



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2010年 8月
碩士學位 論文

로터 中心空 非破壞檢査
및 定量評價

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金正玟

로터 中心空 非破壞檢査
및 定量評價

Nondestructive Testing and Evaluation of
Rotor Bore

2010年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金正玟

로터 中心空 非破壞檢査
및 定量評價

指導教授 李 鎭 伊

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함


2010 年 5 月


朝鮮大學校 大學院


制御計測工學科

金 正 玟

金正玟의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 高樂溶 

委員 朝鮮大學校 教授 趙昌鉉 

委員 朝鮮大學校 教授 李鎮伊 

2010年 5月

朝鮮大學校 大學院

목 차

| | |
|--|----|
| ABSTRACT | ix |
| 제 1장 서론..... | 1 |
| 제 2장 이론적 배경 | 8 |
| 제 1절 다이폴모델 | 9 |
| 1. 직류 요크형 전자석[16,17,24,26,33,36] | 9 |
| 2. 교류 요크형 전자석 | 18 |
| 제 2절 경사형 자화기의 유한요소해석법 | 21 |
| 1. 직류 경사형 전자석..... | 21 |
| 2. 교류 경사형 전자석..... | 32 |
| 제 3절 신호처리 | 46 |
| 1. 직류 증폭..... | 46 |
| 2. 교류 증폭..... | 48 |
| 3. AD 변환기..... | 50 |
| 4. 슬립링 및 통신..... | 52 |
| 5. USB 인터페이스..... | 55 |
| 제 4절 결합정량평가..... | 57 |
| 제 3장 시스템 제작..... | 60 |
| 제 1절 센서 및 신호처리부..... | 61 |
| 1. 경사형 전자석과 일체화된 선형 배열 홀센서..... | 61 |
| 2. 직류형 신호처리회로..... | 63 |
| 3. 교류형 신호처리회로..... | 64 |
| 4. A/D 변환기..... | 65 |
| 5. USB 인터페이스..... | 66 |

| | |
|------------------------|----|
| 제 2절 실험장치 | 67 |
| 1. 로터 중심공 스캔용 로봇 | 67 |
| 2. 컨트롤 박스..... | 70 |
| 제 3절 소프트웨어 | 71 |
| 제 4장 실험 및 고찰 | 76 |
| 제 1절 시험편 | 77 |
| 제 2절 실험결과 | 79 |
| 1. 방향성 실험 결과 및 평가..... | 79 |
| 2. 실기실험 | 82 |
| 제 5장 결 론..... | 87 |
| Acknowledgments..... | 93 |

표목차

| | | |
|-----------|------------------------------------|----|
| Table 2-1 | 직류 경사형 자화기의 수치해석 설정 값 | 23 |
| Table 2-2 | 직류 경사형 자화기의 수치해석 설정 값 | 34 |
| Table 3-1 | Function of Measurement mode | 72 |
| Table 3-2 | Function of Analysis mode | 74 |
| Table 3-3 | Function of Zoom window | 75 |
| Table 4-1 | 결함의 크기 | 77 |
| Table 4-2 | 결함의 위치와 크기 | 78 |
| Table 4-3 | 실제 결함의 위치와 추정 결함의 위치 비교 | 86 |

도목차

| | | |
|-----------|--|----|
| Fig. 1-1 | 하마오카 원자력 발전소의 배관 파단 사고 | 1 |
| Fig. 1-2 | 방사선검사 | 3 |
| Fig. 1-3 | 초음파검사 | 4 |
| Fig. 1-4 | 와전류검사 | 4 |
| Fig. 1-5 | 누설자속검사법 | 5 |
| Fig. 2-1 | 다이폴 모델 | 10 |
| Fig. 2-2 | 실험 장치 | 10 |
| Fig. 2-3 | 저탄소강 시험편의 누설자속 분포(V_H) | 11 |
| Fig. 2-4 | 저탄소강 시험편의 $\partial V_H/\partial x$ 자기영상 | 12 |
| Fig. 2-5 | 개선된 다이폴 모델 | 13 |
| Fig. 2-6 | 개선된 다이폴 모델 기본 원리 | 14 |
| Fig. 2-7 | 구형결함의 다이폴 모델 원리 | 16 |
| Fig. 2-8 | 삼각형결함의 다이폴 모델 원리 | 17 |
| Fig. 2-9 | 타원형결함의 다이폴 모델 원리 | 17 |
| Fig. 2-10 | 다이폴 모델 | 19 |
| Fig. 2-11 | 직류 경사형 자화기의 수치해석 모델링 | 22 |
| Fig. 2-12 | 균열이 없을 때의 수치해석 결과 | 25 |
| Fig. 2-13 | 경사각도 0° 일 때의 수치해석 결과 | 26 |
| Fig. 2-14 | 경사각도 10° 일 때의 수치해석 결과 | 27 |
| Fig. 2-15 | 경사각도 20° 일 때의 수치해석 결과 | 28 |
| Fig. 2-16 | 경사각도 30° 일 때의 자화기 모델 및 수치해석 결과 | 29 |
| Fig. 2-17 | θ_S 의 크기에 따른 최대누설자속의 변화 | 31 |
| Fig. 2-18 | 교류 경사형 자화기의 수치해석 모델링 | 33 |
| Fig. 2-19 | 균열이 없을 때의 수치해석 결과 | 36 |
| Fig. 2-20 | 경사각도 0° 일 때의 자기장 수치해석 결과 | 37 |
| Fig. 2-21 | 경사각도 0° 일 때의 전기장 수치해석 결과 | 38 |
| Fig. 2-22 | 경사각도 10° 일 때의 자기장 수치해석 결과 | 39 |
| Fig. 2-23 | 경사각도 10° 일 때의 전기장 수치해석 결과 | 40 |
| Fig. 2-24 | 경사각도 20° 일 때의 자기장 수치해석 결과 | 41 |
| Fig. 2-25 | 경사각도 20° 일 때의 전기장 수치해석 결과 | 42 |
| Fig. 2-26 | 경사각도 30° 일 때의 자기장 수치해석 결과 | 43 |
| Fig. 2-27 | 경사각도 30° 일 때의 전기장 수치해석 결과 | 44 |
| Fig. 2-28 | θ_S 의 크기에 따른 복합유도전류-누설자속의 변화 | 45 |
| Fig. 2-29 | 홀 효과의 원리 | 46 |

| | | |
|-----------|--------------------------------------|----|
| Fig. 2-30 | 홀센서와 직류증폭회로(INA128)의 회로도 | 47 |
| Fig. 2-31 | 홀센서와 교류증폭회로(INA128)의 회로도 | 48 |
| Fig. 2-32 | 교류-직류신호 변환 회로 | 49 |
| Fig. 2-33 | A/D 변환기 회로 | 51 |
| Fig. 2-34 | 브러쉬방식 슬립링 | 53 |
| Fig. 2-35 | 저전압 차분 신호 | 54 |
| Fig. 2-36 | FT2232HL Block Diagram | 55 |
| Fig. 2-37 | USB 인터페이스 회로도 | 56 |
| Fig. 2-38 | 자기영상 | 57 |
| Fig. 2-39 | 1/n 알고리즘 | 58 |
| Fig. 2-40 | 1/4 알고리즘 적용례 | 58 |
| Fig. 3-1 | 로터 중심공 스캔용 로봇 시스템 | 60 |
| Fig. 3-2 | 경사형 전자석 | 62 |
| Fig. 3-3 | 경사형 전자석과 일체화 된 선형 배열 홀 센서 | 62 |
| Fig. 3-4 | 직류증폭회로 | 63 |
| Fig. 3-5 | 교류증폭회로 | 64 |
| Fig. 3-6 | A/D 변환기 | 65 |
| Fig. 3-7 | USB 인터페이스 | 66 |
| Fig. 3-8 | 로터 중심공 스캔용 로봇 | 67 |
| Fig. 3-9 | 스캔 로봇에 장착된 선형 배열 홀센서 | 68 |
| Fig. 3-10 | 스캔 로봇 내부 : 증폭부와 A/D 변환부가 장착되는 부분 | 68 |
| Fig. 3-11 | 스캔 로봇 전후이동 장치와 인코더 | 69 |
| Fig. 3-12 | 로터 중심공 스캔용 로봇 컨트롤 박스 | 70 |
| Fig. 3-13 | Measurement mode | 71 |
| Fig. 3-14 | Analysis mode | 73 |
| Fig. 3-15 | Zoom window | 75 |
| Fig. 4-1 | 빌렛 시험편 | 77 |
| Fig. 4-2 | 배관형 시험편 | 78 |
| Fig. 4-3 | 경사형 자화기와 일체형 선형자기센서 배열 | 79 |
| Fig. 4-4 | 슬릿형 결함의 자기영상과 단면 | 80 |
| Fig. 4-5 | 원형 결함의 자기영상과 단면 | 81 |
| Fig. 4-6 | 실기실험 | 82 |
| Fig. 4-7 | 스캔용 로봇 시스템으로 취득한 배관형 시험편 내측면 결함 자기영상 | 83 |
| Fig. 4-8 | 각 결함의 확대 자기영상 | 84 |
| Fig. 4-9 | 1/8 알고리즘을 적용한 각 결함의 확대 자기영상 | 85 |

기호 설명

| | |
|---------|--|
| HPCI | High Pressure Coolant Injection |
| RHRS | Residual Heat Removal System |
| ECCS | Emergency Core Cooling System |
| RT | Radiation Testing |
| UT | Ultrasound Testing |
| MT | Magnetic Particle Testing |
| MFLT | Magnetic Flux Leakage Testing |
| PT | Penetration Testing |
| ECT | Eddy Current Testing |
| LT | Leakage Testing |
| VT | Visual Testing |
| AE | Acoustic Emission |
| IRT | Infrared Ray Testing |
| NDT | Nondestructive Testing |
| DMA | Direct Memory Access |
| S/N | Signal-to-Noise ratio |
| C-MFL | Cross-type Magnetic Flux Leakage |
| DC-MFL | Direct Current Magnetic Flux Leakage |
| P-MFL | Plate-type Magnetic Flux Leakage |
| IS-MFL | In-side Solenoid Magnetic Flux Leakage |
| V-MFL | Vertical-type Magnetic Flux Leakage |
| STIC | Sheet-Type Magnetic Induced Current |
| i-STIC | improved Sheet-Type Induced Current |
| CIC-MFL | Combined Induced Current-Magnetic Flux Leakage |

| | |
|---------------------------|--|
| MFPT | Magnetic Fluid Penetration Testing |
| B | Magnetic Flux Density |
| $\partial B/\partial x$ | The Differential of B to Scanning Direction(x-direction) |
| LIHaS | Linearly Integrated Hall Sensor Array |
| V | Hall Voltage |
| $\partial V_H/\partial x$ | The Differential of V_H to Scanning Direction(x-direction) |
| CMRR | Common Mode Rejection Ratio |
| FIR | Finite Impulse Response |
| IIR | Infinite Impulse Response |
| SMPS | Switched Mode Power Supply |
| PLD | Programmable Logic Device |
| FEM | Finite Elements Method |
| DPMA | Dipole Model Analysis |
| L | Length of Crack[mm] |
| W | Width of Crack[mm] |
| D | Depth of Crack[mm] |
| θ | Rotation angle of Crack[degree] |
| μ | Magnetic Permeability |
| u | Depth from Specimen Surface[mm] |
| S | Spatial Resolution[mm] |
| L | Minimum Detectable Length of Crack[mm] |
| LPF | Low Pass Filter |
| f | Cut off Frequency |
| T | Time |
| GUI | Graphical User Interface |

아래 참조

| | |
|-------|---------------------------|
| MAG | Magnetic Direction |
| H | Hall Sensor |
| C | Crack |
| R | Rotated Axis and Position |
| N | Noise Level |
| S | Sensor Output |
| M | Maximum |
| TOTAL | Total of Sensor Output |

ABSTRACT

Nondestructive Testing and Evaluation of Rotor Bore

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

Large equipment-structures such as nuclear and thermoelectric power plants, aging aircrafts, rapid transit railway, petrochemical plants, and vessels are national infrastructure that are produced with enormous amount of funding, manpower and time. However, cracks and corrossions are bound to occur since it is exposed to poor surroundings like high temperature, high pressure, high energy, fatigue and corrosion. Also, if such defects are not detected at the in-service-inspection period will progress rapidly in the elaborated poor surrounding and consequently result in a big problem as a country not only in the form of enormous amount of human and economic loss but also in the form of environmental pollution and such.

Meanwhile, if the size of the defect, that is tolerance size, does not affect the safety of the structure and the continuous operation is economic, the service life can be extended even after the design life has been reached. In such aspect of Damage Tolerance, the life of a total of 57 nuclear power plants in the United States have been extended from 40 years to 60 years and currently 18 plants are being examined for an extended use. Even in the case of Japan, the design life of 18 nuclear power plants has been allowed to be extended.

The two important factors in Damage Tolerance are the permissible size of damage (tolerance size) and the quantitative analysis of damage using nondestructive testing (quantitative nondestructive testing). Generally nondestructive testing of large

equipment-structure is done by national code and damaged equipment parts that were detected during the periodic inspection period is repaired or replaced after evaluation. However, an unforeseen accident may occur if the crack within the structure grows and exceeds the permissible limits during usage. Thus, it is crucial that the smaller defects are detected in nondestructive testing and are assessed quantitatively.

According to the type of energy source used for defect detection, nondestructive testing can be classified into Radiographic(RT), Ultrasonic Testing(UT), Eddy Current Testing(ECT), Magnetic Flux Leakage Testing(MFLT), Penetrant Testing(PT), Leak Testing(LT), Visual Testing(VT), Magnetic Particle Testing(MPT), Acoustic Emission(AE), Neutron Radiographic Testing(NRT), and Infrared Thermography Testing, IRT).

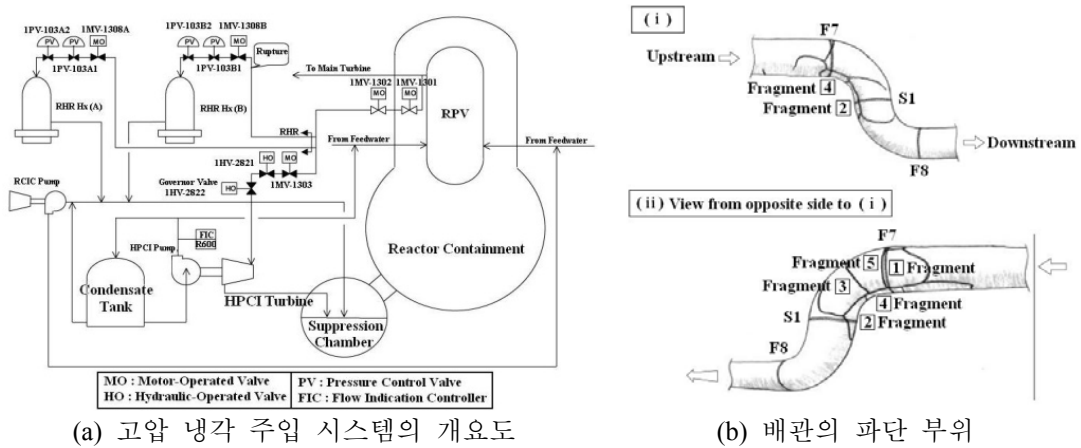
Meanwhile, a large part of the nuclear, thermoelectric and petrochemical power plants are pipe structures. Pipe structures are vulnerable to stress and corrosion because is transmit fluids of high temperature and high pressure. Also, because the form is narrow and long, there is the drawback that it is not easy to detect the defects with the above-mentioned nondestructive testing methods. For example, testing method is extremely limited when it complexly occurs both axially and circumferentially in a narrow and long pipe inner wall like a rotor bore. As an example, until now the inside of the rotor bore has been magnetized by a high voltage current of about 1000A which goes through the rotor bore and the MT has been carried out. Meanwhile, while observing the magnetic particles in the inner walls of the rotor bore using long endoscope for industrial use in order to observe the shape of the magnetic particles, there was a need to solve (1) the non-uniformity of the magnetic particle distribution due to gravity, (2) the necessity of pre-treatment and post-treatment process, (3) the exposure to danger of a worker due to high voltage current power usage, and (4) the extension of labor hour. Meanwhile, although the method of scanning using UT installed to a robot that makes a spiral movement automatically inside the rotor bore which is about 50 to 300mm narrow and 10 to 30m long was proposed and actually used, the shortcomings that (1) due to the nature of the UT, the

sensor needs to be drawn right up against the inner wall of the rotor bore, (2) it is not fit for exploring cracks that are very little because the special resolution that can be acquired by 1 sensor of UT is about 5mm big, (3) the defect exploring ability can be lowered according to the direction of the crack (axial or circumferential), and that (4) the exploring time is too long are problems that have to be solved urgently.

In the research, we recommend the NDT method which gave ways to (1) the solution to the non-uniformity of the exploring ability due to gravity, (2) the minimization of the pre-treatment and post-treatment process, (3) the rejection of high voltage current power usage, (4) the reduction of labor hours, (5) the practical use of non-contact sensor, (6) the enhancement of special resolution, and (7) the minimization of the dependence on the crack's length and direction of the exploring ability which was the problem that was to be solved in the elaborated MT and UT in exploring the defects that exist within the piping with the narrow and long shape. Also, we have verified its usefulness by exploring and evaluating defects of various sizes and directions that were introduced in the piping proof piece.

제1장 서론

원자력 및 화력발전소, 장기운영항공기, 고속철도, 석유화학플랜트, 선박과 같은 대형 기기 구조물은 막대한 자금, 인력 및 시간에 걸쳐 제작하게 되는 국가기간 설비이다. 하지만, 고온, 고압, 고에너지, 피로 및 부식과 같은 열악한 환경에 노출되어 있어서, 균열 및 부식이 발생하기 쉽다. 또한, 이러한 결함을 적시에 검출하지 못하면 상술한 열악한 환경하에서 급격히 진전되어, 결과적으로 막대한 인적·경제적 손실뿐만 아니라 환경 오염등 국가적으로도 큰 문제를 일으킬 수 있다. [1-5] 대표적인 예로 2001년 11월 7일 일본 시즈오카현에 위치한 하마오카 원자력 발전소 1호기에서 발생한 증기 누설 사고를 들 수 있다. [4]



(a) 고압 냉각 주입 시스템의 개요도

(b) 배관의 파단 부위

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

Fig. 1-1 하마오카 원자력 발전소의 배관 파단 사고

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 자동으로 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 냉각 계통(ECCS, emergency core cooling system)의 일부인 고압노심 냉각계통이 사용 불능이 되었다. 방사능을 포함한 증기가 원자로 건물로 누설되어 화재경보기가 울렸지만, 다행히 건물 외부로의 방사능 누설은 없었다고 보고되었다.

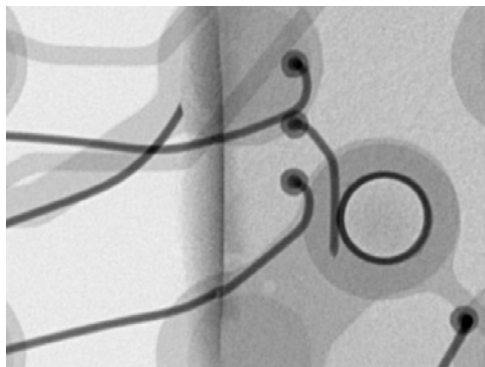
(발췌 및 자료출처:http://radar.ndsl.kr/tre_View.do?cn=GTB2001110389&ct=TREND&lp=SI)

한편, 결함의 크기가 구조물의 안전에 영향을 미치지 않고 지속적인 운영이 경제성을 갖는다면, 설계수명에 다다르고 나서도 사용 연한을 연장할 수 있다. 이러한 손상허용공학(Damage Tolerance) [6-9]적 측면에서 총 57기에 이르는 미국 원자력 발전소의 수명이 40년에서 60년으로 연장되었으며, 현재 18기가 연장 사용에 대한 심사를 받고 있다. 일본의 경우에도 18기의 원자력발전소의 설계수명의 연장이 허용된 바 있다. [8, 9]

손상허용공학에서 두 가지 중요한 인자는 허용할 수 있는 손상의 크기(손상허용치수, tolerance size)와 보다 작은 결함을 검출할 수 있는 비파괴검사기술(nondestructive testing)이다. 비파괴검사진행법에 의하면 비파괴검사는 “물리적 현상의 원리를 이용하여 검사할 대상물을 손상시키지 아니하고, 그 대상물에 존재하는 불완전성을 조사하고 판단하는 기술적 행위”로 정의된다.[10] 즉, 재료나 제품을 물리적 현상을 이용한 특수방법으로 검사 대상물을 파괴, 분리 또는 손상을 입히지 않고 결함의 유무와 상태 또는 그것의 성질, 상태, 내부구조 등을 알아내는 검사를 말한다. 일반적으로 대형기기 구조물의 비파괴검사는 국가코드에 의하여 이루어지며, 정기검사기간에 검출된 손상된 기계 부품은 평가 후 수리되거나 교체된다. 그러나 사용중에 구조 내의 균열이 성장하여 허용 한계를 넘어서면 불의의 사고가 일어날 수 있다. 따라서, 비파괴검사에서는 보다 작은 결함을 검출하고, 정량적으로 평가하는 것이 매우 중요하다.

비파괴검사는 결함검출에 활용하는 에너지원의 종류에 의하여 방사선검사(RT, Radiographic Testing), 초음파검사(UT, Ultrasonic Testing), 와전류검사(ECT, Eddy Current Testing), 누설자속검사(MFLT, Magnetic Flux Leakage Testing), 침투탐상(PT, Penetrant Testing), 누설탐상(LT, Leak Testing), 육안검사(VT, Visual Testing), 자분탐상(MPT, Magnetic Particle Testing), 음향방출(AE, Acoustic Emission), 중성자검사(Neutron Radiographic Testing), 열화상검사(IRT, Infrared Thermography Testing)등으로 분류된다. [11]

먼저, RT의 경우에는 X선 등의 방사선을 이용하여, 결함의 존재에 의하여 발생하는 투과상태의 차이를 관찰함으로써 결함을 검출하는 방법으로서, 용접품, 주조품 및 복합재 구조물의 내외부 결함 검출에 유용하다. 하지만, 방사선에 대한 안전 관리가 요구된다. 최근에는 Fig.1-2에 나타낸 바와 같이 공간분해능을 높여 IC칩 안의 와이어 절단부를 검출하는 방법이 상용화되기도 하였다. [12]



[Nanofocus X-ray image를 이용한 IC칩 안의 와이어절단 검출]

자료출처: GE Sensing & Inspection Technologies - phoenix/X-ray

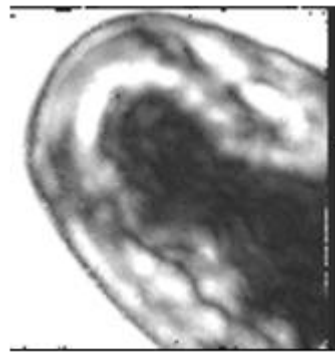
Fig. 1-2 방사선검사

UT는 탐촉자로부터 초음파를 1~10MHz의 초음파를 대상물의 내부에 입력시켰을 때, 결함이나 조직의 변화에 의한 초음파 반사신호 또는 투과된 초음파의 양을 측정하여 결함을 검출하는 원리를 가지며, 용접품, 주조품, 압연품, 단조품, 복합재의 내부결함 검출이나 소재 및 도금의 두께 측정에 유효하다. 이러한 원리에 근거하여, 초음파센서를 1차원으로 배열한 위상배열초음파탐상법이나, 2차원으로 배열한

초음파카메라와 같은 방법(Fig.1-3)이 적용되기도 하고 있다. [13]



(a) 25센트 동전의 초음파영상

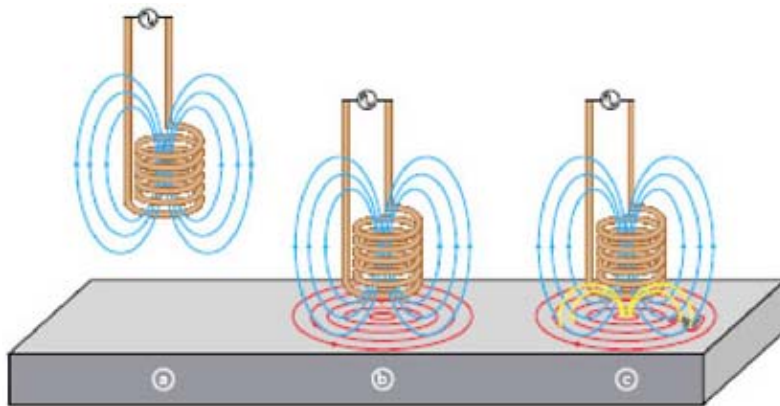


(b) 손가락 뼈/핏줄

자료출처: <http://www.imperiuminc.com/news-events.html>

Fig. 1-3 초음파검사

ECT는 코일로 도체에 시간상으로 변화하는 자장을 주어 도체에 생긴 와전류가 결함에 따라 변화하는 것을 검출하는 원리(Fig.1-4)를 가지며, 철강, 비철재료의 파이프, 와이어 등의 표면 또는 표면 근처의 결함검출, 박막 두께 측정, 전도도를 이용한 열처리 특성 및 재질 식별에 유용하게 사용된다. [14]

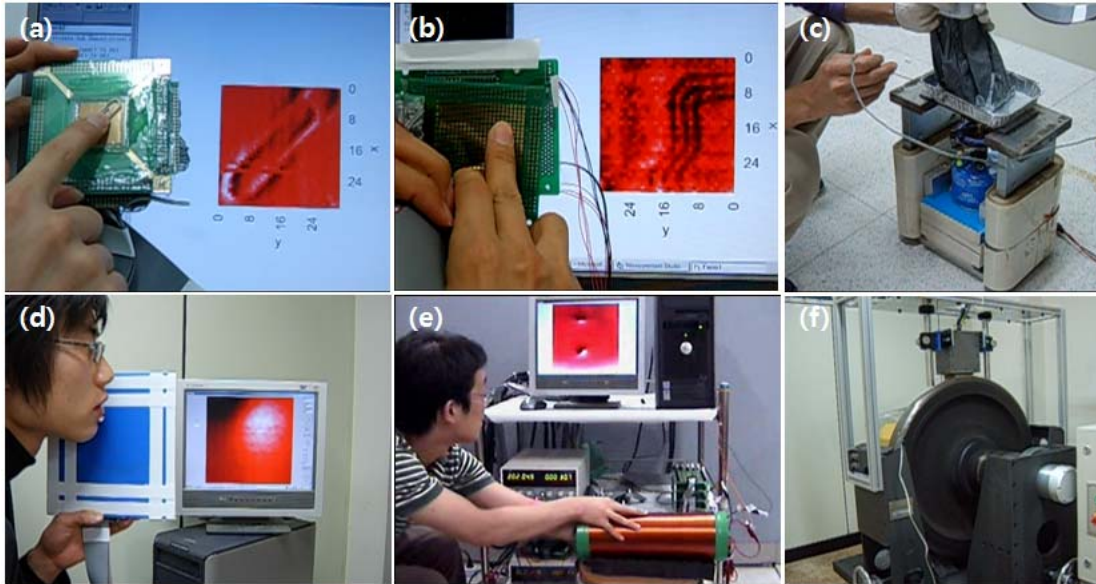


- a—The alternating current flowing through the coil at a chosen frequency generates a magnetic field around the coil.
- b—When the coil is placed close to an electrically conductive material, eddy current is induced in the material.
- c—If a flaw in the conductive material disturbs the eddy current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

자료출처: <http://www.olympus-ims.com/en/eddycurrenttesting/>

Fig. 1-4 와전류검사

MFLT는 강자성체에 자기장을 인가하였을 때, 결함 주변에서 누설되는 자속을 자기센서에 의하여 검출하는 원리를 이용하여 결함의 유무, 위치, 크기 등을 검출하게 된다. 따라서 강자성체의 표면 및 표면 직하의 결함 검출에 적합하며, 최근에는 자기센서를 1차원 또는 2차원으로 배열한 자기카메라 기술(Fig.1-5)[3-20]이 상용화에 근접해 있다. [15-35]



(a) 미소영역 잔류 자기장 실시간 검출
 (b) PCB 패턴 검사
 (c) 고온 환경하 비파괴검사
 (d) 턱관절 이상 검사
 (e) 배관 검사
 (f) 고속 철도차륜

자료출처: <http://itndt.chosun.ac.kr/> 커뮤니티/홍보자료

Fig. 1-5 누설자속검사법

MT는 시험체를 자화시켜 시험체 표면이나 표면 바로 밑에 존재하는 불연속부에 의해서 자속(Magnetic Flux)이 누설되는 부위에 축적된 자분의 모양을 관찰하여 표면이나 표면 바로 밑에 존재하는 결함의 유무 및 위치를 확인하는 수법이며, MFLT와 마찬가지로 강자성체 표면 및 표면 직하의 결함 검출에 적합하다.

PT는 시험체의 표면에 열려있는 균열이나 결함 주변에 침투액을 산포하였을 때, 모세관 현상에 의하여 결함에 해당 액체가 침투하는 원리를 갖는다. 이러한 침투액을 현상액에 의하여 보다 쉽게 볼 수 있게 함으로써, 결함의 위치, 크기 및 지

시모양을 관찰할 수 있다. 따라서, 금속 및 비금속의 모든 재료, 부품에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 열처리균열, Seam, 단조결집, 터짐, 접합상태, 용접부 등의 검사에 적합하다.

LT는 시험체 내부 또는 외부에 적용한 기체나 액체와 같은 유체가 시험체 내부와 외부의 압력 차이에 의해 시험체에 존재하는 결함을 통해 흘러들어 가거나 나오는 것을 적당한 검출 매체를 통하여 확인하는 수법이다. 실제로 압력 또는 저장용기, 유압계통의 파이프 등을 매우 적절하게 검사할 수 있다.

VT는 시험체를 육안으로 보고 결함 및 이상 유무를 확인하는 방법으로서 일반적으로 다른 비파괴검사를 수행하기 전에 수행한다. 확대경, 거울, 내시경 등의 보조기구를 사용하기도 하며, 소프트웨어(영상처리) 기술과 로봇기술의 발달에 따라 가장 오래되었으면서도 가장 최신 기술이 적용되는 분야이다.

AE는 기기 구조물의 온도 또는 기계적인 효과에 의하여 그 상태가 변화(결정 구조변화, 소성변형, 전위의 확산, 균열의 발생 및 성장, 파괴)할 때, 음향을 방출. 압전소자등과 같은 음향센서를 이용하여 이러한 음향의 변화를 측정하는 방법이다. 금속재료, 복합재료, 압력용기 등의 재료 내부의 동적거동 파악에 의한 건전성 평가, 회전체 이상 진단(진동검사), 잔여수명평가 등 재료특성 평가 등에 활용되고 있다.

한편, 원자력·화력발전소 및 석유화학플랜트의 많은 부분이 배관구조물이다. 배관구조물은 고온 또는 고압의 유체를 전송하기 때문에 응력 및 부식에 취약하다. 또한, 그 형상은 좁고 길기 때문에 상술한 비파괴검사법들에 의하면 결함의 검출이 용이하지 않다는 단점이 있다. 한 예로 로터 중심공과 같은 좁고 긴 pipe 내벽에 축방향 또는 원주방향이 복합적으로 발생하는 경우에는 검사 방법이 극히 제한적이다. 한 예로 지금까지는 중심공을 관통하는 1,000A 정도의 고전류에 의하여 중심공 내부를 자화시키고, MT를 시행하였다. [37] 한편, 자분의 모양을 관찰하기 위하여 긴 공업용 내시경을 이용하여 증공축 내벽의 자분을 관찰하였던바, (1) 증력에

의한 자분의 분포의 불균일성, (2) 전처리 및 후처리 공정의 필요, (3) 고전류 전원 사용에 의한 작업자의 위험 노출, (4) 작업 시간의 장기화 등을 해결할 필요가 있었다. 한편, 직경 50~300mm, 길이 10~30m 정도의 좁고 긴 중공축 내부를 자동으로 나선 운동하는 로봇에 장착한 UT로 스캔하는 방법[38,39]이 제안 및 사용된 바 있으나, (1) UT의 특성상 센서를 중공축 내벽에 밀착시켜야 하며, (2) 1개의 초음파 센서에 의하여 얻을 수 있는 공간분해능이 약 5mm 정도로써 매우 커서 미소 균열을 탐상하기에 적합하지 않으며, (3) 균열의 방향(축방향 또는 원주방향)에 따라 결함의 탐상 능력이 현저히 저하하는 경우가 발생하며, (4) 탐상시간이 매우 길다는 단점은 시급히 해결해야 할 과제였다.

