 수직인 방향을 x라고 하면 x방향은 자기장 분포를 측정하기 위한 스캔방향이 된다. x방향으로 스캔하여 자기장 분포를 검출할 경우, 먼저 GMR 센서 배열에 의해 수평성분을 측정하게 되고, 이어서 Hall 센서 배열에 의해 수직성분을 측정한다. 이때, Hall 센서와 GMR 센서간의 이격거리( $\Delta d_s$ )를 적용한  $\vec{B}_{MVC}$ 에 관한 식은 Eq. (27)과 같으며, 전용소프트웨어(Fig. 2-40)에 의해 측정과 동시에 실시간으로 자기장 벡터 분포를 가시화한다. 이와 같은 방법을 이용하여 x, y, z 축 방향 각각의 자기장 분포를 측정할 수 있는 센서를 결합하여 3차원 자기벡터카메라로도 제작할 수 있다.

$$\vec{B}_{MVC}(x, y) = \left( \pm \left| \frac{C_2 - V_G}{C_1} \right| \right) (x, y) \hat{j} + \left( \frac{V_H}{k \cdot I \cdot \cos \theta} \right) (x + \Delta d_s, y) \hat{k} \quad (27)$$



**Fig. 2-38 Combination of LIHaS and LIGaS**

Fig. 2-39는 Fig. 2-38의 스캔형 2차원 자기벡터카메라의 블록다이어그램이다. LIG-S와 LIHaS를 결합한 센서부는 정밀 이송장치에 장착되어 검사 대상체를 선형으로 스캐닝하여 신호를 검출한다. 검출된 신호는 필터부를 거쳐 증폭부로 전달되며, 증폭된 신호는 다기능 신호수집장치(DAQ, Data Acquisition device by National Instruments Corporation)를 통해 디지털신호로 변환된 후 컴퓨터로 전송되어 위치정보와 조합된 후 가시화된다. 한편, 유도된 와전류에 의한 자기장의 변화를 검출할 경우에는 검출된 교류 신호를 증폭 후 교류-직류 신호변환기(RMS-to-DC Converter)에서 신호분석 및 후처리가 용이한 직류 신호로 변환되어 다기능 DAQ로 전송된다.

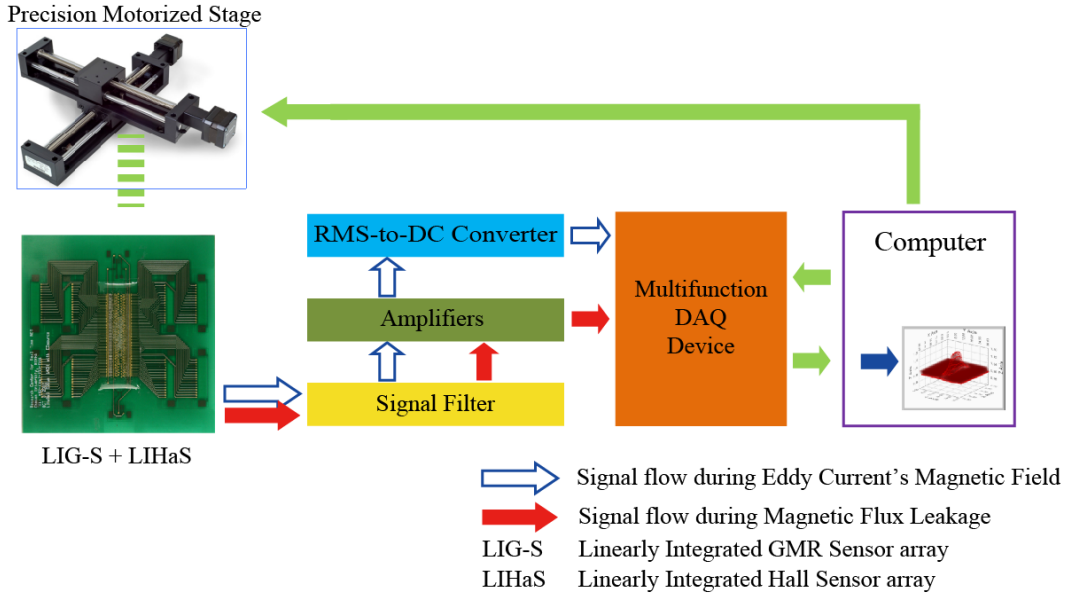


Fig. 2-39 Block diagram for a scan-type magnetic vector camera

Fig. 2-40은 상술한 스캔형 2차원 자기벡터카메라에 적용하기 위해 개발된 전용 소프트웨어이다. 내쇼날인스트루먼트(National Instruments)사의 그래픽 기반 개발 프로그램인 LabVIEW를 사용하여 개발하였다. Fig. 2-39에 표기된 각 부위의 기능은 아래와 같다.

- (a) 정밀이송장치 통신환경 설정 및 수동 제어
- (b) DAQ의 아날로그 신호 입력 환경 설정
- (c) 측정영역 설정 및 측정 시작, 정지 버튼
- (d) 측정된 신호 저장 및 불러오기
- (e) 측정된 신호의 수직성분 강도 표현
- (f) 측정된 신호의 수평성분 강도 표현
- (g) 3차원 벡터 표현

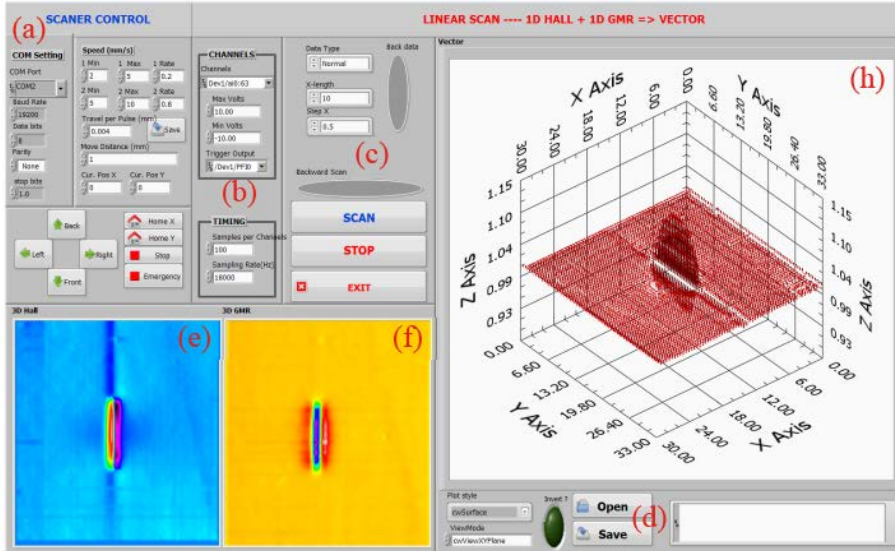


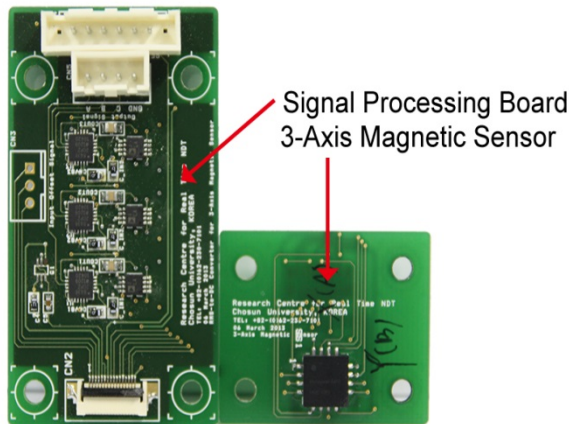
Fig. 2 -40 Scan-type magnetic vector camera software

## (2) 단일 센서 스캔형 자기 벡터 카메라

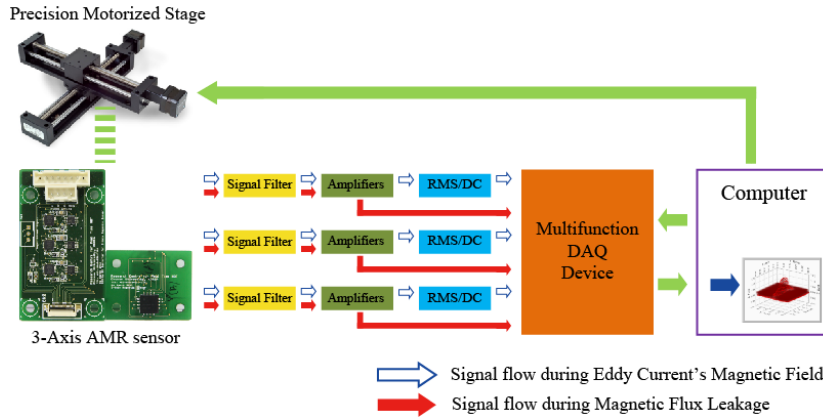
상술한 선형 배열 스캔형 자기벡터카메라와는 다른 형태의 스캔형 자기벡터카메라도 시제작을 시도하였다. 하나의 반도체 패키지에 같은 감자면을 가지는 자기 센서 3개를 XYZ-직각좌표계에 의해 3차원으로 배치시켜 제작한 센서를 이용한다. 동일한 센서를 이용하는 것이므로 센서 특성에 따른 오차가 적고 센서간의 이격거리 또한 극히 짧으므로 신뢰성 높은 3차원 자기장 벡터 분포를 취득할 수 있다. 또한, 스캔 분해능을 고정밀 이송장치에 의존하므로 센서의 크기에 제약을 받는 선형 배열 스캔형 자기벡터카메라 보다 조밀하게 측정이 가능하여 검출능이 우수하다. 하지만, 이러한 방법은 하나의 센서로 측정영역을 xy평면상에서 고정도로 이동하며 측정하기 때문에 측정속도가 느려 실제 산업현장에는 적용하기 힘들다. 하지만, 신뢰성 높은 3차원 자기장 벡터 분포를 측정할 수 있으므로, 상이한 방법의 자기벡터 카메라의 비교검증이나 자구 변화 관찰 등으로서 활용이 가능하다.

Fig. 2-41은 가로 7.4 mm, 세로 7.4 mm 크기의 반도체 패키지 내부에 세 개의 B-AMR 센서를 3차원으로 배치시킨 3축 AMR 센서를 부착한 센서부와 고정밀 차

동연산증폭기를 내재한 신호처리부를 나타낸다. Fig. 2-42는 Fig. 2-41을 이용한 단일 센서 스캔형 3차원 자기벡터카메라의 블록다이어그램이다. 전용소프트웨어로 제어되는 정밀이송장치에 부착된 3축 AMR 센서를 고정도로 이동하며 자기장의 분포를 측정한다. 측정된 신호는 내재된 3개의 B-AMR 센서에 의해 x, y, z 성분의 신호로 나누어져 각각 필터부를 거쳐 증폭부로 전달된다. 증폭된 신호는 다기능 DAQ를 통해 디지털신호로 변환된 후 컴퓨터로 전송되어 가시화된다. 한편, 유도된 와전류에 의한 자기장의 분포를 측정할 경우에는 측정된 교류 신호를 증폭 후 교류-직류 신호변환기(RMS-to-DC Converter)에서 신호분석 및 후처리가 용이한 직류 신호로 변환되어 다기능 DAQ로 전송된다. 이와 같은 단일 센서 스캔형 3차원 자기벡터카메라는 330 mm × 33 mm 의 영역을 공간분해능 0.5mm 로 측정할 경우 최대 스캔속도 10 samples/sec가 가능하며, 780 $\mu$ m의 공간분해능으로 25mm × 25 mm 영역의 전자기장 분포를 가시화하면서 정량적으로 측정할 때 약 130초가 소요된다.



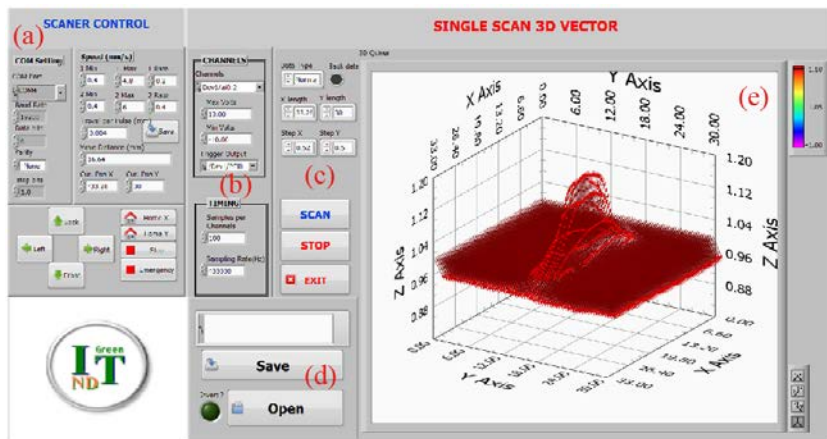
**Fig. 2-41 3-Axis AMR sensor**



**Fig. 2 -42 Block diagram for a single sensor scan-type magnetic vector camera**

Fig. 2-43은 상술한 단일 센서 스캔형 3차원 자기벡터카메라에 적용하기 위해 개발된 전용소프트웨어이다. 전술한 바와 같이 내쇼날인스트루먼트사의 그래픽 기반 개발 프로그램인 LabVIEW를 사용하여 개발하였다. Fig. 2-42에 표기된 각 부위의 기능은 하기와 같다.

- (a) 정밀이송장치 통신환경 설정 및 수동 제어
- (b) DAQ의 아날로그 신호 입력 환경 설정
- (c) 측정영역 설정 및 측정 시작, 정지 버튼
- (d) 측정된 신호 저장 및 불러오기
- (e) 측정된 신호 3차원 벡터 표현



**Fig. 2 -43 Single sensor scan-type magnetic vector camera software**

## 나. 면적형 자기벡터카메라

면적형 자기카메라의 장점 중 하나는 자기장 분포를 측정하기 위한 고정밀 이송장치가 필요하지 않으며, 경우에 따라서는 휴대형으로 사용할 수 있다는 것이다. 이러한, 면적형 자기카메라의 장점에 맞추어 면적형 자기벡터카메라는 이중 자기 센서를 중첩하여 시제작하였다. Fig. 2-44는 면적형 자기벡터카메라의 원리를 도시한 것이다. 그림과 같이 수직방향(z축 방향)으로 감자면을 가지는 자기 센서를 xy평면 상에 2차원 배열하고, 수평방향(x 또는 y축 방향, 또는 x-y 축 방향)으로 감자면을 가지는 자기 센서도 xy평면 상에 2차원 배열한 후 중첩하였다. 자기장 분포의 수직 성분은 Hall 센서를 이용하여 측정하였고, 수평성분은 V-AMR 센서 또는 GMR 센서를 이용하였다. 이때, Hall 센서 배열은 다른 자기 센서 배열의 뒤에 위치시켜 Hall 센서의 반도체 원판(substrate)으로 사용되는 강자성체(Ni-Zn Ferrite)에 의한 자기장 분포의 왜곡을 최소화하였다.

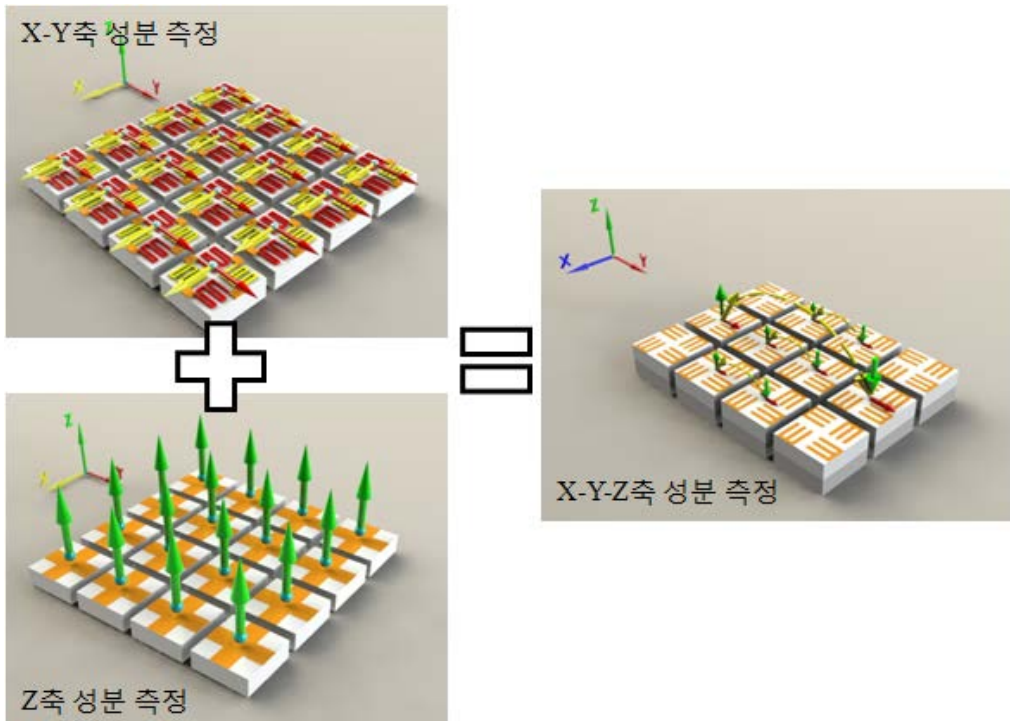
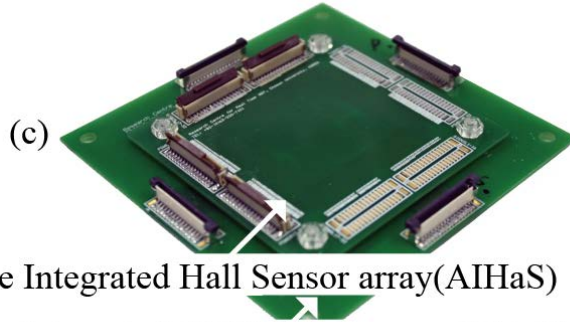
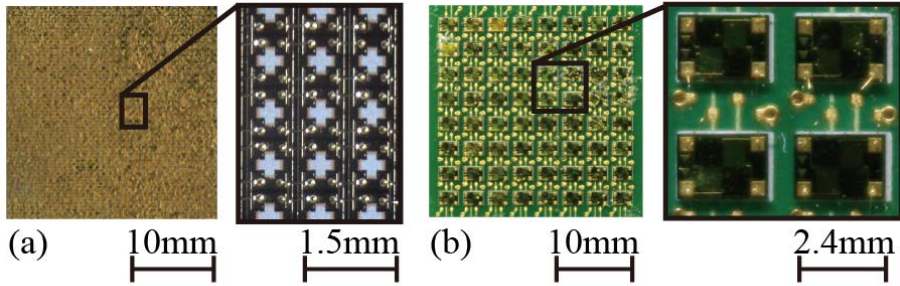


Fig. 2-44 Principles of 3-D magnetic vector visualization





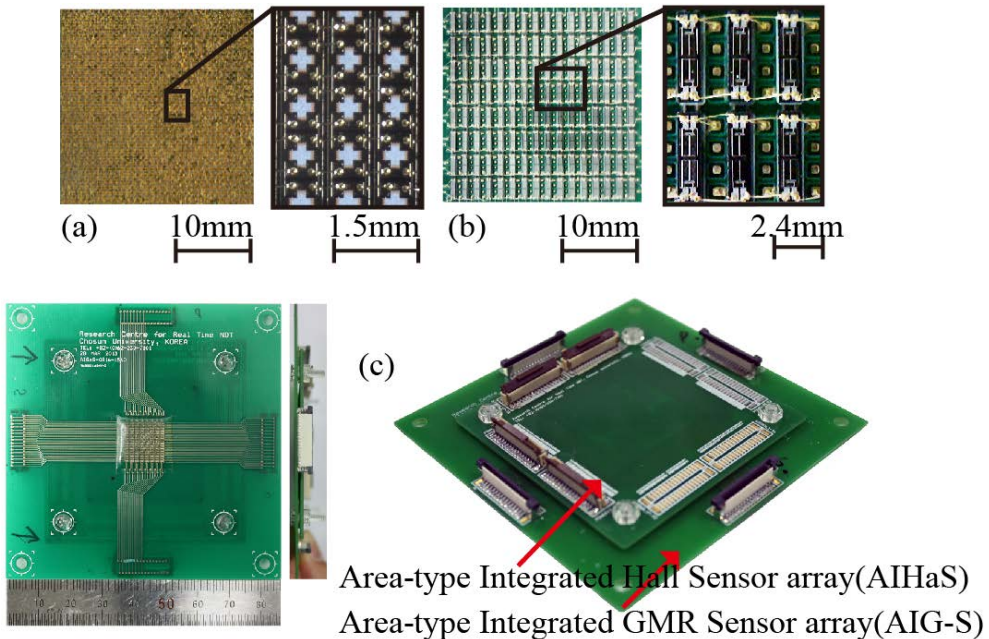
Area-type Integrated Hall Sensor array(AIHaS)

Area-type Integrated AMR Sensor array(AIA-S)

**Fig. 2-45 Structural superimpose for an area-type magnetic vector camera using AIHaS and AIA-S**

Fig. 2-45는 1,024개의 2차원 Hall 센서 배열(32행, 32열, Fig. 2-45(a))과 64개의 2차원 V-AMR 센서 배열(8행, 8열, Fig. 2-45(b))을 이용하여 시제작한 2차원 면적형 자기벡터카메라이다. Hall 센서를 이용한 기존의 면적형 자기 센서 배열에 V-AMR 센서를 이용한 면적형 자기 센서 배열을 중첩하였다.(Fig. 2-45(c)) Hall 센서의 배열 간격은  $780\mu\text{m}$  이며, V-AMR 센서의 배열 간격은 3.12mm 로 Hall 센서 4개당 V-AMR 센서 하나가 중첩되는 구조이다. 이것은 V-AMR 센서의 크기(가로 2.4mm, 세로 1.7mm)로 인한 배열 공간 부족으로 인한 것이며, 이때의 공간분해능은 3.12mm로 매우 낮아 실효성이 떨어진다. 본 연구에서는 V-AMR 센서를 이용하여 가능성만 확인하는 수준의 연구만 수행하였고, GMR 센서를 이용하여 보다 많은 연구를 수행하였다.