본 연구에서는 로터 중심공 내부 결함 탐상을 한 예로 하여, 좁고 긴 형태의 배관 내에 존재하는 결함의 탐상에 있어서 상술한 MT 및 UT에서 해결해야 할 과제였던, (1) 중력에 의한 탐상 능력의 불균일성 해소, (2) 전처리 및 후처리 공정의 최소화, (3) 고전류 전원 사용의 지양, (4) 작업시간의 단축, (5) 비접촉식 센서의 활용, (6) 공간분해능의 고도화, (7) 탐상능력의 균열 길이방향 의존성의 최소화를 해결한 NDT 방법을 제안한다. 또한, 배관형 시험편에 도입한 여러 가지 크기 및 방향의 결함을 탐상하고 평가함으로써 그 유용성을 확인하였다.

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 제1장은 서론이며, 제2장은 로터 중심공 결함 탐상을 위한 비파괴검사법의 이론적 배경에 대하여 설명한다. 제3장은 본 연구를 통하여 제작한 비파괴검사시스템에 대하여 소개한다. 제4장은 제2장의 원리 및 제3장의 시제품을 이용하여 결함 탐상에 적용한 결과를 보고한다. 제5장은 결론이다.

제 2장 이론적 배경

MFLT(누설자속탐상법)을 이용한 결함의 정량 평가를 위해서는 결함의 존재에 의해 발생하는 누설자속밀도 분포를 해석할 필요가 있다. 누설자속 분포의 시뮬레이션을 위하여 많이 사용하는 방법이 유한요소해석(FEM, Finite elements method)과 자기쌍극자 모델해석법(DPMA, Dipole Model Analysis)이다. [16,17,24,26,34] FEM은 시험편, 자원, 결함, 공기 등을 작은 요소 및 절점으로 나눈 후 각각의 요소에 대해 전자계의 연립방정식을 해석하는 방법이다. 비교적 정확한 해를 제공하긴 하지만, 모델링 및 요소의 생성과 연립방정식의 계산 등에 많은 시간이 소요된다는 문제를 가지고 있다. 또한, 일반적으로 결함은 폭이 좁고, 길이가 긴 형태를 갖기 때문에 요소의 크기를 작게 표현해야 하며, 결과적으로는 3차원 FEM의 요소 및 계산 시간이 많이 증가한다.

DPMA는 결함의 양단면에 자하(magnetic charge)가 존재하고, 이들 자하의 분포가 생성하는 3차원 공간상의 자계가 누설자계에 근사하다고 가정함으로써, 실제 결함주변에 발생하는 누설자속밀도의 분포에 근접한 자계를 계산해 낼 수 있다. FEM에 비해 계산시간이 짧고, 정성적인 결과를 제공한다. 본 연구에서는 복잡한 형상의 자원 및 누설 자속을 해석할 때는 FEM을 이용하고, 결함에 의한 정성적인 누설 자속의 크기 변화를 검토할 때는 DPMA에 의한 해석을 수행하였다.

제 1절 다이폴모델

1. 직류 요크형 전자석[16,17,24,26,33,36]

DPMA는 결함의 양쪽 단면에 자하가 존재한다고 가정한다. 결함의 단면의 자하의 분포에 의해 생성되는 3차원 공간상의 자기장이 누설자계와 근사하다고 가정함으로써 결함 주변에 발생하는 누설자속분포를 계산할 수 있다.

시험편의 표면에 길이가 l_c , 폭이 w_c , 깊이가 d_c 인 결함이 있다고 가정한다. Fig. 2-1에 보는 바와 같이 x 축은 자화 방향으로 정의하고, xy 평면은 시험편의 표면, 그리고 z 축은 시험편의 표면에 수직인 방향으로 한다. 결함의 길이방향은 y 축으로부터 θ_c 만큼 회전되었다고 가정한다. 즉 $\theta_c = 0$ 일 때는 y 축과 결함의 길이방향은 평행하다.

누설 자속 밀도의 z 방향 성분인 B_z 는 $\theta_c = 0$ 일 때, 단위 면적당 자기량을 m , 자기 투자율을 μ , 그리고 시험편 표면으로부터의 깊이를 u 라 하고, 다이폴 모델에 의해 Eq. (1)로 표현할 수 있다. 여기에서 u 는 $0 \sim d_c$ 사이의 값을 갖는다.

$$B_z|_{\theta_c=0} = \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x+w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} dudy \quad (1)$$

$$- \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x-w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} dudy$$

한편, x_R 과 y_R 는 XY 평면으로부터 θ_c 만큼 회전하였을 때 X_R - Y_R 축의 회전된 새로운 좌표는 Eq. (2)으로 표현할 수 있다.

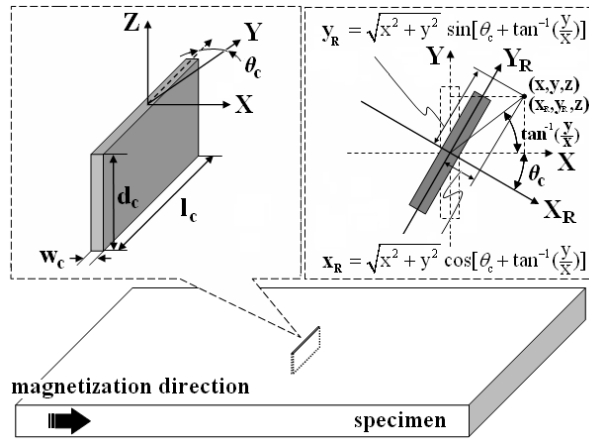
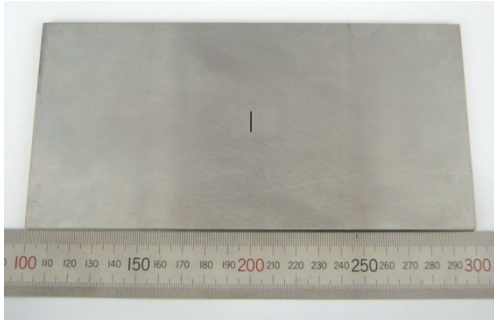


Fig. 2-1 다이폴 모델

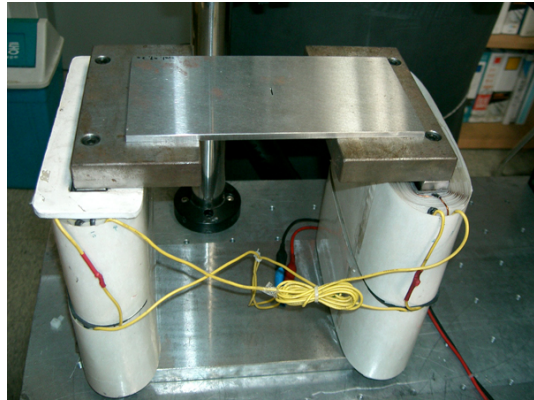
$$\begin{aligned}
 x_R &= \sqrt{x^2 + y^2} \cos[\theta_c + \tan^{-1}(\frac{y}{x})] \\
 y_R &= \sqrt{x^2 + y^2} \sin[\theta_c + \tan^{-1}(\frac{y}{x})]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$\theta_c = \pi/2$ 인 경우, B_z 는 Eq. (1)에 의해 w_c 와 l_c 를 바꿔 계산할 수 있다. 또한 $0 < \theta_c < \pi/2$ 경우 Eq. (3)에 의해 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 B_z|_{0 < \theta_c < \frac{\pi}{2}} &= \frac{m \cos \theta_c}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2 - y_R}^{l_c/2 - y_R} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x_R + w_c/2)^2 + y_R^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy_R \\
 &\quad - \frac{m \cos \theta_c}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2 - y_R}^{l_c/2 - y_R} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x_R - w_c/2)^2 + y_R^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy_R
 \end{aligned}
 \tag{3}$$



(a) 저탄소강 시험편(SS41, 10×0.7×3mm)



(b) 요크형 자원

Fig. 2-2 실험 장치

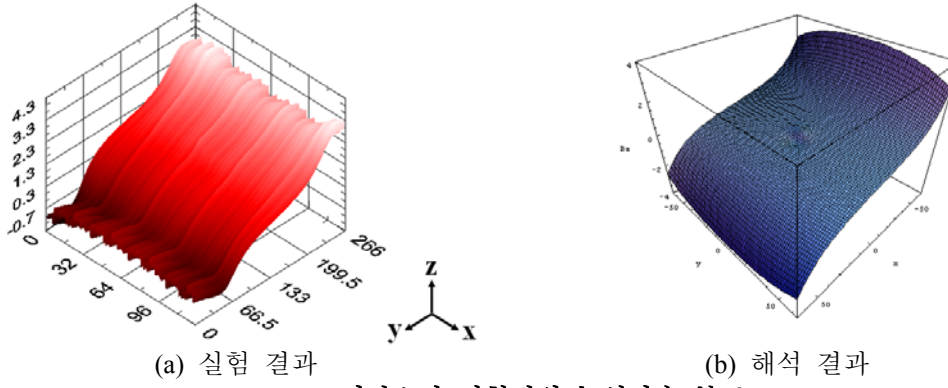


Fig. 2-3 저탄소강 시험편의 누설자속 분포(V_H)

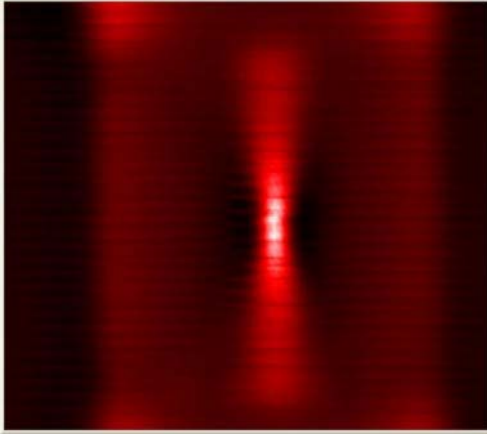
Fig. 2-3는 $m/4\pi\mu$ 를 10으로 가정하였을 때 Fig. 2-2(a) 시험편 표면(lift-off 3mm)에 서의 Eqs. (1)~(3)를 통해 얻어진 누설자속분포의 해석결과이다. Fig. 2-3(a)는 실제 길 이가 180mm, 폭이 150mm, 깊이가 200mm인 자화기를 통해 시험편을 자화하여 얻 은 실험결과이다.

실험결과와 해석결과에 의하면, 누설자속 분포는 자화기의 자극 때문에 현저히 기울어져 있고, 결함에 의한 누설자속분포는 매우 미약하기 때문에 가시화할 수 없 다. 해석결과와 실험결과 모두 누설자속 분포(V_H)에서는 결함을 구분할 수 없었다. 그러나 결함 주위의 누설자속 분포 변화는 일정하기 때문에 Fig. 2-4에서 보는 바와 같이 자화방향으로 미분한 $\partial V_H / \partial x$ 이 사용하여 결함 정보를 추출할 수 있다.

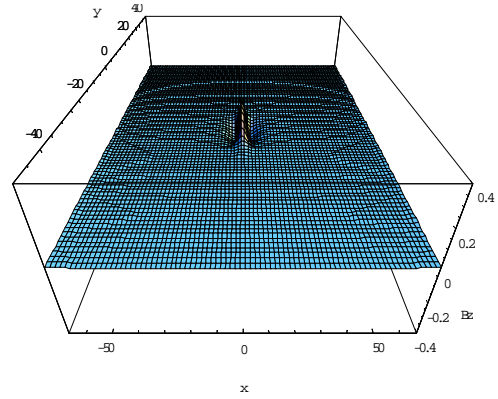
즉, 자화기의 자극으로 인한 누설 자속은 Eq. (4)로 표현할 수 있으며, 결함을 포함하는 시험편에 의한 누설 자속은 Eq. (5)로 표현할 수 있다.

$$B_{yoke}|_{\theta_c=0} = \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x+w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy - \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x-w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy \quad (4)$$

$$B_{spec}|_{\theta_c=0} = \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x+w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy - \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x-w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy \quad (5)$$



(a) 저탄소강 시험편(SS41, 10×0.7×3mm)



(b) 요크형 자원

Fig. 2-4 저탄소강 시험편의 $\partial V_H/\partial x$ 자기영상

$$\begin{aligned}
 [B_{yoke} + B_{spec}]_{i+1} - [B_{yoke} + B_{spec}]_i &= [B_{yoke_{i+1}} - B_{yoke_i}] + [B_{spec_{i+1}} - B_{spec_i}] \\
 &\approx Const + \frac{\partial V_H}{\partial x}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

이것을 자화 방향으로 미분한 결과는 Eq. (6)으로 표현할 수 있다. 자화기의 자극에 의한 누설 자속은 변화가 일정하여 Constant에 가깝고, 만약 Constant에 '0' 값을 부여하면 결함에 의한 $\partial V_H/\partial x$ 의 데이터만 표현할 수 있어 검사 데이터양을 획기적으로 줄일 수 있을 것이다. 즉, 누설자속 분포의 Back ground data 빼주는 것과 같은 기능을 한다 결과적으로 $\partial V_H/\partial x$ 는 결함에 의한 누설 자속의 변화량만 얻을 수 있다. DPMA를 사용함으로써 자화방향이 이루는 각도, 결함의 단면, 형상 및 다중결함의 실험결과와 비슷한 해석 결과를 얻었다. 따라서 정성적인 평가가 가능하며, $\partial V_H/\partial x$ 는 결함 정보 추출에 결정적 인자이다.

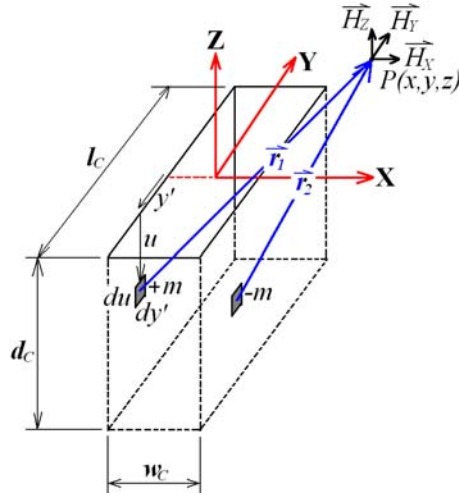


Fig. 2-5 개선된 다이폴 모델

한편, 자기쌍극자 모델해석법을 보완하여, 결함의 단면에만 존재한다고 가정하였던 자하의 분포 이외에 단면과 단면의 경계에 가중되어 분포한다고 가정한 연구가 제안된 바 있다.[16,24] 시험편상의 임의의 위치 $P(x, y, z)$ 에서의 자기장(\vec{H}_{p1})은 자기쌍극자모델 해석법의 Eq. (7)에 의해 표현할 수 있다. 여기에서 m, μ_0, u 는 각각 단위면적당 자기량, 자기 투자율, 시험편 표면으로부터의 깊이로 정의한다.

$$\begin{aligned} \vec{H}_{p1} &= \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \int_0^{d_c} \frac{m}{|\vec{r}_1|^2} \cdot \frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|} dudy' + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \int_0^{d_c} \frac{-m}{|\vec{r}_2|^2} \cdot \frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|} dudy' \\ \vec{r}_1 &= \left(x + \frac{w_c}{2}\right) \cdot \vec{i} + (y + y') \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\ \vec{r}_2 &= \left(x - \frac{w_c}{2}\right) \cdot \vec{i} + (y + y') \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\ \vec{H}_{p1} &= \frac{1}{4\pi\mu_0} \sum_{p=1}^2 \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \int_0^{d_c} \frac{(-1)^{p-1} \cdot m}{|\vec{r}_p|^2} \cdot \frac{\vec{r}_p}{|\vec{r}_p|} dudy' \end{aligned} \quad (7)$$

특히 \vec{H}_{p1} 의 수직성분 H_{z1} 은 Eq. (8)를 이용해 계산할 수 있다.

$$H_{z1} = \frac{m}{4\pi\mu_0} \times \sum_{p=1}^2 (-1)^{p-1} \cdot \int_{-l_c/2+y}^{l_c/2+y} \int_0^{d_c} \frac{(z+u)}{\left\{ \left(x + (-1)^{p-1} \cdot \frac{w_c}{2}\right)^2 + y^2 + (z+u)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} dudy \quad (8)$$

한편, Fig. 2-6은 결함의 단면과 단면이 만나는 경계에서의 선을 단위 선분당 자기량 m' 으로 가정하고 결함의 모서리의 점을 단위 절점당 자기량 m'' 으로 가정한다. 이러한 가정은 일반적으로 결함의 에지 부분에서 자기장의 세기가 크기 때문이다. 일반적으로 결함의 폭보다 결함의 길이가 크게 되므로 m' , m'' 은 결함의 길이방향의 선분에서만 존재한다고 가정하였다. 어떠한 임의의 점 $P(x,y,z)$ 에서의 시험편의 m' , m'' 에 의한 자기장 세기 \overline{H}_{P2} 는 Eq. (9)로 표현할 수 있고, 벡터 $\overline{r}_3 \sim \overline{r}_{10}$ 과 $\overline{r}_{11} \sim \overline{r}_{18}$ 은 m' , m'' 에 영향을 받는다.

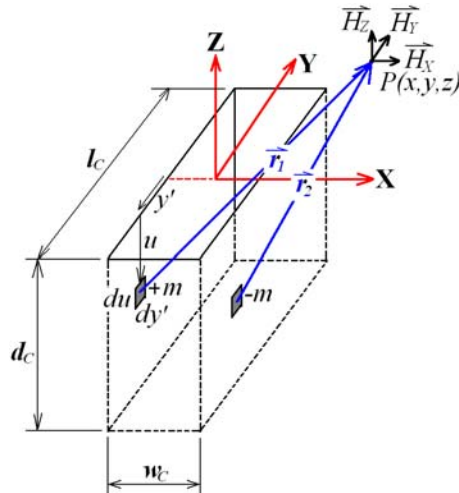


Fig. 2-6 개선된 다이폴 모델 기본 원리

$$\overline{r}_3 = \left(x + \frac{w_c}{2}\right) \cdot \overline{i} + (y + y') \cdot \overline{j} + z \cdot \overline{k}$$

$$\overline{r}_4 = \left(x - \frac{w_c}{2}\right) \cdot \overline{i} + (y + y') \cdot \overline{j} + z \cdot \overline{k}$$

$$\overline{r}_5 = \left(x + \frac{w_c}{2}\right) \cdot \overline{i} + (y + y') \cdot \overline{j} + (z + d) \cdot \overline{k}$$

$$\overline{r}_6 = \left(x - \frac{w_c}{2}\right) \cdot \overline{i} + (y + y') \cdot \overline{j} + (z + d) \cdot \overline{k}$$

$$\overline{r}_7 = \left(x + \frac{w_c}{2}\right) \cdot \overline{i} + \left(y + \frac{l_c}{2}\right) \cdot \overline{j} + (z + u) \cdot \overline{k}$$

$$\overline{r}_8 = \left(x - \frac{w_c}{2}\right) \cdot \overline{i} + \left(y + \frac{l_c}{2}\right) \cdot \overline{j} + (z + u) \cdot \overline{k}$$

$$\overline{r}_9 = \left(x + \frac{w_c}{2}\right) \cdot \overline{i} + \left(y - \frac{l_c}{2}\right) \cdot \overline{j} + (z + u) \cdot \overline{k}$$

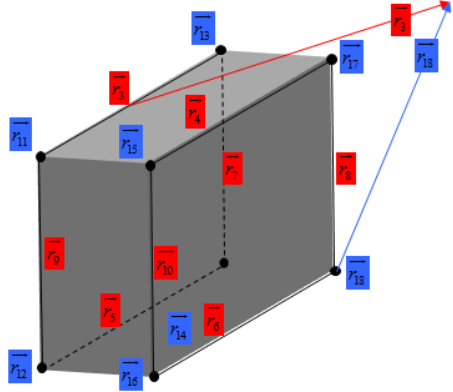
$$\overline{r}_{10} = \left(x - \frac{w_c}{2}\right) \cdot \overline{i} + \left(y - \frac{l_c}{2}\right) \cdot \overline{j} + (z + u) \cdot \overline{k}$$

$$\begin{aligned}
\bar{r}_{11} &= \left(x + \frac{w_C}{2}\right) \cdot \bar{i} + \left(y + \frac{l_C}{2d_C} \cdot u + \frac{l_C}{2}\right) \cdot \bar{j} + (z+u) \cdot \bar{k} \\
\bar{r}_{12} &= \left(x - \frac{w_C}{2}\right) \cdot \bar{i} + \left(y + \frac{l_C}{2d_C} \cdot u + \frac{l_C}{2}\right) \cdot \bar{j} + (z+u) \cdot \bar{k} \\
\bar{r}_{13} &= \left(x + \frac{w_C}{2}\right) \cdot \bar{i} + \left(y - \frac{l_C}{2d_C} \cdot u - \frac{l_C}{2}\right) \cdot \bar{j} + (z+u) \cdot \bar{k} \\
\bar{r}_{14} &= \left(x - \frac{w_C}{2}\right) \cdot \bar{i} + \left(y - \frac{l_C}{2d_C} \cdot u - \frac{l_C}{2}\right) \cdot \bar{j} + (z+u) \cdot \bar{k} \\
\bar{r}_{15} &= \left(x + \frac{w_C}{2}\right) \cdot \bar{i} + \left(y + \frac{l_C}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_C}{d_C}}\right) \cdot \bar{j} + (z+u) \cdot \bar{k} \\
\bar{r}_{16} &= \left(x - \frac{w_C}{2}\right) \cdot \bar{i} + \left(y + \frac{l_C}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_C}{d_C}}\right) \cdot \bar{j} + (z+u) \cdot \bar{k} \\
\bar{r}_{17} &= \left(x + \frac{w_C}{2}\right) \cdot \bar{i} + \left(y - \frac{l_C}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_C}{d_C}}\right) \cdot \bar{j} + (z+u) \cdot \bar{k} \\
\bar{r}_{18} &= \left(x - \frac{w_C}{2}\right) \cdot \bar{i} + \left(y - \frac{l_C}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_C}{d_C}}\right) \cdot \bar{j} + (z+u) \cdot \bar{k} \\
\bar{H}_{p2} &= \frac{m'}{4\pi\mu_0} \left[\sum_{p=3}^6 (-1)^{p-1} \cdot \int_{-l_C/2}^{l_C/2} \frac{\bar{r}_p}{|\bar{r}_p|^3} dy' + \sum_{p=7}^{10} (-1)^{p-1} \cdot \int_0^{d_C} \frac{\bar{r}_p}{|\bar{r}_p|^3} du \right] + \frac{m''}{4\pi\mu_0} \left[\sum_{p=11}^{14} \frac{\bar{r}_p}{|\bar{r}_p|} - \sum_{p=15}^{18} \frac{\bar{r}_p}{|\bar{r}_p|} \right] \quad (9)
\end{aligned}$$

여기에서 수직성분, H_{Z2} 은 Eq. (10)을 이용해 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
H_{Z2} &= \frac{m'}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_{-l_C/2+y}^{l_C/2+y} \frac{z+q \cdot d_C}{\left\{ \left(x + (-1)^p \cdot \frac{w_C}{2} \right)^2 + y^2 + (z+q \cdot d_C)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} dy \right. \\
&\quad \left. + \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_0^{d_C} \frac{z+u}{\left\{ \left(x + (-1)^p \cdot \frac{w_C}{2} \right)^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \frac{l_C}{2} \right)^2 + (z+u)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} du \right] \quad (10) \\
&\quad + \frac{m''}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{r=0}^1 \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^r \cdot \frac{z+p \cdot d_C}{\left\{ \left(x + (-1)^r \cdot \frac{w_C}{2} \right)^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \frac{l_C}{2} \right)^2 + (z+p \cdot d_C)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \right]
\end{aligned}$$

추가로 결합의 단면형상이 깊이가 d_c 이고, 단면 형상이 삼각형과 타원형인 경우의 수직성분은 각각 Eq. (11)와 Eq. (12)으로 표현할 수 있다. 또한, 자계 H_z 는 Eq. (13)과 같이 중첩의 원리에 의해 H_{z1} 과 H_{z2} 을 더해서 계산할 수 있다.



$$\overline{H}_{p2} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \left[\sum_{p=3}^6 (-1)^{p-1} \cdot \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \frac{\overline{r}_p}{|\overline{r}_p|^3} dy' \right] + \sum_{p=7}^{10} (-1)^{p-1} \cdot \int_0^{d_c} \frac{\overline{r}_p \cdot \alpha}{|\overline{r}_p|^3} du \right] + \frac{m''}{4\pi\mu_0} \left[\sum_{p=11}^{14} \frac{\overline{r}_p}{|\overline{r}_p|} - \sum_{p=15}^{18} \frac{\overline{r}_p}{|\overline{r}_p|} \right]$$

Fig. 2-7 구형결합의 다이폴 모델 원리

$$H_{z2} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_{-l_c/2+y}^{l_c/2+y} \frac{z}{\left\{ \left(x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} dy + \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\left\{ \left(x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \left(\frac{l_c}{2d_c} \cdot u - \frac{l_c}{2} \right) \right)^2 + (z+u)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{du}{\sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{2d_c}{l_c}\right)\right)} \right] \quad (11)$$

$$+ \frac{m''}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{r=0}^1 \sum_{q=0}^1 (-1)^r \cdot \frac{z}{\left\{ \left(x + (-1)^r \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \frac{l_c}{2} \right)^2 + (z)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \right]$$

$$H_{z2} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_{-l_c/2+y}^{l_c/2+y} \frac{z}{\left\{ \left(x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} dy + \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\left\{ \left(x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \frac{l_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_c}{d_c}} \right)^2 + (z+u)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{du}{\sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{2d_c}{l_c}\right)\right)} \right] \quad (12)$$

$$+ \frac{m''}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{r=0}^1 \sum_{q=0}^1 (-1)^r \cdot \frac{z}{\left\{ \left(x + (-1)^r \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \frac{l_c}{2} \right)^2 + (z)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \right]$$

$$\begin{aligned}
H_Z &= H_{Z1} + H_{Z2} \\
&= \frac{m}{4\pi\mu_0} \cdot \sum \iint \frac{|\vec{r}_{i,Z}| \cdot \alpha}{|\vec{r}_i|^3} dudy + \frac{m'}{4\pi\mu_0} \cdot \sum \int \frac{|\vec{r}_{j,Z}| \cdot \alpha}{|\vec{r}_j|^3} du(dy) + \frac{m''}{4\pi\mu_0} \cdot \sum \frac{|\vec{r}_{l,Z}|}{|\vec{r}_l|^3}
\end{aligned} \tag{13}$$

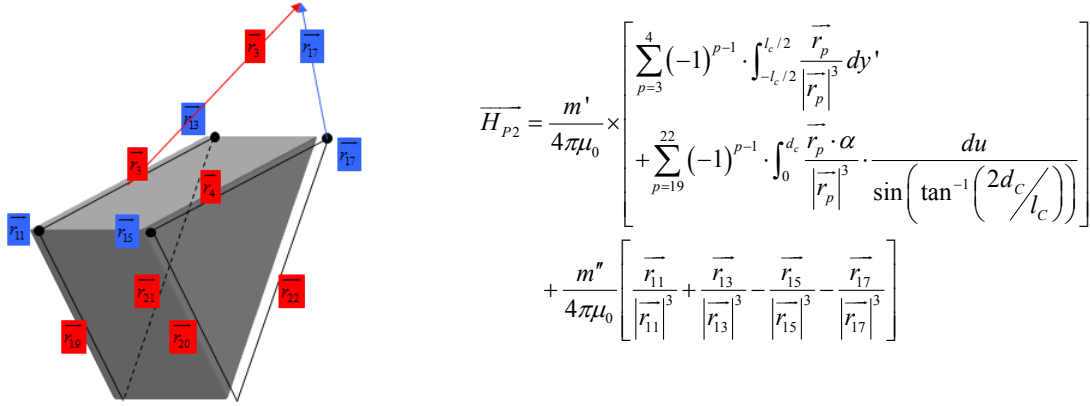


Fig. 2-8 삼각형결함의 다이폴 모델 원리

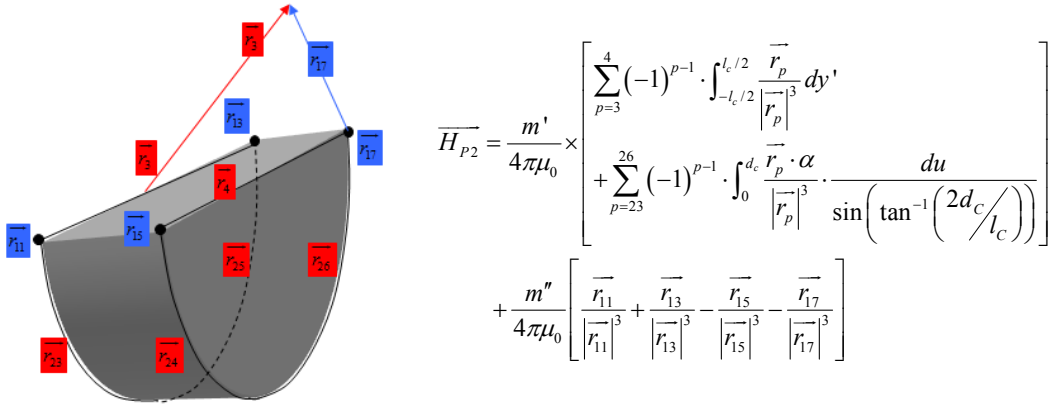


Fig. 2-9 타원형결함의 다이폴 모델 원리

개선된 다이폴 모델은 단위 면적당 자기량 m 이 결함의 단면뿐만 아니라 단면과 단면의 경계에 가중되어 분포한다고 가정하여 보다 정확한 해석 결과를 제공한다. 반면에 종래의 다이폴 모델은 개선된 다이폴 모델에 비하여 정확성은 떨어지나 결함의 형태 및 크기에 따른 누설자속 분포의 경향을 더욱 빠른 시간내에 파악할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 개선된 다이폴 모델이 아닌 종래의 다이폴 모델을 이용한다.

2. 교류 요크형 전자석

교류 요크형 전자석은 누설자속과 함께 와전류에 의한 결함 주변에서의 전기장의 왜곡도 발생한다. 전술한 바와 같이 결함의 길이방향이 y방향일 때, 누설자속은 Fig.2-10(a)에 표시한 다이폴모델에 의하여 다음 식으로 표현될 수 있으며, 균열의 길이방향이 자화방향과 수직일 경우에 결함 탐상능력이 최대가 된다.

$$\vec{H}_{MFL} = \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{m_{MFL} \cdot \vec{r}_1}{|\vec{r}_1|^3} dt dy - \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{m_{MFL} \cdot \vec{r}_2}{|\vec{r}_2|^3} dt dy \quad (14)$$

$$\vec{r}_1 = \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + (z_0 + t) \cdot \vec{k} \quad (15)$$

$$\vec{r}_2 = \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + (z_0 + t) \cdot \vec{k} \quad (16)$$

$$m_{MFL} = m_{MFL}(\mu, shape, f, l_c, d_c, w_c) \quad (17)$$

여기에서 m_{MFL} 은 누설자속에 의한 단위면적당 자기량을 나타내며, 교류자기장의 경우에는 주파수 f 의 함수가 된다. 또한, z_0 및 t 는 각각 lift-off와 시험편 표면으로부터의 깊이를 나타낸다. l_c , d_c , w_c 는 결함의 길이, 깊이 및 폭을 표현하고 있다. 한편, 단위면적당 자기량 m_{MFL} 은 상수가 아니며, 시험편의 투자율 μ , 결함의 형태(shape) 및 크기(size)의 함수이나, 직류 자기장의 경우에는 일반적으로는 상수로 취급하고 있다.

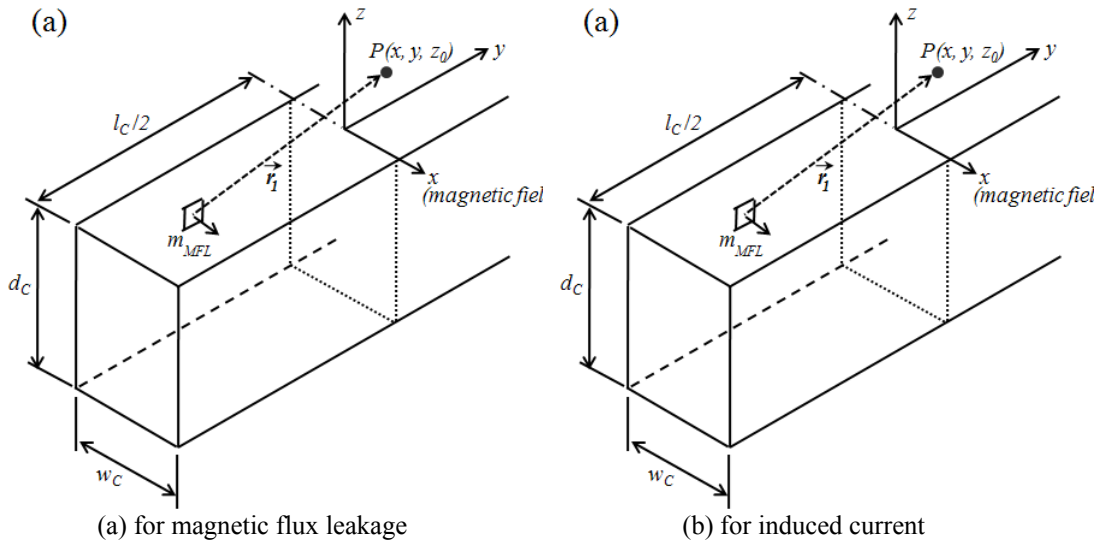


Fig. 2-10 다이폴 모델

또한, 자기장과 직각인 방향인 y방향으로 시험편에 유도전류가 발생하여, 결함의 존재에 의하여 전기장의 왜곡을 유도하게 된다. 이때 왜곡되는 유도전류는 표면에서 전류밀도 J_s , 깊이 t에서 전류밀도 J_t 로 표현될 수 있으며, J_s 와 J_t 는 Eq. (18)와 같은 관계가 성립한다. 여기에서 δ 는 Eq. (19)로 표현되는 침투깊이로서, J_t 가 J_s 의 37%에 해당하는 깊이를 의미한다. 침투깊이는 시험편 자체의 고유값이며, 유도전류의 주파수 및 시험편의 투자율과 전도도에 의하여 Eq. (19)로 표현되어진다.

$$\frac{J_t}{J_s} = e^{-t/\delta} \quad (18)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (19)$$

이러한 전기장의 왜곡은 Fig.2-10(b)에 나타난 바와 같이 결함의 선단에서 유도전류에 의한 단위면적당 자기량 m_{IC} 로 표현될 수 있다. 여기에서 주의할 것은 균열의 길이방향이 상기 Eqs. (14~17)로 표현되는 누설자속에 의한 자기장의 분포를 고려한 경우와 90도 회전되어 있다는 것이다. m_{IC} 는 Eq. (17)의 m_{MFL} 과 마찬가지로 시험편의 투자율, 형상, 크기는 물론 Eq. (18) 및 Eq. (19)에 표현한 바와 같이 유도주

파수 및 전도도와 밀접한 관계를 가지며, 비례상수 ζ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} m_{IC} &= m_{IC}(\mu, \sigma, f, t, shape, l_C, d_C, w_C) \\ &= \zeta \cdot e^{-t/\delta} \end{aligned} \quad (20)$$

유도전류가 벽면을 따라 발생한다고 가정하였을 때, 유도전류에 의하여 발생하는 단위면적당 자기량 m_{IC} 의 결함 깊이에 따른 적분값에 의하여 자기장의 분포가 나타나게 된다. 따라서, 상기 Eqs. (14~17)에서 표현한 바와 마찬가지로 다음 식에 의하여 유도전류에 의한 자기장의 세기 분포를 표현할 수 있으며, 결함의 길이방향이 전기장의 방향과 수직일 경우, 즉 자기장의 방향과 수평일 경우, 결함 검출 능력이 최대가 된다. 즉,

$$\vec{H}_{IC} = \int_{-w_C/2-y}^{w_C/2-y} \int_0^{d_C} \frac{\zeta \cdot e^{-t/\delta} \cdot \vec{r}_3}{|\vec{r}_3|^3} dt dy - \int_{-w_C/2-y}^{w_C/2-y} \int_0^{d_C} \frac{\zeta \cdot e^{-t/\delta} \cdot \vec{r}_4}{|\vec{r}_4|^3} dt dy \quad (21)$$

$$\vec{r}_3 = \left(x + \frac{l_C}{2} \right) \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + (z_0 + t) \cdot \vec{k} \quad (22)$$

$$\vec{r}_4 = \left(x - \frac{l_C}{2} \right) \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + (z_0 + t) \cdot \vec{k} \quad (23)$$

CIC-MFL에서는 Eq. (14)와 Eq. (21)에 의하여 표현되는 누설자속과 유도전류의 흐트러짐이 복합적으로 나타나게 된다. 따라서, 투자율 μ 와 전도도 σ 를 가지는 강자성체 금속의 경우에는 균열의 길이방향이 자화방향과 수직일 때에는 μ 를 주요 인자로 하는 Eq. (14)에 의하여, 또한 균열의 길이방향이 자화방향과 수평일 때에는 σ 를 주요 인자로 하는 Eq. (21)에 의하여 균열을 검출하게 된다. 즉, 자극 방향의 변화 없이도 결함의 탐상능력이 길이방향에 받는 영향을 최소화할 수 있다.

제 2절 경사형 자화기의 유한요소해석법

1. 직류 경사형 전자석

상술한 전자기적 현상을 이용한 NDT 방법은 검사 대상의 표면 결함이나 표면 근방의 이면 결함 또는 내면 결함을 찾아내는 데에 유용하다. 특히, 전자기장 발생 장치의 자극과 자극 사이에 자기 센서들을 배열하여 결함 주변에서 발생하는 누설 자속 또는 와전류를 측정하는 비파괴 검사 장치를 이용하여, 원자력 발전, 화력 발전, 화학 산업, 항공기, 제철 및 제강 등에 사용되는 대형 플랜트, 구조물 및 생산 제품의 결함을 찾아낼 수 있다. 한편, 결함 부위에서의 누설 자속 또는 와전류의 발생은 결함의 길이 방향과 밀접한 관계를 가진다. 예를 들어, 검사 대상이 자기장에 의하여 영향을 받게 되는 강자성체 금속인 경우, 결함의 길이 방향이 자기장의 방향과 수직인 경우에 결함 검출 능력이 우수하다. 하지만, 결함의 길이 방향이 자기장의 방향과 나란한 경우에는 결함 검출 능력이 현저히 떨어져서 결함을 검출하지 못할 수가 있다. 따라서, 금속의 압연 공정에서 롤러들 사이를 통과한 판재에 결함이 있는지를 검사할 때, 판재의 유입 방향으로 발생한 가느다란 결함을 정확하게 검출할 수 없거나, 스테인레스 강의 응력 부식 결함(SCC, Stress Corrosion Crack)과 같은 다중 결함(multi-site crack)은 특정한 결함 길이 방향을 갖지 않으므로, 누설 자속에 의하여 결함을 정확하게 검출할 수 없는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 한 방법으로서 복합유도전류-누설자속탐상법(CIC-MFL, Combined Induced Current – Magnetic Flux Leakage Testing)[35]이 제안된 바 있다. CIC-MFL에서는 전술한 Eq. (14)과 Eq. (21)에 의하여 표현되는 누설자속과 유도전류의 흐트러짐이 복합적으로 나타나게 된다. 따라서, 투자율 μ 와 전도도 σ 를 가지는 강자성체 금속의 경우에는 균열의 길이방향이 자화방향과 수직일 때에는 μ 를 주요 인자로 하는 Eq. (14)에 의하여, 또한 균열의 길이방향이 자화방향과 수평일 때에는 σ 를 주요 인자로 하는 Eq. (21)에 의하여 균열을 검출하게 된다. 즉, 자극 방향의 변화 없이도 결함의 탐상능력이 길이방향에 받는 영향을 최소화할 수 있다.

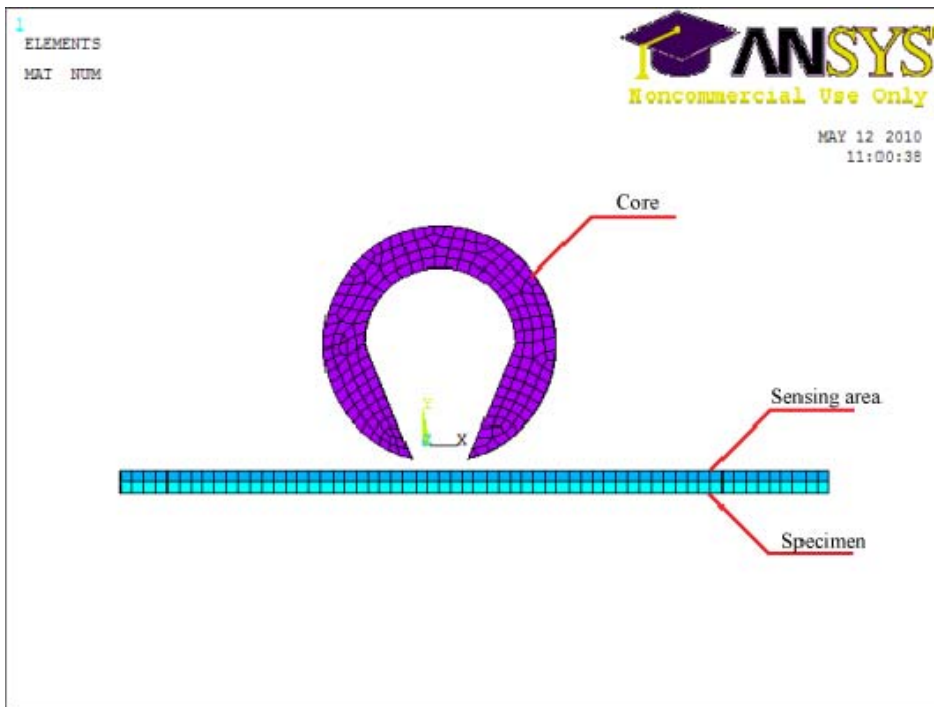
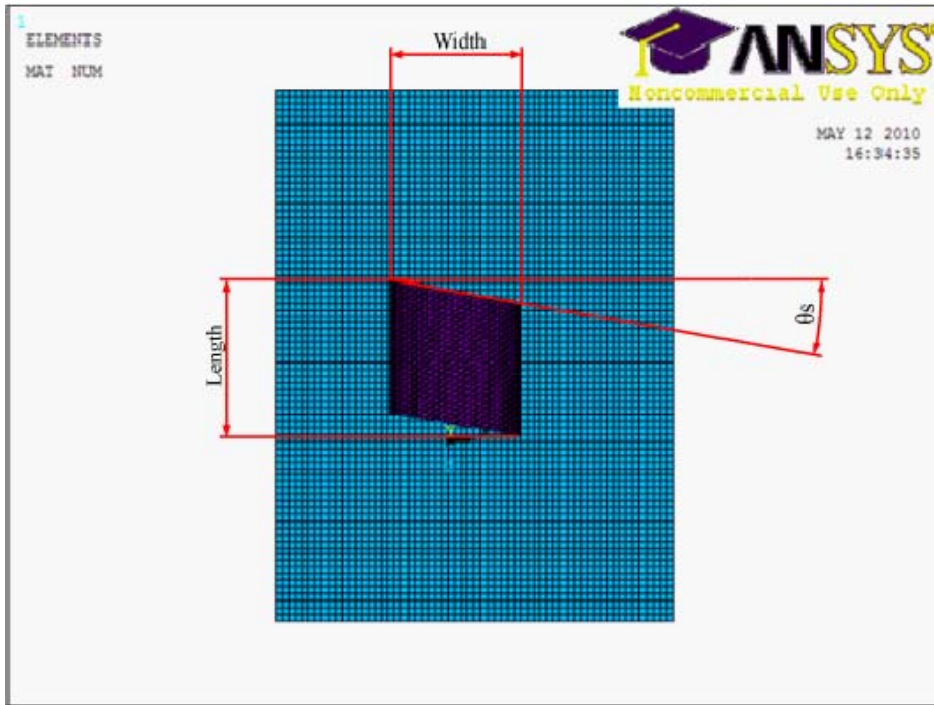


Fig. 2-11 직류 경사형 자화기의 수치해석 모델링

Table 2-1 직류 경사형 자화기의 수치해석 설정 값

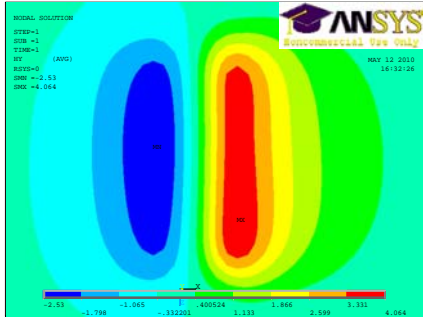
| Item | Material | Properties | Size | Mesh size | Ansys model |
|------------------------------|----------|--------------------------|----------------------|-----------|-------------|
| Specimen | Steel | MURX 4000 RSVX 1.6e-7 | 60×80 | 1 | 117 |
| Core | Metal | RSVX 1.6e-7 | 20×19.85×22(0) | 1 | 117 |
| | | | 19.6×23.7×22(10) | | |
| | | | 18.7×27.8×22(20) | | |
| | | | 17.1×32.9×22(30) | | |
| Coil | Copper | MURX 1 | 25×25.85×19.86(0) | 1 | 117 |
| | | | 24.6×30.6×19.86(10) | | |
| | | | 23.5×35.65×19.86(20) | | |
| | | | 21.65×41.7×19.86(30) | | |
| Sensing Area | Air | MURX 1 | 60×80 | 1 | 117 |
| Crack (part of air block) | Air | MURX 1 | 10×1×1 | | |

본 연구에서는 또 다른 방법으로서 누설 자속에 의하여 결함을 검출하는 비파괴 검사 장치에서, 검사 대상의 유입 방향으로 발생한 가느다란 결함도 정확하게 검출할 수 있는 향상된 방법으로서 Fig.2-11에 나타낸 바와 같은 스캔방향과 경사진자화방향을 생성할 수 있는 자화기를 제안한다. 이 방법은 스캔방향으로 경사지게 배열한 실린더강관들을 이용하여, 스캔방향과 경사진자화방향을 생성한다. 이때, 결함의 길이방향이 검사대상의 유입방향과 평행 또는 수직이라도 평행하지 않게 많은 양의 누설 자속들이 발생하므로 검출능의 저하없이 결함을 검출할 수 있다. 이러한 방법을 기존의 DPMA에 의하여 이론적으로 검토하는데 많은 제약을 가지고 있기 때문에, 본 연구에서는 경사형 자화기를 유한요소법(FEM, Finite Element Method)에 의하여 해석하였고, 해석 모델에 의한 실제 경사형 자화기를 제작하여 결함길이 방향이 스캔방향과 평행인 인공결함 탐상에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

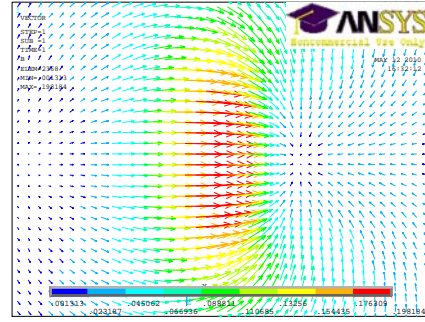
FEM 해석은 상용화된 수치해석프로그램인 ANSYS(Ver.11.0 SP1 UP20070830, EMAG)의 3차원 해석에 의하여 수행하였다. Fig.2-11과 Table 2-1은 해석모델을 나타

낸다. 그림에서 θ_s 는 실리콘강판과 스캔방향이 이루는 각도를 나타내며, 0° 에서 30° 를 10° 간격으로 모델링하였다. 실리콘강판을 배열할 때, 강판과 강판사이의 간격은 실제로는 0에 가까우나, 경사형자화기의 원리를 고찰하고자 본 연구에서는 0.15mm 로 모델링하였다. 또한, 측정영역(sensing area)은 센서와 시험편사이의 간격, 즉 리프트오프가 1mm 임을 표현하고자 도입하였다.

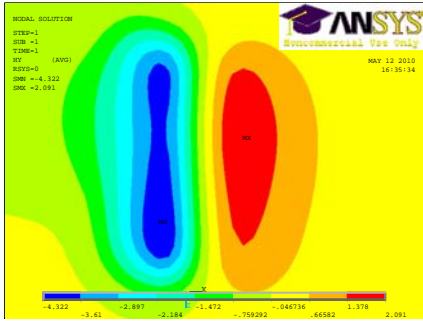
Fig. 2-13 ~ 2-16는 상기 모델에서 θ_s 가 각각 0° 에서 30° 인 경우에 200mA 의 직류 전류를 입력하였을 때의 수치해석결과를 나타낸다. 일반적인 자화법을 사용하였을 때 결함 검출능이 최하인 경우(결함의 길이방향이 스캔방향과 수평인 방향)와 결함 검출능이 최대인 경우(결함의 길이방향이 스캔방향과 수직인 경우)를 각각 모델링하였다. 결함이 없을 때의 해석결과는 Fig.2-12에 나타난 바와 같이 경사형 자화기에 의하여 시험편에 인가되는 자기장의 방향을 의도한 바와 같이 스캔방향과 경사지게 인가시킬 수 있음을 알 수 있다.



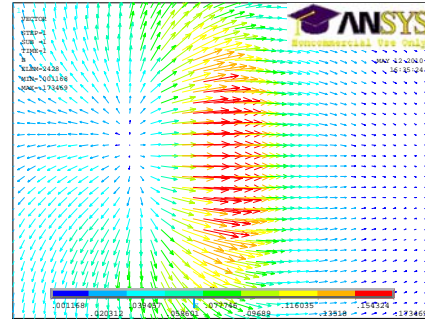
(a) 경사각도 0°일때



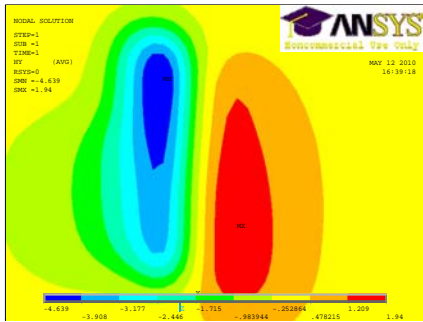
(b) Vector 표현



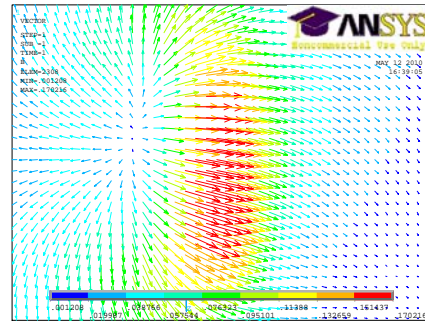
(c) 경사각도 10°일때



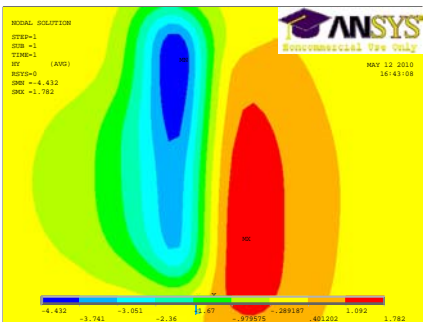
(d) Vector 표현



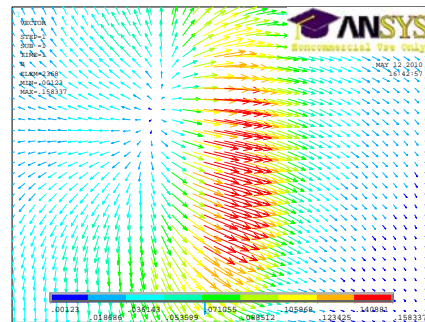
(e) 경사각도 20°일때



(f) Vector 표현



(g) 경사각도 30°일때



(h) Vector 표현

Fig. 2-12 균열이 없을 때의 수치해석 결과

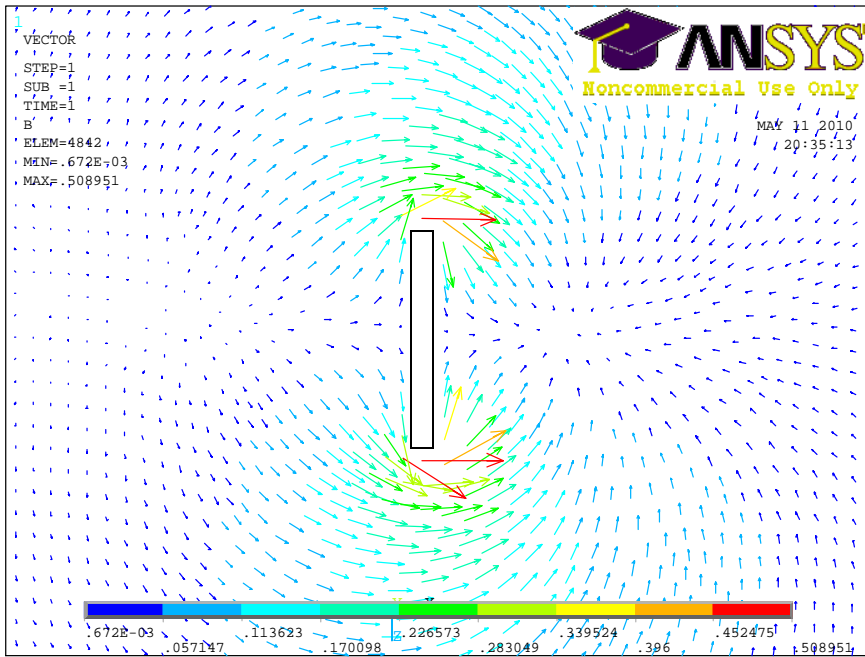
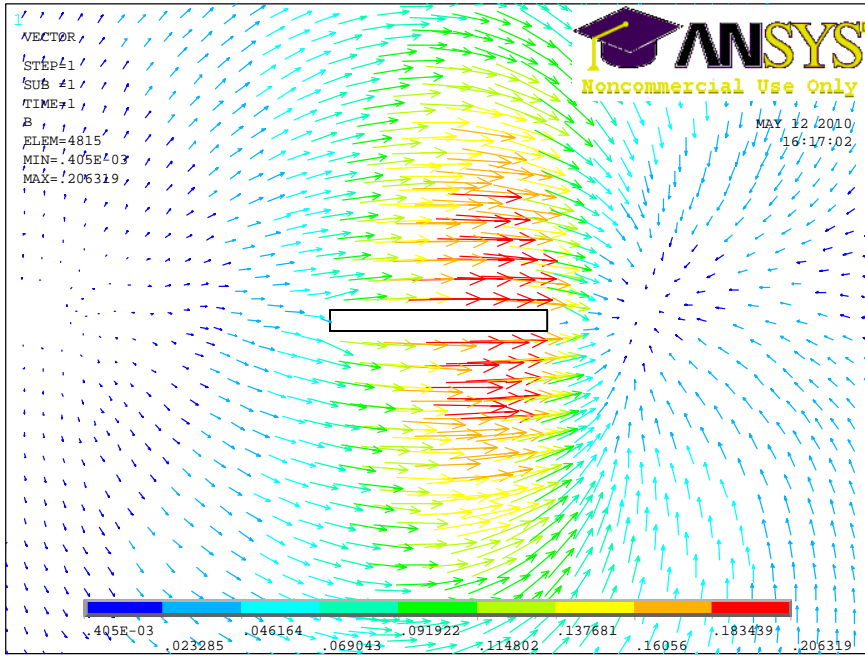


Fig. 2-13 경사각도 0°일 때의 수치해석 결과

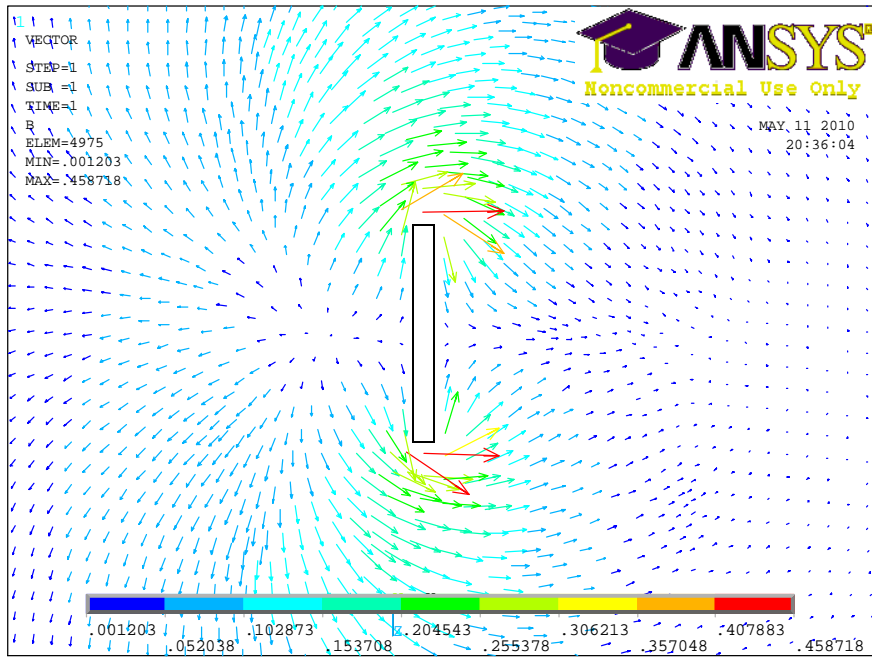
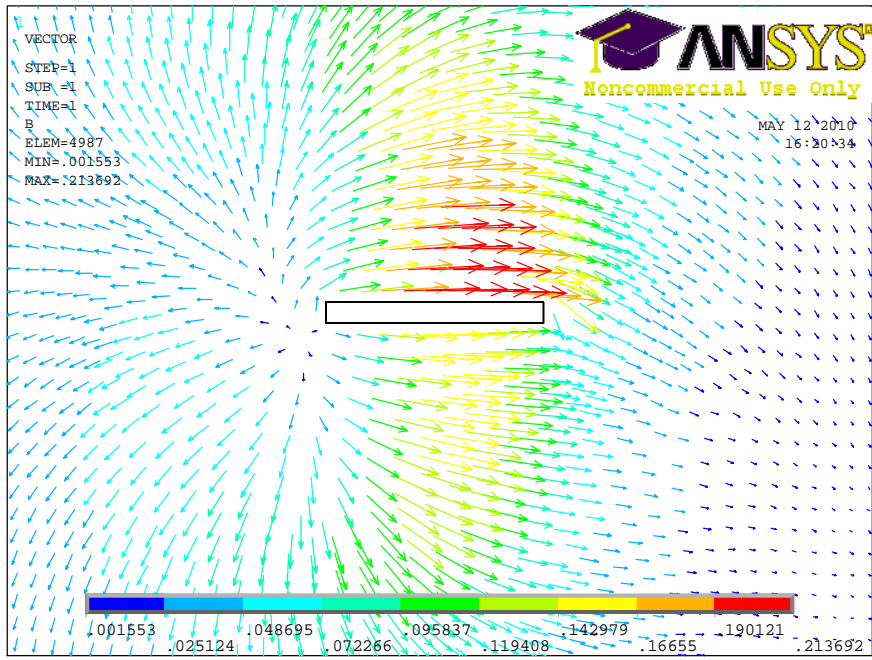


Fig. 2-14 경사각도 10°일 때의 수치해석 결과

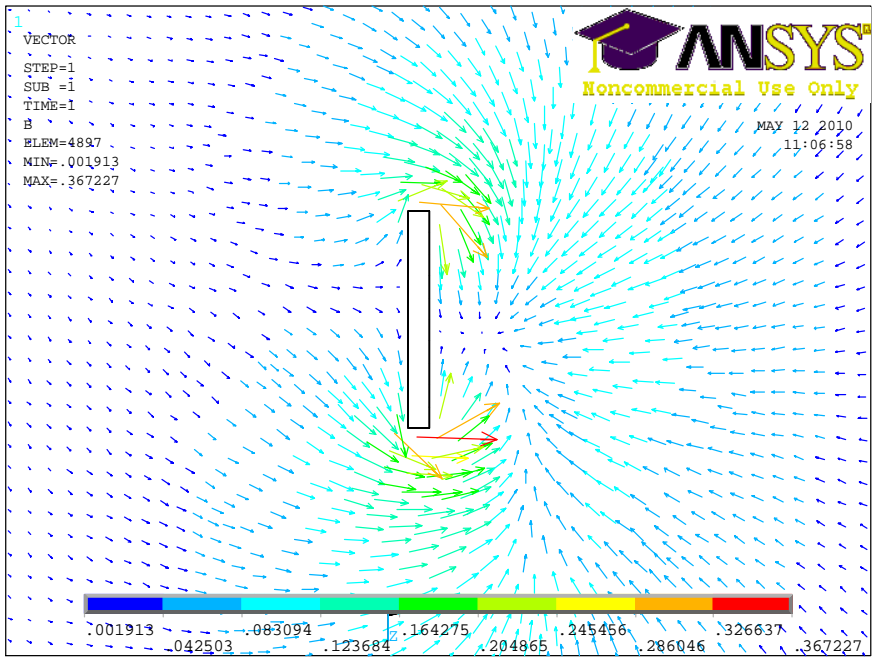
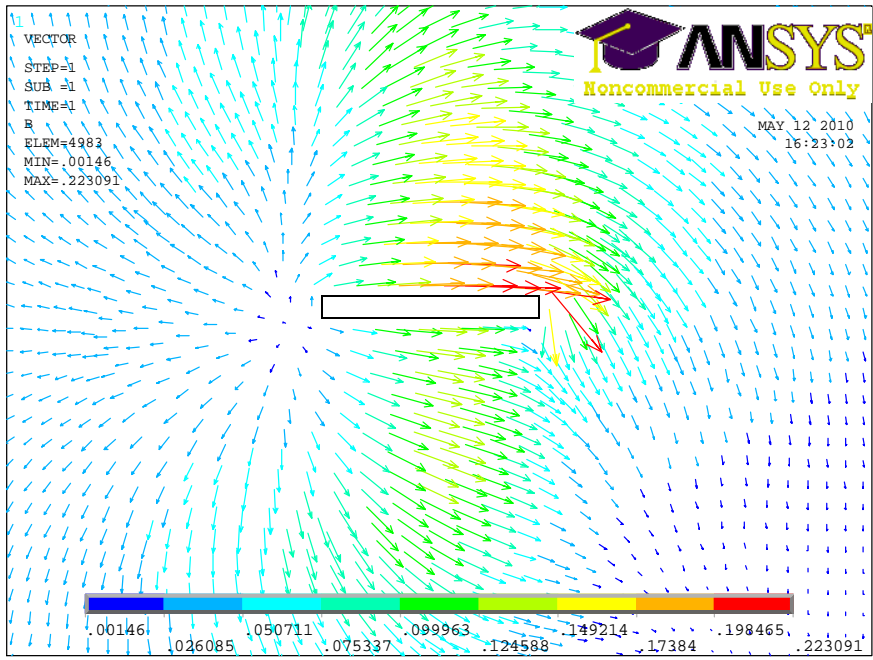