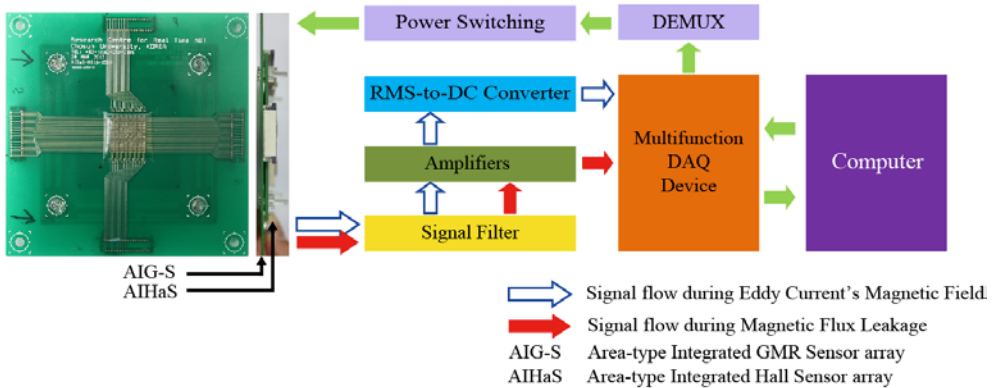


**Fig. 2-46 Structural superimpose for an area-type magnetic vector camera using AIHaS and AIG-S**

Fig. 2-46은 1,024개의 2차원 Hall 센서 배열(32행, 32열, Fig. 2-46(a))과 128개의 2차원 장방형 GMR 센서 배열(16행, 8열, Fig. 2-46(b))을 이용하여 시제작한 2차원 면적형 자기벡터카메라이다. Hall 센서를 이용한 기존의 면적형 자기 센서 배열에 GMR 센서를 이용한 면적형 자기 센서 배열을 중첩하였다.(Fig. 2-46(c)) Hall 센서의 배열 간격은  $780\mu\text{m}$ 이며, GMR 센서의 배열 간격은 행 방향으로  $780\mu\text{m}$ , 열 방향으로  $1.56\text{mm}$ 로, 행 방향으로 Hall 센서 1개당 GMR 센서 1개가 중첩되며, 열 방향으로 Hall 센서 2개당 GMR 센서 1개가 중첩되는 구조이다.

Fig. 2-47은 Fig. 2-46의 2차원 이중 자기 센서 배열을 이용한 면적형 2차원 자기 벡터카메라의 블록다이어그램이다. AIG-S와 AIHaS를 중첩한 센서부를 검사 대상체에 인접시켜 신호를 검출한다. 정밀이송장치를 이용하여 실시간으로 자기장의 분포를 검출할 수 있을뿐만아니라 검사자가 센서부를 직접 파지하여 검사를 수행할 수도 있다. 전술한 면적형 자기카메라와 같이 DEMUX와 스위칭부를 통해 센서에 전원을 공급하여 자기장의 분포를 검출한다. 검출된 신호는 필터부를 거쳐 증폭부로

전달되며, 증폭된 신호는 다기능 DAQ를 통해 디지털신호로 변환된 후 컴퓨터로 전송되어 가시화된다. 한편, 유도된 와전류에 의한 자기장의 변화를 검출할 경우에는 검출된 교류 신호를 증폭 후 교류-직류 신호변환기(RMS-to-DC Converter)에서 신호분석 및 후처리가 용이한 직류 신호로 변환되어 다기능 DAQ로 전송된다.



**Fig. 2 -47 Block diagram for an area-type magnetic vector camera**

Fig. 2-48은 상술한 면적형 2차원 자기벡터카메라에 적용하기 위해 개발된 전용 소프트웨어이다. 전용소프트웨어를 통해 측정과 동시에 실시간으로 자기장의 분포를 가시화할 경우, 1프레임(frame)을 표현하기 위해 소요되는 시간이 25ms 로 종래의 면적형 자기카메라의 최대 영상 구현속도(15 frame/second) 보다 향상된 영상 구현속도(40 frame/second)를 얻을 수 있다. Fig. 2-48에 표기된 각 부위의 기능은 하기와 같다.

- (a) DAQ 의 아날로그 신호 입력 환경 설정
- (b) DEMUX 제어를 위한 디지털신호 출력 포트 설정
- (c) 전원 스위칭부 동작 상태 표시
- (d) 측정 시작, 정지 버튼
- (e) 측정된 신호 저장 및 불러오기
- (f) 측정된 자기장 분포의 수직 성분과 수평 성분 강도 표현
- (g) 측정된 자기장 분포의 3 차원 벡터 표현

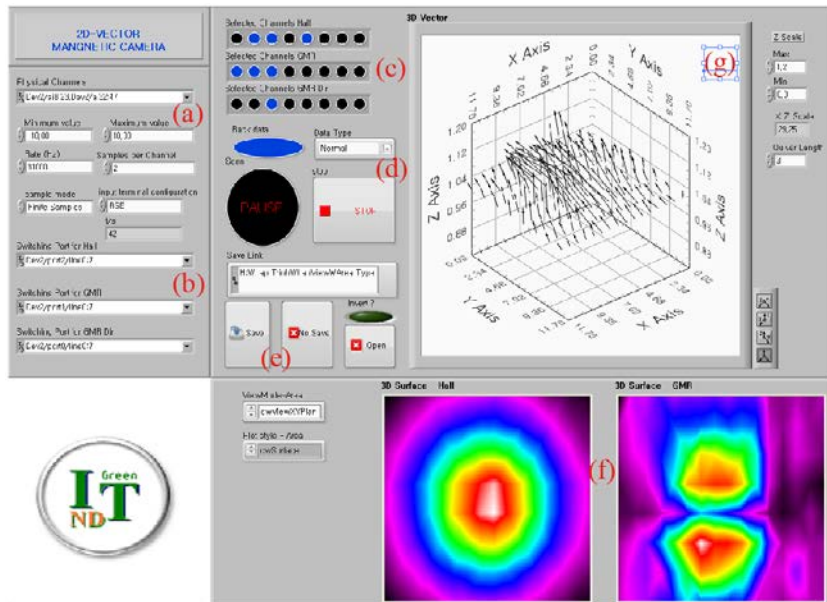


Fig. 2 -48 Area-type magnetic vector camera software

### 제 3 장 이중센서를 이용한 자기벡터카메라

자기장 분포의 변화는 공간적 현상이다. 하지만, 기존의 자기카메라는 오직 측정면으로부터 한 방향(예를 들어  $z$ 축 방향)에 대한 자기장 분포만을 측정한다. 본 연구에서는 기존의 자기카메라에 다른 방향( $x$  또는  $y$ 축 방향, 또는  $x$ - $y$ 축 방향 모두)에 대한 자기장 분포를 측정할 수 있는 자기 센서를 결합시켜 측정면에 대하여 공간적으로 자기장의 분포를 취득 할 수 있는 자기벡터카메라를 제안하였다. 전술한 바와 같이 수직방향으로 감자면을 가지는 Hall 센서와 수평방향으로 감자면을 가지는 GMR 센서를 각각 선형으로 평행하게 배열한 스캔형 자기벡터카메라, 3축 AMR 센서를 이용한 스캔형 3차원 자기벡터카메라, Hall 센서와 GMR 센서를 2차원 면적형으로 배열하여 중첩시켜 면적형 자기벡터카메라를 시제작하였다. 본 장에서는 상술한 자기벡터카메라를 이용하여 강자성체에 도입한 인공결함 주변의 자기장 분포를 측정하였고, 규소 강판의 자구 관찰을 함으로서 유용성을 확인하였다.

## 제 1절 3축 AMR 센서를 이용한 벡터장 측정

3축 AMR 센서를 이용한 자기벡터카메라는 방법상 자기장 분포 측정 시간이 오래 걸려 실용성이 떨어지지만, 센서 구조적 장점으로 인해 신뢰성 높은 3차원 자기장 벡터 분포를 취득할 수 있어서 연구적인 목적으로 매우 유용하게 사용 할 수 있다. 본 절에서는 강자성체 강판(SS400)의 표면에 도입한 인공결함에 의한 자기장 벡터 분포 측정결과와 외부자기장에 따른 규소 강판(S13)의 자구변화에 대하여 서술하여 3축 AMR 센서를 이용한 스캔형 3차원 자기벡터카메라의 유용성을 검증한다.

# 1. 강자성체 강판 표면 결함 검출

Fig. 3-1은 구형 및 삼각형의 단면을 가지는 폭 0.7mm, 길이 10mm, 깊이 1/2/3mm의 인공결함을 방전가공에 의하여 SS400 강판(100×200×5mm)의 중앙에 도입한 시험편을 나타낸다. Fig. 3-2와 같이 요크형 자화기에 시험편을 위치시켜 자기장을 인가하고, 결함 주변에서 누설자속의 분포를 3차원 벡터로 측정하였고, 그 결과를 Fig. 3-3에 나타내었다.

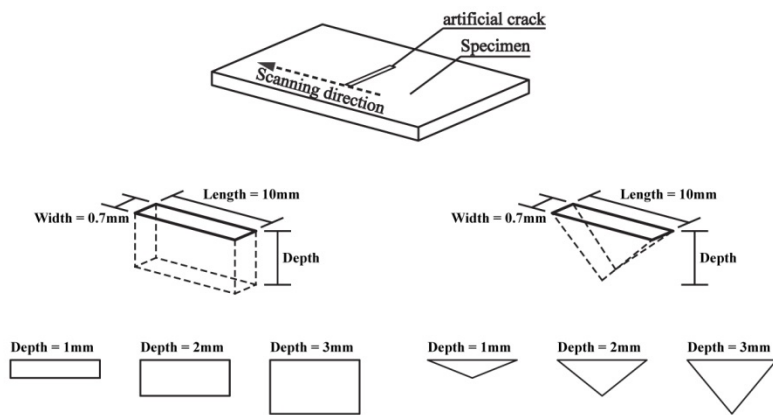


Fig. 3-1 Specimen (SS400)

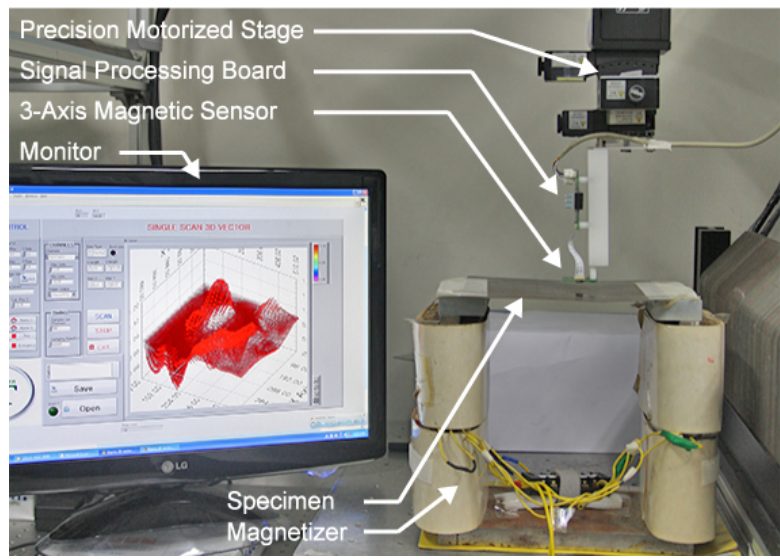
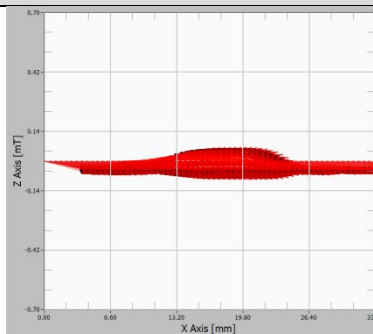
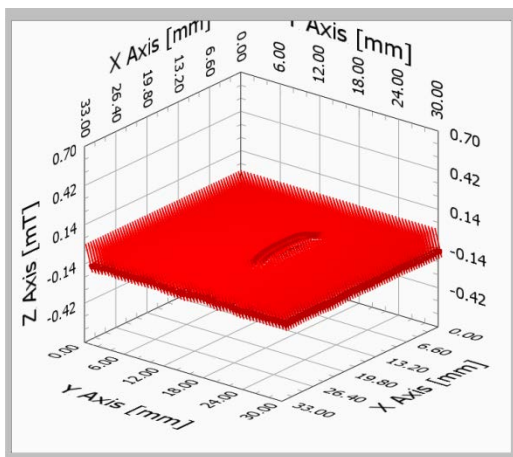


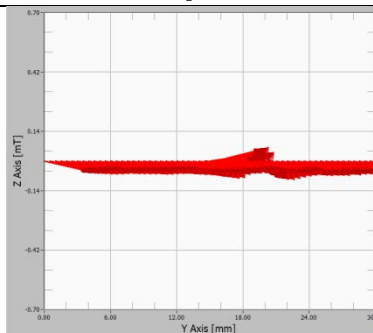
Fig. 3-2 Experimental equipment for SS400

Rectangular cracks

Depth  
1 mm

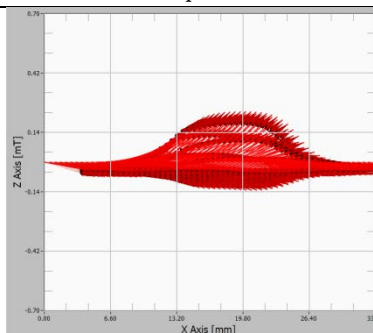
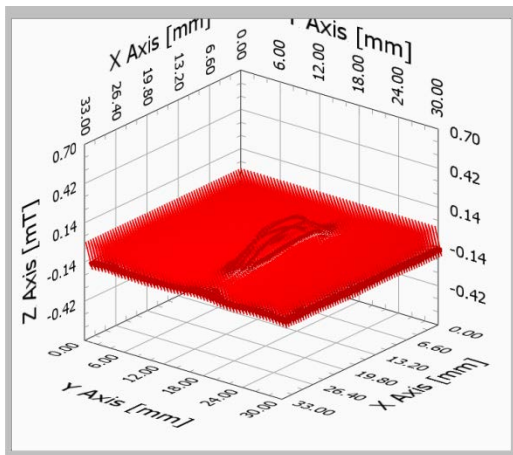


XZ-plane

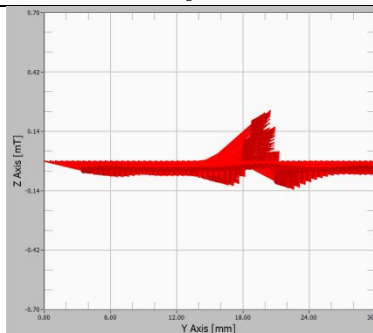


YZ-plane

Depth  
2 mm

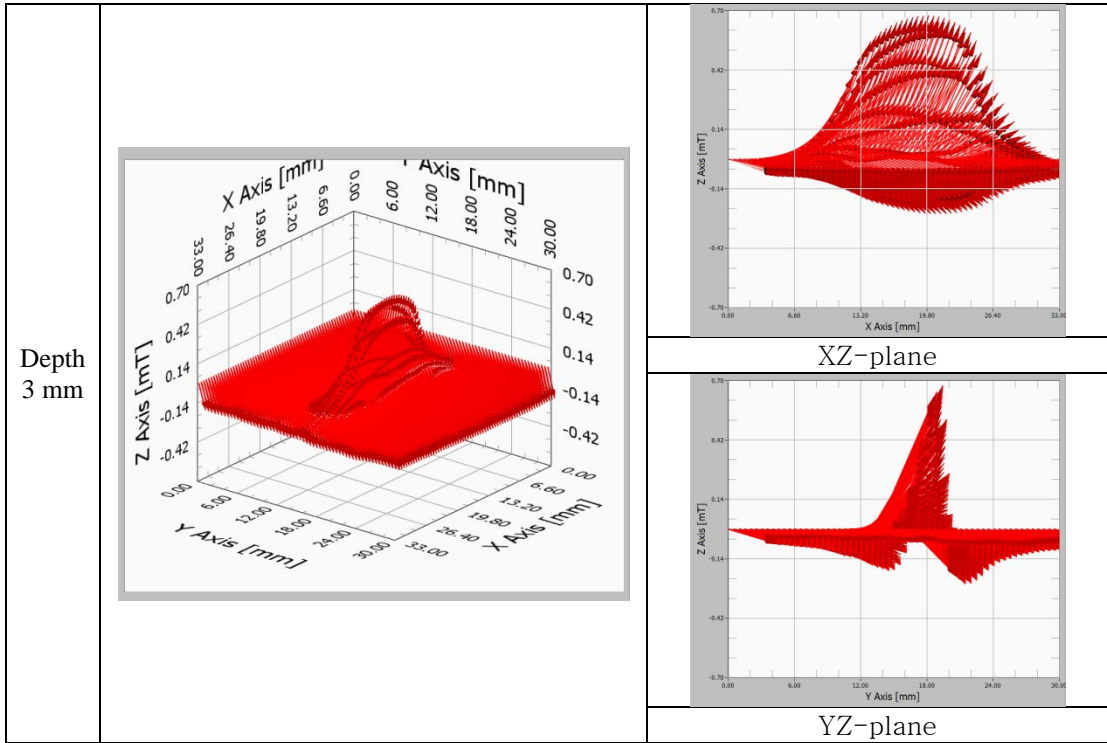


XZ-plane

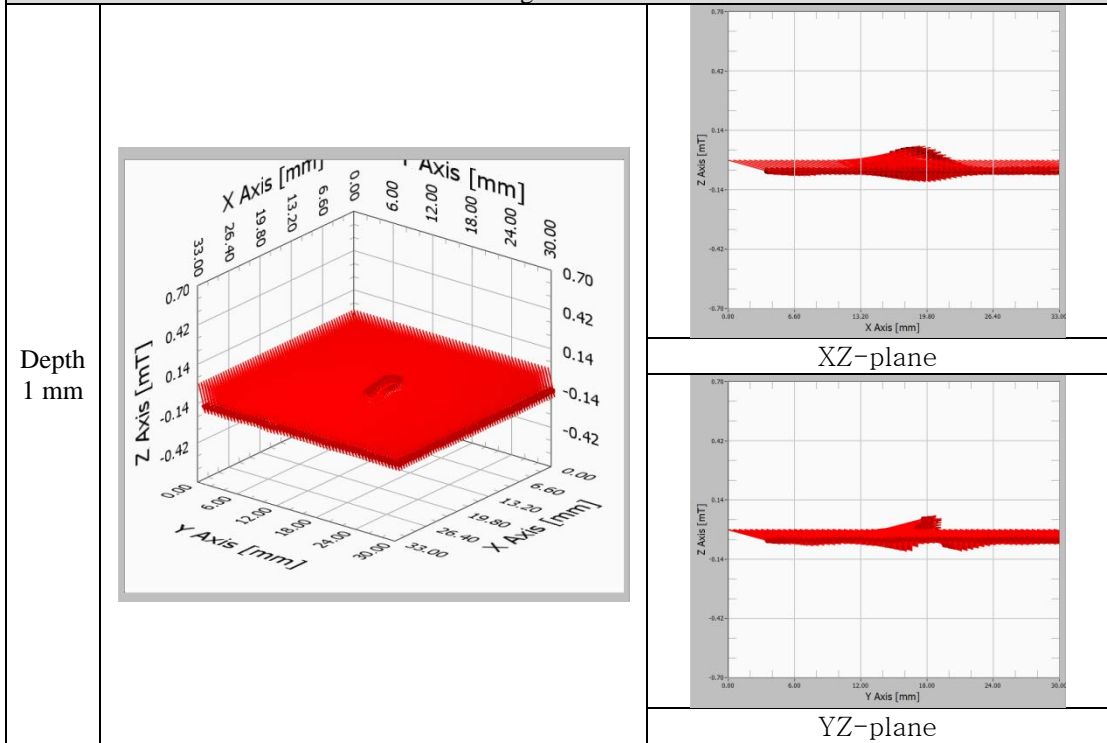


YZ-plane

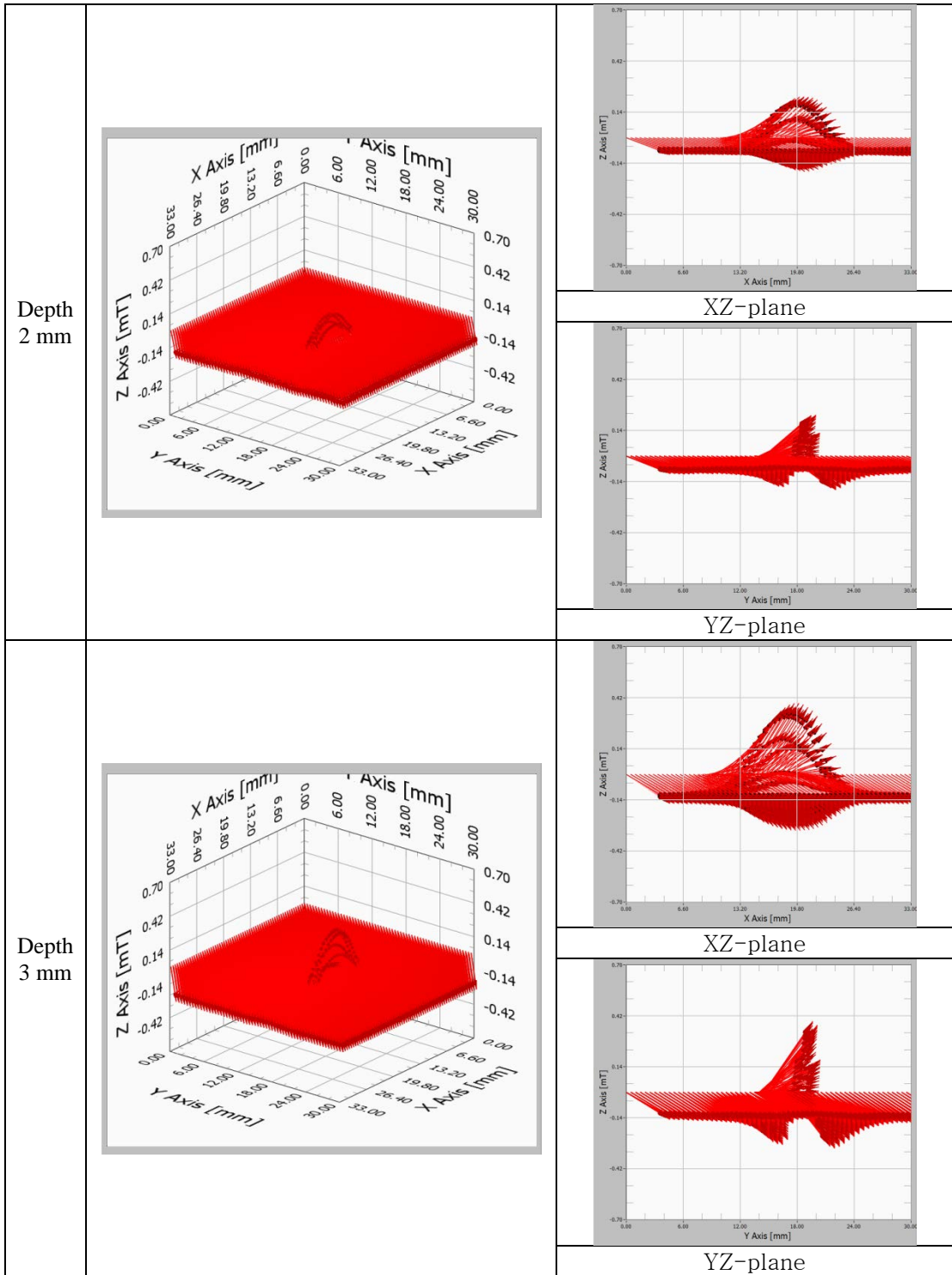




Triangular cracks







**Fig. 3-3 Visualization of magnetic field vectors around artificial cracks**

결과영상은 스캔방향으로 미분( $\partial V_H/\partial x$ )하여 영상처리를 수행하였다. 전체적인 벡터 값의 기저가 0이 아닌 이유는 직류자화에 기인하여 경사진 자기장 분포를 가지고 있으며,  $\partial V_H/\partial x$ 는 이들의 기울기를 나타내고 있기 때문이다.