Fig. 2-15 경사각도 20°일 때의 수치해석 결과

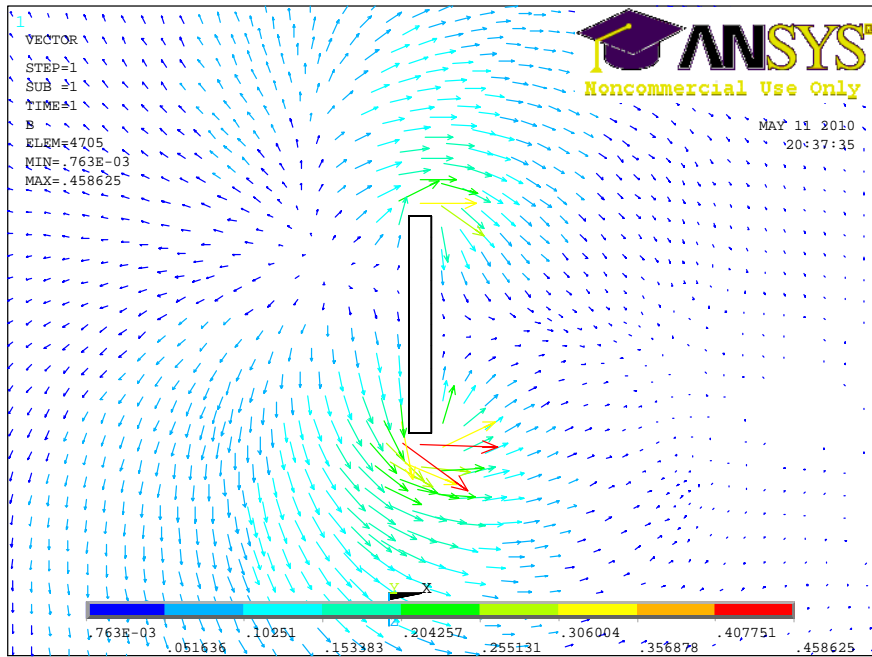
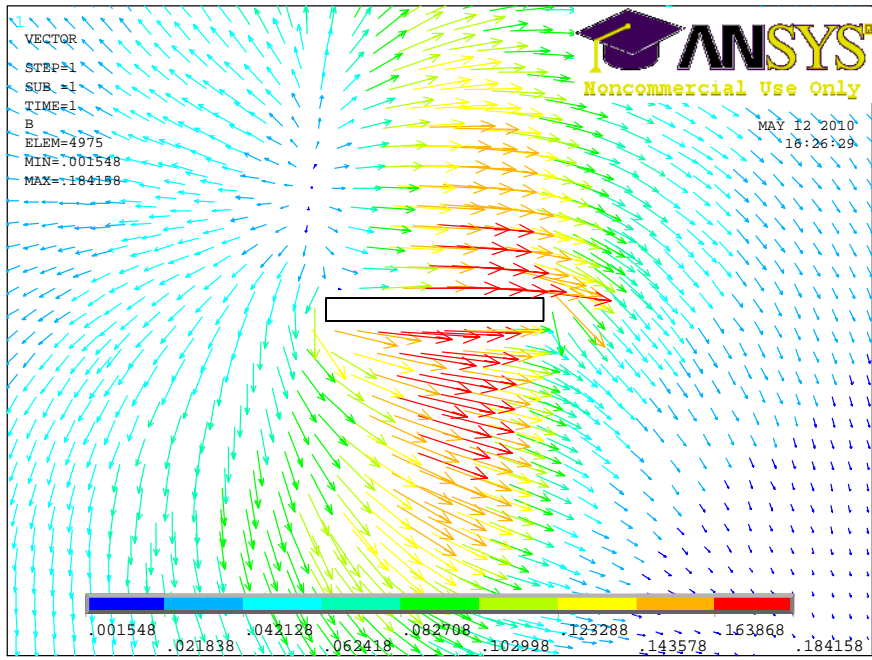
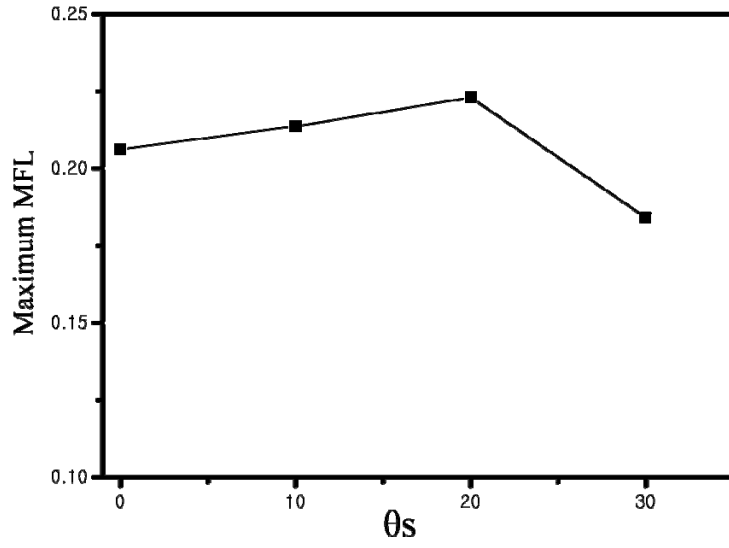


Fig. 2-16 경사각도 30°일 때의 자화기 모델 및 수치해석 결과

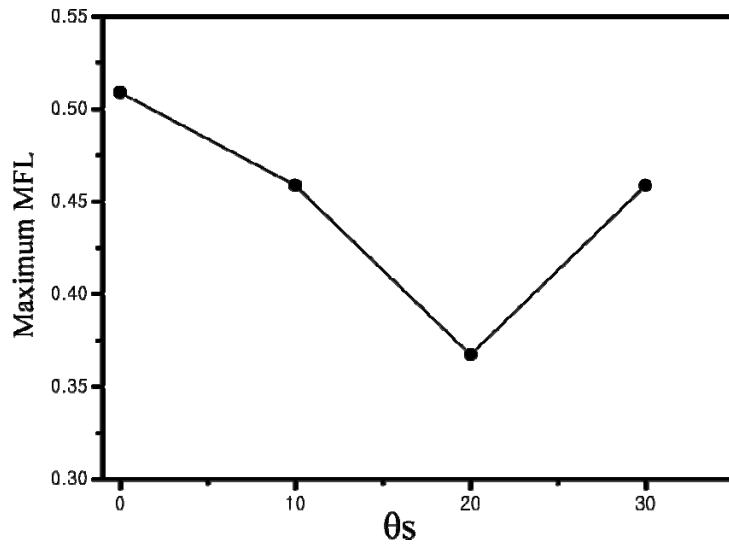
한편, θ_S 가 0° 일 때, 결함의 길이방향이 스캔방향과 수평인 경우(그림 2-13(a))에는 누설자속의 발생이 결함의 양면에서 대칭형으로 발생하며, 그 크기는 최소화된다. 그러나 θ_S 가 $10\sim 30^\circ$ 인 경우(Fig.2-14, 15, 16(a))에는 누설자속의 발생이 결함의 양면에서 비대칭형으로 발생하며, θ_S 가 커질수록 그 크기가 점점 증가함을 알 수 있다. 그러나 20° 인 경우와 30° 의 경우에는 그 크기의 증가율이 포화상태에 이르러 경사각도를 20° 이상으로 증대시키지 않아도 충분한 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

또한, 결함의 길이방향이 스캔방향과 수직인 경우(Fig.2-13, 14, 15, 16(b))에는 결함의 양 선단에서 누설자속의 크기가 최대화되고 있음을 알 수 있다. 또한, 그 크기는 θ_S 가 0° 일 때는 대칭형이나, θ_S 가 증대함에 따라 비대칭형으로 변화함을 알 수 있다. 그러나, 이러한 현상은 결함과 자화기의 상대적인 위치에 따른 해석결과와 상이함일 뿐이다.

각각의 경우에서 θ_S 의 크기에 따른 최대누설자속의 변화를 Fig.2-17에 나타낸다. 결함 길이 방향이 스캔방향과 수평인 경우(경우 I, Fig.2-17(a))에는 전술한 바와 같이 θ_S 가 20° 이상일 때 포화상태에 이르고 있음을 알 수 있다. 또한, 결함 길이 방향이 스캔방향과 수직인 경우(경우 II, Fig.2-17(b))에는 θ_S 의 크기가 커짐에 따라 최대누설자속의 크기가 감소함으로써 결함 검출능력이 상대적으로 저하되고 있음을 알 수 있다. 하지만, 경우 II는 경우 I에 비하여 그 크기가 충분히 크므로 결함 검출능력에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서, 전체적인 결함검출능력을 좌우하는 것은 경우 I에 해당하므로, 본 연구에서 제안하는 경사형 자화기가 결함검출능력을 향상하고 있음을 알 수 있다.



(a) 결함 길이 방향이 스캔 방향과 수평인 경우



(b) 결함 길이 방향이 스캔 방향과 수직인 경우
 Fig. 2-17 θ_s 의 크기에 따른 최대누설자속의 변화

2. 교류 경사형 전자석

상술한 바와 같이 직류 경사형 전자석을 도입하면, 결함의 길이방향이 스캔방향과 동일한 경우에도 결함 검출능을 향상할 수 있다. 본 절에서는 경사형 전자석을 도입한 경우의 CIC-MFL을 수치해석하여, 종래의 방법과의 결함 검출능을 비교하였다.

CIC-MFL에 의하면, 전술한 바와 같이 Eq. (14)과 Eq. (21)에 의하여 표현되는 누설자속과 유도전류의 흐트러짐이 복합적으로 나타나게 된다. 따라서, 투자율 μ 와 전도도 σ 를 가지는 강자성체 금속의 경우에는 균열의 길이방향이 자화방향과 수직일 때에는 μ 를 주요 인자로 하는 Eq. (14)에 의하여, 또한 균열의 길이방향이 자화방향과 수평일 때에는 σ 를 주요 인자로 하는 Eq. (21)에 의하여 균열을 검출하게 된다. 그러나 교류 경사형 자화기에 의하면 상술한 식에 의하여 해석하기 곤란하다.

따라서, Fig.2-18에 나타낸 바와 같은 스캔방향과 경사진 자화방향을 생성할 수 있는 자화기에 의한 모델링을 도입하고, 상용화된 FEM 수치해석프로그램인 ANSYS(Ver.11.0 SP1 UP20070830, EMAG)의 3차원 해석을 수행하였다. Fig.2-18과 Table 2-2은 해석모델을 나타낸다. 그림에서 θ_s 는 실리콘강판과 스캔방향이 이루는 각도를 나타내며, 0° 에서 30° 를 10° 간격으로 모델링하였다. 강판과 강판사이의 간격은 실제로는 0에 가까우나, 경사형자화기의 원리를 고찰하고자 직류 경사형 전자석과 마찬가지로 본 연구에서는 0.15mm 로 모델링하였다. 또한, 측정영역(sensing area)은 센서와 시험편사이의 간격, 즉 리프트오프가 1mm 임을 표현하려고 도입하였다.

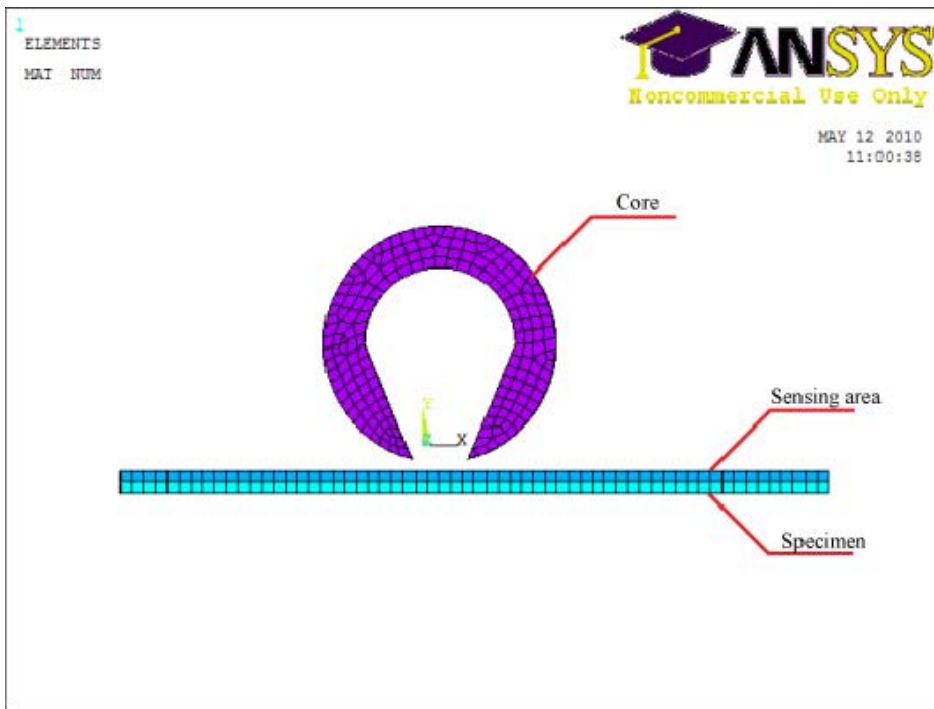
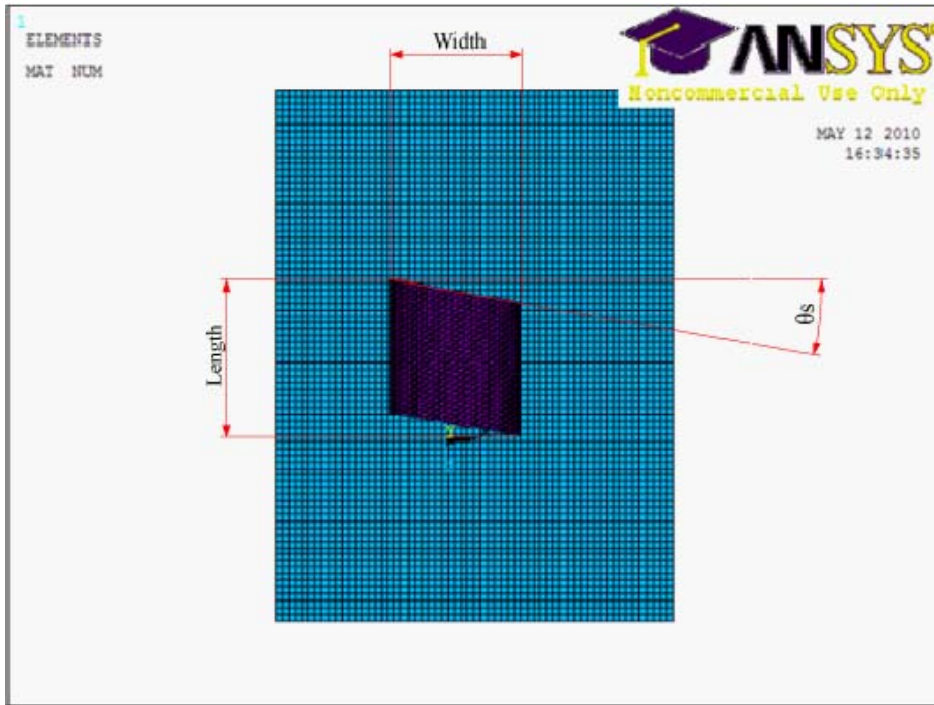


Fig. 2-18 교류 경사형 자화기의 수치해석 모델링

Table 2-2 직류 경사형 자화기의 수치해석 설정 값

| Item | Material | Properties | Size | Mesh size | Ansys model |
|------------------------------|----------|--------------------------|----------------------|-----------|-------------|
| Specimen | Steel | MURX 4000 RSVX 1.6e-7 | 60×80 | 1 | 117 |
| Core | Metal | RSVX 1.6e-7 | 20×19.85×22(0) | 1 | 117 |
| | | | 19.6×23.7×22(10) | | |
| | | | 18.7×27.8×22(20) | | |
| | | | 17.1×32.9×22(30) | | |
| Coil | Copper | MURX 1 | 25×25.85×19.86(0) | 1 | 117 |
| | | | 24.6×30.6×19.86(10) | | |
| | | | 23.5×35.65×19.86(20) | | |
| | | | 21.65×41.7×19.86(30) | | |
| Sensing Area | Air | MURX 1 | 60×80 | 1 | 117 |
| Crack (part of air block) | Air | MURX 1 | 10×1×1 | | |

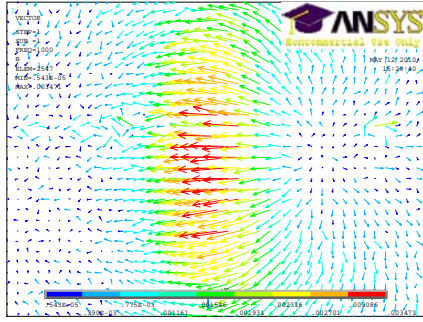
Fig.2-20 ~ 2-27는 상기 모델에서 θ_s 가 각각 0° 에서 30° 인 경우에 200mA, 1,000Hz 의 교류전류를 입력하였을 때의 수치해석결과를 나타낸다. 결함의 방향은 상술한 직류 경사형 전자석의 경우와 마찬가지로 스캔방향과 같은 방향 및 수직인 방향으로 각각 모델링하였다.

상술한 CIC-MFL인 경우 전도도 σ 를 주요 인자로 하여 균열을 검출하게 된다. 즉, 전기장의 방향이 결함 길이방향과 수직일 경우(자기장의 방향이 결함 길이방향과 수평일 경우, 경우 I) 결함 검출능이 최대가 된다. Fig.2-28(a)에서 나타나는 바와 같이 전기장의 방향이 결함 길이방향과 수직일 경우 θ_s 가 0° 일 때 결함의 선단에서 최대 유도전류가 발생함을 알 수 있다. 한편, θ_s 가 10° 에서 20° 까지 증가하면 유도전류는 단계적으로 감소하고 30° 까지 증가하면 다시 증가함을 알 수 있다. 반면, 전기장의 방향이 결함 길이방향과 수평일 경우(자기장의 방향이 결함 길이방향과 수직일 경우, 경우 II) θ_s 가 0° 일 때는 경우 I 보다 유도전류가 더 많이 발생하지만, θ_s 가 10° 에서 30° 까지 증가하면 오히려 경우 II에서 더 많은 유도전류가 발생함을 알 수 있다. 즉, 교류 경사형 전자석에서도 상술한 직류 경사형 전자석처럼 경사형 전자석이 비경사형 전자석보다 결함 검출능이 우수함을 알 수 있

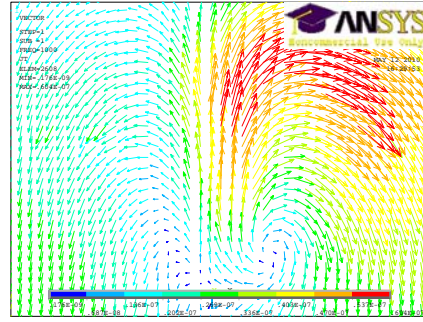
다.

반면, Fig.2-28(b)에서 보는 바와 같이 θ_s 의 크기에 따른 누설자속의 변화는 유도전류의 변화와 틀린경향을 나타내는데, 이는 자기장 해석 시 유도전류에 의해 발생하는 수직방향의 자기장 또한 결과에 나타남으로 인해서이다.

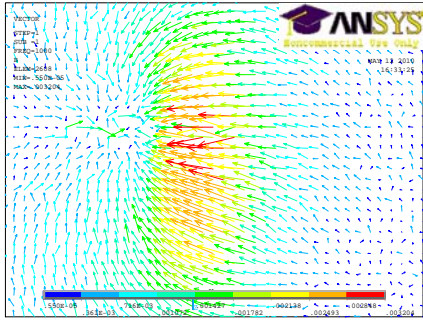
결과적으로 교류 경사형 전자석을 활용한 CIC-MFL도 종래의 CIC-MFL과 큰 차이 없이 결함을 검출할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 모의실험을 통해 경사형 직류자화기를 검증하였으며, 경사형 교류자화기를 도입한 CIC-MFL에 의하여 실증실험을 수행하였다.



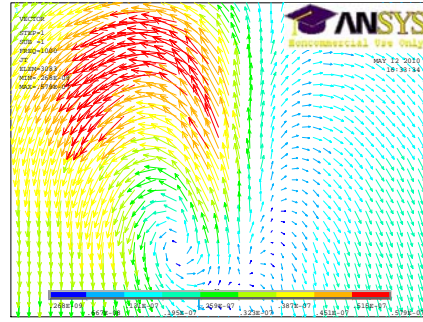
(a) 자기장 해석 ($\theta_s=0^\circ$)



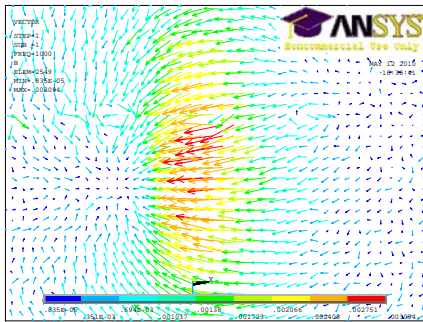
(b) 전기장 해석 ($\theta_s=0^\circ$)



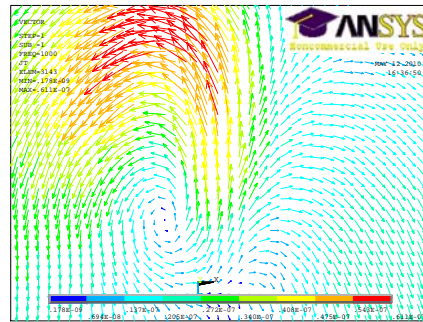
(c) 자기장 해석 ($\theta_s=10^\circ$)



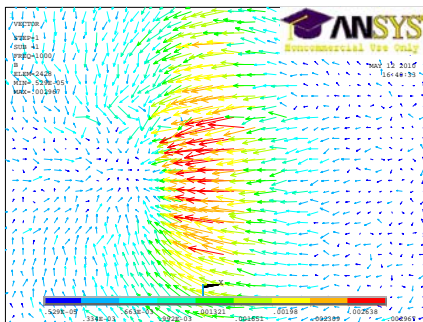
(d) 전기장 해석 ($\theta_s=10^\circ$)



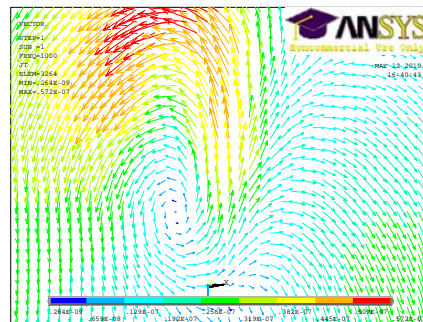
(e) 자기장 해석 ($\theta_s=20^\circ$)



(f) 전기장 해석 ($\theta_s=20^\circ$)



(g) 자기장 해석 ($\theta_s=30^\circ$)



(h) 전기장 해석 ($\theta_s=30^\circ$)

Fig. 2-19 균열이 없을 때의 수치해석 결과

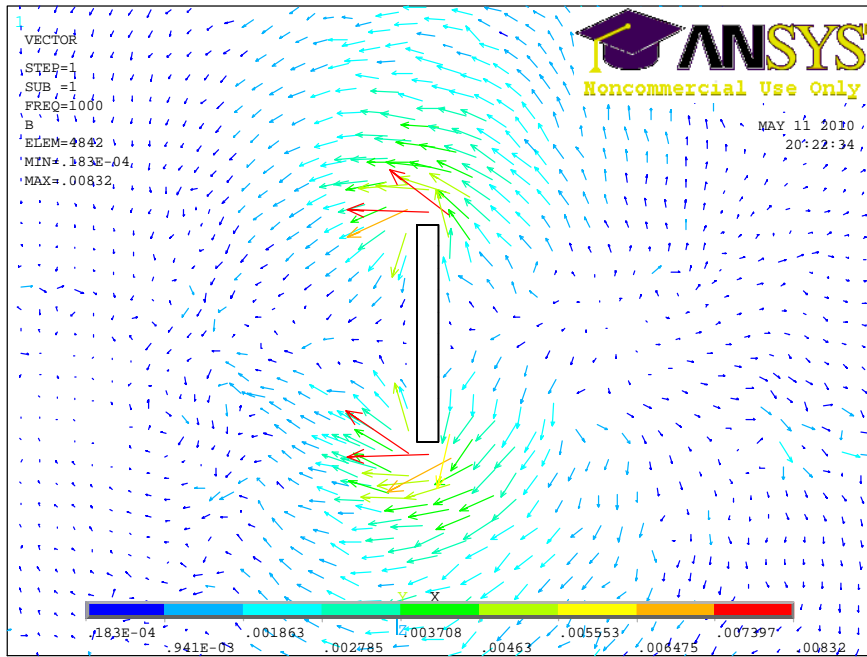
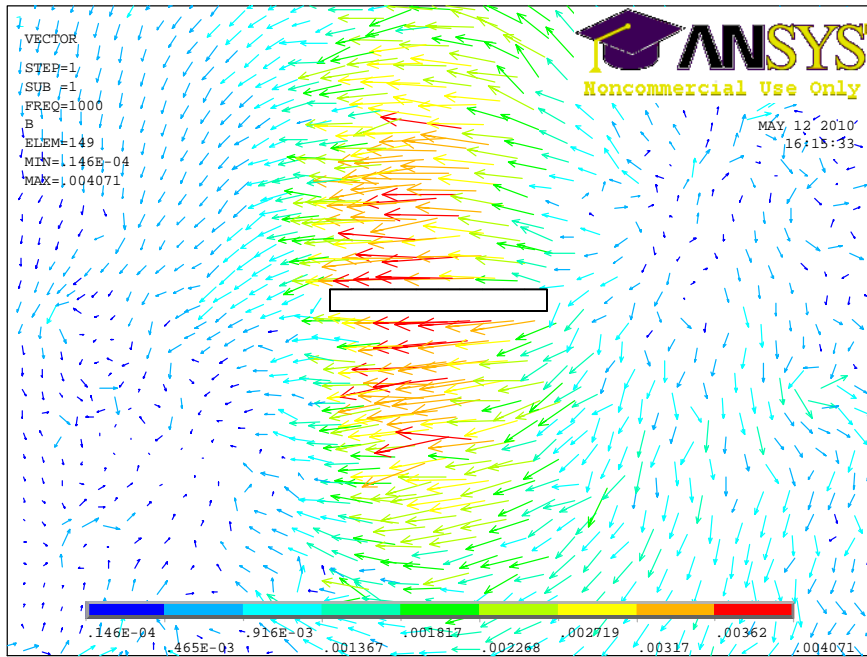


Fig. 2-20 경사각도 0°일 때의 자기장 수치해석 결과

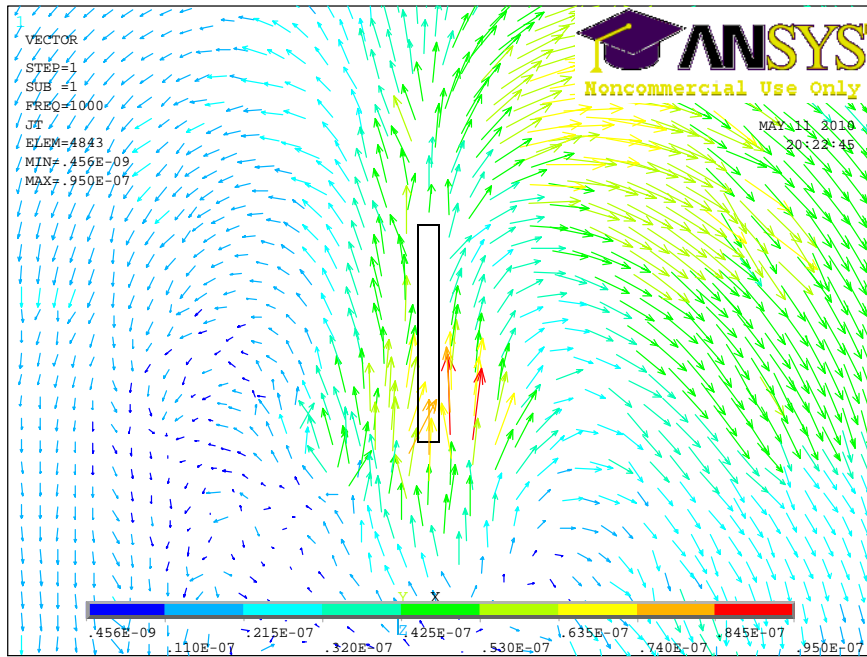
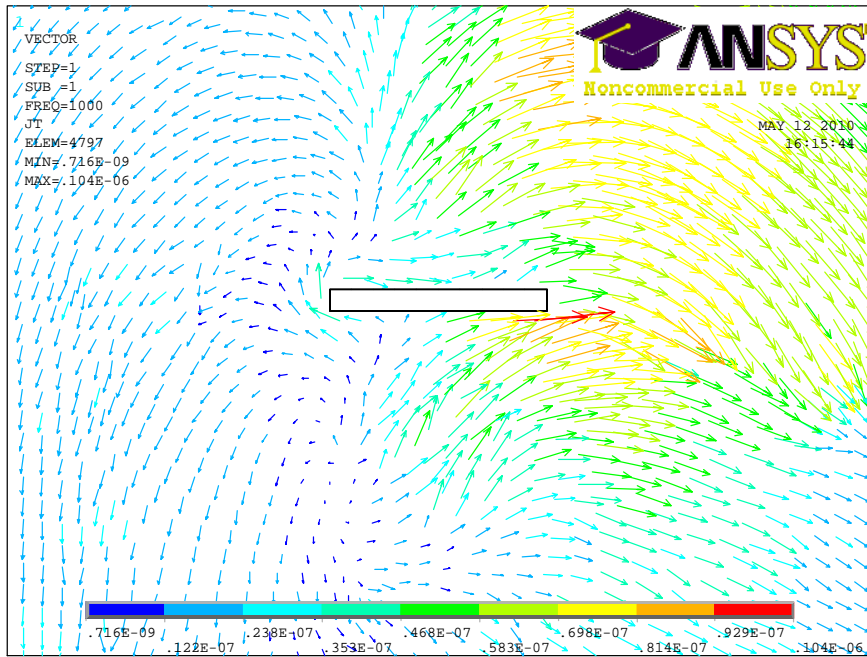


Fig. 2-21 경사각도 0°일 때의 전기장 수치해석 결과

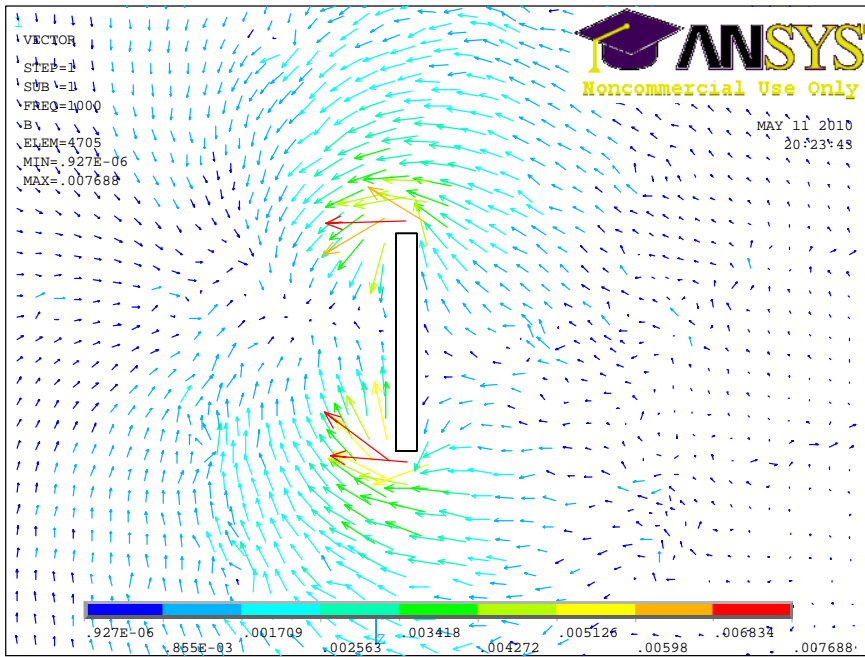
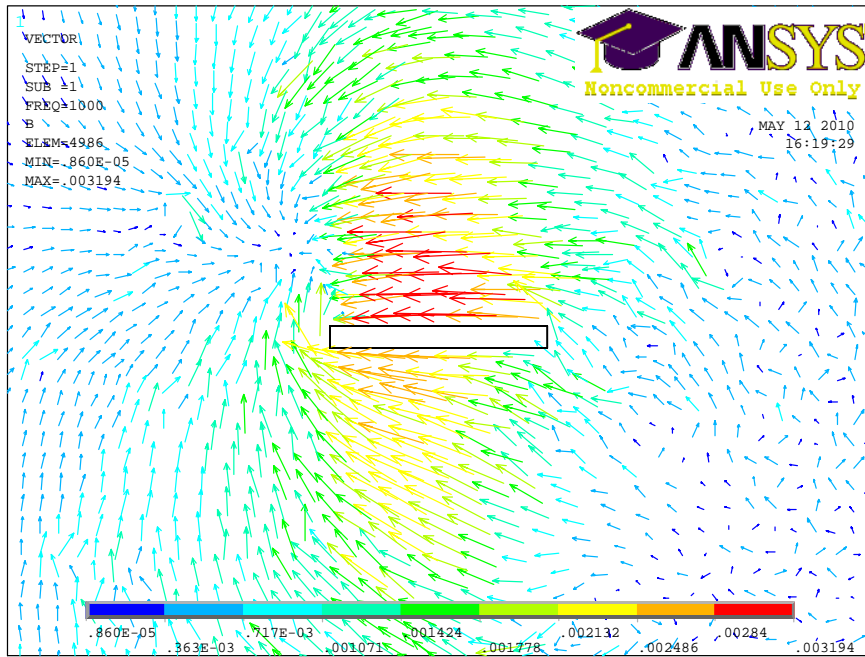


Fig. 2-22 경사각도 10°일 때의 자기장 수치해석 결과

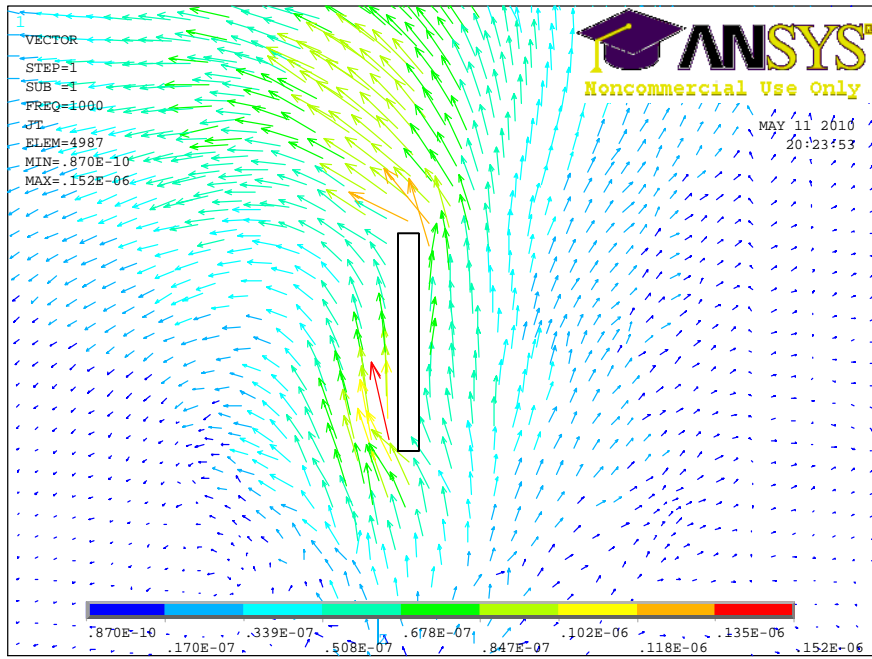
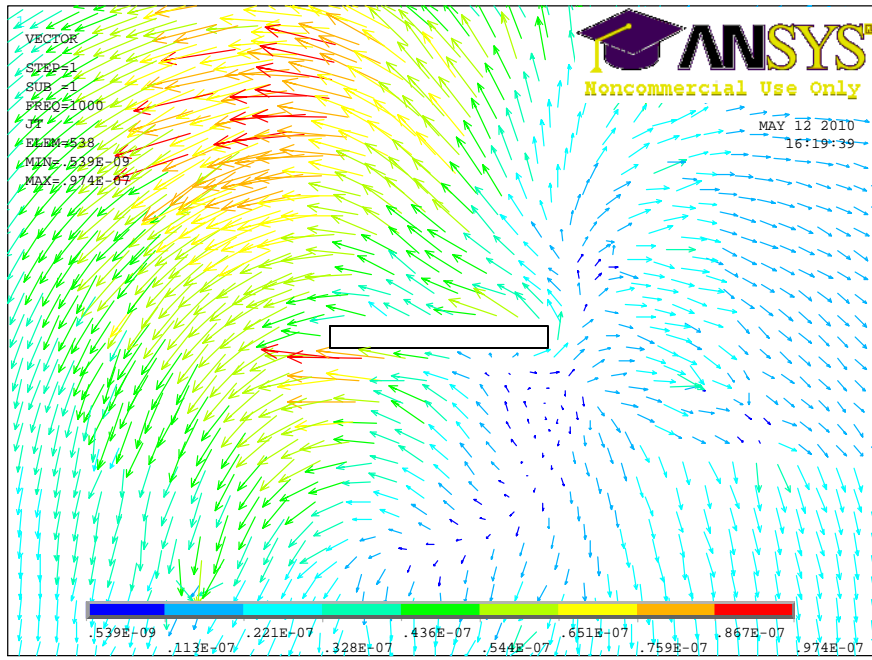


Fig. 2-23 경사각도 10°일 때의 전기장 수치해석 결과

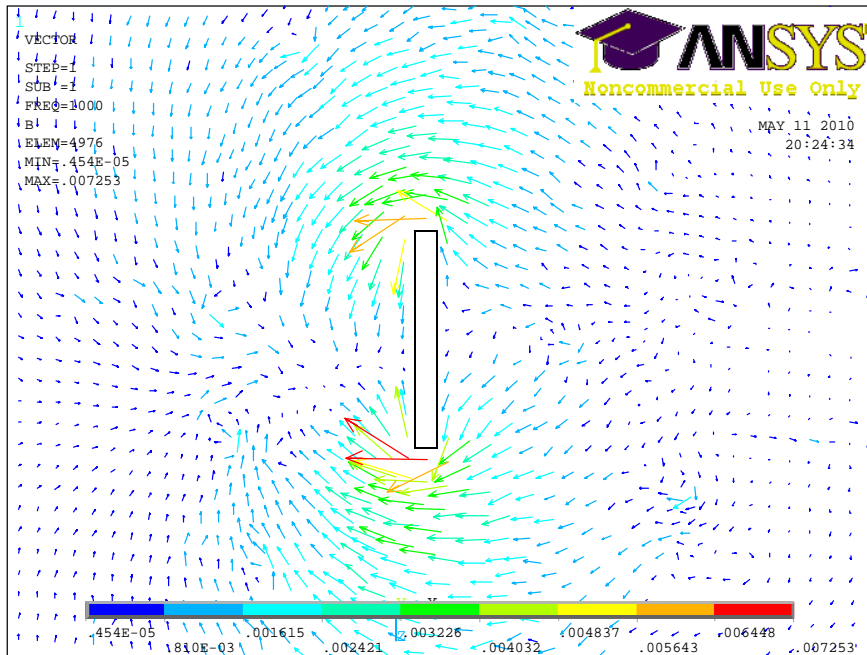
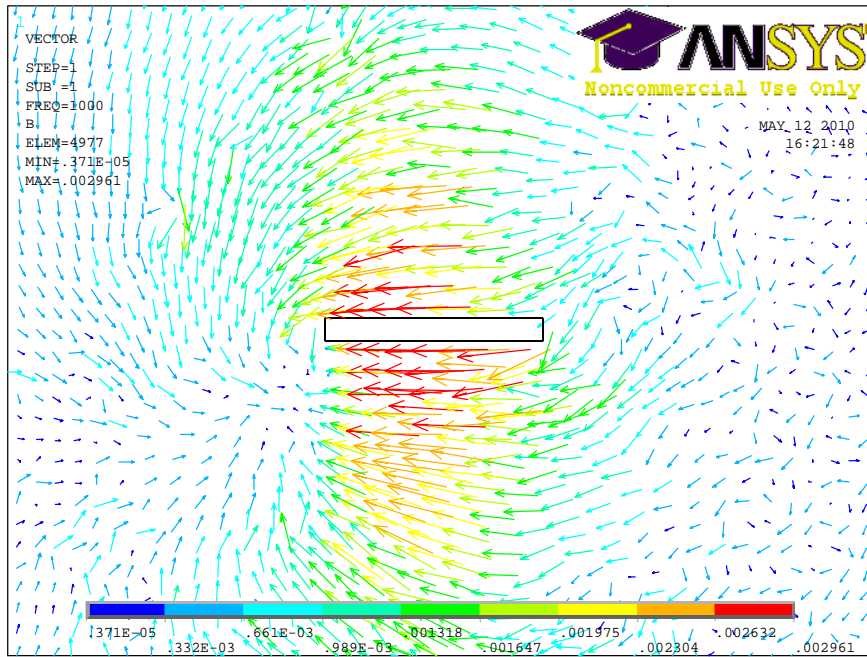


Fig. 2-24 경사각도 20°일 때의 자기장 수치해석 결과

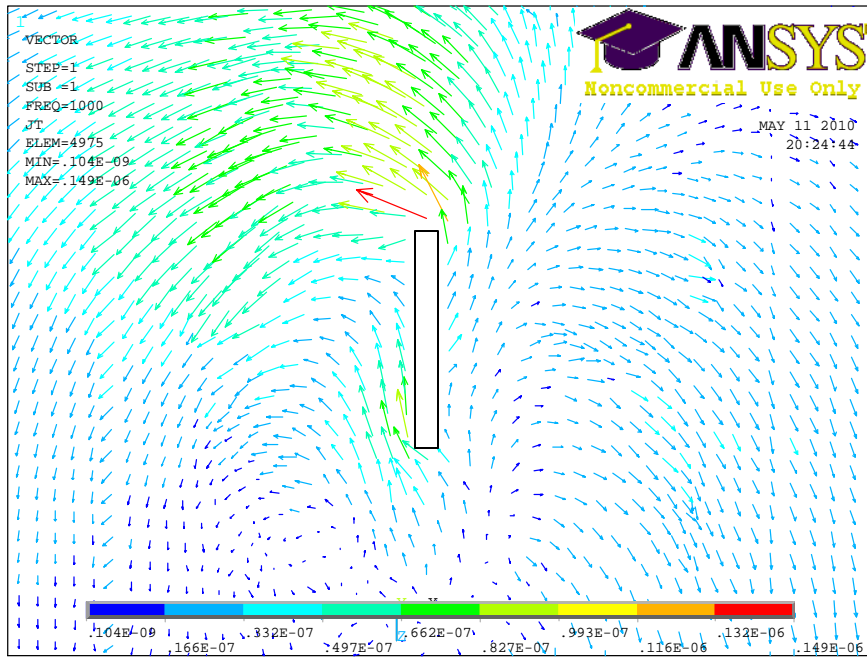
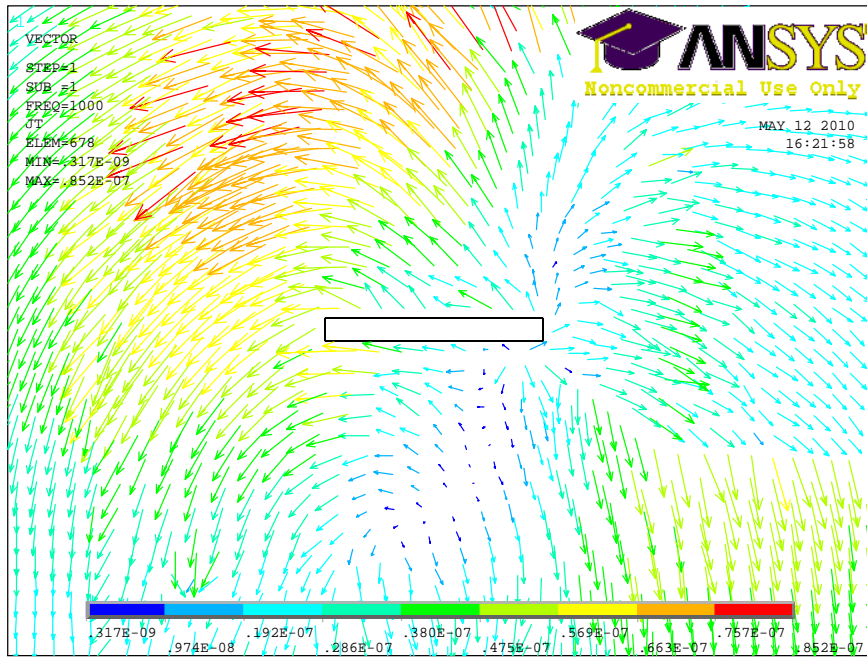


Fig. 2-25 경사각도 20°일 때의 전기장 수치해석 결과

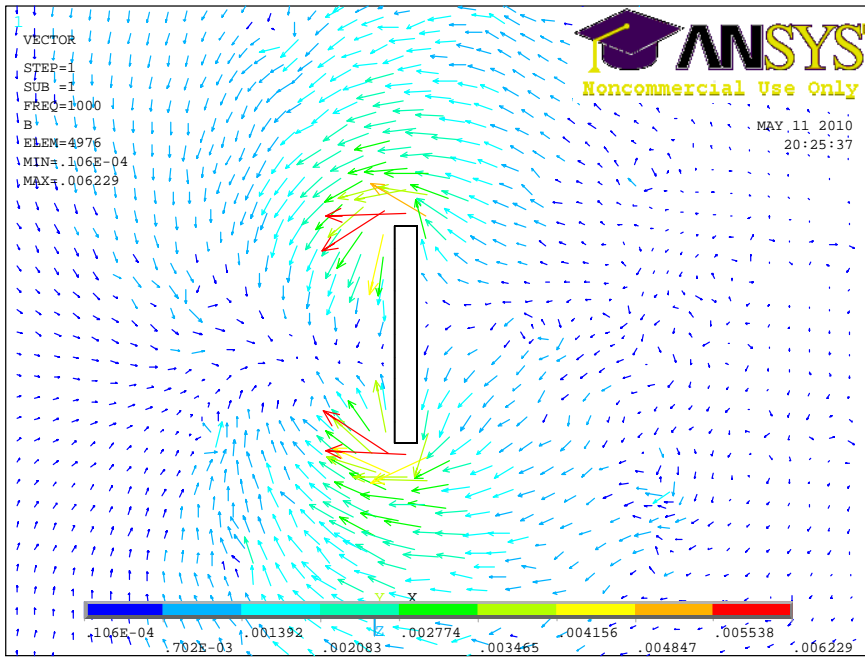
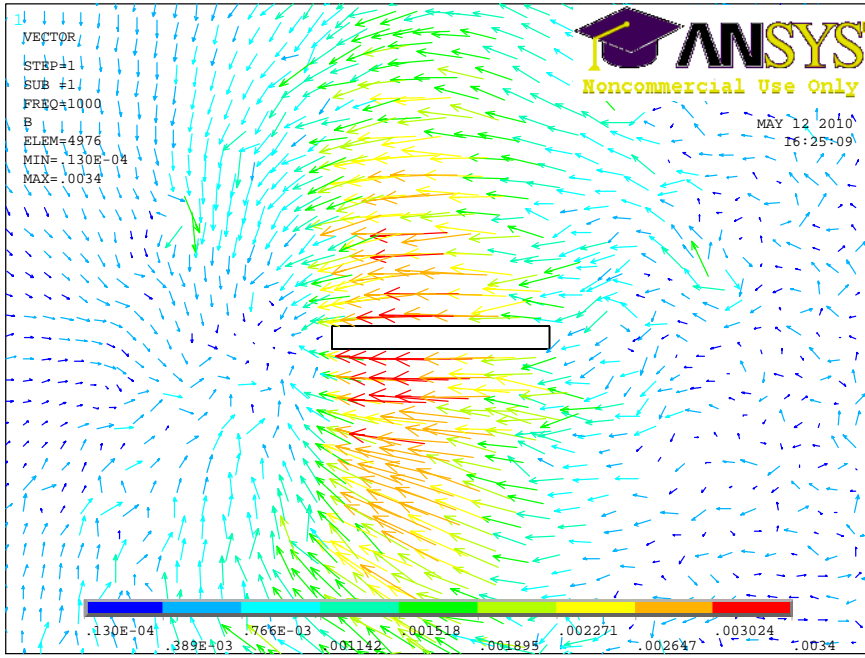


Fig. 2-26 경사각도 30°일 때의 자기장 수치해석 결과

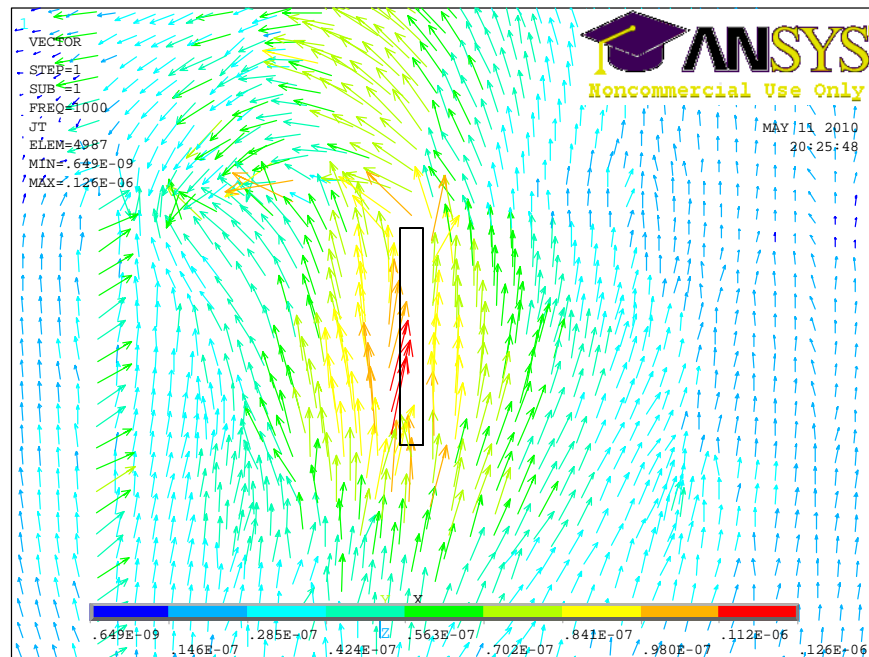
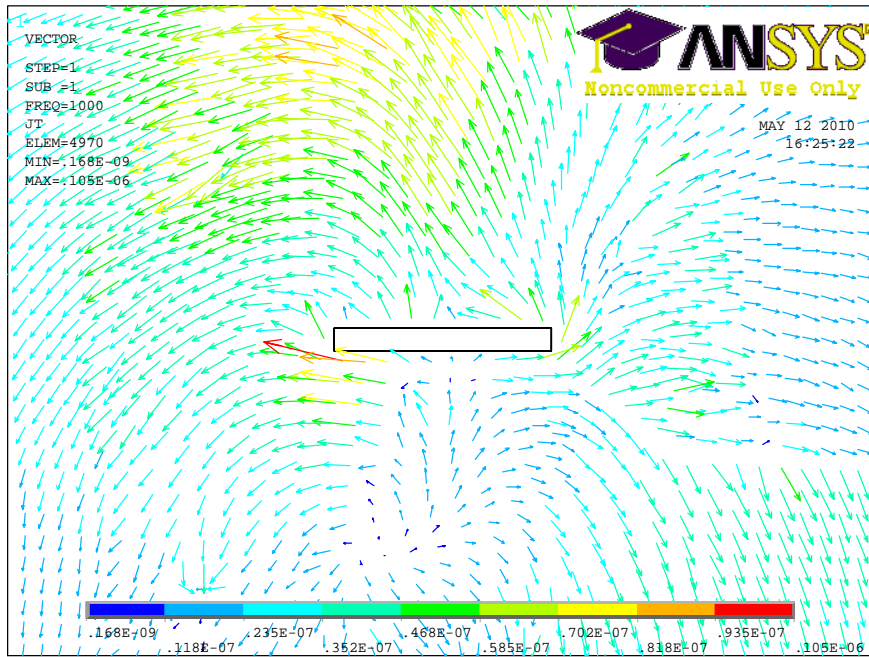
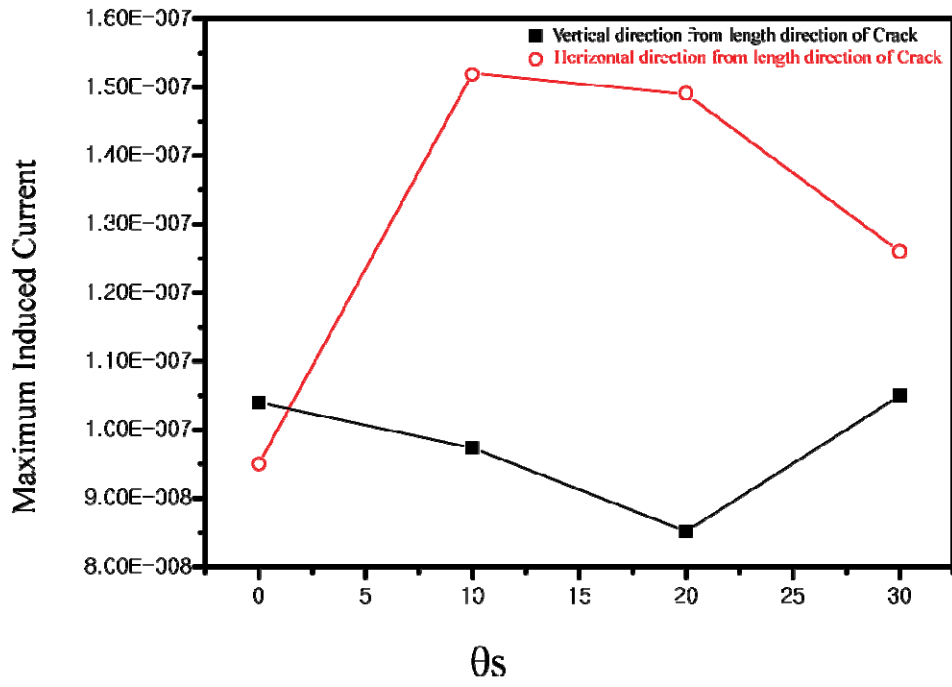
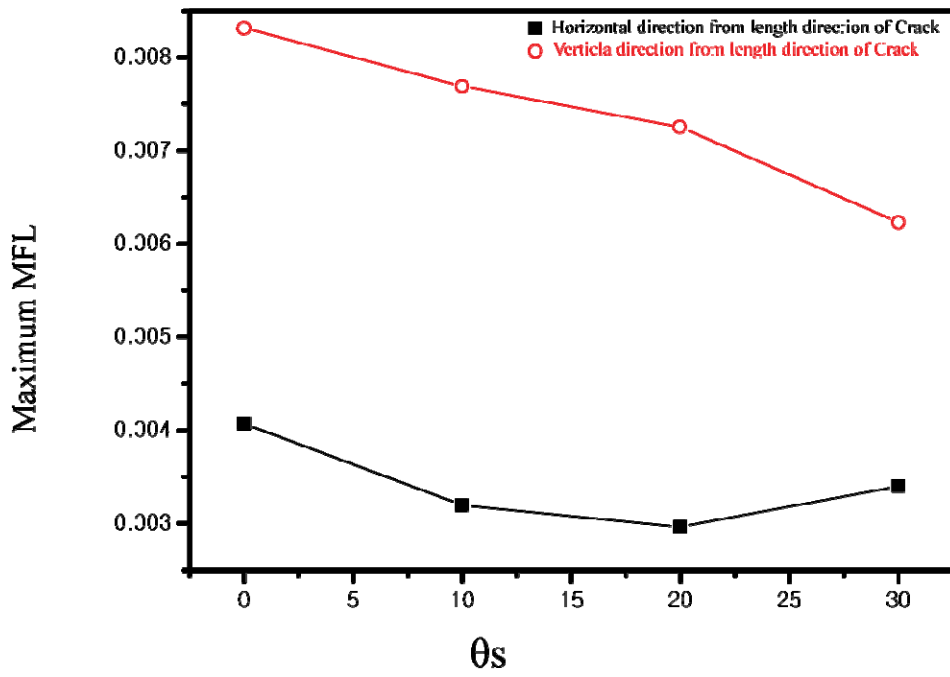


Fig. 2-27 경사각도 30°일 때의 전기장 수치해석 결과



(a) 유도전류의 변화



(b) 누설자속의 변화

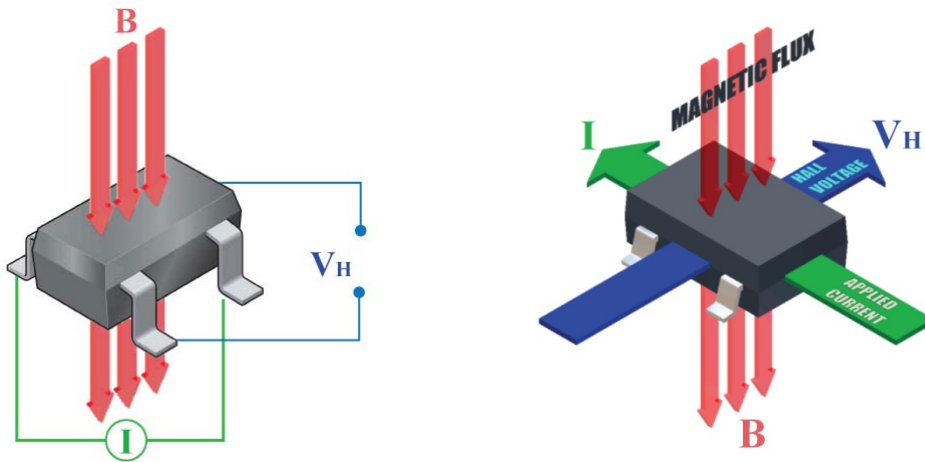
Fig. 2-28 θ_s 의 크기에 따른 복합유도전류-누설자속의 변화

제 3절 신호처리

1. 직류 증폭

홀 효과 현상을 이용한 홀 센서는 전류가 흐를 수 있는 반도체 물질에 정전류 I를 흐르게 하고 전류에 직각인 방향으로 B를 인가하면 Lorentz Force가 전자의 흐름에 작용하게 되어 전자 분포의 왜곡이 발생하게 된다. 이로 인해 출력 양단에는 전위차가 발생하고 이러한 차이는 센서 면에 수직으로 입사하는 외부자장의 세기에 비례하게 된다. 이러한 홀 전압(V_H)은 전술한 바와 같이 Eq. (24)로 나타낸다. 여기서 k는 홀 상수이며, θ 는 감자면(減磁面)에 입사되는 자기장의 각도이다.

$$V_H = k \cdot I \cdot B \cdot \cos \theta \quad (24)$$



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

Fig. 2-29 홀 효과의 원리

자기카메라는 이러한 누설 자속 분포에 따른 홀센서의 출력전압 즉, 전위 차이를 차동식 연산증폭기 (이하 OP-Amp)를 이용하여 측정한다. 고정밀 차동 증폭을 위하여 높은 동상신호제거비(CMRR, Common Mode Rejection Ratio)를 갖는 INA128를 도입하여 Fig. 2-15와 같은 회로를 구성하였다. INA128는 한 개의 외부 저항(R_G)을 연결하는 것만으로도 쉽게 0~80dB의 이득값을 얻을 수 있다. 차동 증폭 회로에 연

결되는 두 개의 전압 플로어(A₁, A₂)들은 작은 오차를 갖으면서도 높은 입력 임피던스를 보인다. 또한, 구동 저항이 R_G이상으로 불균형 되는 것을 허용할 수 있다. 한편, 차동 증폭회로의 이득은 Eq. (25)에 나타난 바와 같이 R₅=R₇, R₈=R₉일 때 R₅과 R₈에 의하여 결정된다.

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

$$\begin{aligned}
 Gain &= \frac{R_8}{R_5} \left(1 + \frac{2R_4}{R_G} \right) = \frac{40k\Omega}{40k\Omega} \left(1 + \frac{2 \cdot 25k\Omega}{R_G} \right) \\
 &= 1 + \frac{50k\Omega}{R_G}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

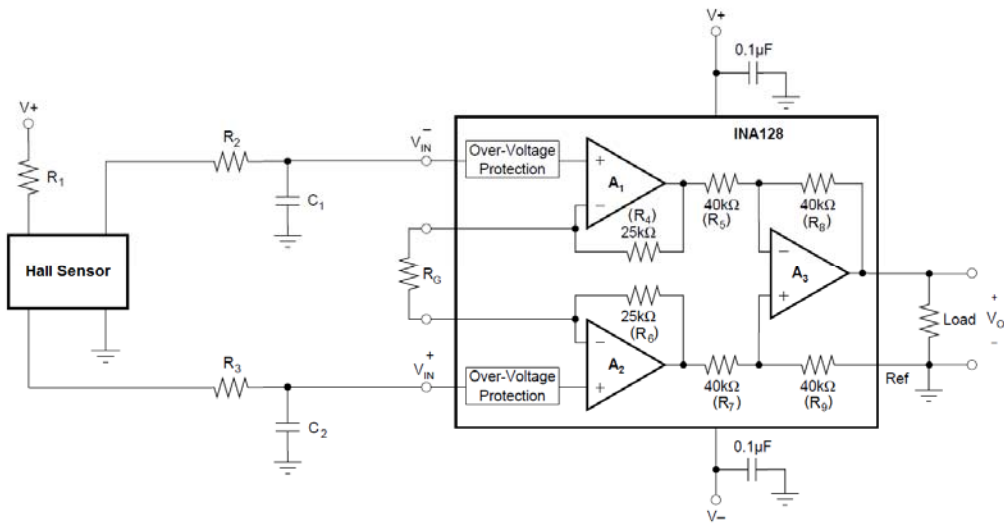


Fig. 2-30 홀센서와 직류증폭회로(INA128)의 회로도

2. 교류 증폭

Fig.2-29는 본 연구에서 교류증폭에 활용한 회로도를 나타낸다. 교류증폭은 교류 경사형 자화기와 같은 교류자원을 시험편에 인가하고, 결합주변에서 발생하는 교류누설자속 및 전기장의 왜곡에 의하여 발생하는 교류형 자기장의 세기를 검출할 때 유효하게 사용될 수 있다. 즉, 시험편 주변에 발생하는 잔류자화 및 오스테나이트계스테인레스강과 같은 상자성체(오스테나이트조직)와 강자성체(마르텐사이트조직)가 혼재된 시험편에서 직류성분인 잔류자화 및 강자성체를 소거하려고 HPF를 도입한다.