Z축 성분은 (+)와 (-)값을 가지고 있으며, 이는 Z축(수직) 성분의 자기장 분포를 측정하는 Hall 센서가 자극을 구분할 수 있기 때문이다. X축 성분은 (+) 값만을 보이고 있으며, 이는 GMR 센서가 자극을 구분할 수 없기 때문이기도 하지만, 균열 근방의 누설자속의 X축 성분이 (+) 값을 나타내고 있기 때문이다.

YZ 평면상에서 보았을 때, 같은 형상 즉 구형 또는 삼각형의 경우, 결함의 깊이에 따라 X축 성분 및 Z축 성분의 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 결함의 깊이가 클수록 자속의 흐름을 방해하는 단면적이 넓어져 누설자속의 양이 결함의 깊이에 비례하여 발생하기 때문이다.

XZ 평면상에서 보았을 때, 구형 결함의 경우에는 결함의 중심부근에서 편평한 자기벡터 분포를 보이고 있으나, 삼각형 결함의 경우에는 결함의 중심부근에서 최고 값을 가지는 타원형의 자기벡터 분포를 보이고 있어, 향후 결함의 형상 판별에 활용될 수 있다.

이와 같이 결함 주변에서의 누설 자속은 결함의 체적, 즉 시험편에 인가된 자기장을 방해하는 단면적의 크기에 따라 그 양이 증가함을 알 수 있다. 이것은 자기 카메라를 이용한 종래의 연구에서도 이미 동일한 결과를 얻은 것이나, 결함의 형상에 따라 외부공간상의 누설 자속의 형태가 달라지는 것은 자기벡터카메라로만 얻을 수 있는 결과이다. 이와 같은 정보는 결함을 정량적으로 평가하고 형상을 추정하는데 유용하게 사용될 수 있다.

## 2. 규소강판의 자구 관찰

규소강판(Silicon steel)은 전기강판(Electrical steel)이라고도 불리며, 강에 실리콘을 첨부한 소재이다. 실리콘을 첨부함으로써 전기저항(electrical resistance)이 증가하고, 자기장의 침투능력이 개선되므로, 전자기장(electromagnetic fields)이 중요시 되는 응용분야, 즉 트랜스포머(transformers), 자기코일(magnetic coils) 및 전기모터(electrical motors) 등에 활용되는 고부가가치 소재이다. 규소강판에 대한 코어손실 특성은 규소강판에 포함된 실리콘 함유량, 불순물의 농도, 투자율, 자구의 구조 등에 의존한다. 본 연구에서는 자기벡터카메라의 유용성을 검증하기 위한 수단으로 Fig. 3-4(a)와 같은 규소강판(방향성 규소강판, S13)의 자구변화를 관찰하였으며, Fig. 3-4(b)에 나타낸 바와 같이 요크형 전자석을 통하여 시험편에 인가되는 자기장을 변화시키면서 실험을 하였다. Fig. 3-5는 결과영상을 인가되는 자기장에 따라 나타낸 것이다.

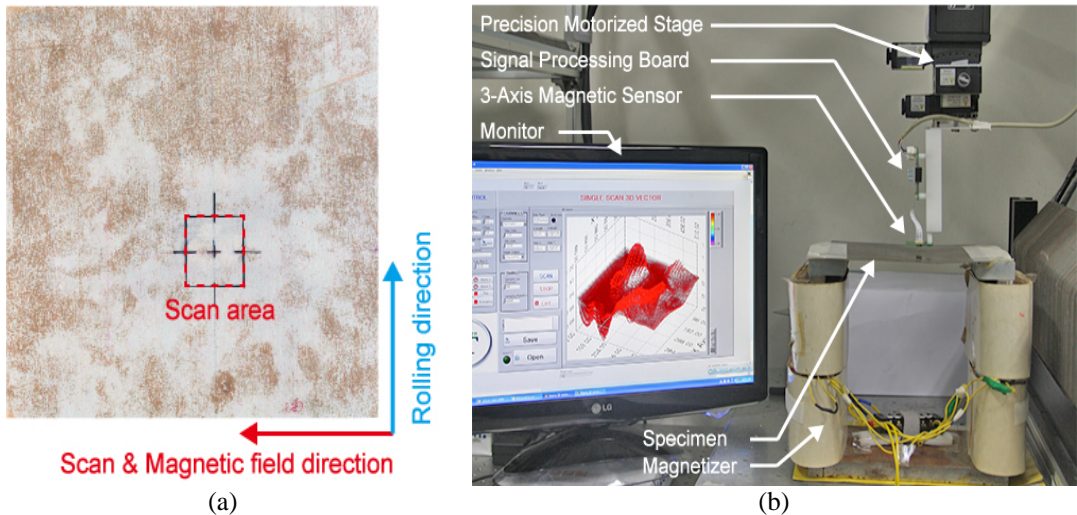
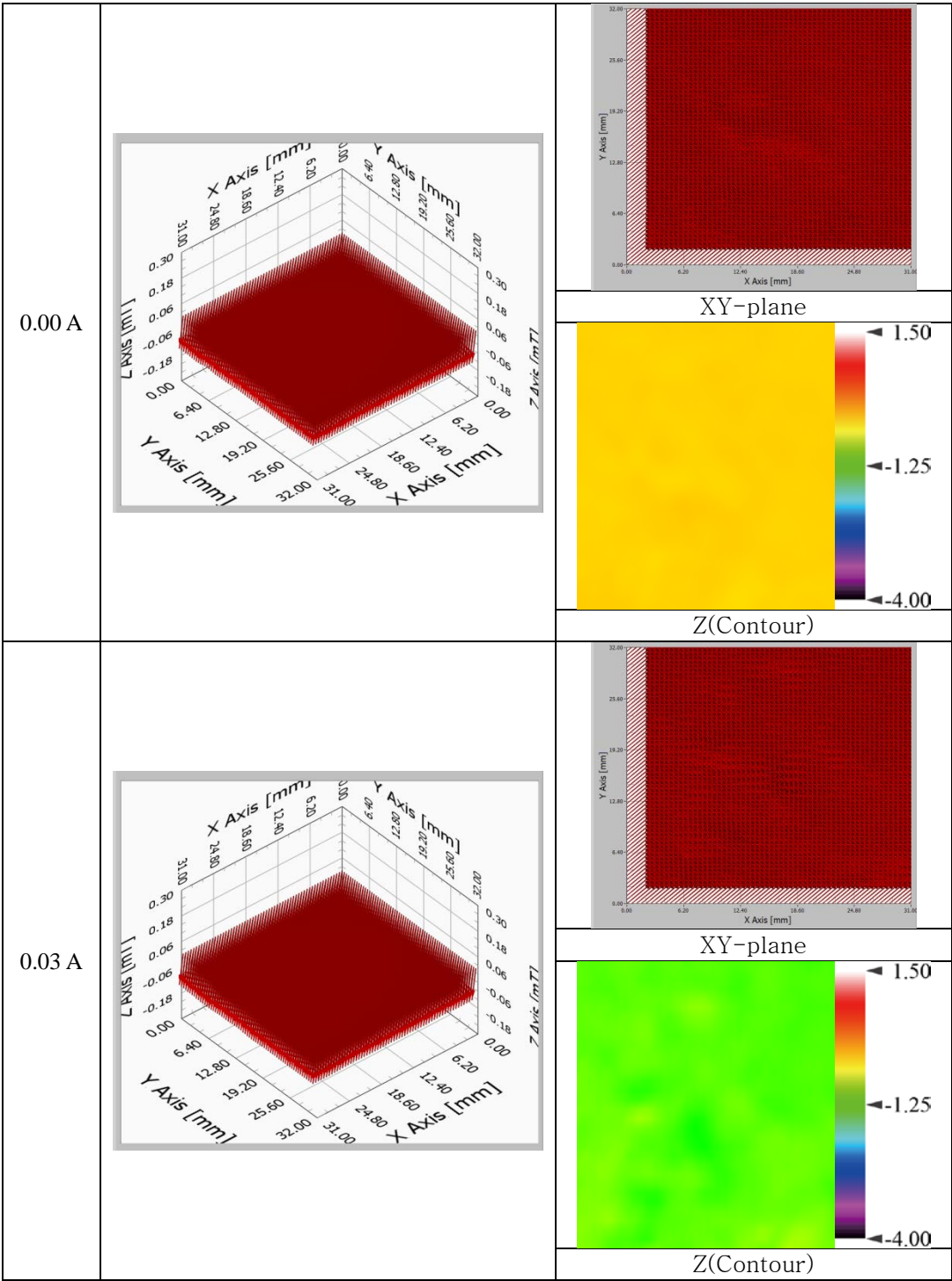
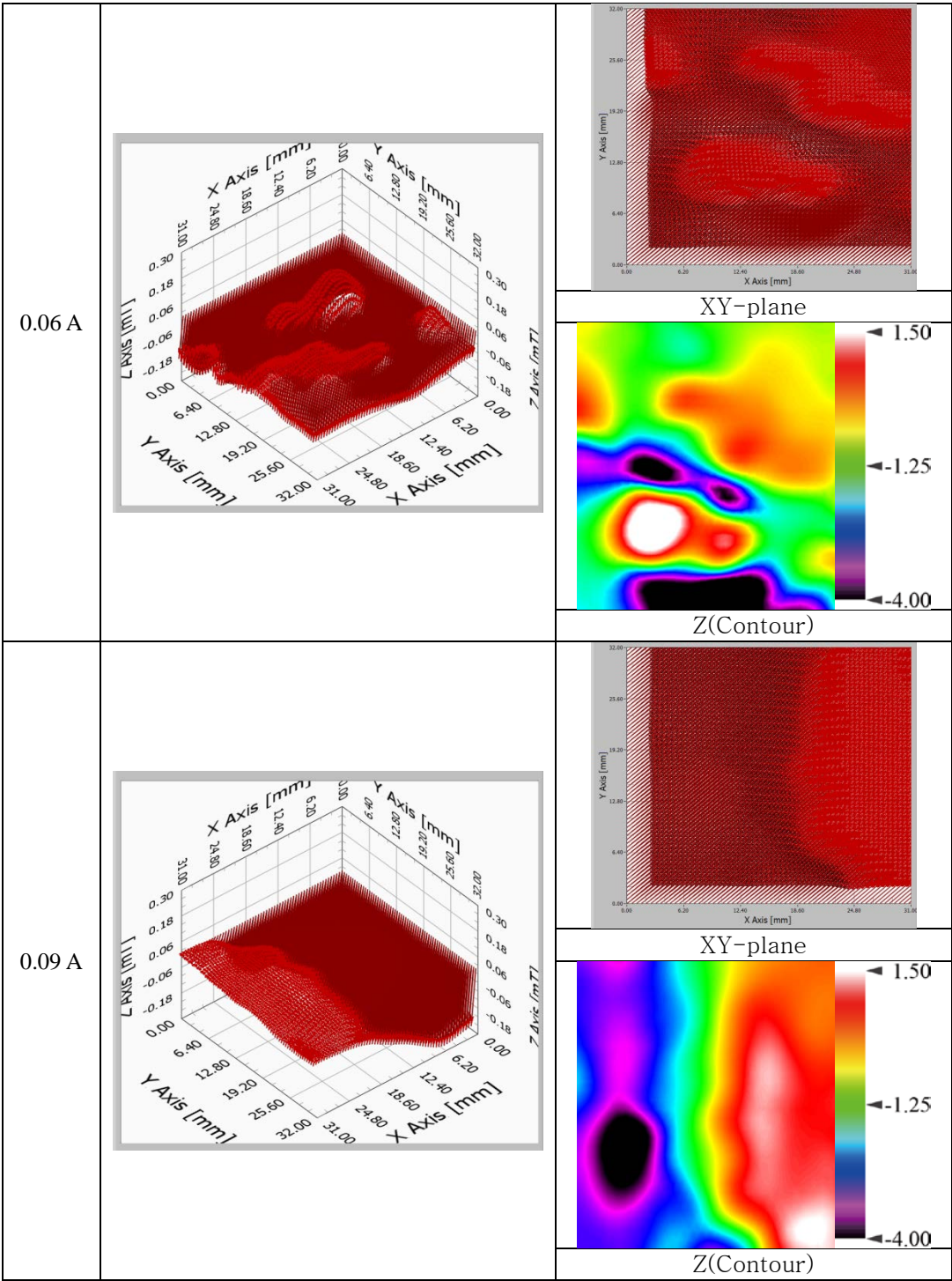


Fig. 3-4 (a) Silicon steel specimen and (b) experimental equipment







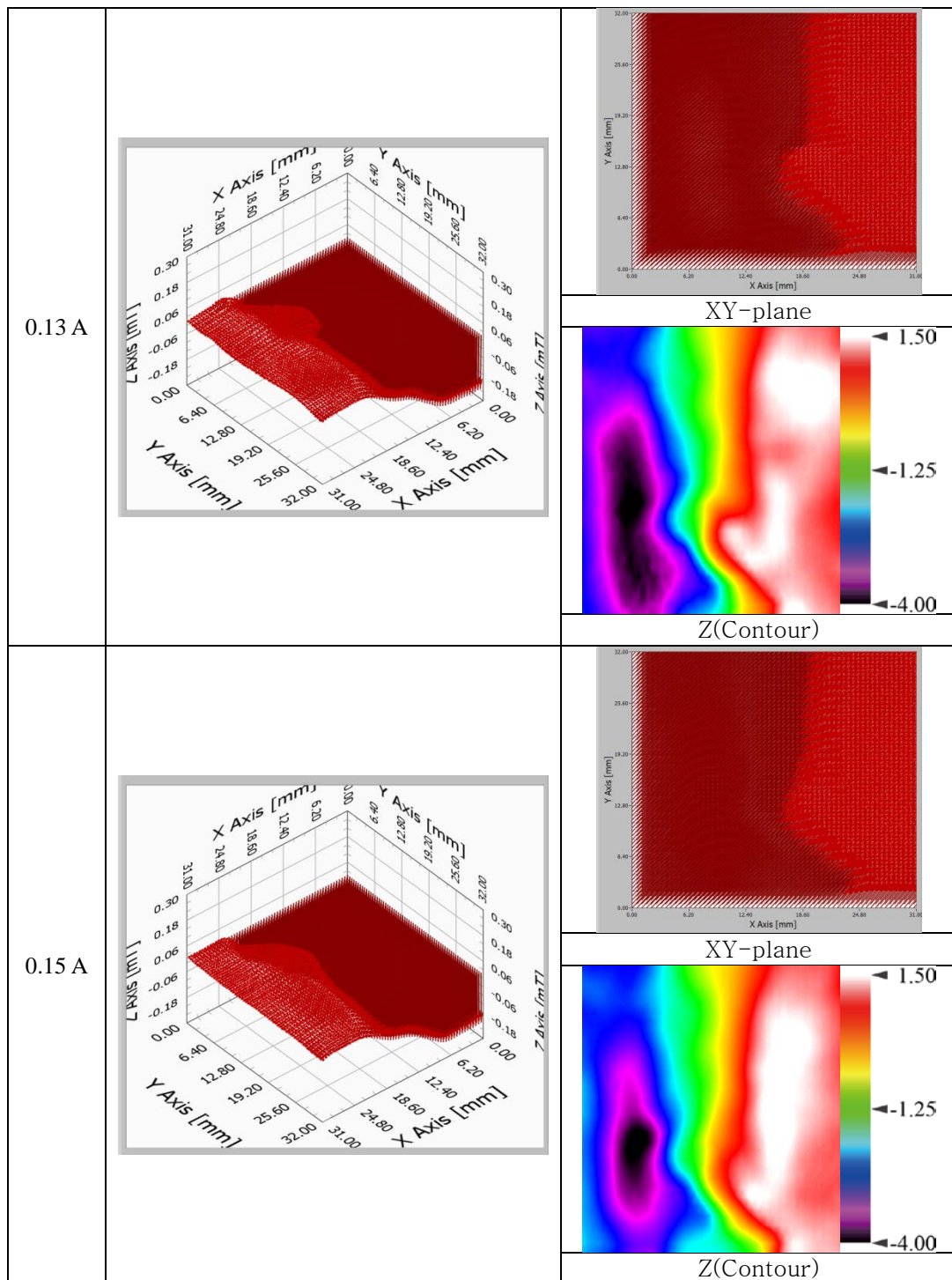


Fig. 3-5 Visualization of magnetic field vector around magnetic domain

결과영상에서와 같이 0.03 A 까지는 자구의 변화가 없다가 더욱더 전류가 인가되어 자기장의 세기가 증가함에 따라 자구의 크기 및 자기장의 분포가 커지고 있음을 알 수 있다. 0.06 A와 0.09 A에서 XYZ-성분 및 XY-성분의 벡터분포를 상호 비교하면, 자구가 커져서 결국 단일 자구로 변화하는 과정을 관찰할 수 있으며, 자벽 부근에서 자기장의 변화가 크게 나타나고 있어, 향후 불순물 및 전위(dislocation)의 존재에 기인한 자벽이동의 방해를 관찰함으로써 경년열화의 평가에 활용될 수 있다.[59, 60] 한편, 전자석 입력전류가 0.06~0.15A인 경우의 상대적인 자기장의 크기를 비교하면, 인가자기장의 증가에 따른 자기장 측정 값이 오히려 감소하고 있음을 보이는데, 이는 스캔형 3축 자기벡터카메라의 B-AMR 센서의 출력특성에 의한 것이다.

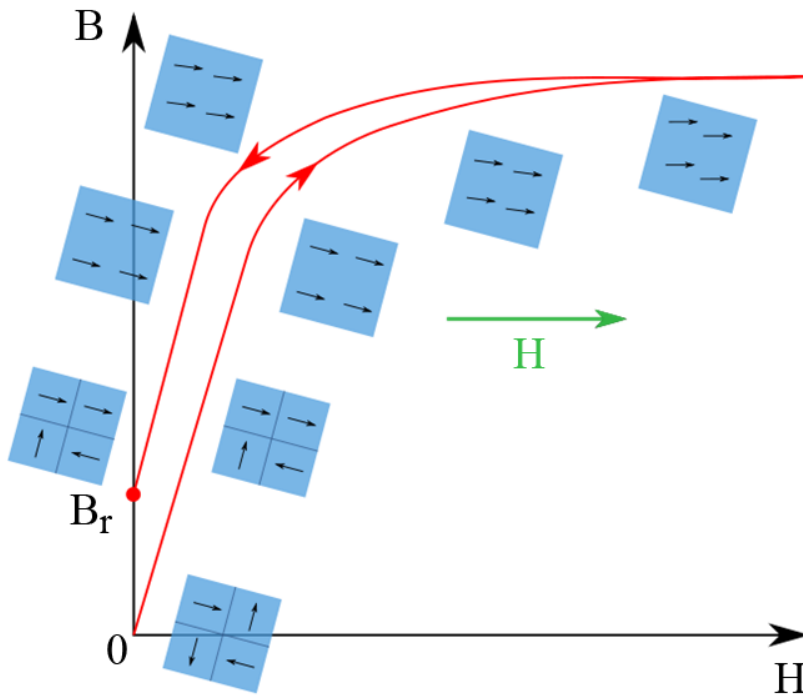


Fig. 3-6 Principle of magnetic domain wall movement

## 제 2 절 Hall 센서와 AMR센서를 이용한 벡터장 측정

1,024개의 2차원 Hall 센서 배열(32행, 32열)과 64개의 2차원 V-AMR 센서 배열(8행, 8열)을 이용하여 시제작한 2차원 면적형 자기벡터카메라는 Hall 센서를 이용한 기존의 면적형 자기 센서 배열에 V-AMR 센서를 이용한 면적형 자기 센서 배열을 중첩한 구조이다. 결과적으로 Hall 센서 4개당 V-AMR 센서 1개가 중첩되어 3.12 mm의 공간분해능을 가진다. 본 연구에서는 V-AMR 센서를 이용하여 가능성만 확인하는 수준의 연구만 수행하였고, GMR 센서를 이용하여 보다 많은 연구를 수행하였다.



## 1. 강자성체 강판 표면 결함 검출

Fig. 3-8은 2차원 배열의 Hall 센서와 2차원 배열의 V-AMR 센서에 의하여 구성되는 면적형 자기벡터카메라(Fig. 3-7)에 의하여 획득한 자기장의 벡터 분포를 나타낸다. 시험편은 구형 및 삼각형의 단면을 가지는 폭 0.7mm, 길이 10mm, 깊이 1/2/3mm의 인공결함을 방전가공에 의하여 SS400 강판(100×200×5mm)의 중앙에 도입한 것으로 상기 3장 1절 1항과 동일한 시험편이며, 동일한 방법으로 요크형 전자석을 이용하여 인가하고, 결함 주변에서 누설자속의 분포를 측정하였다.

V-AMR 센서의 크기로 인한 공간분해능의 한계 때문에 상기 Fig. 3-3에 나타난 바와 같은 조밀한 자기장 벡터의 영상을 얻기는 곤란하였으나, 향후 추가 연구에 의하여 보다 높은 공간분해능을 획득한다면 유용한 자기벡터카메라를 개발할 수 있을 것으로 기대한다.

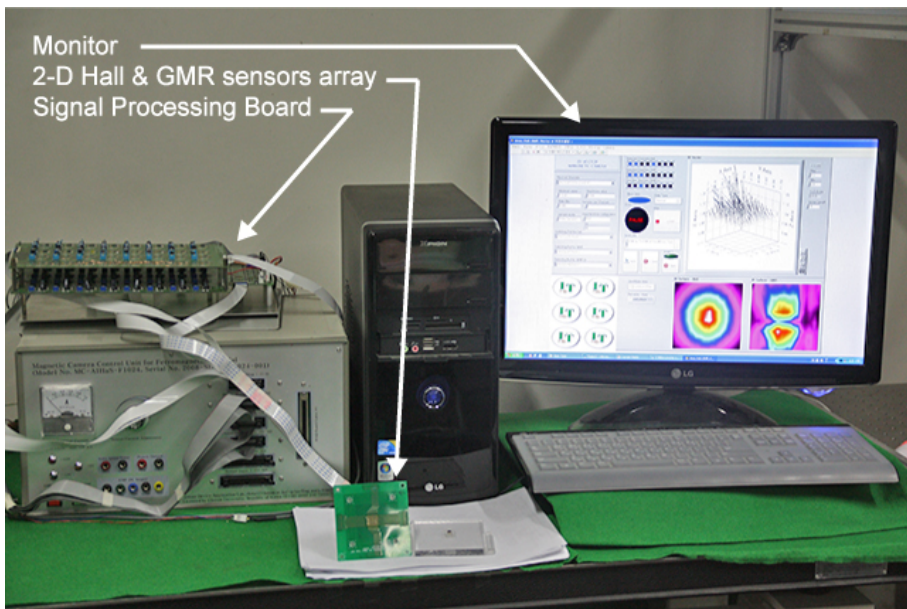
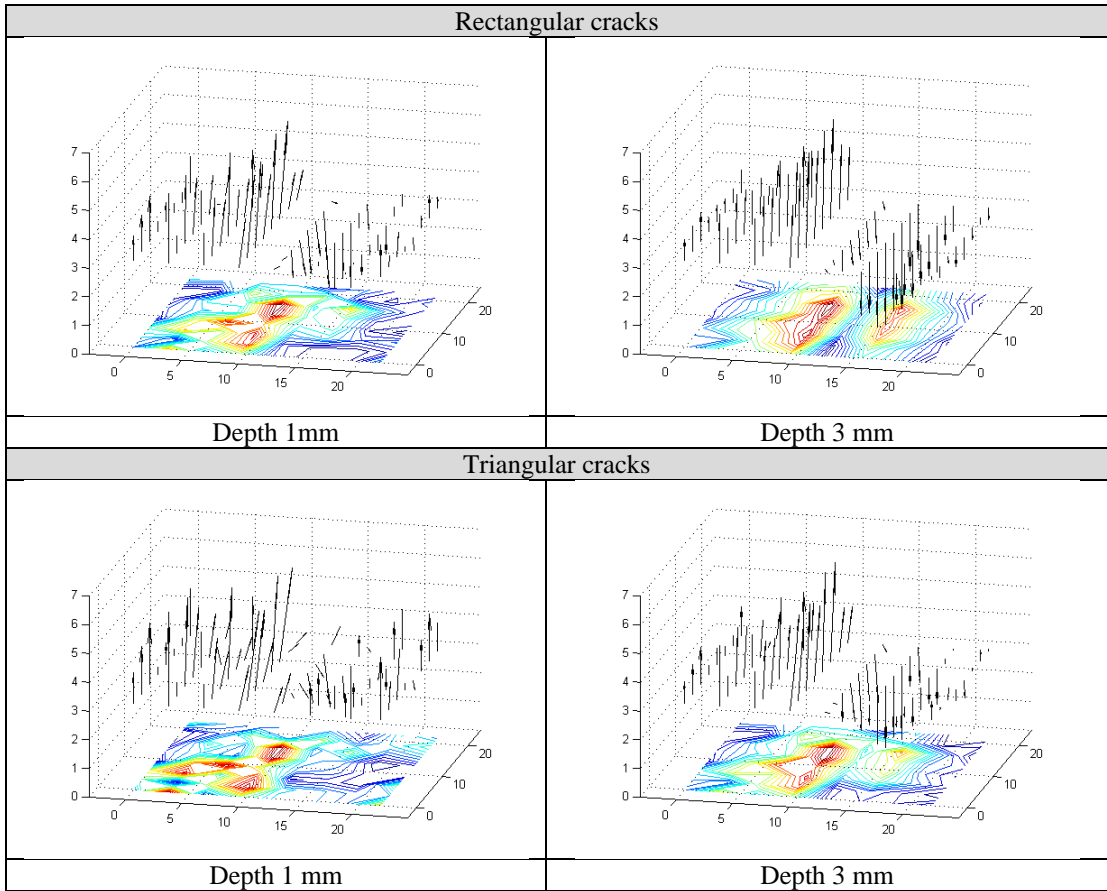


Fig. 3-7 Experimental equipment



**Fig. 3-8 Visualization of magnetic field vectors around artificial cracks**

### 제 3 절 Hall 센서와 GMR센서를 이용한 벡터장 측정

#### 1. 강자성체 강판 표면 결함 검출

64개의 Hall 센서 선형 배열과 64개의 GMR 센서 선형배열을 결합하여 시제작한 스캔형 2차원 자기벡터카메라를 이용하여, Fig. 3-9와 같이 구형 및 삼각형의 단면을 가지는 폭 0.7mm, 길이 10mm, 깊이 1/2/3mm의 인공결함을 방전가공에 의하여 SS400 강판(100×200×5mm)의 중앙에 도입한 시험편을 요크형 자화기에 시험편을 위치시켜 자기장을 인가하고, 결함 주변에서 누설자속의 분포를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 3-10에 나타내었다.

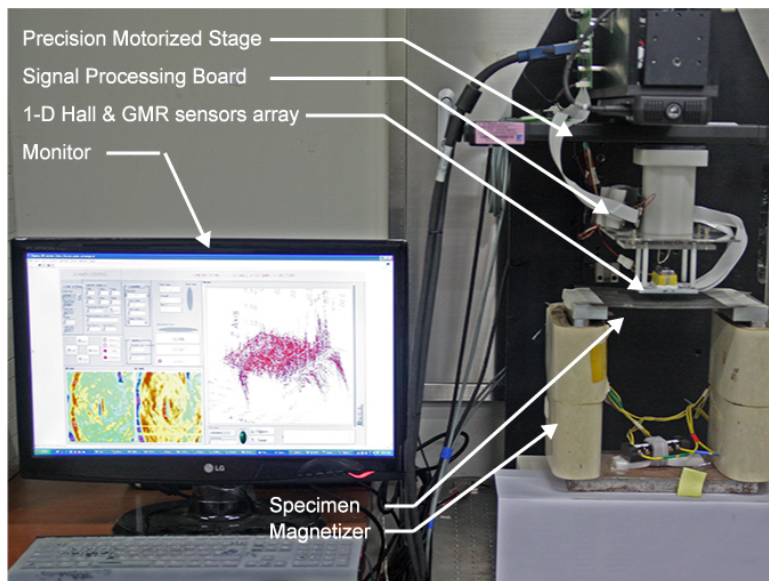
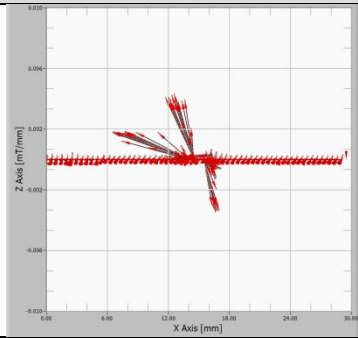
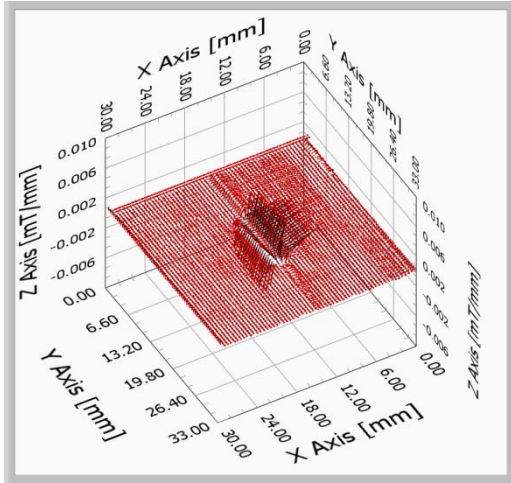


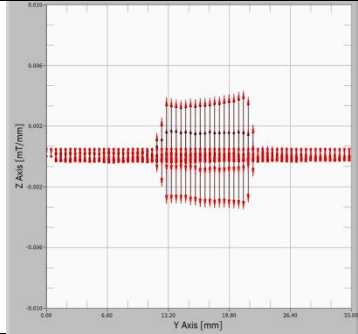
Fig. 3-9 Experimental equipment for SS400

Rectangular cracks

Depth  
1 mm

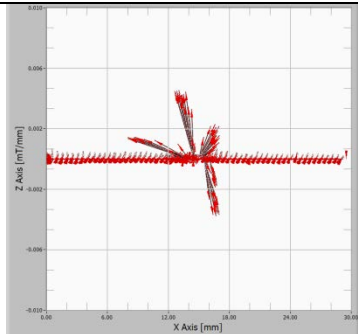
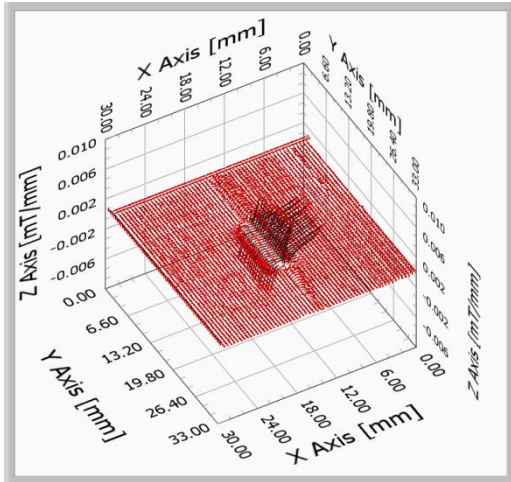


XZ-plane

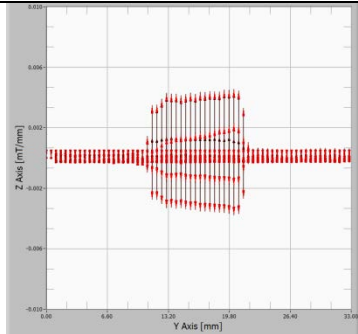


YZ-plane

Depth  
2 mm

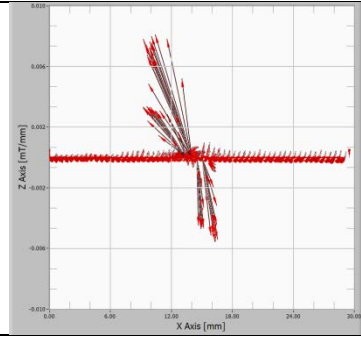
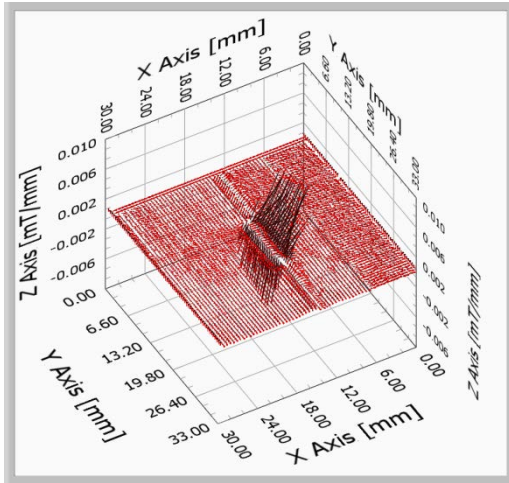


XZ-plane

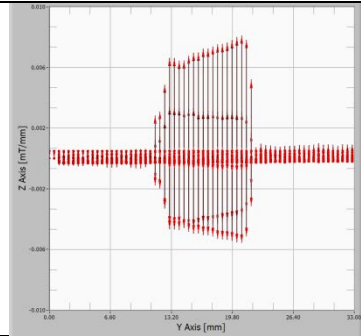


YZ-plane

Depth  
3 mm



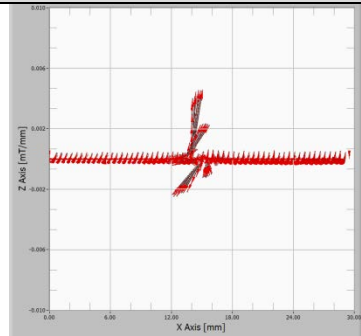
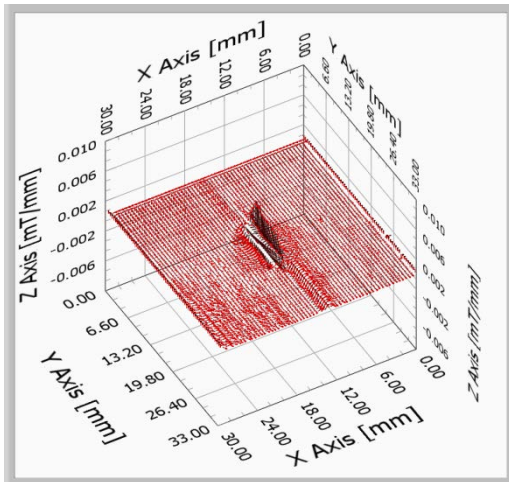
XZ-plane



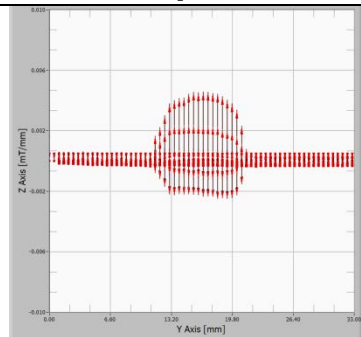
YZ-plane

Triangular cracks

Depth  
1 mm



XZ-plane



YZ-plane



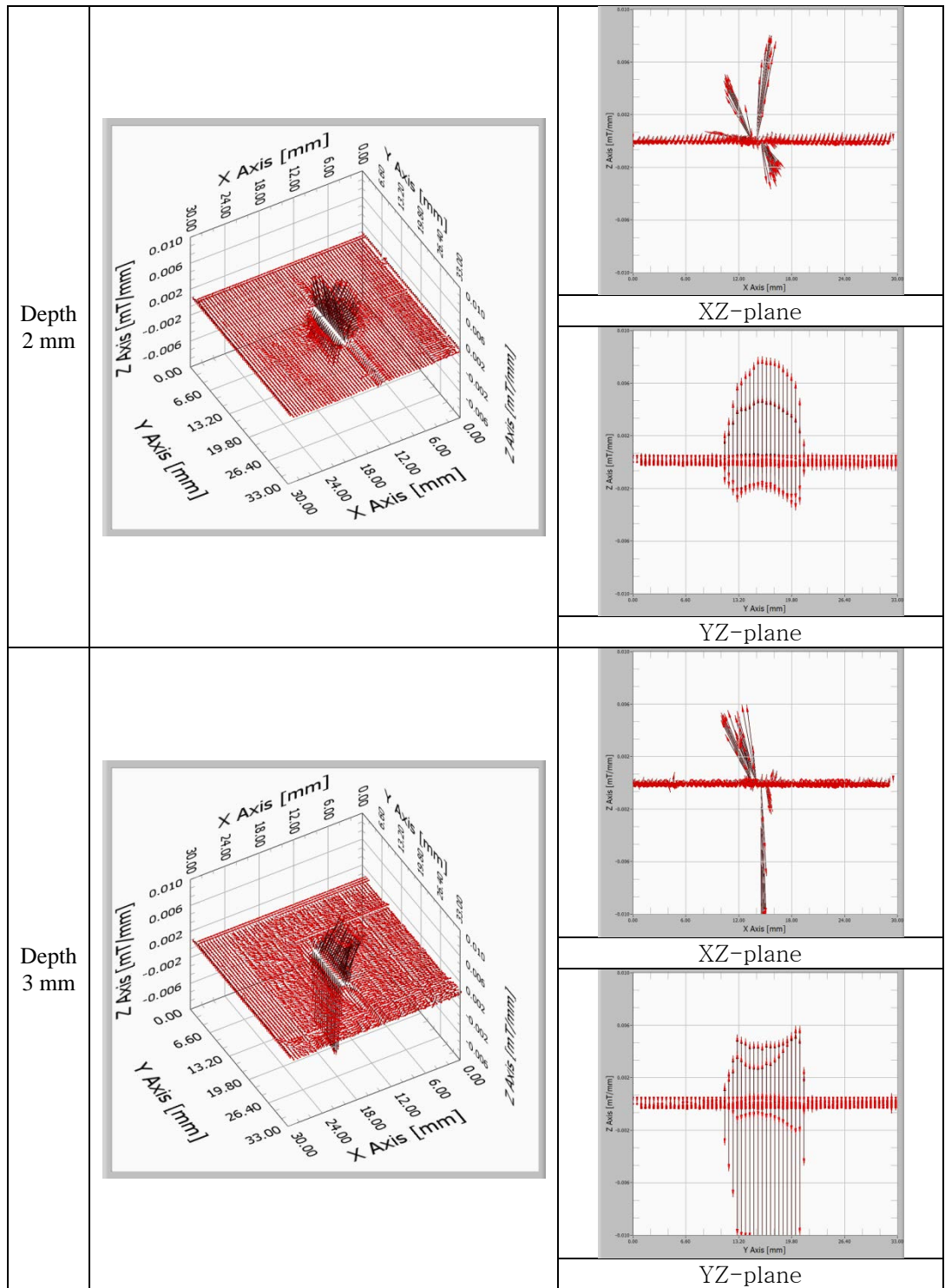


Fig. 3-10 Visualization of magnetic field vectors around artificial cracks

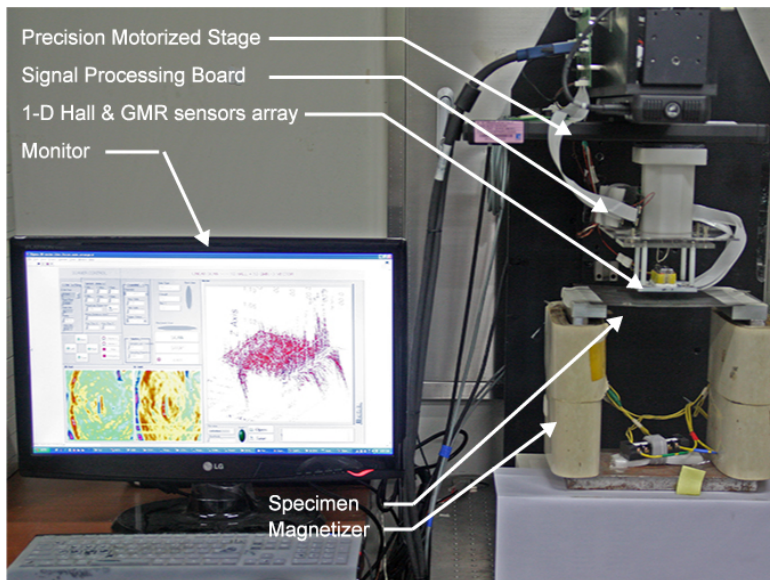
Hall 센서에 의한 Z축(즉, 센서 측정면의 수직방향) 성분의 경우에는 3축 자기 벡터카메라와 동일하게 벡터량으로 표현할 수 있으나, GMR 센서에 의한 X축(즉, 스캔방향) 성분의 경우에는 극성의 구별이 어렵다. 그러나, 자화방향으로의 X-축 성분은 + 극임을 고려하였을 때, 상기 결과영상과 같이 표현할 수 있다.

XZ 평면상에서 보았을 때, 같은 형상 즉 구형 또는 삼각형의 경우, 결함의 깊이 에 따라 X축 성분 및 Z축 성분의 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편, YZ 평면상에서 보았을 때, 구형 결함의 경우에는 결함의 중심부근에서 편평한 자기벡터 분포를 보이고 있으나, 삼각형 결함의 경우에는 결함의 중심부근에서 최고 값을 가지는 타원형의 자기벡터 분포를 보이고 있어, 향후 결함의 형상 판별에서 유용한 정보로 활용될 수 있다.