본 연구에서는 홀센서 양 선단에 각각 수동소자에 의하여 구성되는 고대역통과필터(HPF, High-Pass-Filter, Fig.2-29의 붉은 색 부분)를 도입하여 교류형 자화기 및 결합의 존재에 기인한 교류 신호만을 추출하였다.

이러한 교류 증폭은 전술한 직류증폭과 같이 Eq. (25)에 나타난 식으로 표현할 수 있으며, R_G 의 수치에 의하여 그 증폭비를 조절할 수 있다. 또한, C_1, C_2, R_2, R_3 에 의하여 조절되는 차단주파수(f_c)는 Eq. (26)에 의하여 표현될 수 있다.

본 연구에서는 증폭비 60dB, 차단주파수 300Hz인 교류증폭회로를 주로 사용하였다.

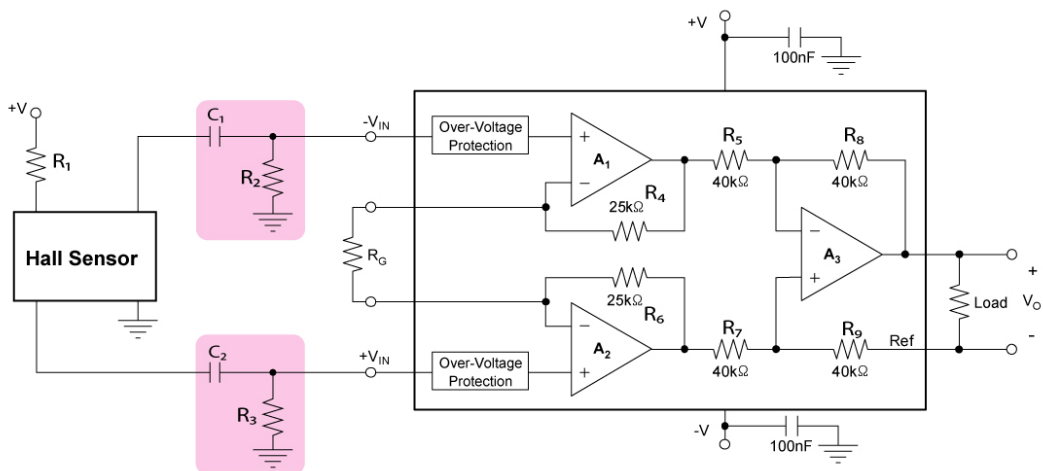


Fig. 2-31 홀센서와 교류증폭회로(INA128)의 회로도

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (26)$$

한편, 상술한 방법에 의하여 증폭한 교류신호의 진폭은 결함의 크기와 밀접한 관계를 가진다. 따라서, 진폭을 정량적으로 측정하는 것은 결함의 위치 및 크기를 추정하기 위한 매우 중요한 기술 중 하나이다. 특히, AD 변환을 하여 마이크로프로세서 또는 컴퓨터에 입력하려면 이러한 진폭을 직류신호로 변환해야 한다. 본 연구에서는 교류 자기장의 진폭을 직류신호로 변환시키기 위하여 Fig.2-32에 나타낸 바와 같은 교류-직류변환회로를 도입하였다.

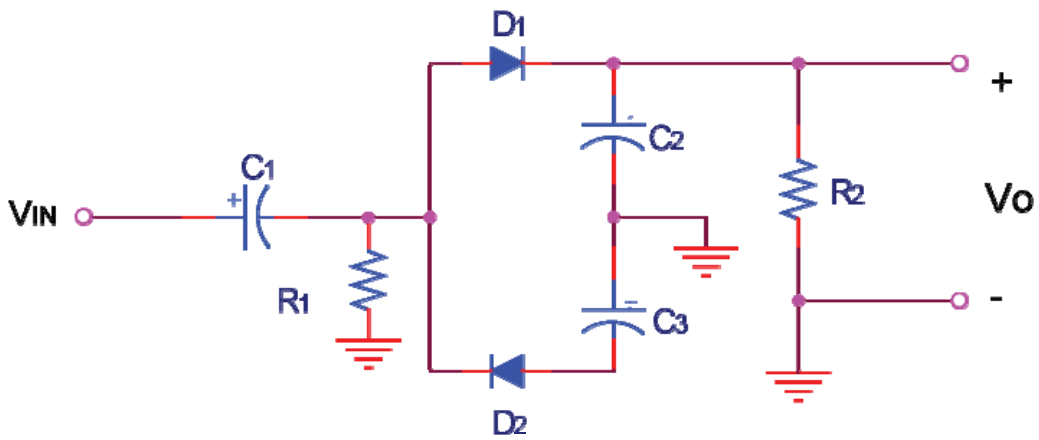


Fig. 2-32 교류-직류신호 변환 회로

3. AD 변환기

결함으로부터 발생한 누설 자속 분포는 배열된 자기센서 및 차동 증폭회로, 아날로그 LPF에 의하여 높은 S/N비를 가진 전기신호의 분포로 변환된다. 변환된 전기신호의 배열은 A/D 변환기와 μ -processor에 의하여 저장, 연산 및 처리 된다. 본 연구에서는 Fig. 2-17에 나타난 바와 같이 13bit 연속 근사 레지스터(Successive Approximation Register, 이하 SAR) A/D변환기인 Analog Devices사의 AD7329를 전용 A/D변환기로 채택하였다. AD7329는 SAR를 사용하여, 값을 순차적으로 증가시키는 것이 아니라 최상위 bit부터 순서대로 하위 bit 방향으로 D/A변환기를 통해 비교기에서 값을 비교, 수정하여 아날로그 입력 전압에 근사시키는 방식이다. 다른 A/D 변환기에 비해 구성회로가 간단하고, 비교적 빠른 변환 시간과, 입력 신호에 가장 가까운 디지털 신호를 생성시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, 최대 $\pm 10V$ 바이폴라 입력에 8:1 입력 멀티플렉서를 갖춰 8채널을 디지털화할 수 있고, 고속 시리얼 인터페이스를 갖추고 있어 전반적인 시스템 공간을 최소화하고 채널 밀도를 증가시킬 수 있다. 본 연구에서 구성한 A/D변환기는 ± 1 LSB 오차와 1MS/S의 변환시간을 가지며, $\pm 10V$ 입력에 2.441mV의 분해능을 가진다.

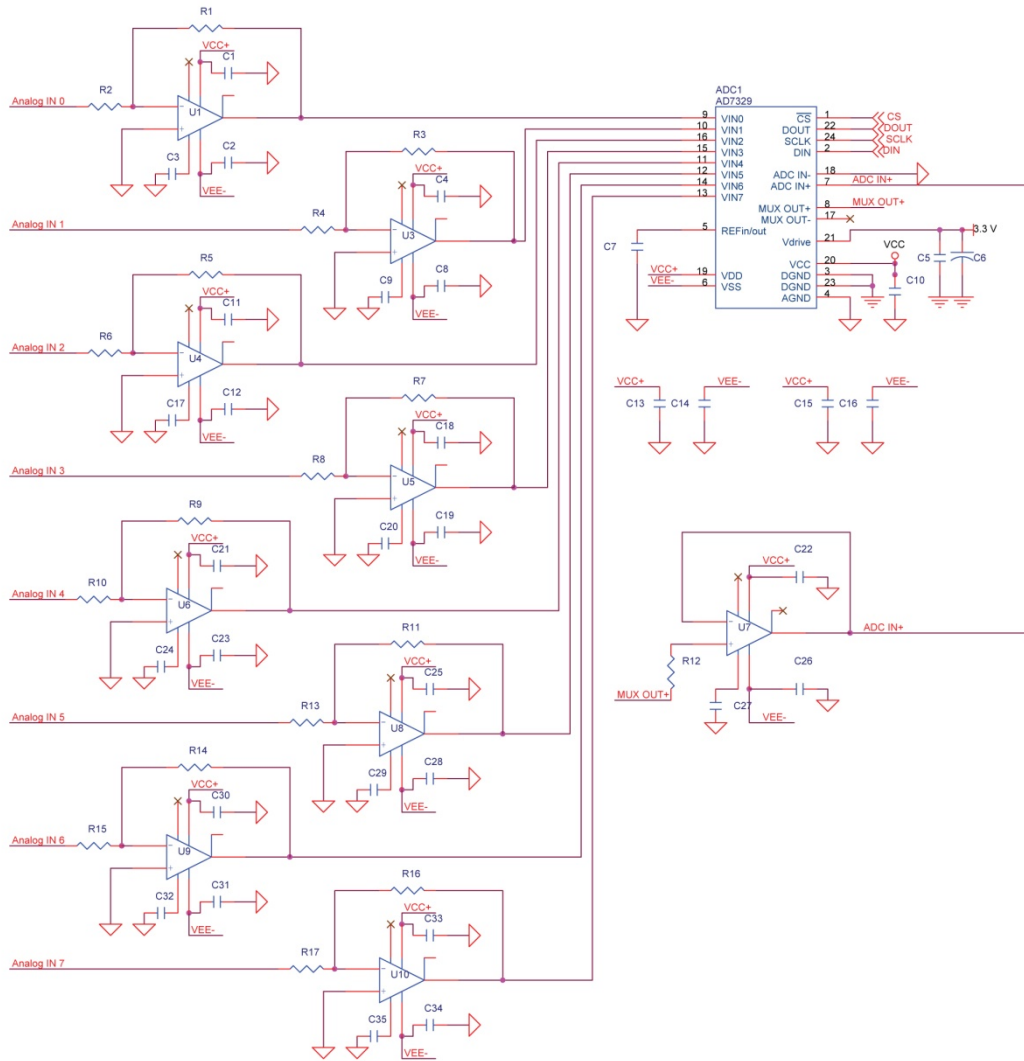


Fig. 2-33 A/D 변환기 회로

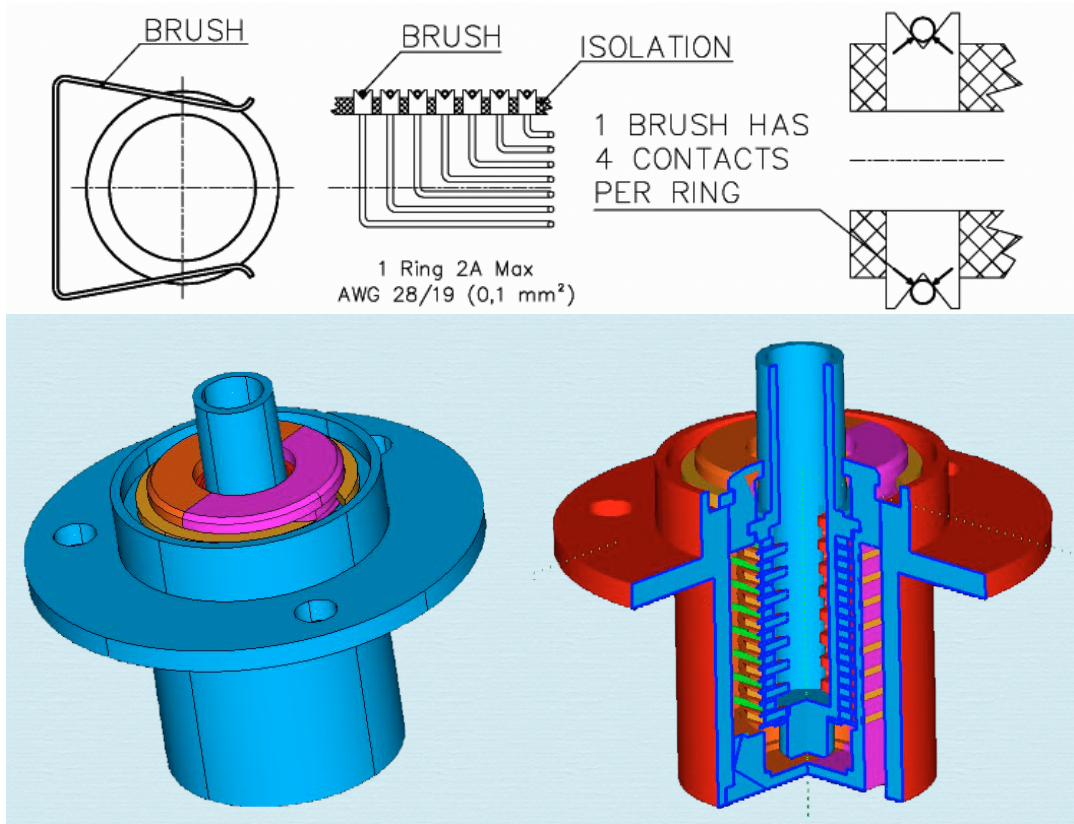
4. 슬립링 및 통신

본 연구는 좁고 긴 형태의 배관 내의 결함을 스캔형 자기카메라에 의하여 검출하는 것을 최종 목표로 하고 있다. 따라서, 배관 내에 위치한 센서 및 증폭회로와 배관밖에 위치한 컴퓨터를 연결하는 배선이 배관 내부 스캔 횟수에 비례하여 꼬이게 된다. 일반적으로 10m 정도의 배관 내부를 검사하는데 약 340회 정도의 회전수가 발생함을 고려할 때, 동일한 횟수의 배선의 꼬임이 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 센서, 증폭회로 및 AD 변환기를 배관 내부에 설치한 후, 디지털식 시리얼 통신회로에 의하여 배선을 최소화하고 이를 슬립링을 통과시킨 후 컴퓨터에 전달함으로써, 배선의 꼬임을 최소화하였다. 이때 슬립링에는 시리얼 통신신호 및 전원 공급선만 통과하도록 설계하였다.

슬립링은 회전체와 고정체로 이루어져 있는 장치나 기기에 회전체와 고정체간에 전기적 신호와 전원을 공급하는 장치이다. 전술한 바와 같이 고정체에서 회전체에 전기적 신호나 전원을 공급해야 할 경우 전선만으로 연결하면, 정회전과 역회전의 반복이 아닌 일방향으로의 지속적인 회전에 의하여 전선의 꼬임 및 이에 기인한 단선을 유발하게 된다. 따라서, Fig.2-34에서 처럼 링으로 된 도체에 브러쉬등과 같은 접촉자를 접점시켜 회전체가 한방향으로 지속적인 회전을 하더라도 접점을 유지시켜 주는 구조의 슬립링에 의하여 이러한 문제를 해결할 수 있다.

슬립링은 크게 브러쉬방식과 와이어방식, 수은방식이 있는데, 브러쉬방식은 가장 많이 사용되는 방식이긴 하나 접촉저항이 크고 노이즈 발생이 많아 통신 등과 같은 데이터 신호 전송에는 적합하지 않다. 반면, 와이어방식은 브러쉬방식에 비해 접촉저항이 낮고 노이즈 발생이 적어 신호 전송용으로 적합하나 대전류를 사용하기에는 무리가 따른다. 이 두 방식은 도체와 접촉자가 마모가 되는 단점이 있다. 수은방식은 액체형 금속인 수은(Mercury)으로 접촉하므로 접촉저항이 매우 낮고, 마모에 의한 유지보수가 필요없다. 하지만, 가격이 비싸며, 접점수가 적다는 단점이 있다. 이 밖에도, 도체와 접촉자 간에 10~20um 정도의 공간을 두어 고정체의 정전용량값을 계산하여 회전체에서 받아 전기적인 신호로 변환시켜주는 비접촉방식과

공기, 유압, 가스, 광신호 등을 같이 사용할 수 있는 특수한 슬립링도 있다. 본 연구에서는 일반적으로 사용하는 브러쉬방식을 도입하였다.



자료출처:http://www.servo-drive.com/rotary_slip_rings.php
Fig. 2-34 브러쉬방식 슬립링

이러한 브러쉬형 슬립링을 적용하는데 가장 큰 문제점은 전술한 바와 같이 잡음의 혼재이었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 회전체와 고정체로 이루어진 자기카메라 로봇과 콘트롤패널 간에 데이터를 전송함에 있어 저전압 차분 신호(Low Voltage Differential Signaling, 이하 LVDS) 방식을 도입하였다. LVDS는 RS-422, RS-485등과 같은 다른 차분 신호방식에 비해 낮은 차분 전압과 낮은 전력을 이용한 신호전송방법으로 최대 655Mbps의 속도까지 지원된다. 또한, LVDS는 자체가 차분 신호를 이용하기에 동상신호제거 특성이 있으며, 신호의 진폭이 작아 저

전력이고, 수신단의 Termination Resistor를 통해 전송케이블의 특성 Impedance을 맞추므로 Impedance Mismatch로 인한 Reflection이 적다. Fig.2-35는 LVDS의 연결구조를 나타낸다. 송신기에서 두 개의 전송선을 통해 차분 신호를 보내고 수신기에서는 Termination Resistor를 통해 양호한 차분신호를 받아들여 논리레벨을 판단한다. Termination Resistor는 전송선의 특성에 따라 $90\sim 132\Omega$ 을 사용한다. 따라서, 본 연구에서는 LVDS를 도입하여 슬립링으로 인한 노이즈를 최소화 하였으며, A/D 변환기의 변환 속도이상의 신호전송속도를 확인할 수 있었다.

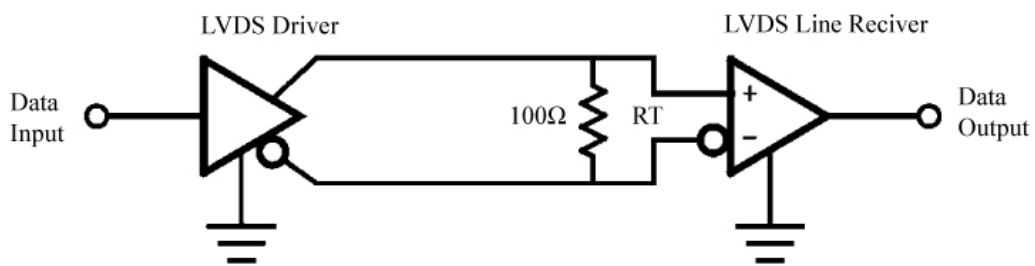


Fig. 2-35 저전압 차분 신호

5. USB 인터페이스

A/D 변환기에 의하여 변환된 데이터신호는 전송한 LVDS 통신으로 컨트롤박스의 USB인터페이스로 전송된다. 전송된 데이터신호는 소프트웨어에서 분석 및 저장을 할 수 있도록 USB전용케이블을 통하여 컴퓨터에 전송된다.

USB인터페이스는 FTDI사의 FT2232HL을 적용하였다. FT2232HL은 하나의 디바이스에 두개의 USB Chip이 있으며 각 USB Chip은 두개의 범용 비동기 송수신기 (Universal Asynchronous Receiver Transmitter, 이하 UART) 또는 선입선출 콘트롤러 (First In First Out, 이하 FIFO)를 가지고 있어(Fig.2-36), 시스템 구성 시 공간활용도가 높으며 다양한 표준 직병렬 인터페이스에 적용할 수 있다.

본 연구에서는 Fig.2-37과 같이 USB 인터페이스를 구성하였으며, 최대 초당 8Mbyte 전송률을 제공하는 병렬 FIFO 방식을 적용하였다.

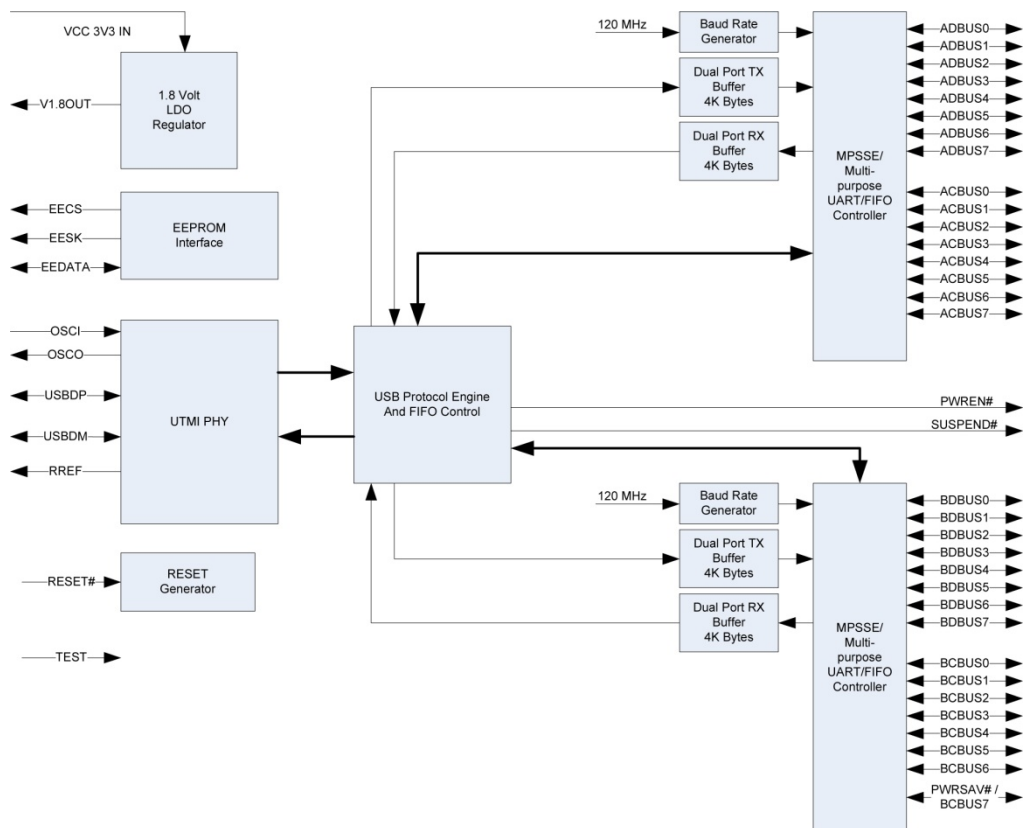


Fig. 2-36 FT2232HL Block Diagram

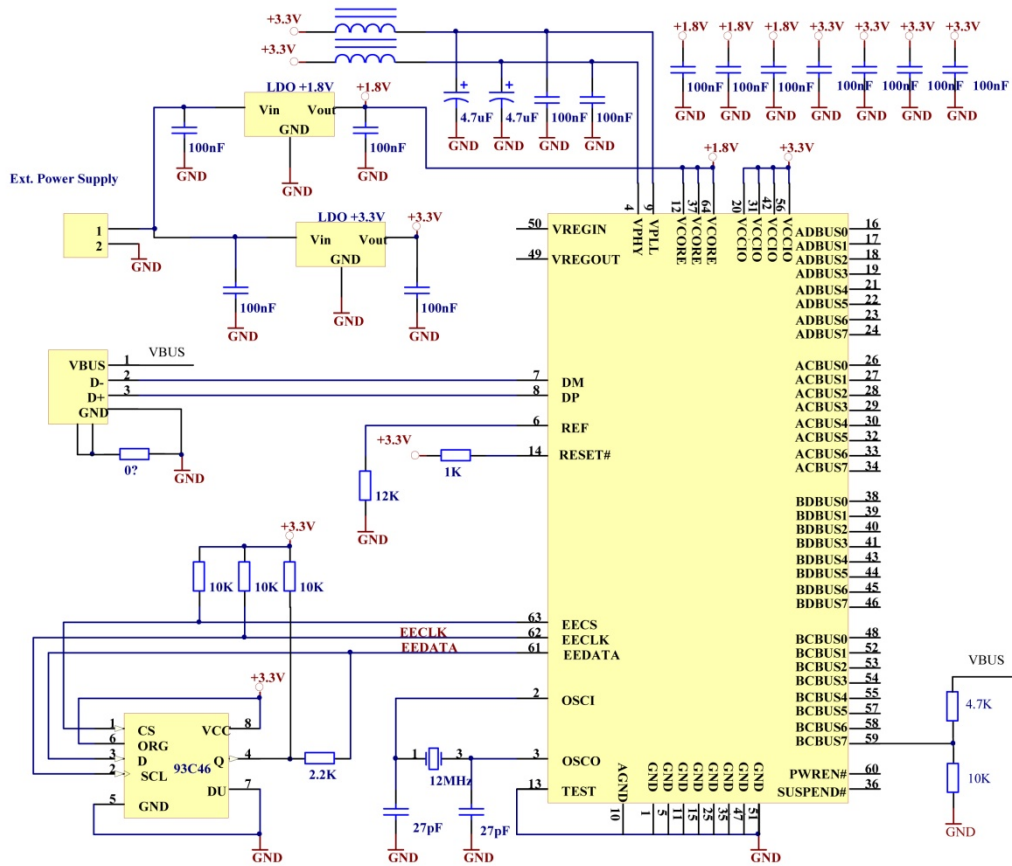


Fig. 2-37 USB 인터페이스 회로도

제 4절 결함정량평가

본 연구에서 제안하는 스캔용 로봇 시스템을 이용하여 취득하는 자기영상 (Fig.2-38)은 자기장 분포(V_H)를 스캔방향(θ)으로 미분한 영상($\partial V_H/\partial\theta$)이며, 결함의 방향 및 길이, 깊이에 따라 그 크기가 달라진다. 종래 저자들의 연구에 의하여 Eq. (27)이 결함을 정량 평가하는데 유효함을 밝힌바 있다. [19,34]

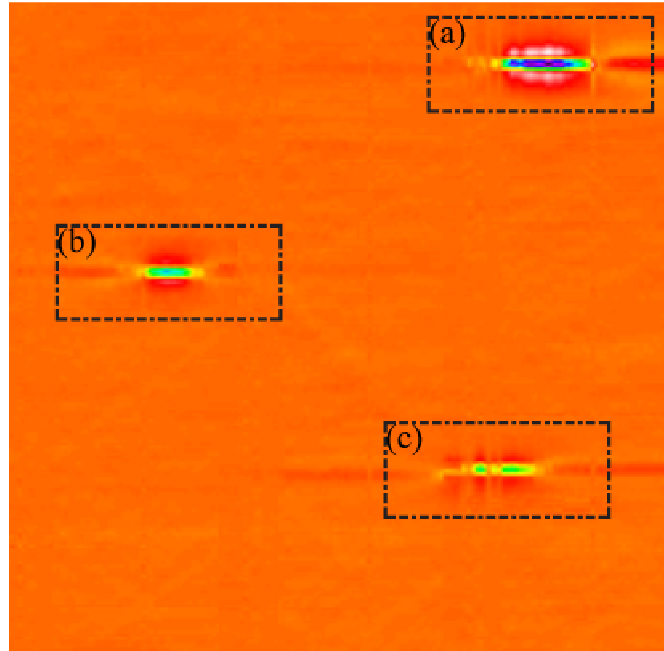


Fig. 2-38 자기영상

$$\left. \frac{\partial V_H}{\partial \theta} \right|_{TOTAL} = \sum_{i=1}^{L_c/2S} \left[\text{Max} \left(\frac{\partial V_{H,i}}{\partial \theta} \right) + \left| \text{Min} \left(\frac{\partial V_{H,i}}{\partial \theta} \right) \right| \right] \quad (27)$$

여기에서 L_c 와 S 는 각 결함의 길이와 측정시스템의 공간분해능을 나타낸다. 또한, $\text{Max}(\partial V_H/\partial\theta)$ 와 $\text{Min}(\partial V_H/\partial\theta)$ 은 최대값군과 최소값군을 의미한다. 본 연구에서 S 는 회전속도에 따라 상이하다. 또한, 결함의 길이는 취득한 자기영상으로부터 얻을 수 있으나, 작업자에 따라 그 해석 결과가 달라질 수 있다.

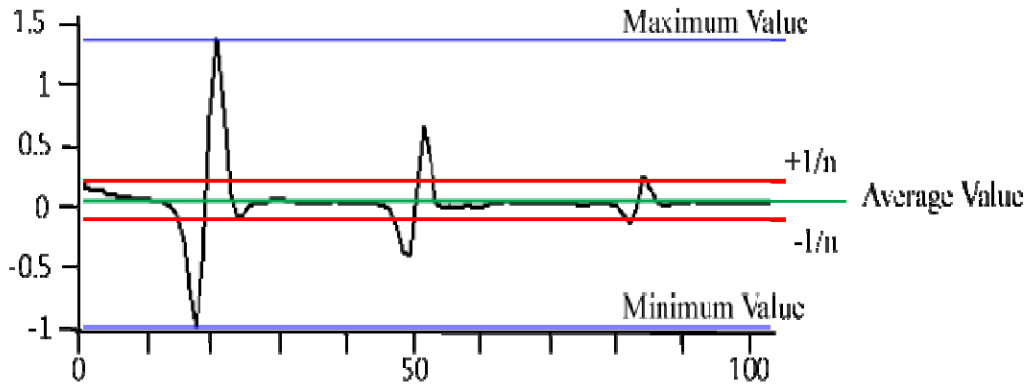


Fig. 2-39 1/n 알고리즘

따라서, 본 연구에서는 Fig.2-39에 나타난 바와 같이 1/n 알고리즘을 도입하였다. 즉, 전체 $\partial V_H / \partial \theta$ 자기영상에서 최대치 및 최저치를 전체의 평균값으로부터 n등 분하여 중심으로부터 각각 1/n에 해당하는 신호 이상을 결함정보로 취급하였다. 여기에서 한 예로 상기 Fig.2-38의 (a), (b), (c)를 각각 1/4 알고리즘을 적용하면, Fig.2-40과 같으며, 결함의 $\pm 1/4$ 등고선 이상의 값을 Eq. (27)의 $L_C / 2S$ 대신에 입력하여 얻어진 Eq. (28)으로부터 결함을 정량적으로 추정할 수 있다.

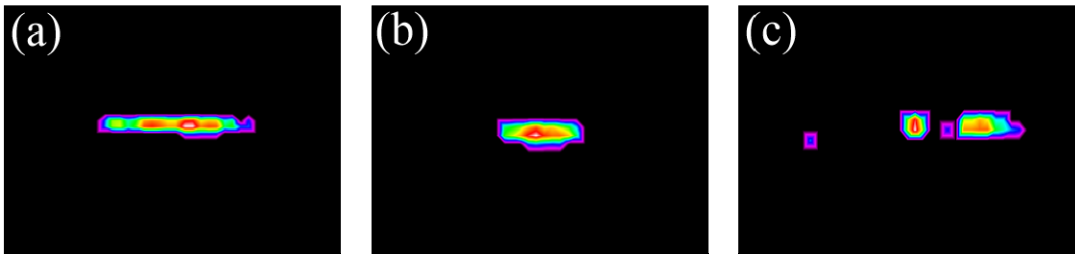


Fig. 2-40 1/4 알고리즘 적용례

$$\left. \frac{\partial V_H}{\partial \theta} \right|_{TOTAL, MODIFY} = \sum_{i=1}^{1/4(MAX-AVR)} \left[Max \left(\frac{\partial V_{H,i}}{\partial \theta} \right) \right] + \sum_{i=1}^{-1/4(MAX-AVR)} \left[Min \left(\frac{\partial V_{H,i}}{\partial \theta} \right) \right] \quad (28)$$

따라서, 다음 Eq.(29)를 이용하면 결함의 체적을 정량적으로 평가할 수 있다

$$Vol_{CRACK} = C_1 \cdot \left(\frac{\partial V_H}{\partial \theta} \Big|_{TOTAL,MODIFY} \right)^{C_2} \quad (29)$$

즉, 1/n 알고리즘을 이용하면 종래의 결함 정량평가 연구에서의 인적요인으로 인한 결함의 L_C 관별 오차가 없어 보다 정확한 결함의 정량평가가 이루어진다.

제 3장 시스템 제작

상술한 원리에 의하여 좁고 긴 배관형태의 하나인 로터 중심공의 결함을 탐상하기 위하여 스캔용 로봇 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 로터 보어 증공축 내 측면의 축방향 및 원주방향 결함을 탐상하기 위하여, 다음과 같은 요소 및 소프트웨어로 구성되며, 더욱 구체적인 내용은 이하 각 절에서 설명한다.