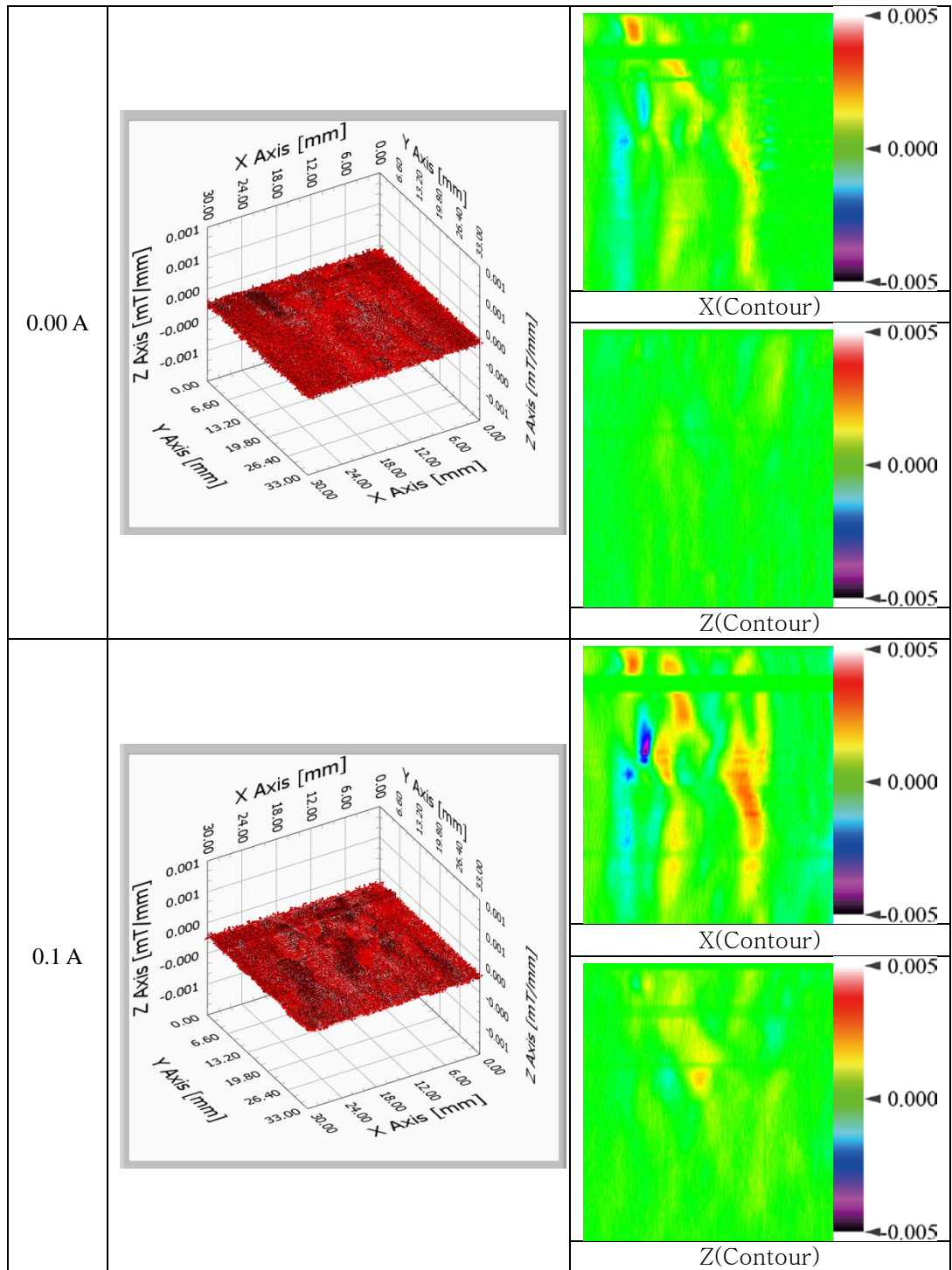
## 2. 규소강판의 자구 관찰

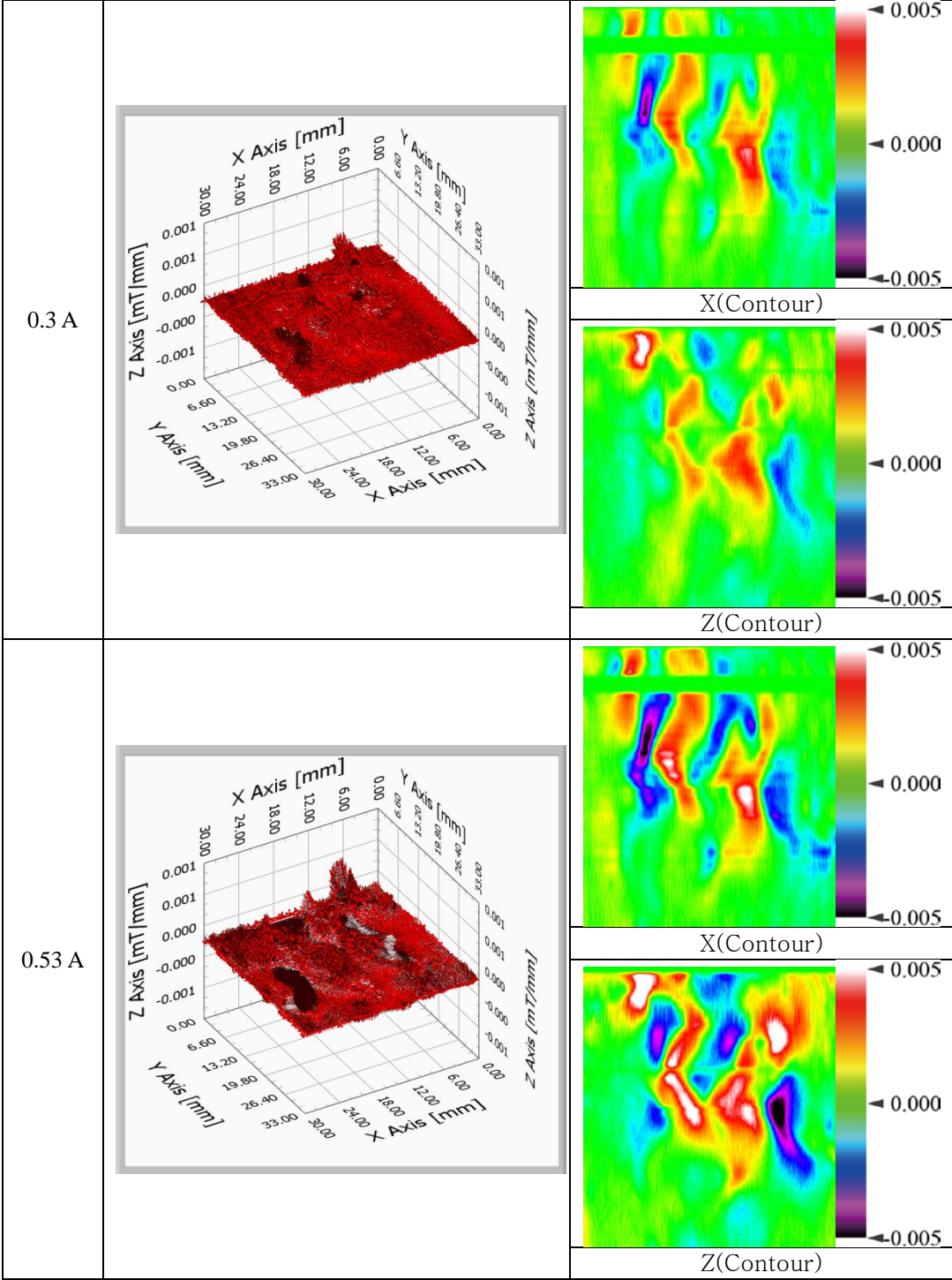
Fig. 3-11은 방향성 전기강판을 요크형 전자석(Fig. 3-10)에 의하여 자 화시키고, 각각 64개씩의 선형배열 Hall 센서와 GMR 센서에 의하여 구성되는 스캔형 2차원 자기벡터카메라에 의하여 획득한 자기장의 분포를 나타낸 것이다. 전술한 단일 센서 스캔형 3차원 자기벡터카메라에 의한 실험결과 영상과 상이해 보이는 것은 측정방법상 많은 영역을 측정하기 어려운 단일 센서 스캔형 3차원 자기벡터카메라에 비해, 선형 배열 자기 센서를 이용한 스캔형 자기벡터카메라는 수십 개의 센서를 배열하여 구성하기 때문에 보다 쉽게 많은 영역을 측정할 수 있다. 하지만, 센서 간격에 의존하는 공간분해능은 단일 센서 스캔형 3차원 자기벡터카메라보다 조밀한 영상을 획득하지 못하는 결정적인 원인이 된다.

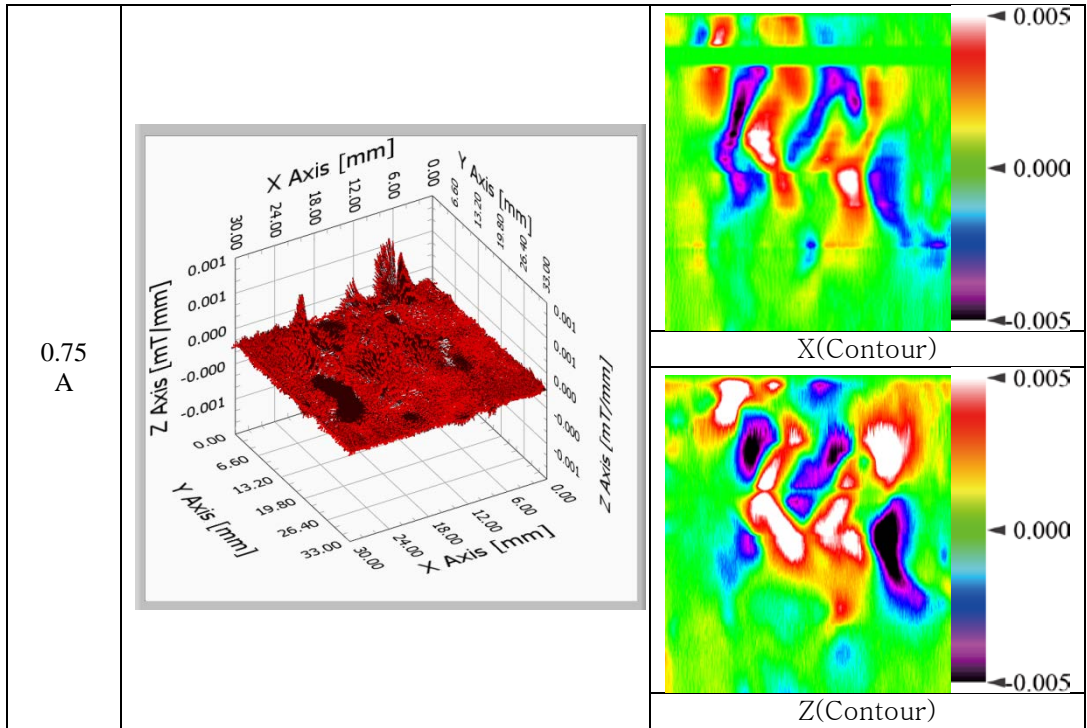


**Fig. 3-11 Experimental equipment for silicon steel**









**Fig. 3-12 Visualization of magnetic field vectors around magnetic domains**

자화방향은 압연방향과 수직(X-방향)이며, 0.1A부터 자구의 변화가 발생하기 시작하며, 자기장의 세기가 증가함에 따라 자기장의 분포가 명확해지고 있음을 알 수 있다. 반면에 자구의 크기 및 자벽의 위치는 크게 변화하지 않고 있다. 상술한 3축 자기벡터카메라의 경우에는 센서 출력이 이미 포화에 이르러 더 이상 자세한 자구 내의 자기장의 변화를 정량적으로 측정할 수 없어서, 자구 및 자벽의 경계를 관찰할 수 있었던데 비하여, 스캔형 자기벡터카메라의 경우에는 보다 넓은 영역(FSO, Full Scaled Operational Region)의 외부자기장의 세기를 정량적으로 측정할 수 있어, 센서의 포화 영역까지 자기장의 세기 분포를 측정할 수 있었기 때문이다.

## 제 4 장 자기벡터카메라를 이용한 비파괴검사 응용

이중 센서를 이용한 자기벡터카메라는 공간적 현상인 자기장 분포의 변화를 정보의 손실 없이 측정할 수 있는 비파괴검사기술이다. 이중 센서의 결합 형태에 따라 다양한 응용분야에 적용 할 수 있으며, 눈에 보이지 않는 전자기장을 가시화 하므로 산업분야뿐만 아니라 교육분야에서도 충분히 활용할 수 있다. 본 장에서는 가장 용이하게 산업현장에 적용할 수 있는 스캔형 자기벡터카메라를 이용한 실증 실험에 관하여 서술하였다.

# 제 1 절 냉연강판 개재물 검출

## 1. 배경



자료 : <http://www.hyundai-steel.com>

**Fig. 4-1 Applications of cold-rolled steel sheets**

냉연강판은 일반적으로 판 두께가 두껍고 표면이 아름다우며 치수 정확도와 평면도가 좋고 성형성이 양호하며, 따라서 자동차 내외판, 금고와 책상 등의 사무용 기기류, 냉장고와 세탁기 등의 가정용 전기기구, 주방 기기류 등에 넓게 사용되고 있다. 생산과정 중 발생하는 미소결함은 제품의 품질을 현저히 저하시키는 원인이 되며, 따라서, 미소결함의 발생을 생산공정에서 검출하는 방법이 필요하다.

냉연강판의 품질 저하 원인인 결함의 상당부분은 압연공정을 이용하여 냉연강판을 제조하는 과정에서는 압연 롤러의 상태 또는 원 소재에 포함되어 있는 개재물의 유입에 의하여, 압연방향으로 좁고 긴 결함이 발생하는 것이다. 이러한 결함을 검출하기 위하여 자분탐상법이 다수 활용되고 있으나, 전처리 및 후처리 공정이 필요하며, 자분과 같은 소모재가 지속적으로 투입되어 경제적인

문제는 물론 환경적인 측면에서도 개선되어야 함은 분명하다. 자분탐상법의 대체기술로 본 연구그룹에서는 자기카메라를 제안한 누설자속탐상법을 제안하였으나, 냉연강관의 개재물이 압연방향과 평행하여 한정된 공간 내에서는 압연방향에 평행한 자기장을 인가할 수 밖에 없어 결함의 길이방향과 인가자기장 방향에 따라 누설자속의 크기가 최소화 된다는 한계를 가지고 있다.

이러한 문제를 보완하는 방법으로 1차원 선형 배열 Hall 센서와 1차원 선형 배열 GMR 센서를 결합한 자기벡터카메라를 이용하여 냉연강관의 개재물을 검출하는 검사방법을 제안하고 실증 실험을 수행하였다.



## 2. 전용 자기벡터카메라 개발 및 응용

Fig.4-2와 같이 1차원 선형 배열의 Hall 센서 및 1차원 선형 배열의 GMR 센서를 각각 평행하게  $520\mu\text{m}$  간격으로 배열하여 제작한 스캔형 자기벡터카메라이다. 각 센서 배열상에서 센서간의 간격은  $520\mu\text{m}$ 이며, Hall 센서 배열과 GMR 센서 배열의 이격거리( $\Delta d_s$ )는 7mm이다. Fig. 4-3은 Hall 센서 배열과 GMR 센서 배열의 등가회로를 나타내며, 각 센서 배열에 차동 연산증폭기를 연결하여 자기장 분포에 대한 전기적 신호를 취득한다.

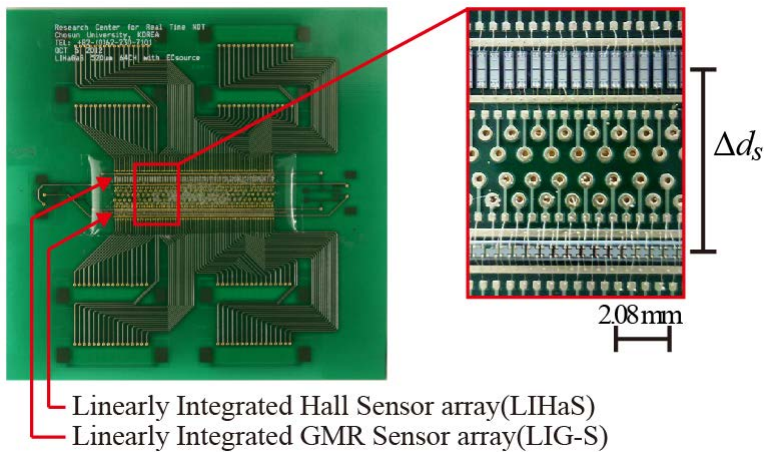


Fig. 4 -2 1-D Hall and GMR magnetic vector camera

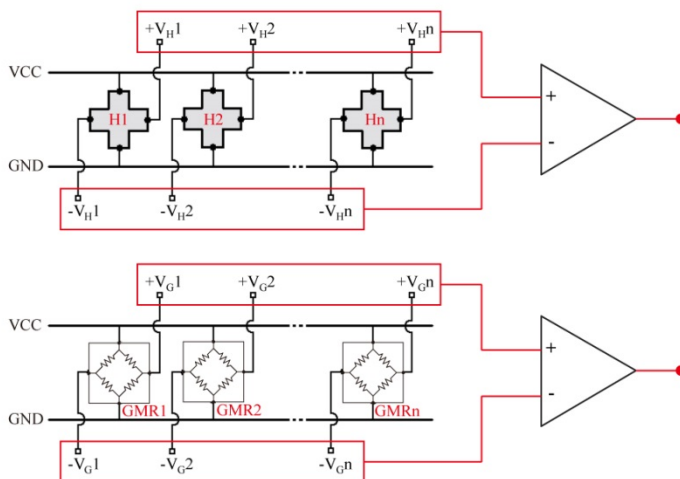
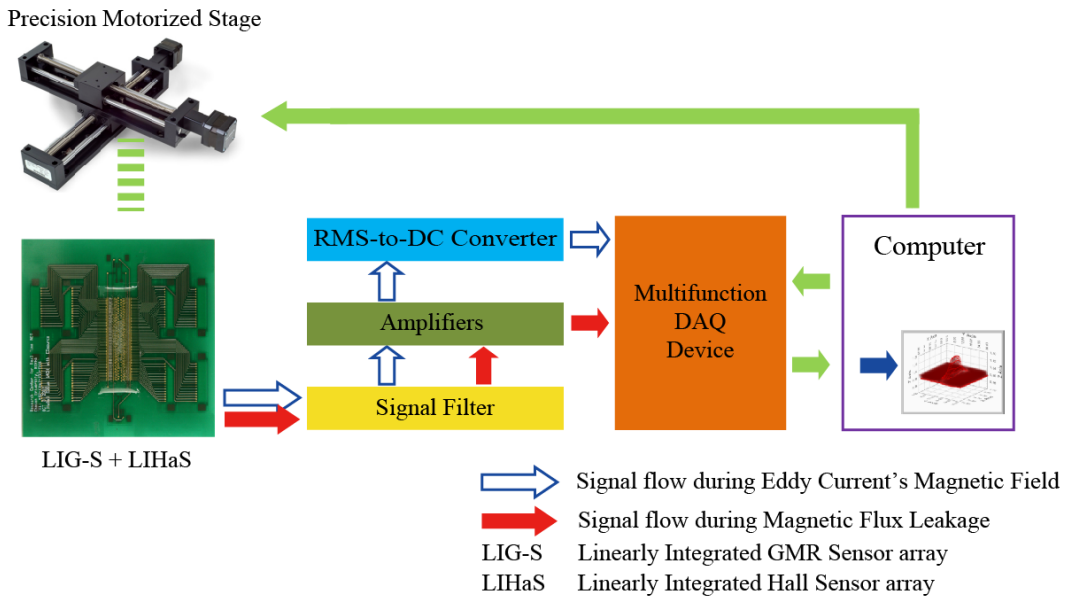


Fig. 4 -3 1-D Hall and GMR magnetic vector camera equivalent circuit

Fig. 4-4는 Fig. 4-2의 스캔형 자기벡터카메라의 블록다이어그램이다. LIGaS와 LIHaS를 결합한 센서부는 정밀 이송장치에 장착되어 검사 대상체를 선형으로 스캐닝하여 신호를 검출한다. 검출된 신호는 필터부를 거쳐 증폭부로 전달되며, 증폭된 신호는 다기능 신호수집장치(DAQ, Data Acquisition device by National Instruments Corporation)를 통해 디지털신호로 변환된 후 컴퓨터로 전송되어 가시화된다. 한편, 유도된 와전류에 의한 자기장의 변화를 검출할 경우에는 검출된 교류 신호를 증폭 후 교류-직류 신호변환기(RMS-to-DC Converter)에서 신호분석 및 후처리가 용이한 직류 신호로 변환되어 다기능 DAQ로 전송된다.



**Fig. 4-4 Block diagram for a scan-type magnetic vector camera**

Fig. 4-5는 상술한 스캔형 자기벡터카메라에 적용하기 위해 개발된 전용소프트웨어이다. 내쇼날인스트루먼트(National Instruments)사의 그래픽 기반 개발 프로그램인 LabVIEW를 사용하여 개발하였다. Fig. 2-39에 표기된 각 부위의 기능은 하기와 같다.



- (a) 정밀이송장치 통신환경 설정 및 수동 제어
- (b) DAQ의 아날로그 신호 입력 환경 설정
- (c) 측정영역 설정 및 측정 시작, 정지 버튼
- (d) 측정된 신호 저장 및 불러오기
- (e) 측정된 신호의 수직성분 강도 표현
- (f) 측정된 신호의 수평성분 강도 표현
- (g) 3차원 벡터 표현

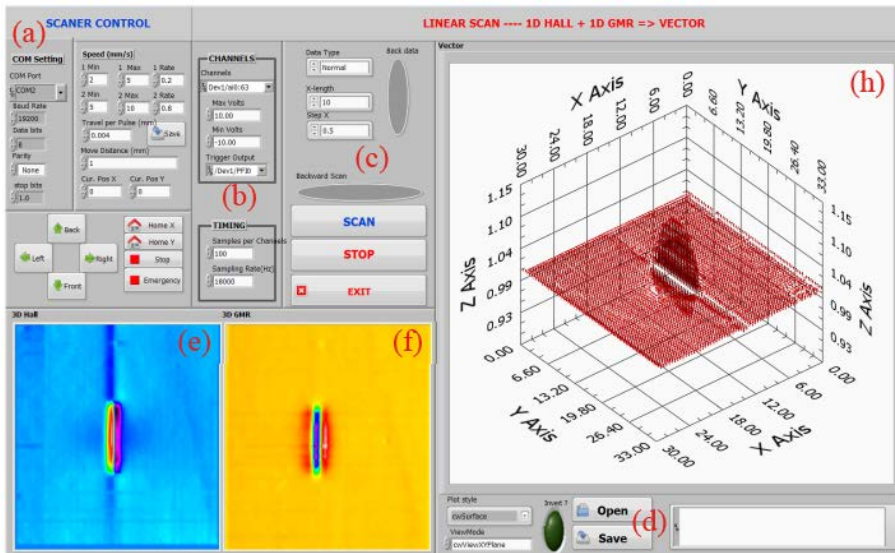


Fig. 4-5 Scan-type magnetic vector camera software

### 3. 실험 및 고찰

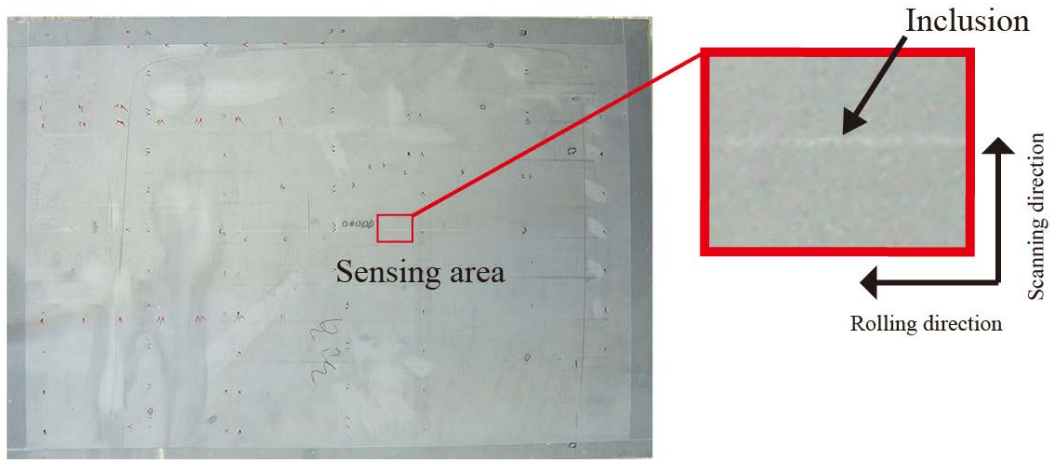
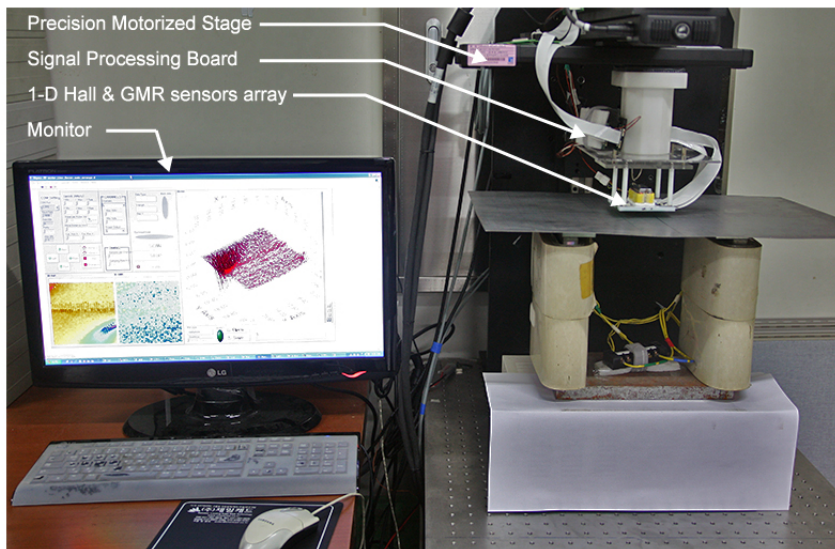


Fig. 4-6 Specimen(cold-rolled steel sheet)

Fig.4-2의 스캔형 자기벡터카메라를 이용하여 냉연강판의 개재물을 검출하였다. 시험편은 POSCO 기술연구소에서 제공 받은 개재물이 내재되어 있는 냉연강판을 사용하였다. 가로 500mm, 세로 340mm, 두께 0.8mm 인 냉연강판 시험편에는 8개 정도의 개재물이 내재되어 있다. 개재물의 성분은 제강공정에서 첨가되는 산화 알루미늄( $Al_2O_3$ )과 산화 칼슘( $CaO$ )에 의한 화합물이 주를 이루고 있으며, 소량의 산화 마그네슘( $MgO$ )에 의한 화합물도 있다.[61] 또한, 개재물은 강판 표면으로부터 수십  $\mu m$ 내의 상반부에 존재하고, 그 길이는 수백  $\mu m$  이상이다. 두께는 20 ~ 30  $\mu m$  내외이고, 압연 방향으로 길게 늘어져 있는 형태이나 일부 구상형에 가까운 것도 있다. 본 연구에서는 이해를 돕기 위해 압연방향으로 길게 형성되어 있고, 표면으로 드러나 있는 개재물을 검출하였다. 시험편이 강자성체이므로 MFLT로 개재물을 검출하였다.[62, 63] 이때, 개재물의 길이방향과 인가자기장 방향에 따라 누설되는 자속의 양이 차이가 나는 것에 착안하여, 의도적으로 시험편을 40° 경사지게 자화기에 위치시켜, 개재물에 의한 누설자속의 분포를 검출하였다. 실제 냉연강판 제작공정에 적용을 하기 위해서는 압연 방향에 경사지게 외부자기장을 인가하는 자화방법을 사용하면 된다.

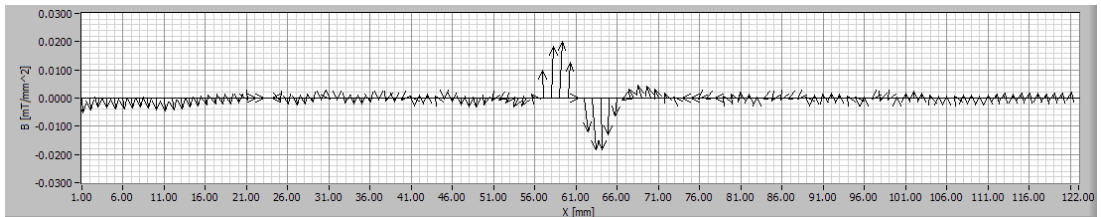
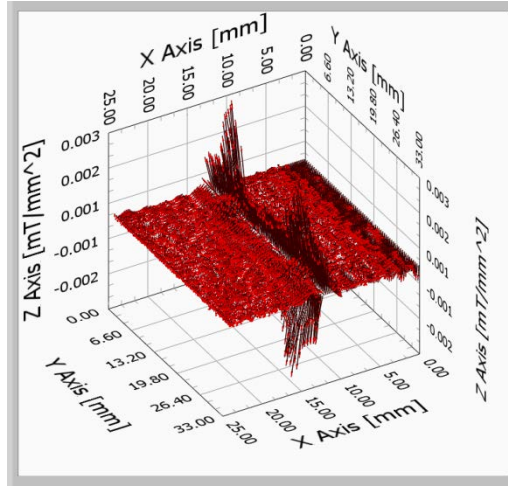
상술한 스캔형 자기벡터카메라를 이용하여 냉연강판 개재물의 검출하기 위한 실험장치 구성을 Fig. 4-7에 나타내었다. 실제 냉연강판의 개재물 검출을 위한 현장 조건을 구성하는 것에는 어려움이 있어, 고정밀 이송장치에 스캔형 자기벡터카메라를 부착하여 유사한 실험 환경을 구성하였다. 냉연강판에 인가할 자기장은 요크형 자화기를 이용하였다. 이때, 낮은 자기장 영역에서는 냉연강판 표면의 흠집이나 찌그러짐등에 의한 누설자속의 변화와 개재물에 의한 누설자속의 변화가 혼재되어 검출될 수 있으므로, 높은 자기장을 인가하여 포화자화가 높은 개재물에 의한 누설자속의 변화만을 검출하기 위하여 7A의 직류 전류를 인가하였다.[64]



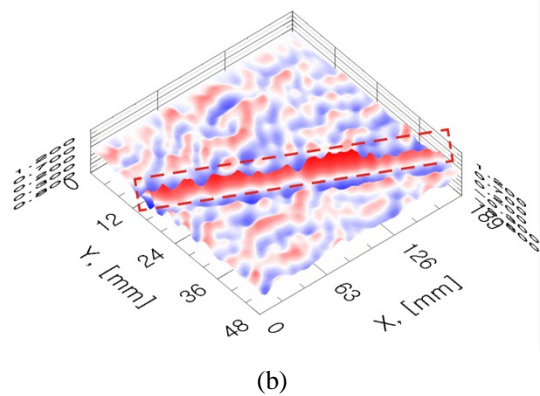
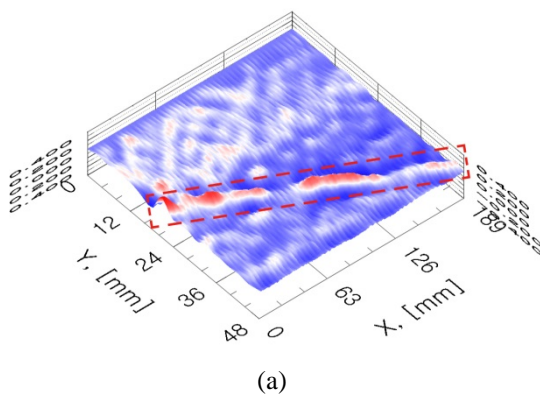
**Fig. 4-7 Experimental equipment for cold-rolled steel sheet**

Fig. 4-8은 자기벡터카메라를 이용하여 취득한 개재물 주변의 자기벡터 분포를 나타낸다. Fig. 4-9의 (a)는 Hall 센서배열에 의하여 취득한 결과이며, (b)는 GMR 센서배열에 의한 것이다. 결과 그림에서 (a)보다 (b)에서 개재물의 형상이 더 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 Hall 센서의 소자크기(약  $200\mu\text{m}$ )가 개재물(약  $20 \sim 30\mu\text{m}$ )보다 매우 커서 개재물에 의한 자기장 분포를 세밀하게 검출하지는 못하는 것에 기인한 것이다. 반면에 GMR 센서의 소자크기(약  $60\mu\text{m}$ )는 개재물의 크기와 비슷하여 개재물에 의한 자기장 분포 변화를 더 세밀하게 검출할

수 있다. 이와 같은 이유로 Fig. 4-9(a)에서 Hall 센서에 의한 개재물 주변의 자기장 분포는 개재물이 간격을 두고 분포되어 있는 것처럼 나타난다. 반면에 Fig. 4-9(b)의 GMR 센서에 의한 개재물 주변의 자기장 분포는 개재물이 길게 하나로 연결되어 있는 것처럼 보임을 알 수 있다.



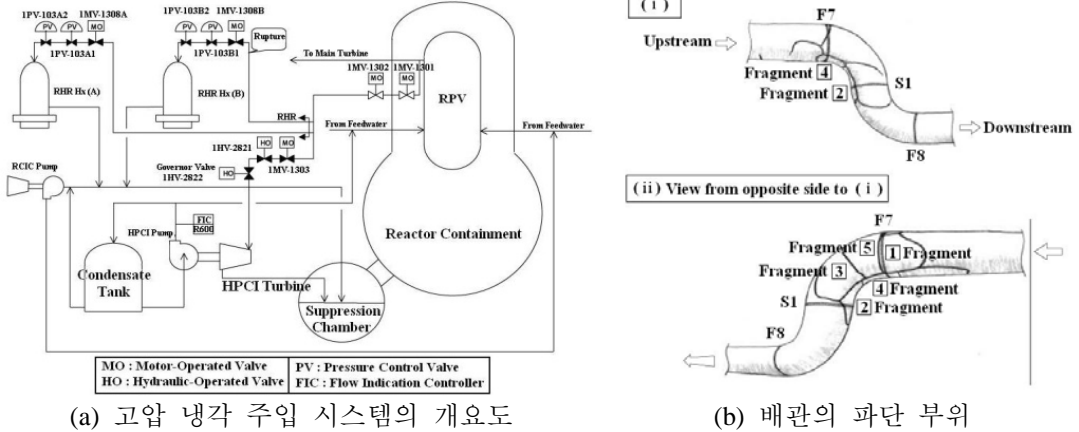
**Fig. 4-8 Visualization of magnetic field vectors around inclusion**



**Fig. 4-9 Visualization of the magnetic flux density after post-processing**

## 제 2 절 소구경 배관 열교환기 내부 및 외부 부식 검출

### 1. 배경



자료출처: <http://www.nisa.meti.go.jp/english/0207eng.pdf>

**Fig. 4-10 The pipe break accident of the Hamaoka atomic power plant**

2001년 11월 7일 시즈오카현에 위치한 하마오카 원자력 발전소 1호기(중부전력 소유 비등형 경수로 출력 540MWe)에서 정상출력운전 중에 고압 냉각 주입(HPCI, high pressure coolant injection) 계통의 터빈 구동 펌프 기동 시험을 수행하던 중, 동 계통의 터빈 구동 펌프가 자동적으로 정지하였다. 원인은 원자로 건물 2층의 잔열 제거계통(RHRS, residual heat removal system) 증기배관인 잔열 제거 열교환기에 연결된 배관 1개가 완전히 파단된 것이다. 파단된 배관은 내경이 150mm, 두께가 11mm인 탄소강 재료였으며, 이 사고로 원자로를 긴급히 냉각시킬 수 있는 비상 노심 냉각계통(ECCS, emergency core cooling system)의 일부인 고압노심 냉각계통이 사용 불가능이 되었다. 방사능을 포함한 증기가 원자로 건물로 누설되어 화재 경보기가 울렸지만, 다행히 건물 외부로의 방사능 누설은 없었다고 보고 되었다.

배관형 구조물은 송유관, 발전소의 로터블레이드, 원자력발전소의 열교환기 등 그 쓰임이 매우 중요하고, 사고 발생시 막대한 피해를 입을 수 있으므로 탐상 및 평가가 꼭 이루어져야 하는 중요한 산업분야이다. 하지만, 배관형 구조물

의 비파괴검사는 배관 형상이 좁고 긴 형태를 가지기 때문에 비파괴검사에 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 점들을 참고하여 별도의 전용 센서를 제작하여 실증 실험을 하였다.

## 2. 전용 자기벡터카메라 개발 및 응용

Hall 센서와 GMR 센서를 이용하여 내경 소구경 배관 시험편을 탐상하기 위한 보빈형 자기벡터카메라를 개발하였다. 가로  $520\mu\text{m}$ , 세로  $520\mu\text{m}$  크기의 Hall 센서를 외경 13.7mm인 원통형 기구부의 원주(圓周)방향으로 곡면 배열을 하고, Hall 센서 배열과 가로  $1,300\mu\text{m}$ , 세로  $400\mu\text{m}$  크기의 GMR 센서를 축 방향으로 평행하게 배열하고 와이어 본딩(wire bonding)하여 제작하였다. 제작에 소요된 Hall 센서와 GMR 센서의 수는 각 70개이며,  $600\mu\text{m}$  간격으로 배열하였으며, 제작된 센서부의 외경은 16.1mm로 원주방향으로 약  $300^\circ$ 에 해당하는 측정영역을 가진다. 한편, Hall 센서 곡면형 1차원 배열(CIHaS)과 GMR 센서 곡면형 1차원 배열(CIG-S)은 신호 배선 처리를 위한 최소한의 공간(이격거리( $\Delta d_s$ ))을 두고 위치한다. Fig. 4-11은 상술한 것과 같이 제작한 자기 센서 배열을 나타내며, 각각의 자기 센서 배열 외부에 구리선을 권선하여, 전자기장을 인가하였다. Fig. 4-12는 보빈형 2차원 자기벡터카메라의 블록다이어그램이다. CIHaS와 CIG-S를 결합한 센서부는 정밀 이송장치에 장착되어 검사 대상체를 축방향으로 스캐닝하여 신호를 검출한다. 검출된 신호는 필터부를 거쳐 증폭부로 전달되며, 증폭된 신호는 다기능 신호수집장치(DAQ, Data Acquisition device by National Instruments Corporation)를 통해 디지털신호로 변환된 후 컴퓨터로 전송되어 가시화된다. 한편, 유도된 와전류에 의한 자기장의 변화를 검출할 경우에는 검출된 교류 신호를 증폭 후 교류-직류 신호변환기(RMS-to-DC Converter)에서 신호분석 및 후처리가 용이한 직류 신호로 변환되어 다기능 DAQ로 전송된다.

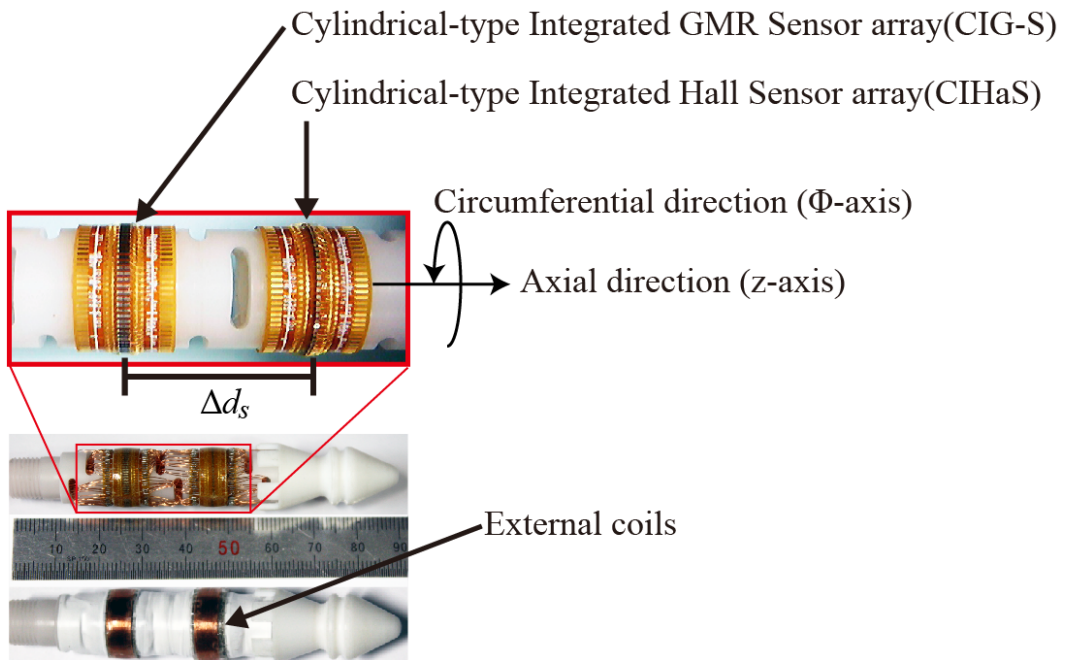


Fig. 4-11 Combination of CIHaS and CIG-S

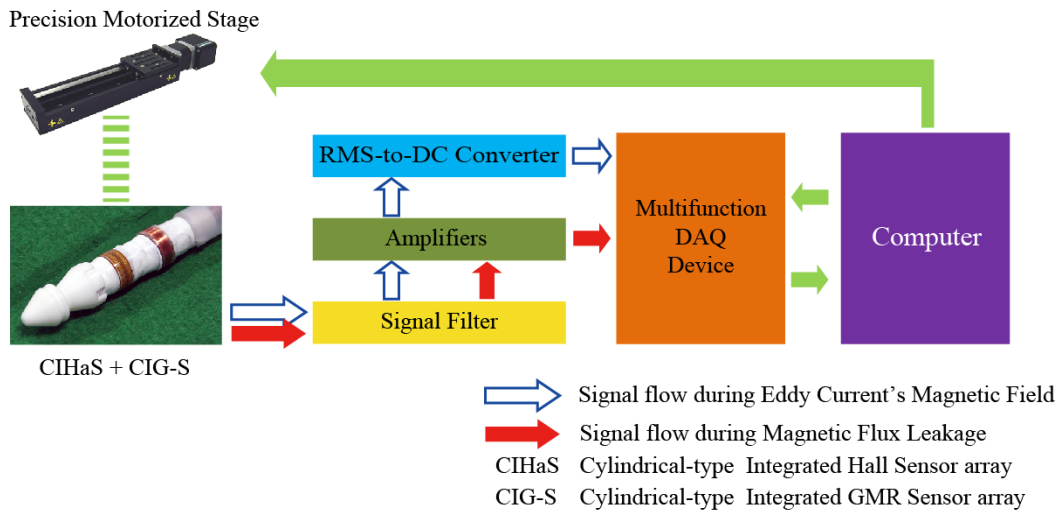


Fig. 4-12 Block diagram for a bobbin-type magnetic vector camera



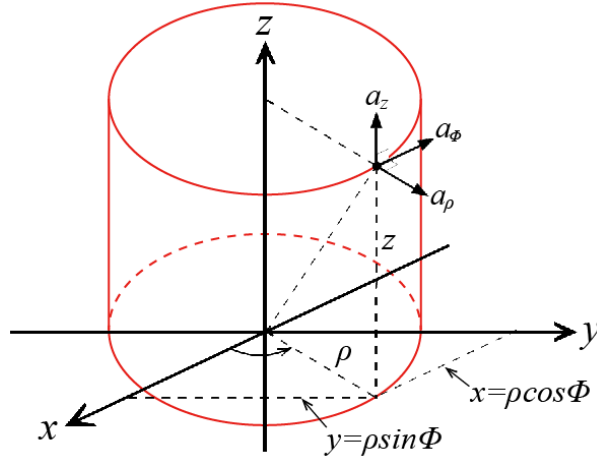


Fig. 4-13 Cylindrical coordinate system

상술한 보빈형 2차원 자기벡터카메라에 의해 검출된 신호는 Fig. 4-13과 같은 원통좌표계(Cylindrical coordinate)에서 Eq. (28)과 같이 벡터  $\vec{B}_{MVC}$  로 표현할 수 있다. 여기서,  $B_{\rho, H}$  는 Hall 센서에 의해 측정되는  $\rho$ 축 성분이며,  $B_{z, G}$  는 GMR 센서의 의해 측정되는  $z$ 축 성분을 나타낸다.  $\hat{i}$ 와  $\hat{k}$ 는 방향을 나타내는 단위 벡터이다.

$$\vec{B}_{MVC} = B_{\rho}\hat{i} + B_z\hat{k} = B_{\rho,H}\hat{i} + B_{z,G}\hat{k} \quad (28)$$

한편, 본 연구에서는 원통좌표계가 아닌 직각좌표계에 벡터  $\vec{B}_{MVC}$  를 표현하였으며, 원통좌표계와 직각좌표계의 기하학적인 관계에 따라 Eq. (29)와 같이 표현하였다.

$$\begin{aligned} \vec{B}_{MVC} = B_{\rho}\hat{i} + B_z\hat{k} &= (B_x \cos \Phi + B_y \sin \Phi)\hat{i} + B_z\hat{k} \\ &= (B_x \cos \Phi)\hat{i} + B_z\hat{k} \end{aligned} \quad (29)$$

### 3. 실험 및 고찰

상술한 보빈형 자기백티카메라를 이용하여 소구경 배관 시험편에 도입된 결함 주변의 자기장 분포를 검출하였다. 실제 원자력발전소에 사용되는 열교환기 배관과 같은 규격으로 제작된 표준 시험편을 이용하였다. Fig. 4-14는 니켈(Ni)이 첨가된 구리 합금(cupro-nickel 90/10) 표준 시험편(ASME/ID PIT CAL. STD for YG12)이며, 내경 16.56 mm, 두께는 1.245 mm 이다. 또한, 그림과 같이 Hole-type 결함이 도입되어 있고, 그 크기는 Table 4-1과 같다.