- (1) 센서부(LIHaS)
- (2) 직류 또는 교류 경사형 전자석
- (3) 직류 또는 교류 증폭부
- (4) A/D 변환 및 신호전송부
- (5) USB 인터페이스
- (6) 전원부
- (7) 컴퓨터
- (8) 자기영상 취득/해석 프로그램
- (9) 로터 중심공 스캔용 로봇
- (10) 컨트롤박스

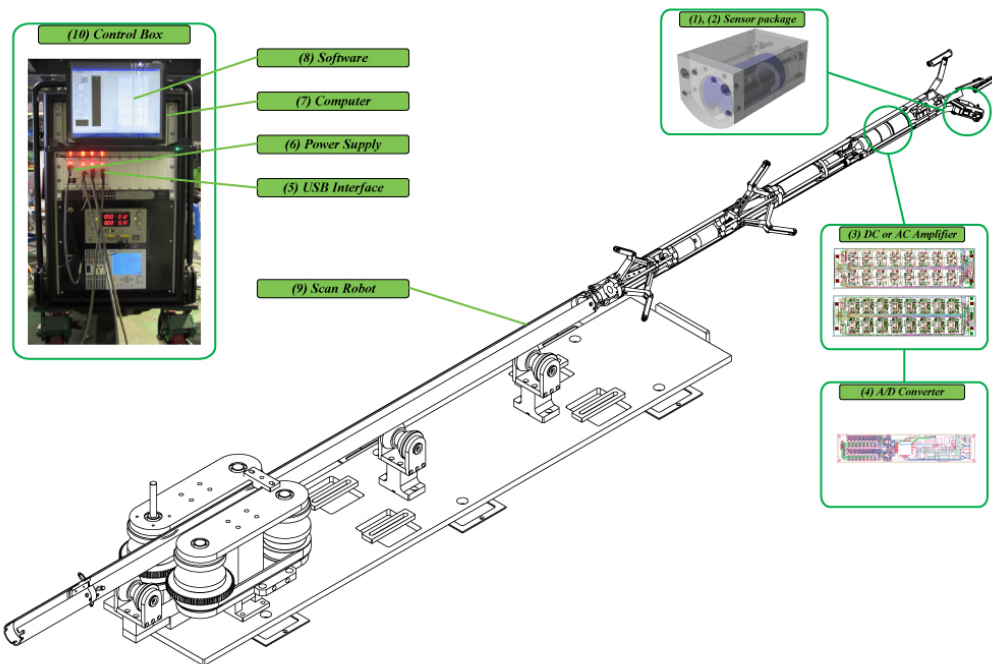


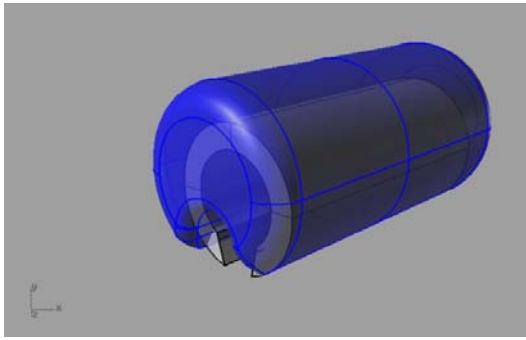
Fig. 3-1 로터 중심공 스캔용 로봇 시스템

제 1절 센서 및 신호처리부

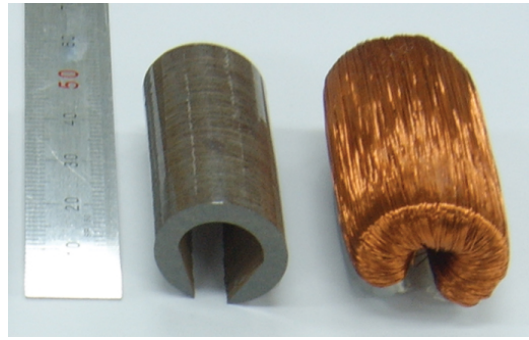
1. 경사형 전자석과 일체화된 선형 배열 홀센서

본 연구에서는 Fig.3-2 및 Fig.3-3에 나타난 바와 같이 실리콘강판을 경사형으로 배열한 코어에 코일(Fig.3-2(a))을 감고, 전도성 에폭시로 일체화(Fig.3-3(a), (b))하였다. 경사형 전자석은 유한요소해석법 결과에 근거하여 0.35mm 두께의 무방향성 실리콘강판을 와이어가공으로 형상을 만들어 이를 경사형($\theta_s=10^\circ$)으로 배열하고, 0.2mm 구리선에 의하여 약 1,300회 권선하였다.

한편, 상술한 경사형 전자석에 의하여 발생하는 자기장 또는 전자기장을 시험편에 인가하고, 결함의 존재에 기인하는 누설자속을 검출하기 위하여 선형 배열 홀센서(Linearly Integrated Hallsensor Array, 이하 LIHaS)를 이용하였다. LIHaS는 Fig.3-3(b, c)에 나타난 바와 같이 NiZn Ferrite에 InSb 홀센서를 자화방향과 수직으로 직선 배열하였으며, 각각의 홀센서의 간격은 0.52mm이다. LIHaS는 Fig.3-3(b)에 나타난 바와 같이 상기 경사형 전자석의 자극과 자극사이에 배치하였으며, 피측정체인 배관이 원통형임을 고려하여, 그 형태를 반원형으로 하였다. 이러한 반원형 형상을 가능하면서 강성을 갖게 하려고 Fig.3-3(c)에 나타난 바와 같이 FR-4 PCB(강성의 실현)와 연성회로케이블(Flexible Printed Circuit Cable, 반원형의 실현)을 일체형으로 제작한 Rigid-Flexible PCB에 LIHaS를 30um 직경의 Au wire으로 결선하였다. 또한, LIHaS를 에폭시수지로 보호함으로써, 외부충격과 절연, 일정한 Lift-off를 유지할 수 있었다. 한편, Fig.3-3 (a), (b)와 같이 반원형태를 가지는 전자석 일체형 LIHaS의 발열 문제를 해결하기 위하여 열전도가 잘되고 절연 특성이 우수한 특수한 에폭시수지로 일체화시켰다.

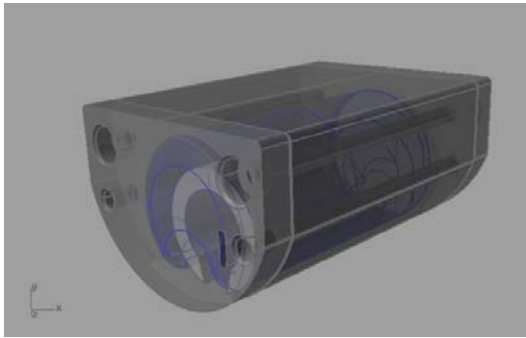


(a) 경사형 전자석 모델

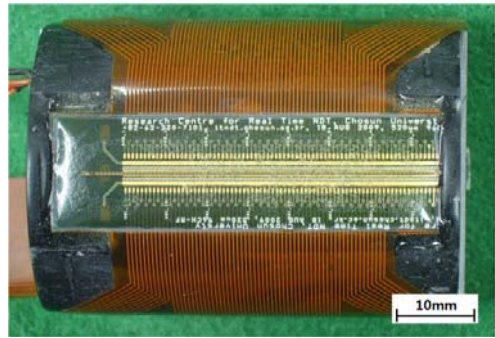


(b) 경사형 전자석 실물

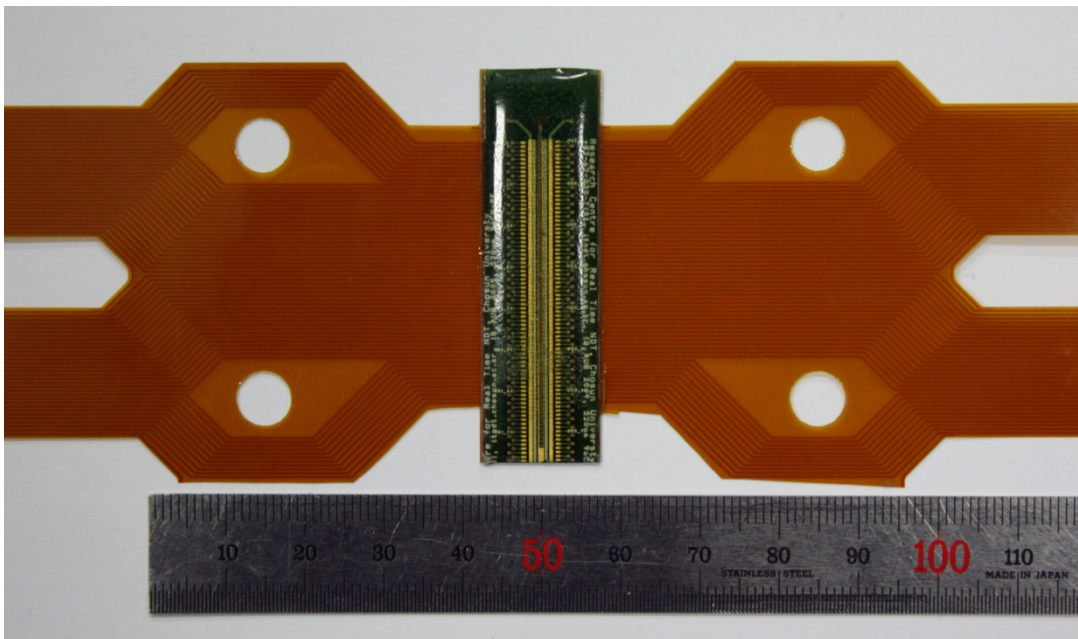
Fig. 3-2 경사형 전자석



(a) 경사형 전자석 패키지 모델



(b) 경사형 전자석 패키지 및 LIHaS 실물

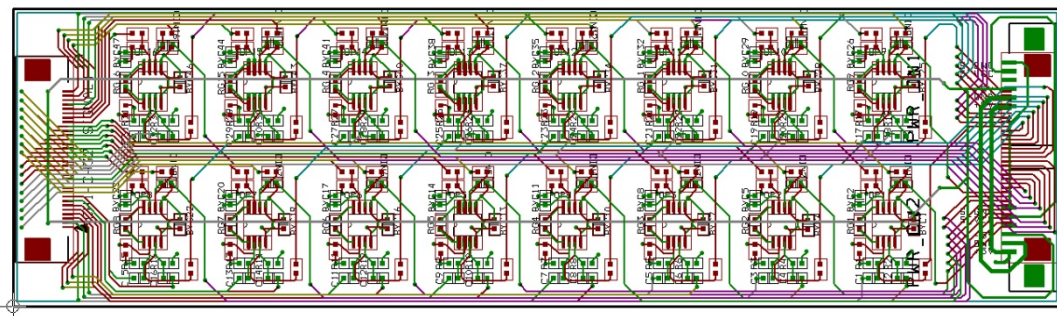


(c) 선형 배열 홀 센서

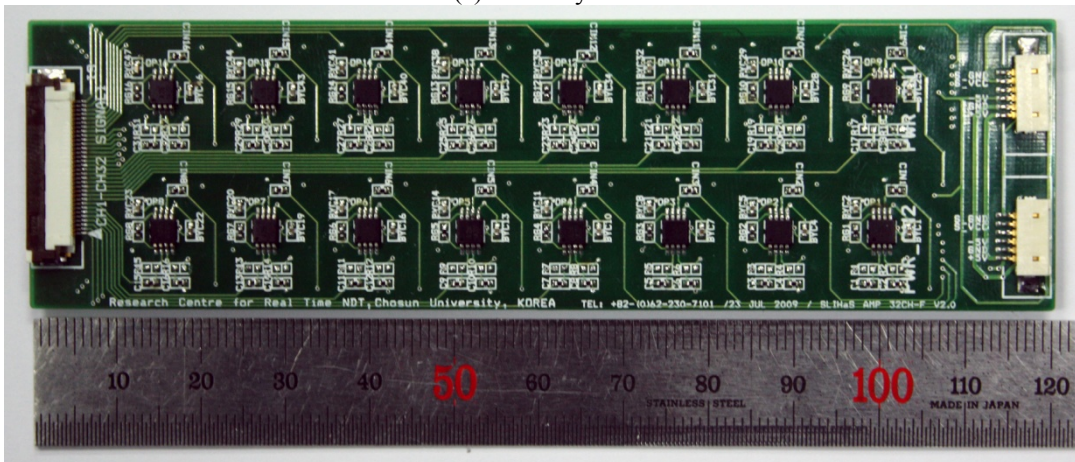
Fig. 3-3 경사형 전자석과 일체화 된 선형 배열 홀 센서

2. 직류형 신호처리회로

상기 경사형 전자석에 직류전류를 인가하였을 때, 결함으로부터 발생하는 누설 자속은 직류성분이 유효한 정보를 가지게 된다. 따라서, Fig.3-4와 같은 차동식 연산 증폭기 (이하 OP-Amp)를 제작하였다. 상술한 바와 같이 비교적 높은 동상신호제거비(CMRR, Common Mode Rejection Ratio)를 갖는 INA126을 이용하여, 60dB의 증폭비를 실현하였다. INA126은 동상신호제거비 및 주파수응답특성이 INA128에 비하여 다소 열악하나, 크기 제한을 해결하기 위하여 적용하였다. 결과적으로 로터 중심공의 결함을 검출하기 위한 로봇(Fig.3-1)내에 실장하기 위하여, PCB의 형상은 좁고 긴 형태(120mm*34mm)로 설계하였으며, 그 안에 32채널의 증폭회로를 실장하였다.



(a) PCB Layout

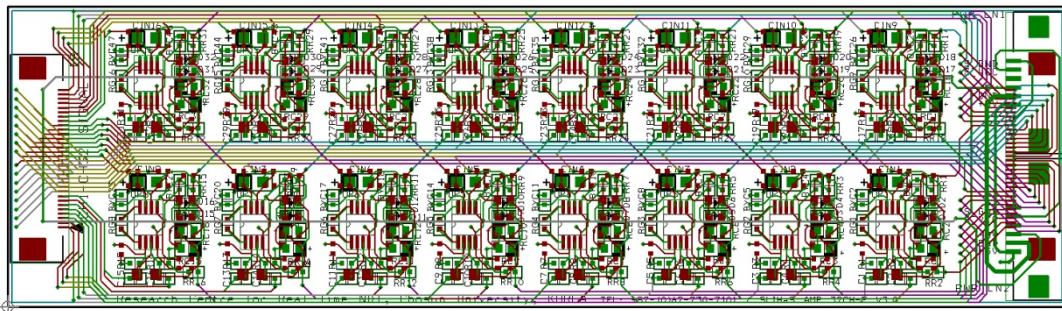


(b) 직류증폭회로 실물

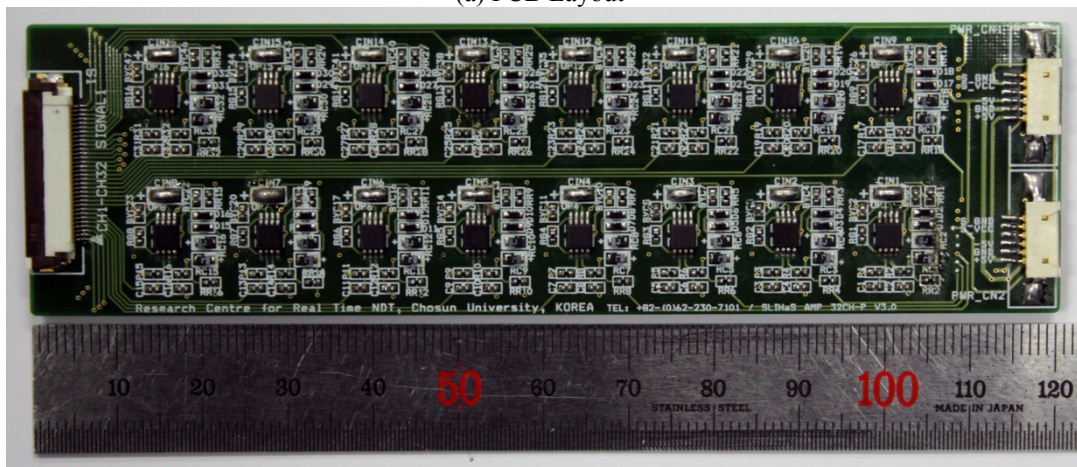
Fig. 3-4 직류증폭회로

3. 교류형 신호처리회로

상기 경사형 전자석에 교류전류를 인가하였을 때, 결함으로부터 발생하는 누설 자속은 교류성분이 유효한 정보를 가지게 된다. 따라서, Fig.3-5와 같은 교류형 차동 연산증폭기 (이하 OP-Amp)를 제작하였다. 상술한 직류형 신호처리회로와 마찬가지로 비교적 높은 동상신호제거비(CMRR, Common Mode Rejection Ratio)를 갖추면서 그 크기가 INA128에 비하여 작은 INA126을 이용하여, 60dB의 증폭비를 실현하였다. 한편, 로터 중심공의 결함을 검출하기 위한 로봇(Fig.3-1)내에 실장하기 위하여, PCB의 형상은 좁고 긴 형태(120mm*34mm)로 설계하였으며, 그 안에 32채널의 교류증폭회로 및 교류-직류변환회로를 실장하였다.



(a) PCB Layout



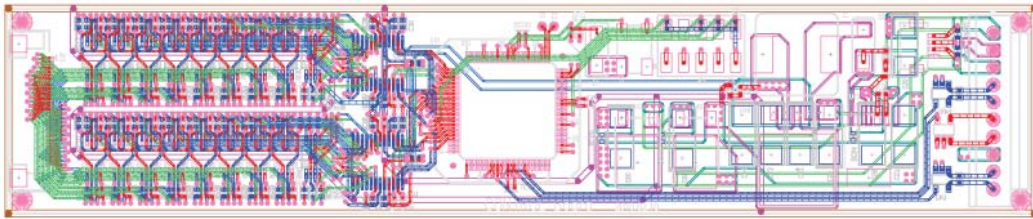
(b) 교류증폭회로 실물
Fig. 3-5 교류증폭회로

4. A/D 변환기

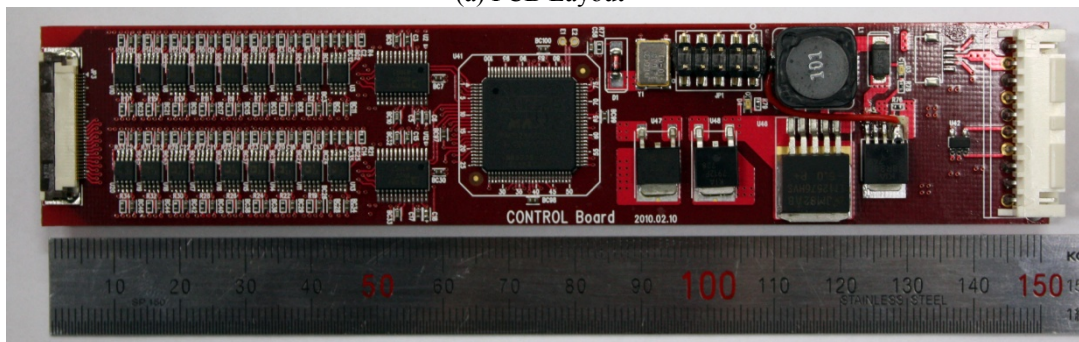
본 연구에서는 Fig.3-6과 같이 AD7329에 의하여 구성되는 축차근사형 13비트 AD변환기를 제작하였다. 입력범위는 $\pm 10V$ 로서, $2.441mV$ 의 분해능을 가지며, 8:1 입력 멀티플렉서를 갖춰 8채널을 디지털화할 수 있도록 하였다. 따라서, PCB의 양면에 2개씩 총 4개의 AD변환기를 구비하여, 상술한 Fig.3-4 및 Fig.3-5의 32개의 출력을 AD변환할 수 있다.

AD변환기에 의한 디지털신호는 상술한 LVDS 통신칩(DS90LV011A)에 의하여 순차적으로 시리얼 통신신호로 변환된다.

또한, 각 AD변환기의 동기를 맞추기 위하여 CPLD(Complex Programmable Logic Device, EPM3128)을 도입하였다. CPLD는 LVDS에 의한 통신신호도 동기화한다.



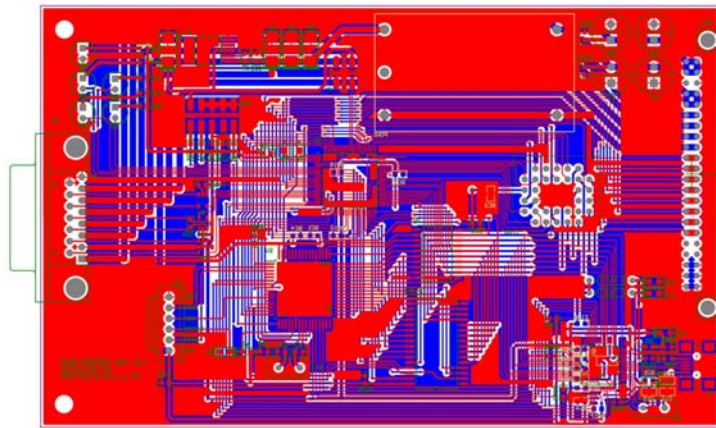
(a) PCB Layout



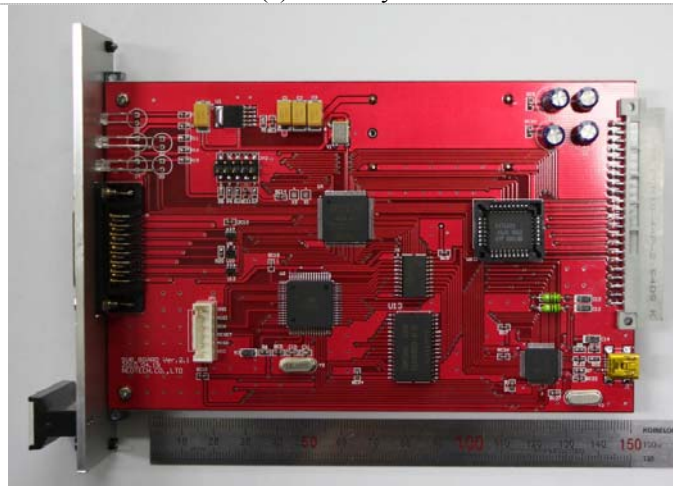
(b) A/D 변환기 실물
Fig. 3-6 A/D 변환기

5. USB 인터페이스

본 연구에서는 Fig.3-7과 같이 FT232HL에 의하여 구성되는 USB 인터페이스를 제작하였다. 컴퓨터와의 통신 방식은 최대 초당 8Mbyte 전송률을 제공하는 병렬 FIFO 방식을 적용하였으며, A/D변환기에서 전송되는 데이터신호와 스캔용 로봇 시스템에서 제공되는 회전각도 및 이송거리 정보를 가지고 있는 인코더 신호도 같이 전송된다.



(a) PCB Layout



(b) USB 인터페이스 실물

Fig. 3-7 USB 인터페이스

제 2절 실험장치

1. 로터 중심공 스캔용 로봇

상술한 각 구성요소를 가지는 스캔용 로봇 시스템을 제작하였다. 이 시스템은 로터 보어 중공축 내측면의 축방향 및 원주방향 결함을 탐상하기 위하여, Fig.3-9와 같이 제작되었으며 40mm/sec로 축방향 이동할 수 있고, 3.5rpm으로 회전이 가능하며, 확장파이프를 통해 배관길이 30m까지 측정이 가능하게 제작되었다.



Fig. 3-8 로터 중심공 스캔용 로봇

Fig.3-9 ~ 3-11은 실제 제작된 스캔용 로봇시스템의 구성요소들이다. 경사형자화기와 일체형으로 제작된 선형배열홀센서는 검사대상 배관의 내경에 따라 조절되는 네개의 기구부중 하나에 설치된다.(Fig.3-9)

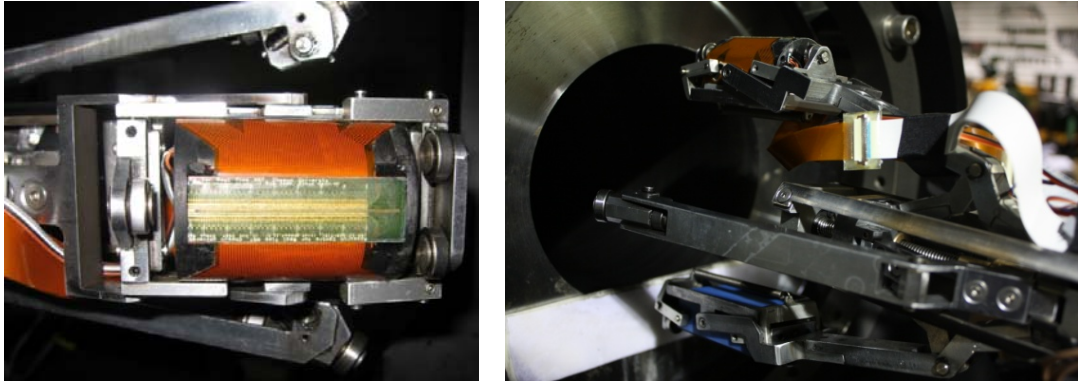


Fig. 3-9 스캔 로봇에 장착된 선형 배열 홀센서

직류 또는 교류증폭부와 A/D변환기, 시리얼통신회로는 Fig.3-10에 나타낸 바와 같이 스캔용 로봇의 내부에 설치된다. 또한, 윤활유에 의한 전자회로부의 손상을 방지하기 위하여 3중 구조로 설계하여, 회전축 및 외부 노출면과 기계적으로 분리되도록 하였다.

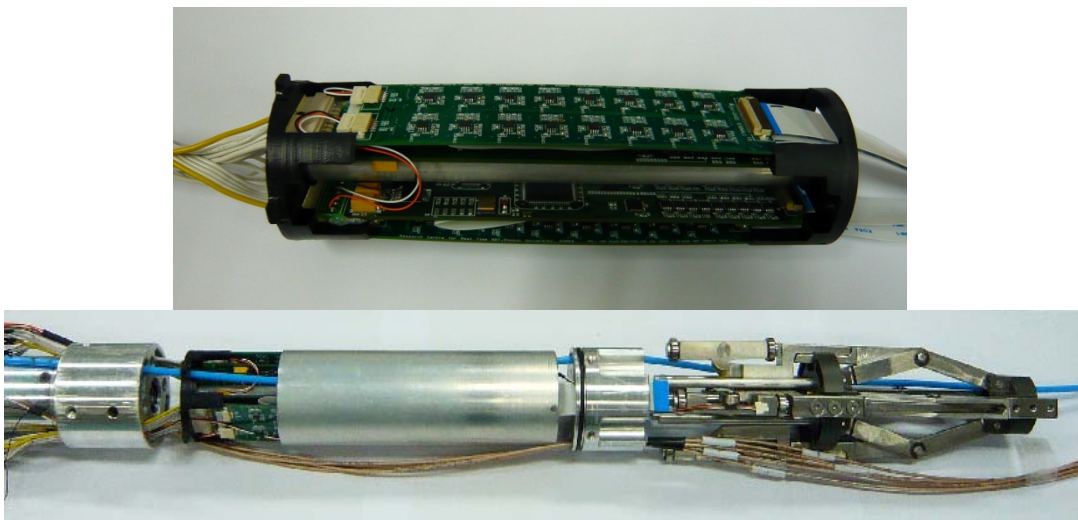


Fig. 3-10 스캔 로봇 내부 : 증폭부와 A/D 변환부가 장착되는 부분

한편, 시리얼통신신호 및 전원공급선은 슬립링을 통과하여 로봇의 후방에 위치한 컴퓨터에 전달된다. 이때, 각 배선은 확장파이프를 통과하여 기설치되어 있으며, 확장파이프를 Fig.3-11에 나타낸 바와 같은 리니어스테이지에 고정 및 이송시켜 로

터 중심공의 내부에 진입시키는 방식을 채택하였다. 이러한 방식에 의하여 배선의 절단 및 접속의 반복 없이 확장파이프의 연결 또는 분리만으로 중심공 내부에의 진입 또는 퇴출작업을 수행할 수 있었다. 한편, 이송거리를 정확하게 측정하기 위하여, 인코더를 설치하였으며 펄스신호는 LIHaS 신호와의 동기를 통하여 이송거리로 환산하여 활용하였다.

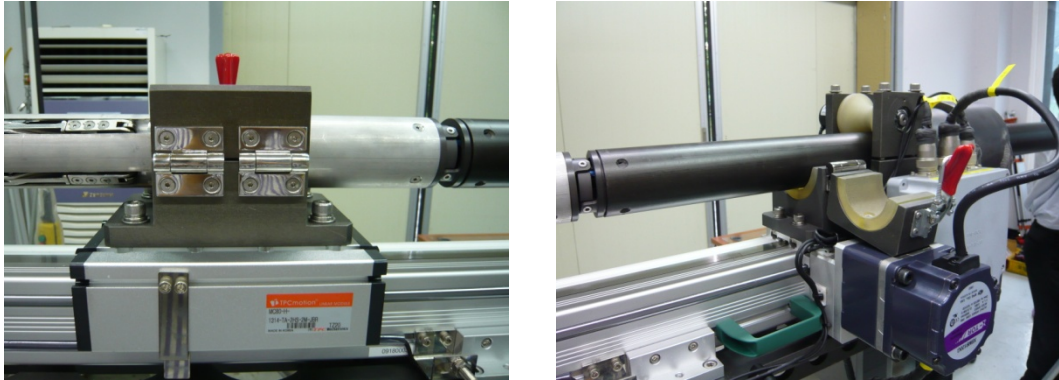


Fig. 3-11 스캔 로봇 전후이동 장치와 인코더

2. 컨트롤 박스

엔코더에 의한 이송거리 및 회전각도 측정, 시리얼신호의 변환, 인터페이스를 통한 LIHaS 신호 입력 및 전원 공급 등은 Fig.3-12에 나타낸 바와 같은 컨트롤박스 내의 직류 및 교류전원, 디코더 및 컴퓨터에 의하여 수행하였다. 사용자(주)두산중공업)의 요청에 의하여 컨트롤박스는 강성구조를 가지도록 설계하였다. 한편, 컴퓨터는 슬롯형으로 보관 및 이송 시에는 수납되도록 하였다.

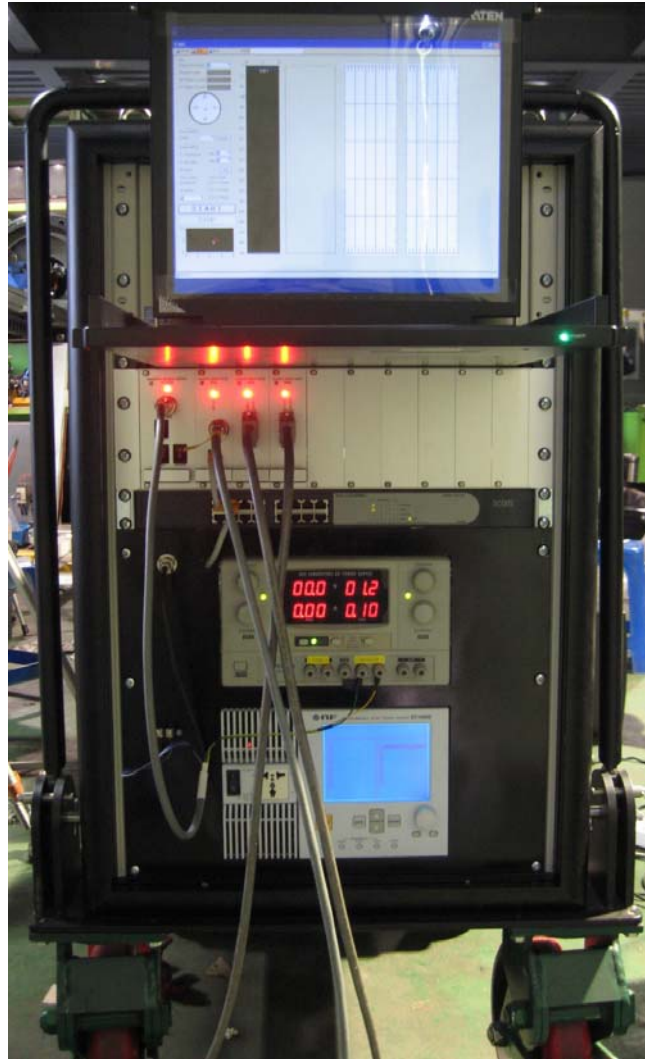


Fig. 3-12 로터 중심공 스캔용 로봇 컨트롤 박스

제 3절 소프트웨어

Fig. 3-16는 로터 중심공 스캔용 로봇 시스템의 운용 소프트웨어의 모습이다. Fig. 3-16(a)는 운용 소프트웨어의 메인메뉴(main menu)를 나타낸다. 소프트웨어를 시작하면 기본적으로 ‘Measurement’ 모드(mode)가 활성화된다. 이때, Fig. 3-16(i)의 프로젝트명 입력창에 적당한 측정명을 입력하고 Fig. 3-16(g)의 시작버튼을 누르면 Fig. 3-16(n)의 상태바(status bar)에 하드웨어 연결상태가 표시되며, 이상이 없으면 스캔 로봇의 움직임과 동시에 소프트웨어가 시작된다. 한편, Fig. 3-16(a)의 ‘New Project’는 새로운 측정 시작 시 선택을 하면 Fig. 3-16(i)의 프로젝트명 입력창의 내용이 지워지며 새로운 측정명을 입력하고 다시 측정을 시작할 수 있다.