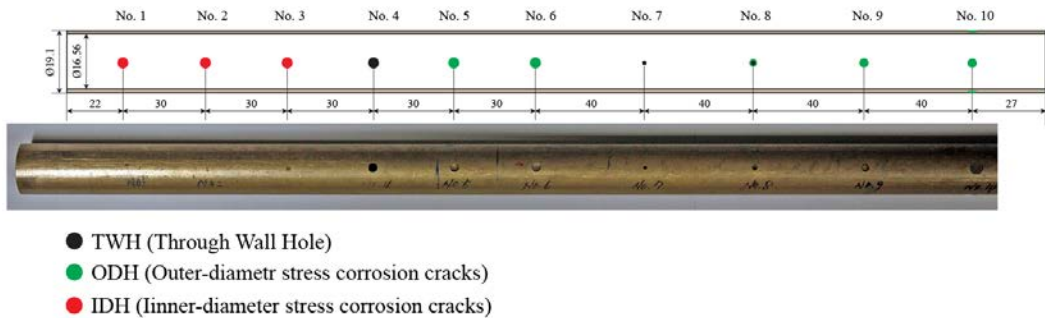


Fig. 4-14 Small-bore piping specimen made of cupro-nickel 90/10

Table 4-1 Size and shape of each crack on a cupro-nickel 90/10

No.	Shape	Depth [mm]	Width [mm]	Volume [mm <sup>3</sup> ]
1	IDH	0.30	3.0	2.12
2	IDH	0.60	3.0	4.24
3	IDH	0.90	3.0	6.36
4	TWH	-	3.0	9.60
5	ODH	1.01	3.0	7.14
6	ODH	0.65	3.0	4.60
7	TWH	-	1.0	1.07
8	TWH	-	2.0/1.0	2.76
9	ODH	0.81	2.5	3.98
10	ODH	0.38	4.5	6.04

Fig. 4-15는 타이타늄 합금(Titanium alloy) 표준 시험편(ASME FBH STD SB338 Gr.2)이며, 내경 17.28 mm, 두께는 0.86 mm 이다. 또한, 그림과 같이 Hole-type 결함이 도입되어 있고, 그 크기는 Table 4-2와 같다.

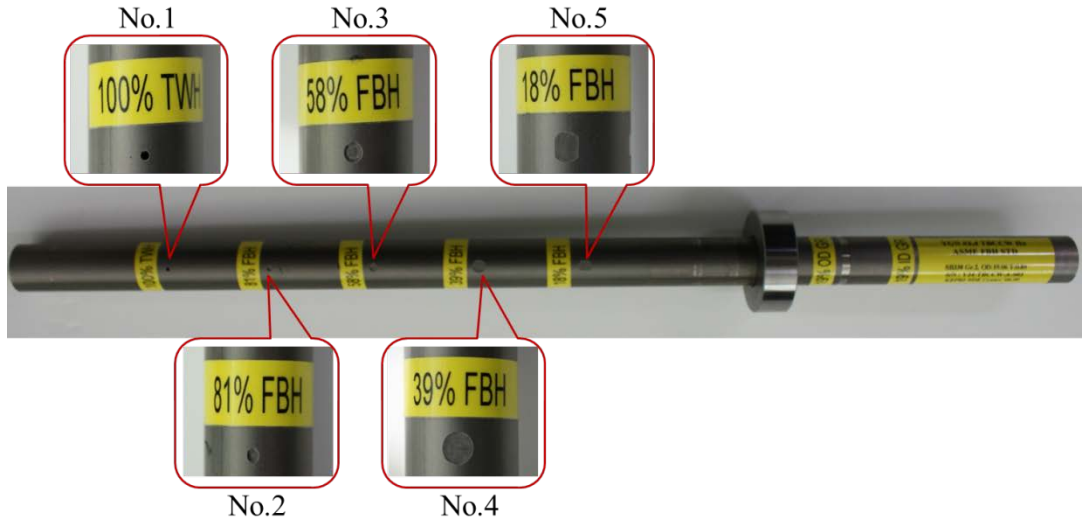


Fig. 4 -15 Small-bore piping specimen made of titanium alloy

Table 4 -2 Size and shape of each crack on a titanium alloy

No.	Shape	Depth [mm]	Width [mm]	Surface area [mm <sup>2</sup> ]	Volume [mm <sup>3</sup> ]
1	Through wall hole-type	0.860	1.0	0.79	0.68
2	Flat bottom hole-type	0.697	1.8	2.54	1.77
3		0.499	2.7	5.73	2.86
4		0.335	4.6	16.62	5.57
5		0.155	4.6	16.62	2.57

상술한 자기 센서 배열을 이용하여 Fig. 4-14와 Fig. 4-15에 도입된 인공결함 주변의 자기장 분포를 측정하기 위한 실험장치의 구성을 Fig. 4-16에 나타내었다. 자기 센서 배열 외부에 권선된 코일을 통하여 교류 전류를 인가하여 시험편에 전자기장을 유도하였다. 1축 정밀 이송장치를 이용하여 열교환기를 이동시켜 측정하였으며, 전용 소프트웨어(Fig. 4-17)를 이용하여 측정된 신호를 가시화하였다.

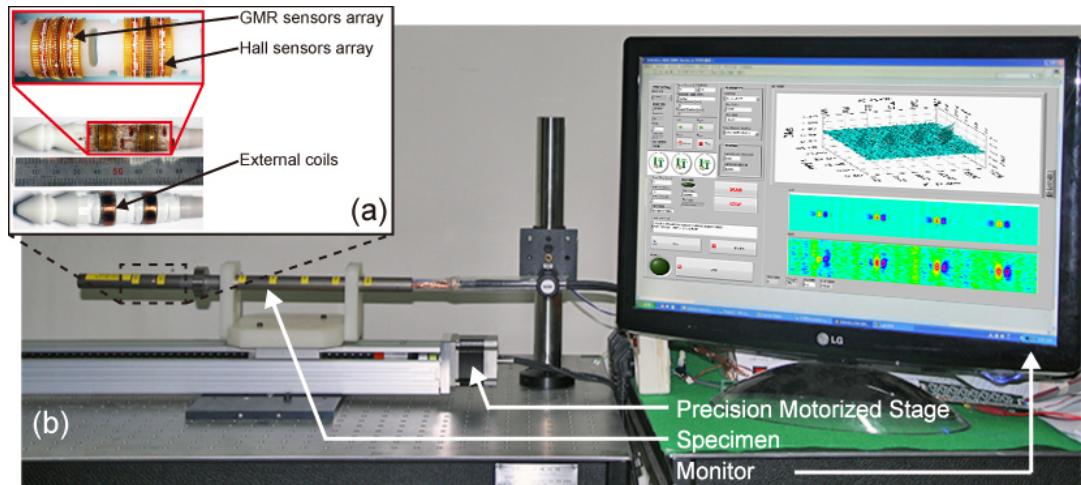


Fig. 4-16 Experimental equipment

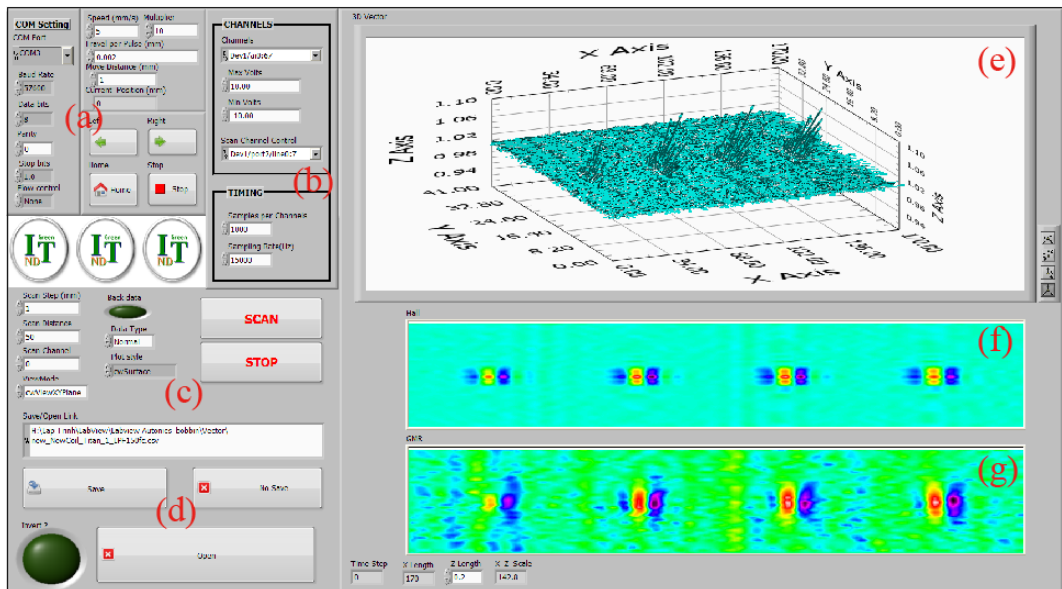


Fig. 4-17 Bobbin-type magnetic vector camera software

Fig. 4-17은 상술한 보빈형 2차원 자기벡터카메라에 적용하기 위해 개발된 전용 소프트웨어이다. 내쇼날인스트루먼트(National Instruments)사의 그래픽 기반 개발 프로그램인 LabVIEW를 사용하여 개발하였다. Fig. 4-15에 표기된 각 부위의 기능은 하기와 같다.

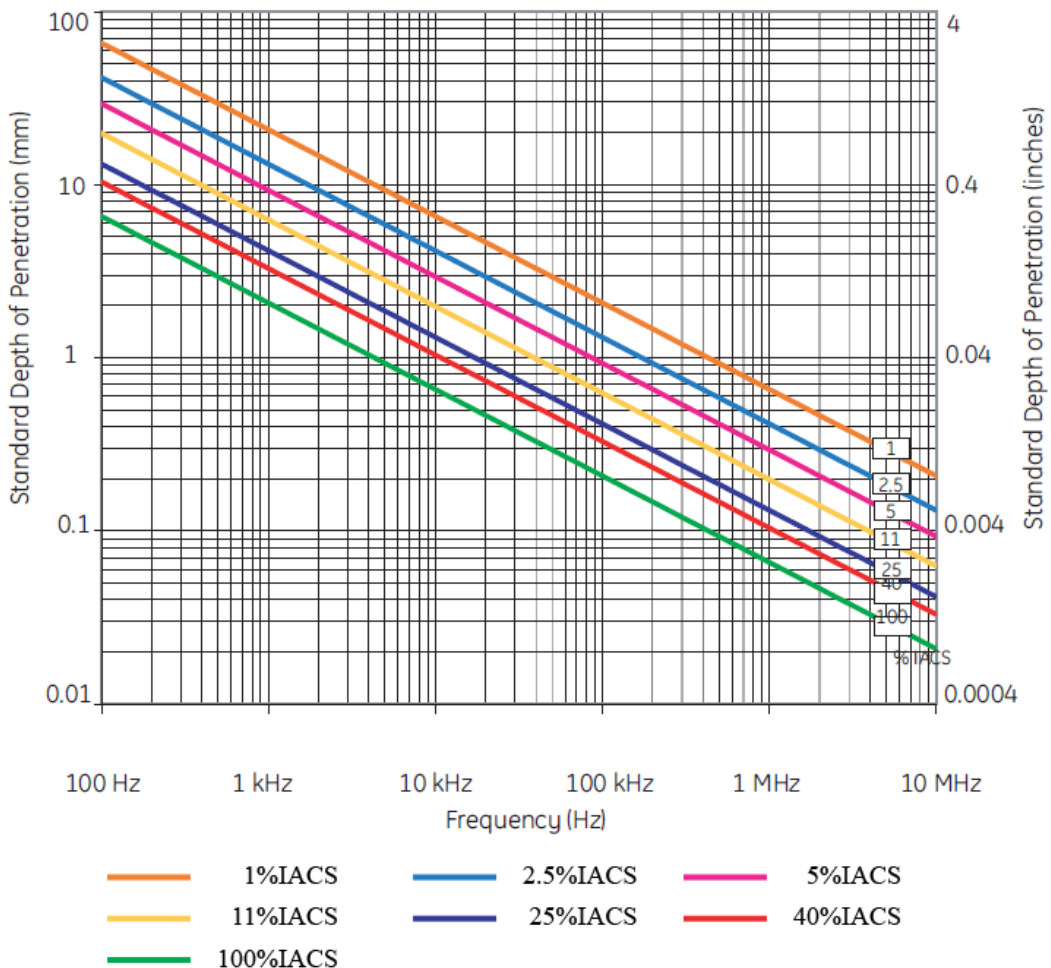
- (a) 정밀이송장치 통신환경 설정 및 수동 제어
- (b) DAQ의 아날로그 신호 입력 환경 설정
- (c) 측정영역 설정 및 측정 시작, 정지 버튼
- (d) 측정된 신호 저장 및 불러오기
- (e) 3차원 벡터 표현
- (f) 측정된 신호의 수직성분 강도 표현
- (g) 측정된 신호의 수평성분 강도 표현

상술한 실험장치와 전용 소프트웨어를 이용하여 구리 합금 시험편과 타이타늄 합금 시험편에 도입된 결함 주변의 자기장 분포를 검출하였다. 유도전류를 발생시키기 위하여, 구리 합금 소구경 배관의 경우 5kHz, 타이타늄 소구경 배관의 경우는 20kHz의 교류전류를 인가하였으며, 상이한 주파수의 교류전류를 인가한 것은 표피효과(skin effect)에 의한 유도전류의 침투깊이를 고려한 것이다.

표피효과란 도체에 흐르는 전류가 주파수가 높아짐에 따라 단면 전체에 균일하게 흐르지 않고 표면 가까이 모여 흐르는 현상을 말하며, 주파수와 도체의 전도율, 투자율등에 의해 얼마만큼 깊이에서 전류가 흐르게 되는지가 결정되고, 이를 침투깊이라 한다. 또한, 침투깊이가 표면에서 약 37%인 깊이를 표준침투깊이(standard depth of penetration)라 하고, Eq. (30)과 같이 표현 할 수 있다.[65, 66]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (30)$$

여기에서  $\delta$ 는 표준침투깊이(standard depth of penetration) [mm],  $f$ 는 주파수 [Hz],  $\mu$ 는 투자율(magnetic permeability) [H/mm],  $\sigma$ 는 전기 전도율(electrical conductivity) [%IACS] 이다. 전기 전도율의 단위로 사용된 %IACS는 국제 연동표준(國際軟銅標準, The International Annealed Copper Standard)의 약칭으로 풀림(annealing)한 순동의 전도율  $1.73 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  를 100%IACS라 할때, 이것과의 비를 나타낸다. Fig. 4-18은 %IACS와 표준침투깊이의 관계를 나타내며, Table 4-3은 주요 금속의 전도율을 나타낸다.



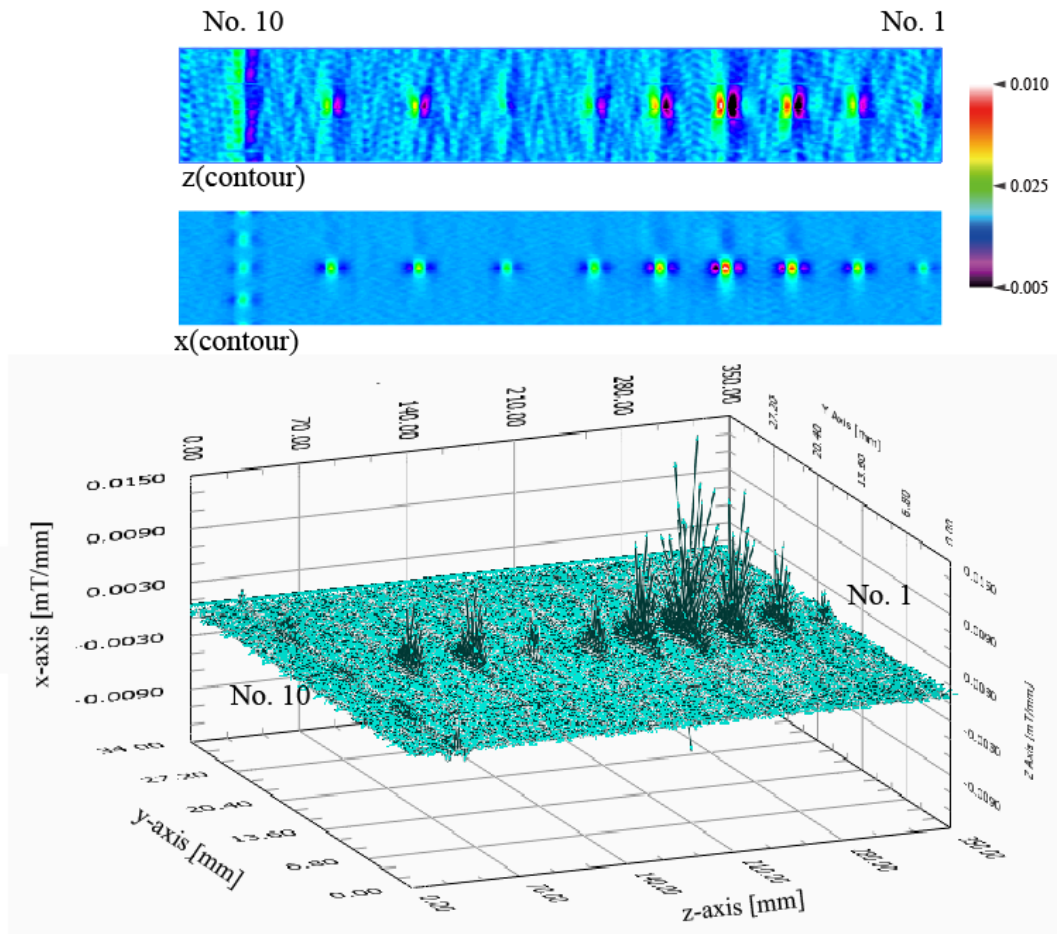
**Fig. 4-18 Frequency vs. Standard depth of penetration**

(자료출처: Principles of Eddy Current Testing, GE Inspection Technologies)

**Table 4-3 Conductivity of the primary metal**  
 (자료출처: Principles of Eddy Current Testing, GE Inspection Technologies)

Metal Type	Conductivity	
	%IACS	[MSm <sup>-1</sup> ]
Aluminium (pure)	61	35.4
Aluminium Alloy, 2014-T6	38 ~ 40	22 ~ 23.2
Brass, 70Cu 29Zn 1Sn	25	14.5
Copper (pure)	100	58
Cupro-Nickel 70/30	5	2.9
Cupro-Nickel 90/10	11.9	6.9
Inconel 600	1.7	0.99
Phosphor Bronze	11	6.4
Stainless steel (300 series)	2.3 ~ 2.5	1.3 ~ 1.5
Titanium	1 ~ 4.1	0.6 ~ 2.4

Fig. 4-19는 구리 합금 소구경 배관에 도입된 결함 주변의 자기장 분포를 측정한 결과이며, Fig. 4-20은 타이타늄 합금 소구경 배관에 도입된 결함 주변의 자기장 분포를 측정한 결과이다. 보빈형 2차원 자기벡터카메라로부터 검출된 원천신호(raw data)를 축방향(스캔방향)으로 미분연산을 하고, 소프트웨어적으로 차단주파수 100Hz의 저주파대역통과필터(LPF, low pass filter)를 적용한 결과영상이다. z축 성분을 검출한 Hall 센서의 결과영상이 x축 성분을 검출한 GMR 센서의 결과영상 보다 명확하게 결함을 나타내고 있다. 이와 같은 이유는 시험편의 내외벽의 평행한 방향으로 유도된 전류의 왜곡에 의한 자기장의 변화가 수직방향으로 더 많이 발생하기 때문이다.



**Fig. 4-19 Visualization of magnetic field vectors around stress corrosion cracks in the copper alloy piping specimen**



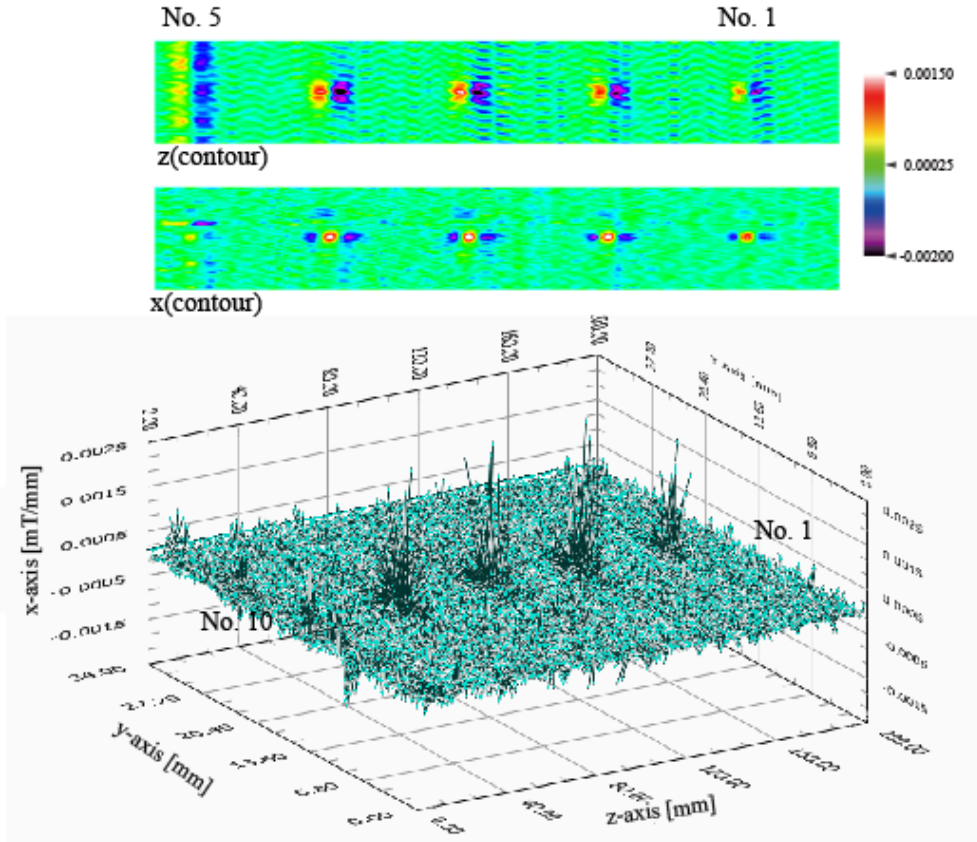


Fig. 4-20 Visualization of magnetic field vectors around stress corrosion cracks in the titanium alloy piping specimen

종래의 자기카메라의 결과영상과 유사한 Hall 센서의 결과영상과 자기벡터카메라에 의한 자기벡터 분포 영상을 보면, 단편적인 결과 영상만으로는 Hall 센서의 결과영상과 자기벡터카메라에 의한 자기벡터 분포 영상의 차이가 크게 나지 않는 것처럼 보인다. 하지만, Fig. 4-19와 Fig. 4-20의 결과 영상에서 결함의 중심을 기준으로 시험편의 축 방향으로의 단면을 보면 두 방법의 검출능 차이를 알 수 있다. 각 단면 그래프에서 기저로부터 결함으로 추정되는 신호의 최대 첨두치까지의 값을 신호(S, signal)라고 하고, 기저로부터 결함이 아닌 것으로 추정되는 신호의 최대 첨두치까지의 값을 잡음(N, noise)이라고 할 때, S와 N의 차이(신호대잡음비, signal-to-noise ratio)는 주변 신호로부터 결함을 판별할 수 있는 중요한 정보가 된다.

Fig. 4-21은 신호대잡음비를 비교하기 위한 구리 합금 소구경 배관의 자기장 분포 영상(Fig. 4-21(a))과 타이타늄 합금 소구경 배관의 자기장 분포 영상(Fig. 4-21(b))의 단면그래프이다. 그림에서와 같이 벡터 분포의 결과영상이 신호대잡음비가 더 큰 것을 알 수 있다. 본 연구에서와 같이 잡음의 유입이 적은 환경에서 보다, 잡음의 유입이 많은 실제 산업현장에서 더 유용하게 적용 될 것으로 기대한다.

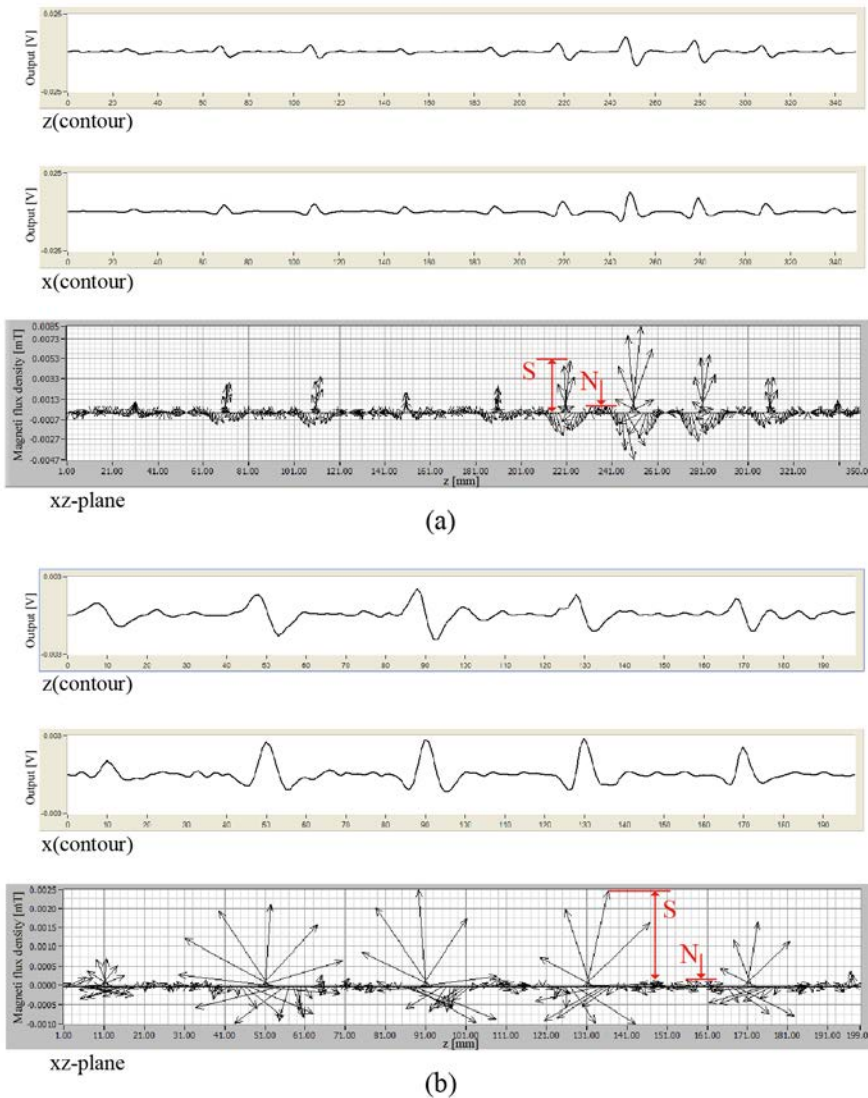


Fig. 4-21 Characteristic comparison of the signal-to-noise ratio

## 제 5 장 결 론

항공기를 비롯하여 화력, 원자력 발전, 석유정제, 유인 우주스테이션, 로켓 엔진 등의 대형기기 구조물로부터, IC 패키지, VLSI 등의 초소형부재에 이르기까지 손상의 직접적인 원인 중 하나는 재료열화, 부식, 피로의 발생 및 성장에 의한 것이다. 특히, 대형기기 구조물에 존재하는 결함은 결과적으로 막대한 인명피해, 경제적 손실, 환경오염 및 국가적 위상 추락을 유발할 수 있다. 이러한 손상을 조기에 발견하여 정비 및 교체등과 같은 조치를 취하면, 설계수명까지 안정적 사용은 물론 손상허용공학적 관점에서 수명을 연장하여 사용할 수 있다.

자분과 같은 소모품을 사용하지 않고, 검사를 위한 전처리 및 후처리 공정을 없앨 수 있으며, 적은 전력소모로, 강자성체, 상자성체 및 강자성체와 상자성체가 혼재된 금속의 구조물에 존재하는 표면결함, 이면결함, 내재결함을 구조물의 형상에 관계없이, 넓은 영역에서 고속, 고공간분해능으로 탐상 가능하고, 정량 해석도 가능하고, 무엇보다 현장 적용성이 탁월한 새로운 순수 국산 원천 기술에 의한 고유 브랜드의 비파괴검사장비를 개발해야 한다. 이러한 소기의 목적을 달성하기 위하여 개발된 기술이 자기카메라이다.

자기카메라 기술은 자기장의 분포를 관찰하여 비파괴 검사 분야에 적용할 수 있는 첨단 IT 기술의 하나로서, 지금까지 많은 연구를 통하여 원천기술을 확보하고 있다. 자기카메라의 결함탐상능력은 센서크기(0.2mm), 배열간격(0.52~1.04mm) 및 감도(약  $100\mu\text{T}$ )에 의존하며, 결과적으로 길이 1~2 mm 이상인 결함의 탐상 및 평가에 국한되어 활용되어지고 있다. 따라서 현재의 자기카메라 기술에 의하면, 2mm 이상의 결함을 검출할 수 있으며, 50~500 $\mu\text{m}$ 의 결함을 검출하기 위해서는 센서 공간분해능과 감도 향상을 위한 연구가 필수적이다. 또한, 결함을 정량 평가할 때, 시험편에 수직인 방향의 자기장의 분포만을 활용하므로, 정보의 다양화, 즉 3차원 자기장 벡터의 실시간 가시화 및 이를 이용한 비파괴정량해석 알고리즘을 개발한다면, 보

다 작은 결함을 보다 정확하게 검출하고, 평가할 수 있을 것으로 기대하였다.

따라서, 본 연구에서는 경년열화를 포함한 마이크로미터 단위의 손상을 검사하기 위해서 보다 높은 감도 및 낮은 잡음비로, 보다 높은 공간분해능을 가지면서, 보다 많은 센서를 배열하는 한편, 더 많은 정보를 취득하기 위한 3차원적인 자기장 벡터의 분포를 측정하는 자기벡터카메라를 개발하는 것을 그 목적으로 하였다.

본 연구에서는 상술한 목표를 달성하기 위하여 이중센서를 이용한 자기벡터카메라를 제안하였다. 한편, 누설자속탐상법(MFLT, Magnetic Flux Leakage Testing)과 와전류탐상법(ECT, Eddy Current Testing)에 의한 결함 주변에서의 전자기적 현상을 정성적으로 표현하고 정량적으로 평가하기 위해서 상용 수치해석 프로그램 ANSYS를 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 수치 해석 결과에 의해, 자기벡터 분포를 예측하는 한편 특정한 방향으로 결함이 가늘게 발생하는 검사 대상체에 전자기적 현상을 이용하여 결함을 검출할 경우 전자기장의 방향과 결함의 길이방향의 상관관계를 도출하였다.

또한, 이중센서로 채택할 적합한 자기센서를 선택하기 위하여 자기 센서의 원리와 특성을 원리적, 실험적으로 검토하였다. 특히, Hall 효과(Hall effect)를 이용한 Hall 센서와 자기저항 효과(Magnetoresistive effect)를 이용한 MR 센서 중 거대자기저항 효과(Giant Magnetoresistive effect)를 이용한 GMR 센서, 이방성 자기저항 효과(Anisotropic Magnetoresistive effect)를 이용한 AMR 센서를 중점 검토하였다. 대표적인 특성에 대한 비교를 Table 5-1에 정리하였다. 여기에서 V-AMR 센서는 AMR 소자를 Full bridge 형태로 배치한 것이며, B-AMR 센서는 baber pole bias 구조를 적용하여 wheatstone bridge 형태로 배치한 AMR 센서이다.

**Table 5-1 Performance characteristic comparison:  
Hall vs. V-AMR vs. B-AMR vs. GMR**

	Hall sensor	V-AMR sensor	B-AMR sensor	GMR sensor
Sensitivity [mV/Oe]	0.72	1.44	2.70	5.57
Saturation Field [Oe]	80<<	40	10	60
Linear Operating Region [Oe]	All	5-30	0-10	0-50
Most Sensitive Direction (Cartesian coordinate )	z-axis	x-axis	x-axis	x-axis
Hysteresis	No	Yes	Yes	Yes
Discriminate + and - Fields?	Yes	No	Yes	No

시제작한 자기벡터카메라의 유용성을 확인하기 위하여, (1) 강자성체 평판형 시험편 표면에 도입한 결함 주변의 자기장 벡터 분포를 측정, (2) 외부자기장의 세기에 따른 규소강판의 자구 변화 관찰, (3)요크형 자화기를 이용한 냉연강판 개재물 검출, (4)소구경 배관에 도입한 결함에 의한 자기장 벡터 분포를 관찰하였다. 종래의 자기카메라에 의한 자기장 분포의 측정은 XYZ-직각좌표계에서 오직 하나의 축에 대한 성분만을 검출하므로 정보의 미비는 필연적이다. 반면에 감자방향이 다른 이중 센서를 이용하여 공간적 현상인 자기장의 분포 변화에 대한 다양한 정보를 측정하고 가시화할 수 있었다. 또한, 종래의 자기카메라의 장점인 자기장 분포 가시화 기술도 자기벡터카메라에 이식하여 자기장 벡터 분포와 함께 결함 검출 및 평가 정보로 활용할 수 있었다. 종래의 자기카메라에 보다 나은 결함 검출능을 확보한다는 목표에서는 마이크로 단위의 결함을 가지고 있는 시험편을 대신하여 규소강판 자구의 히스테리시스 특성을 가시화함으로써 검증하였다.

## REFERENCE

- [1] J. C. Scully, "The theory of stress corrosion cracking in alloys," *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 19, pp. 5-10, 1972.
- [2] J. Galvele, "A stress corrosion cracking mechanism based on surface mobility," *Corrosion Science*, vol. 27, pp. 1-33, 1987.
- [3] K. Sieradzki and R. C. Newman, "Stress-corrosion cracking," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 48, pp. 1101-1113, 1987.
- [4] R. H. Jones, *Stress-corrosion cracking*: ASM International, 1992.
- [5] R. C. Newman, "Stress-corrosion cracking mechanisms," *Corrosion Technology New York and Basel*, vol. 17, pp. 399-450, 2002.
- [6] N. E. Frost and D. S. Dugdale, "The propagation of fatigue cracks in sheet specimens," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 6, pp. 92-110, 1958.
- [7] S. T. Revankar, B. Wolf, and J. R. Roznic, "Metal Fatigue Crack Growth Models," *International Journal of Advanced Engineering Applications*, vol. 1, pp. 85-91, 2012.
- [8] J. LAUBE, F. LASSERRE, G. GUSE, and J. M. TCHILIAN, "Qualification works for the mechanized Pre-service Inspection (PSI) for the Primary Circuit of the new European Pressurized Water Reactor (EPR)," in *Abstracts of 17th World Conference on Non-Destructive Testing*, 2008.
- [9] F. Ammirato, M. Bieth, O. Chapman, L. Davies, G. Engl, C. Faidy, *et al.*, "Improvement of in-service inspection in nuclear power plants," *International Atomic Energy Agency, Tech. Rep. IAEATECDOC-1400*, 2004.
- [10] M. Ando, S. Kubo, Y. Kamishima, and T. Iitsuka, "Study on In-Service Inspection Program and Inspection Technologies for Commercialized Sodium-Cooled Fast Reactor," in *Proceedings of the 14th International Conference on Nuclear Energy, Miami, Florida, July 17-20, 2006*.

- [11] M. Brumsen, "Case Description: The ICE Train Accident near Eschede," in *European Business Ethics Cases in Context*. vol. 28, W. Dubbink, L. Liedekerke, and H. Luijk, Eds., ed: Springer Netherlands, 2011, pp. 157-168.
- [12] U. G. Goranson, "14th Plantema Memorial Lecture: Damage Tolerance - Facts and Fiction," in *Proceedings of the Symposium International Committee on Aeronautical Fatigue*, 1993, pp. 3-106.
- [13] P. E. Mix, "Magnetic Particle Testing," in *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide, Second Edition*, ed, pp. 247-299.
- [14] C. E. Betz, *Principles of magnetic particle testing*: Magnaflux Corporation Chicago, 1967.
- [15] A. Lindgren, H. Weltman, J. Reynolds, J. Halkias, W. Kaarlela, O. Molina, *et al.*, "Magnetic particle inspection," *ASM Handbook.*, vol. 17, pp. 89-128, 1989.
- [16] K. Mandal and D. L. Atherton, "A study of magnetic flux-leakage signals," *Journal of Physics D*, vol. 31, pp. 3211-3217, 1998.
- [17] P. E. Mix, "Magnetic Flux Leakage Theory," in *Introduction to nondestructive testing: a training guide*, ed: Wiley-Interscience, 2005, pp. 73-78.
- [18] G. S. Park and E. S. Park, "Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage-Type Nondestructive Testing (NDT)," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 38, pp. 1277-1280, 2002.
- [19] 이진이, "누설자속탐상법의 결합검출능력 향상에 관한 연구," presented at the 대한기계학회 춘추학술대회, 2004.
- [20] K. Kosmas, C. Sargentis, D. Tsamakis, and E. Hristoforou, "Non-destructive evaluation of magnetic metallic materials using Hall sensors," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 161, pp. 359-362, 2005.
- [21] S. H. Choi, J. Y. Lee, K. C. Lee, and J. S. Hwang, "A study of leakage magnetic flux detector using Hall sensors array," *Key Engineering Materials*, vol. 306, pp. 235-240, 2006.

- [22] G. Dobmann, G. Walle, and P. Höller, "Magnetic leakage flux testing with probes: physical principles and restrictions for application," *NDT International*, vol. 20, pp. 101-104, 4// 1987.
- [23] P. E. Mix, "Eddy Current Theory," in *Introduction to nondestructive testing: a training guide*, ed: Wiley-Interscience, 2005, pp. 66-72.
- [24] 정용무, "와전류탐상법(渦電流探傷法)(I)," *비파괴검사학회지*, vol. 13, pp. 94-100, 1993.
- [25] 정용무, "와전류탐상법(渦電流探傷法)(II)," *비파괴검사학회지*, vol. 13, pp. 39-45, 1993.
- [26] 정용무, "와전류탐상법(渦過電流探傷法)(III)," *비파괴검사학회지*, vol. 13, pp. 47-56, 1994.
- [27] J. Jun and J. Lee, "Nondestructive evaluation of a crack on austenitic stainless steel using a sheet type induced current and a Hall sensor array," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 22, pp. 1684-1691, 2008.
- [28] J. Jongwoo, C. Myungki, and L. Jinyi, "Nondestructive Evaluation of Austenitic Stainless Steel Using CIC-MFL and LIHaS," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 3959-3962, 2011.
- [29] K.-K. Park, "Consideration of Penetrant Inspection," *Journal of the Korean society for nondestructive testing*, vol. 3, pp. 36-39, 1984.
- [30] J. S. Hwang and J. Y. Lee, "Magnetic Images and NDT of the Express Train Wheel Using a High Speed Scan-Type Magnetic Camera," *Key Engineering Materials*, vol. 417-418, pp. 169-172, 2010.
- [31] L. Jinyi, J. Jongwoo, K. Jungmin, C. Hoyoon, and L. Minhhuy, "Bobbin-Type Solid-State Hall Sensor Array With High Spatial Resolution for Cracks Inspection in Small-Bore Piping Systems," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 3704-3707, 2012.
- [32] J. Jun, Y. Park, and J. Lee, "Real time visualization of alternating magnetic fields using



- 2-dimensional integrated Hall sensor array," *Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis*, vol. 61, pp. 32-35, 2010.
- [33] J. M. Kim and J. Y. Lee, "Inspection of the Internal Cracks on a Pipe Using a Cylinder-Type Magnetic Camera," *Key Engineering Materials*, vol. 417-418, pp. 165-168, 2010.
- [34] J. Lee, J. Jun, J. Kim, and J. Lee, "An application of a magnetic camera for an NDT system for aging aircraft," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 30, 2010.
- [35] J. N. Lee, J. S. Hwang, S. Choi, and J. K. Lim, "Detection Probability Improvement for Nondestructive Evaluation Using a Magnetic Camera," *Key Engineering Materials*, vol. 306-308, pp. 241-246, 2006.
- [36] J. Y. Lee and J. S. Hwang, "A Study of the Quantitative Nondestructive Evaluation Using the Cross Type Magnetic Source and the Magnetic Camera," *Key Engineering Materials*, vol. 321-323, pp. 1447-1450, 2006.
- [37] 이진이, 전종우, "IT 융복합 NDT 기술과 자기카메라," 한국정보기술학회 하계종합학술발표논문집, 2010.
- [38] 전종우, 이진이, "요크형 교류 전자기장과 선형배열 홀 센서에 의한 결함 탐상 및 평가," 대한기계학회 춘추학술대회, 2009.
- [39] J. Jun, J. Lee, and D. Park, "NDT of a nickel coated inconel specimen using by the complex induced current-magnetic flux leakage method and linearly integrated hall sensor array," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, pp. 375-82, 2007.
- [40] 이향범, 김신, "누설자속탐상의 수치해석," 비파괴검사학회지, 1 2001.
- [41] F. I. Al-Naemi, J. P. Hall, and A. J. Moses, "FEM modelling techniques of magnetic flux leakage-type NDT for ferromagnetic plate inspections," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 304, pp. e790-e793, 9// 2006.
- [42] H. Zuoying, Q. Peiwen, and C. Liang, "3D FEM analysis in magnetic flux leakage method," *NDT&E International*, vol. 39, pp. 61-66, 2006.

- [43] 이용, "와전류에 영향을 미치는 인자," 와전류탐상검사, 도서출판 골드, 2000, pp. 15-16.
- [44] 전중우, 황지성, and 이진이, "홀센서를 이용한 상자성체의 비파괴검사," 대한기계학회 춘추학술대회, 2006.
- [45] 원성연, 이항범, and 신영길, "유한요소법을 이용한 3차원 관결함의 와전류탐상 수치해석," 1999, pp. 220-222.
- [46] 이항범, "와전류탐상의 3차원 유한요소 정식화에 따른 특성 분석," *Journal of the Korean society for nondestructive testing*, vol. 25, pp. 384-390, 2005.
- [47] T. Instruments, "INA128 Data Sheet," *Dallas, Texas*, 2005.
- [48] *Principle of perpendicular sensing line type AMR sensor's detection*. Available: [http://www.hkd.co.jp/english/amr\\_tec\\_suichoku/](http://www.hkd.co.jp/english/amr_tec_suichoku/)
- [49] M. J. Caruso, T. Bratland, C. H. Smith, and R. Schneider, "A new perspective on magnetic field sensing," *Sensors Peterborough*, vol. 15, pp. 34-47, 1998.
- [50] 이성래, "거대자기저항 및 응용," 세라미스트, vol. 2, pp. 35-46, 1999.
- [51] R. T. Ko and M. P. Blodgett, "Application of a Giant Magnetoresistive (GMR) Sensor for Characterization of Corrosion in a Laboratory Specimen," *AIP Conference Proceedings*, vol. 657, pp. 844-851, 2003.
- [52] A. Jander, C. Smith, and R. Schneider, "Magnetoresistive sensors for nondestructive evaluation (Invited Paper)," pp. 1-13, 2005.
- [53] G. Betta, L. Ferrigno, and M. Laracca, "GMR-Based ECT Instrument for Detection and Characterization of Crack on a Planar Specimen: A Hand-Held Solution," *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 61, pp. 505-512, 2012.
- [54] 고재귀, "자기 기록 재료," 자성재료학, 숭실대학교 출판부, 2008, pp. 299-301.
- [55] I. Bakonyi and L. Peter, "Progress on Electrodeposited Multilayer Films with Giant Magnetoresistance (GMR) Behaviour: 1993-2004," *Proceedings Electrochemical Society PV*, vol. -, pp. 227-244, 2004.

- [56] I. Bakonyi and L. Peter, "Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR): Progress and problems," *Progress in materials science*, vol. 55, pp. 107-245, 2010.
- [57] "GMR Sensor Catalog," ed: NVE Corporation, 2005.
- [58] 남충모, "자성체 자화," 전자기학, 도서출판 ITC, 2003, pp. 354-356.
- [59] J. Slonczewski, "Theory of domain-wall motion in magnetic films and platelets," *Journal of Applied Physics*, vol. 44, pp. 1759-1770, 1973.
- [60] M. Tsoi, R. E. Fontana, and S. S. P. Parkin, "Magnetic domain wall motion triggered by an electric current," *Applied Physics Letters*, vol. 83, pp. 2617-2619, 09/29/ 2003.
- [61] 임종수, 김구화, 이영기, "냉연강판의 내부 개재물 및 표면결함 검출기의 연계가능성 검토," RIST 연구결과보고서, 1995.
- [62] 임종수, 김구화, 이성익, "누설자속탐상법을 이용한 개재물 탐상기술개발," 한국비파괴검사학회 학술발표대회자료, 1 1994.
- [63] 이주승, 최상우, 최세호, 김구화, "강판의 내부 결함 탐상을 위한 자기센서 개발," 2012, pp. 331-332.
- [64] 이진이, 김정민, 전종우, 황지성, "자기센서를 이용한 냉연강판의 개재물 탐상 장치," 대한민국 Patent, 2011.
- [65] D. Hagemaiier, "Eddy current standard depth of penetration," *Materials evaluation*, vol. 43, pp. 1438-1442, 1985.
- [66] Z. Mottl, "The quantitative relations between true and standard depth of penetration for air-cored probe coils in eddy current testing," *NDT International*, vol. 23, pp. 11-18, 1990.