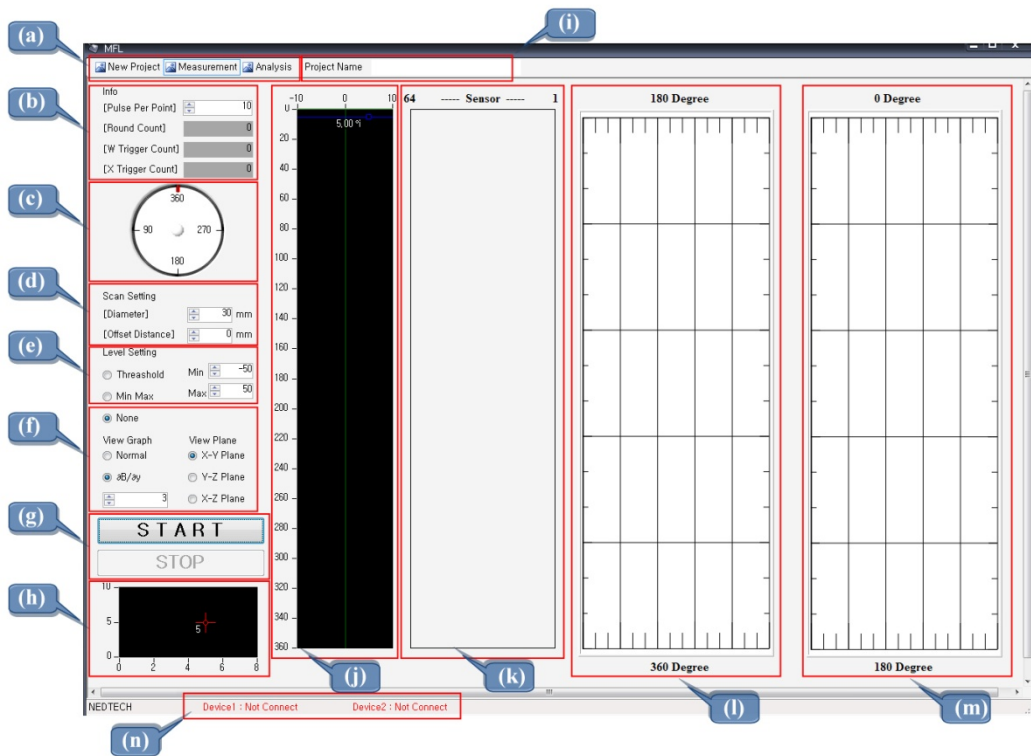


Fig. 3-13 Measurement mode

Table 3-1 Function of Measurement mode

| 번호 | 표기 | 용도 | 초기치 | 비고 |
|-----|------------------------|--|-------|----|
| (a) | New Project | 새로운 측정 시작시 선택 | - | 선택 |
| | Measurement | 측정모드 | - | 선택 |
| | Analysis | 분석모드 | - | 선택 |
| (b) | Pulse Per Point | 1Pixel당 0.5mm의 해상도를 유지하기 위한 Data평균 개수 | 10 | 입력 |
| | Round Count | 원호방향의 회전수 | - | 자동 |
| | W Trigger Count | 원호방향 Trigger Count(회전각도) | - | 자동 |
| | X Trigger Count | 원주방향 Trigger Count(전진) | - | 자동 |
| (c) | Graphic 표현 | 센서부 회전각도의 실시간 표시 | - | 자동 |
| (d) | Scan Setting | 측정 대상체의 직경 | 173.5 | 입력 |
| | Offset Distance | 최초 스캔 시 측정 못하는 영역 | 15 | 입력 |
| (e) | Threshold | 안정된 신호 영역 셋팅 (잡음 제거) | ± 50 | 입력 |
| | Min/Max | | | |
| (f) | View Graph | Normal : raw data(V_H)표현 | - | 선택 |
| | | $\partial B / \partial y$: Scan 방향(회전방향) 미분 | - | 선택 |
| | View Plane | 2차원 평면 표현 | X-Y | 선택 |
| (g) | START/STOP | 측정 시작 및 측정 정지 | - | 선택 |
| (h) | Section View I | 선택된 신호채널의 원주방향에 대한 홀전압의 2차원 그래프 | - | 자동 |
| (i) | Project Name | 측정명 입력창 | - | 입력 |
| (j) | Section View II | 선택된 X Trigger Count의 원호방향에 대한 홀전압의 2차원 그래프 | - | 자동 |
| (k) | Real View | 실시간 측정데이터 화면 | - | 자동 |
| (l) | 180 Degree /360 Degree | 한 프레임 전 데이터 분할화면 (180도~360도) | - | 자동 |
| (m) | 0 Degree /180 Degree | 한 프레임 전 데이터 분할화면 (0도~180도) | - | 자동 |
| (n) | Device1 /Device2 | USB 인터페이스 연결상태 표시 | - | 자동 |

Table 3-1은 ‘Measurement’ 모드의 세부적인 설명 및 기능을 나타낸다. 측정된 데이터는 1회전마다 지정된 경로의 폴더에 자동으로 저장되며, Fig. 3-13(g)의 ‘STOP’ 버튼을 누르면 측정이 끝나고 1회전을 마치지 않아도 측정된 데이터만큼 저장한다. 저장 경로는 소프트웨어 제작 시에 정해져 있으며, 폴더명은 자동으로 측정 시작 전 입력한 측정명으로 된 폴더가 생성된다. 이때, 저장된 측정데이터파일은 검사대상의 직경, 오프셋값, 회전수, 1회전이 끝났을 때의 X Trigger Count 순으로 파일명이 자동으로 생성된다. 저장된 측정데이터는 ‘analysis’모드에서 분석할 수 있으며, 2장의 이론적 배경에서 설명한 알고리즘을 적용하여 결함의 위치와 크기 등을 확인할 수 있다. ‘analysis’모드는 Fig. 3-13(a)의 ‘analysis’ 버튼을 누르면 전환된다.

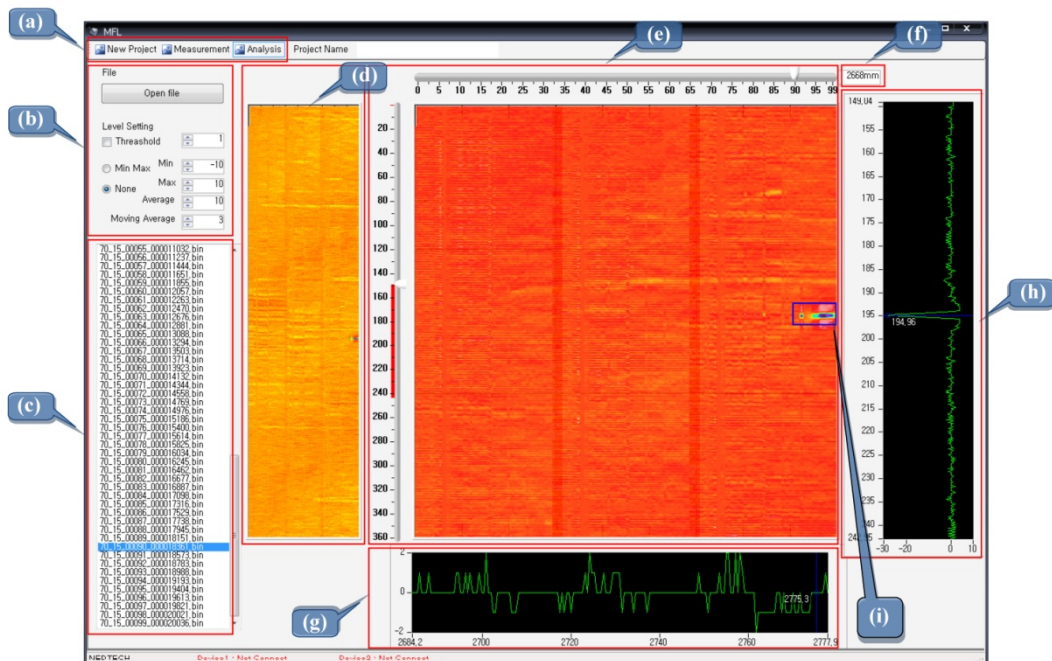


Fig. 3-14 Analysis mode

Fig. 3-14은 ‘analysis’모드 화면을 나타낸다. Fig. 3-14(b)의 ‘Open file’ 버튼을 누른 후 분석하고자하는 측정데이터의 저장파일을 불러오면 된다. 이때, 같은 폴더에

저장된 파일들 중 어떠한 것을 선택하더라도 소프트웨어는 불러올려는 파일이 있는 폴더안의 모든 파일을 저장된 순서로 불러온다.

Fig 3-14(d)와 (e)는 측정된 자기장 분포 영상을 나타내며, 3회전데이터를 측정순으로 나열하여 보다 용이하게 결합분석을 할 수 있다.

Table 3-2 Function of Analysis mode

| 번호 | 표기 | 용도 | 초기치 | 비고 |
|-------|-----------------|---|------|-----------------|
| (a) | New Project | 새로운 측정 시작 시 선택 | - | 선택 |
| | Measurement | 측정모드 | - | 선택 |
| | Analysis | 분석모드 | - | 선택 |
| (b) | Open file | 저장된 측정데이터를 불러온다. | - | 선택 |
| | Min Max /None | 화면에 표시되는 데이터값의 레벨영역을 지정 또는 자동레벨 | None | 선택 /입력 |
| | Average | $\partial V_H / \partial X$ 연산을 하기 전의 이동평균수 | 10 | 입력 |
| | Moving Average | $\partial V_H / \partial X$ 연산을 한 후의 이동평균수 | 3 | 입력 |
| (c) | File Name | 불러들인 파일의 목록 | - | 자동 |
| (d) | Display I | 3회전에 해당하는 측정데이터 표시 | - | 자동 |
| (e) | Disply II | Display I 의 1/4영역을 확대 | - | 자동 |
| (f) | 원주방향위치 | 선택한 영역의 원주방향위치표시 | - | 선택 |
| (g) | Section View I | 선택된 X Trigger Count의 원호방향에 대한 홀전압의 2차원 그래프 | - | 선택 |
| (h) | Section View II | 선택된 신호채널의 원주방향에 대한 홀전압의 2차원 그래프 | - | 선택 |
| (i) | 결합탐상사례 | 측정된 결합 탐상 사례 | - | 자동 |
| 특수 기능 | Zoom window | Display II 자기영상에서 지정한 영역만큼 확대하여 볼 수 있다. | - | Shift + 마우스 드래그 |

결함으로 의심되는 부분을 자기영상(Fig.3-14(e))에서 마우스를 이용하여 Drag하면, 지정한 영역만 선택되어 Pop-up창(Fig.3-15)에 나타난다.

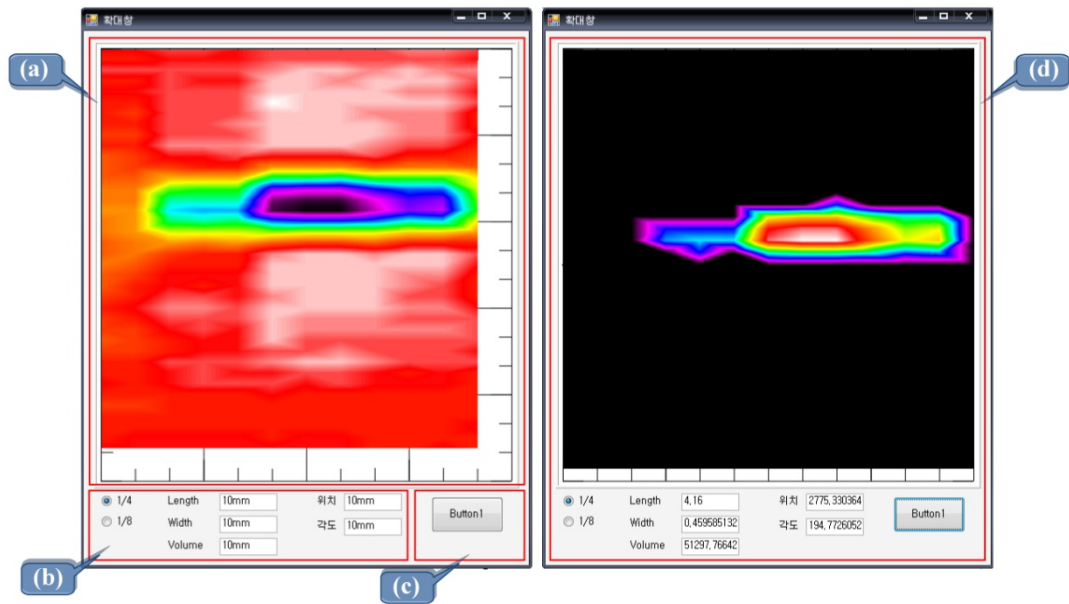


Fig. 3-15 Zoom window

Table 3-3 Function of Zoom window

| 번호 | 표기 | 용도 | 초기치 | 비고 |
|-----|---------|---------------------------------|-----|----|
| (a) | 확대창 | Fig. 3-17(e)화면에서 선택한 영역을 확대표시 | - | 자동 |
| (b) | 알고리즘 선택 | 1/n 알고리즘의 n값을 선택할 수 있음 | - | 선택 |
| (c) | 알고리즘 적용 | 선택된 1/n 알고리즘을 적용한 결과화면을 (a)에 표시 | - | 자동 |
| (d) | 결함정보 | 1/n 알고리즘 적용 화면 및 결함 정량평가 정보 표시 | - | 자동 |

이 때, 초기화면(Fig.3-15(a))은 기존 자기영상(Fig.3-14(e))을 단순히 확대만 하여 나타내지만, Fig.3-15(b)에서 1/n 알고리즘의 n값을 선택하고 적용버튼(Fig.3-15(c))을 누르면 선택한 n값을 적용한 결함 정량평가 결과 자기영상이 나타난다. 한편, 결함 정량평가 결과 자기영상 화면(Fig.3-15(d))에는 결함의 크기와 길이, 축방향 위치, 각 위치 등과 같은 결함 정량평가 정보도 표시된다.

제 4장 실험 및 고찰

경사형 직류자화기를 통해 모의실험을 수행, 검증하였고, 경사형 교류자화기를 도입한 스캔용 로봇에 의하여 실증실험을 하였다. 즉, 경사형 자화기와 일체화된 고공간 분해능의 센서 배열과 공간활용도가 높고 비교적 높은 S/N비를 가진 계측용 차동 증폭 및 13bit SAR A/D변환기를 통해 획득된 데이터신호는 30M길이의 제작된 케이블을 거쳐, USB 인터페이스에 전송되어 컴퓨터에서 전용 소프트웨어를 이용하여 실시간 측정 및 저장, 분석된다. 또한, 작업자의 착오, 경험 미숙에서 오는 조작 과정의 실수 등과 같은 인적 오류를 최소화하기 위하여 결함의 검출 및 위치 파악, 결함 크기를 정량적으로 평가하는 알고리즘을 적용하였다. 이러한 일련의 연구결과를 로터 중심공용 스캔 로봇 시스템에 적용함으로써 로터 중심공 내측면 결함 탐상시 스캔형 자기카메라와 지능형 결함 평가 알고리즘의 유용성을 고찰하였다. 본 장에서는 모의실험을 통해 제안한 경사형 자화기의 방향성 결과 및 평가, 실증실험을 통해 로터 중심공 스캔용 로봇 시스템의 탐상 결과를 논의한다.

제 1절 시험편

Fig.4-1과 Table 4-1은 본 논문의 모의실험에 사용한 시험편의 형상과 결함의 크기를 나타낸다. 가로 155mm, 세로 136mm, 두께 20mm의 빌렛 시험편의 표면에 Fig.4-1에 보인 바와 같이 인공결함을 가공하여 도입하였다.

Fig.4-2과 Table 4-2는 본 논문의 실증실험에 사용한 시험편의 형상과 결함의 크기를 나타낸다. 내경 150mm, 두께 15mm, 길이 330mm의 탄소강 강관(A53)으로 된 시험편의 내부에 Fig.4-2에 보인 바와 같이 인공결함을 가공하여 도입하였다.

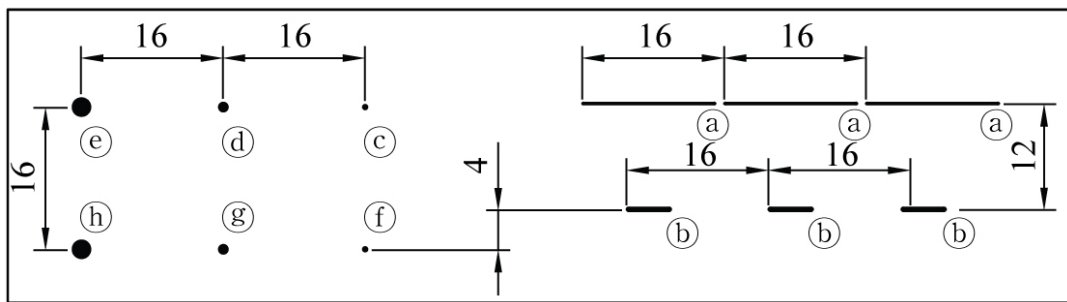


Fig. 4-1 빌렛 시험편

Table 4-1 결함의 크기

| No. | Size | | |
|-----|----------|--------|-------|
| | Width | Legnth | Depth |
| Ⓐ | 0.2 | 15 | 0.2 |
| Ⓑ | 0.4 | 5 | 0.4 |
| No. | Diameter | | Depth |
| Ⓒ | 0.5 | | 1 |
| Ⓓ | 1 | | 1 |
| Ⓔ | 2 | | 1 |
| Ⓕ | 0.5 | | 1.5 |
| Ⓖ | 1 | | 1.5 |
| Ⓗ | 2 | | 1.5 |

(Unit : mm)

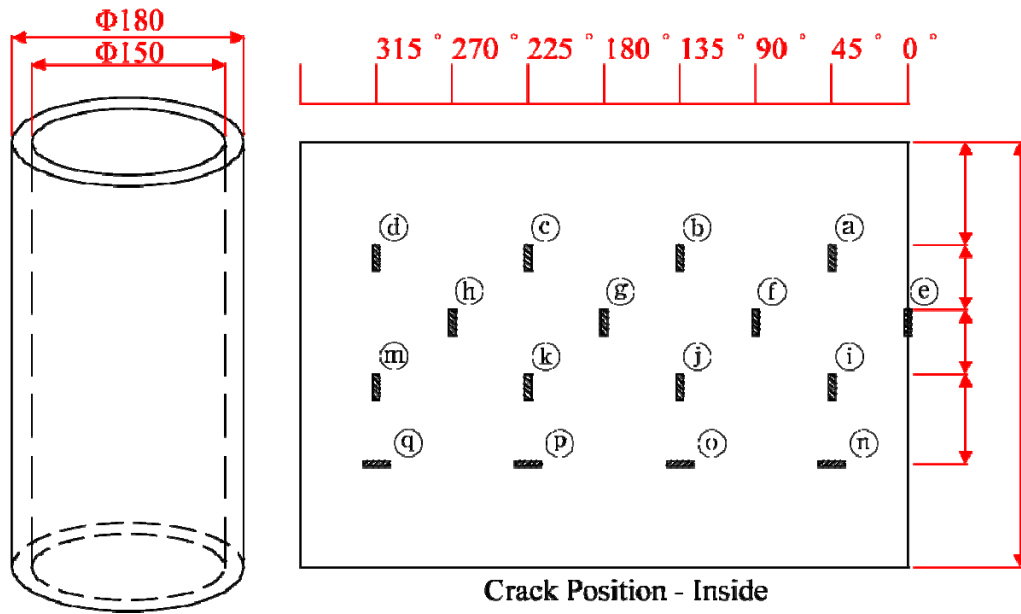


Fig. 4-2 배관형 시험편

Table 4-2 결함의 위치와 크기

| No. | Width | Legnth | Depth | Position | No. | Width | Legnth | Depth | Position |
|-----|-------|--------|-------|----------|-----|-------|--------|-------|----------|
| Ⓐ | 0.15 | 12.7 | 0.4 | 45° | ⓲ | 0.15 | 3.2 | 0.4 | 45° |
| Ⓑ | 0.15 | 12.7 | 0.2 | 135° | ⓳ | 0.15 | 3.2 | 0.2 | 135° |
| Ⓒ | 0.15 | 12.7 | 1.6 | 225° | ⓴ | 0.15 | 3.2 | 1.6 | 225° |
| Ⓓ | 0.15 | 12.7 | 0.8 | 315° | ⓵ | 0.15 | 3.2 | 0.8 | 315° |
| Ⓔ | 0.15 | 6.4 | 0.8 | 0° | ⓶ | 6.4 | 0.15 | 0.4 | 45° |
| Ⓕ | 0.15 | 6.4 | 0.4 | 90° | ⓷ | 6.4 | 0.15 | 0.2 | 135° |
| Ⓖ | 0.15 | 6.4 | 0.2 | 180° | ⓸ | 6.4 | 0.15 | 1.6 | 225° |
| Ⓗ | 0.15 | 6.4 | 1.6 | 270° | ⓹ | 6.4 | 0.15 | 0.8 | 315° |

(Unit:mm)

제 2절 실험결과

1. 방향성 실험 결과 및 평가

Fig.4-3(a)는 모의실험에서 사용한 경사형 자화기($\theta_s=10^\circ$)와 일반적으로 사용되는 비경사형 자화기를 나타내며, Fig.4-3(b)는 각각의 자화기를 일체화한 자기센서 배열을 나타낸다. 이와 같은 자기센서배열을 이용하여 취득한 자기장 분포(V_H)를 스캔방향(x)으로 미분한 영상($\partial V_H/\partial x$)을 통해 방향성 실험을 검증하였다. 결함의 길이 방향이 스캔방향과 평행인 경우(Fig.4-4)는 물론 특정한 결함 길이방향을 갖지 않는 원형 결함의 경우(Fig.4-5)에도 경사형 자화기가 비경사형 자화기보다 우수한 결함 검출능을 보임을 알 수 있다. 이때, 결함 탐상능력은 0.2mm이었으며, 이는 센서간 간격인 0.52mm보다 더 작다.

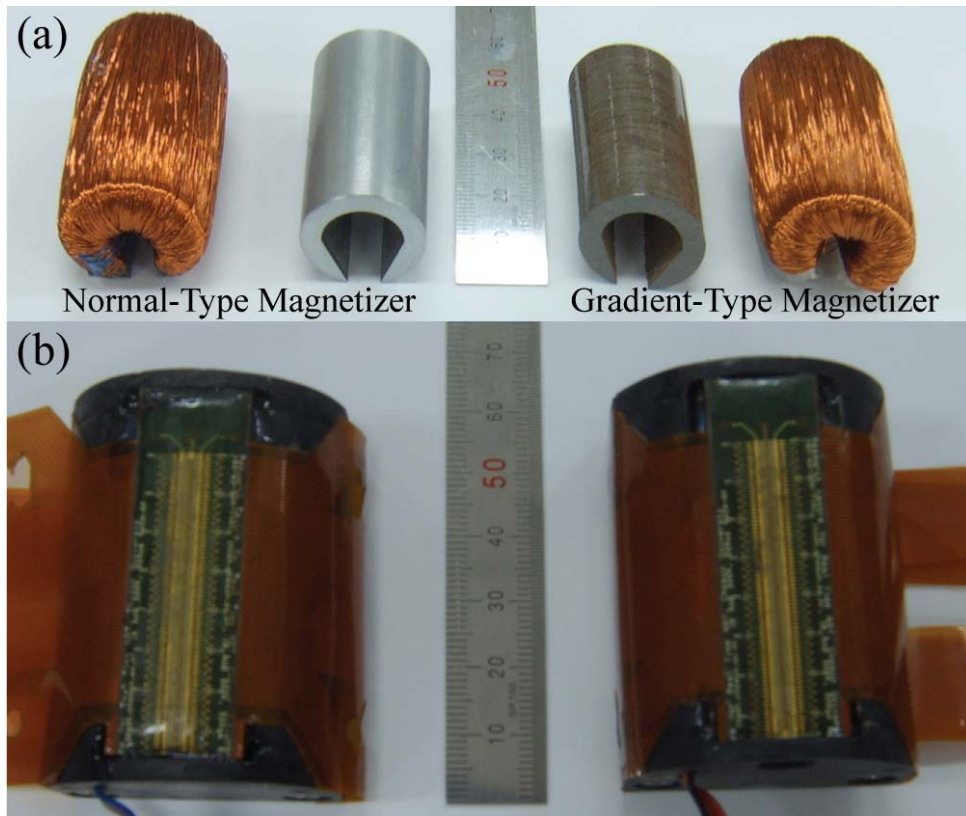
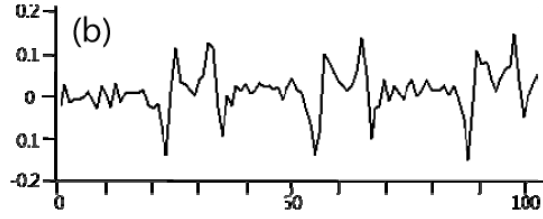
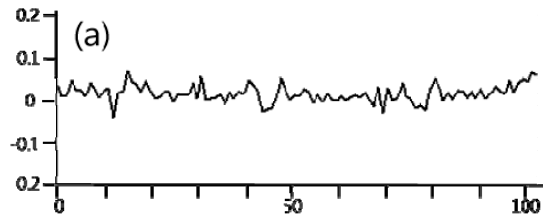
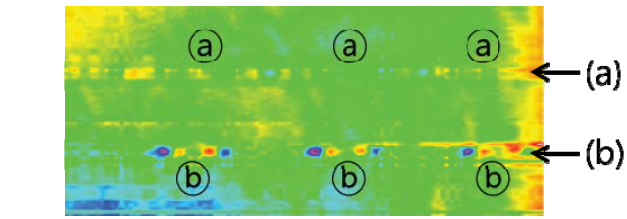
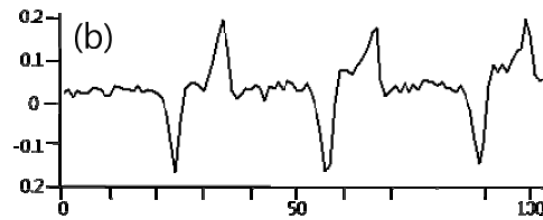
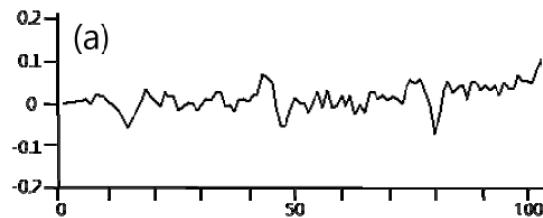
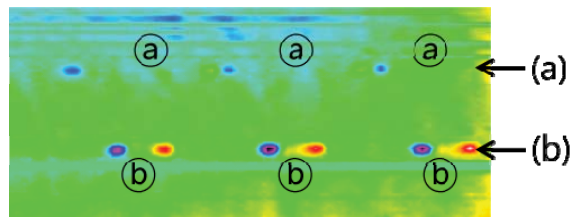


Fig. 4-3 경사형 자화기와 일체형 선형자기센서 배열

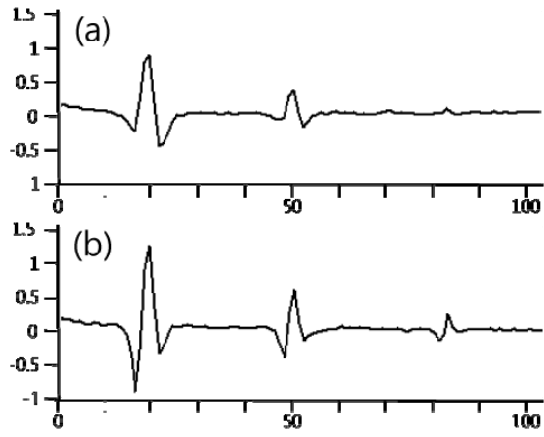
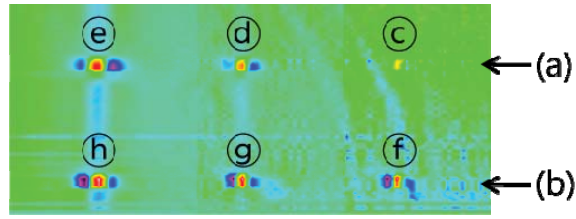


(a) 비경사형 자화기

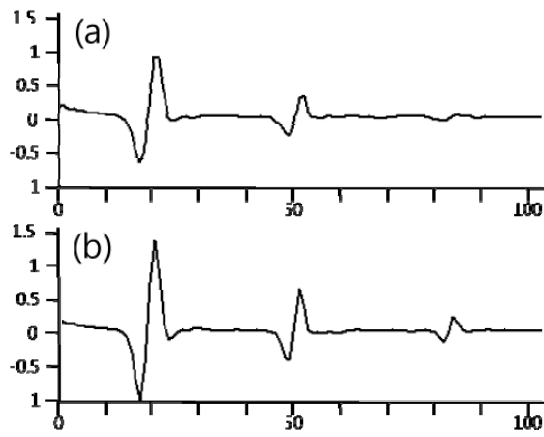
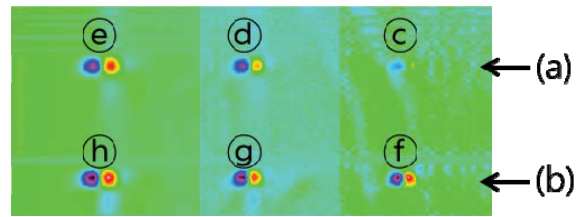


(b) 경사형 자화기

Fig. 4-4 슬릿형 결합의 자기영상과 단면



(a) 비경사형 자화기



(b) 경사형 자화기

Fig. 4-5 원형 결합의 자기영상과 단면

2. 실기시험

본 연구에서 제안한 로터 중심공 스캔용 로봇 시스템을 적용한 실기시험은 로봇 기구기계부를 제작한 (주)리노NDT에서 이루어졌으며, 많은 오류와 시행착오를 거쳐 최종 사용자 검증을 통과하였다. Fig.4-9는 연구지원기업체인 두산중공업(주), (주)에네스코와 (주)리노NDT, (주)네드텍, 실시간 IT-NDT 연구센터가 참석하여 로터 중심공 스캔용 로봇 시스템을 최종시험검사를 하는 모습이다.

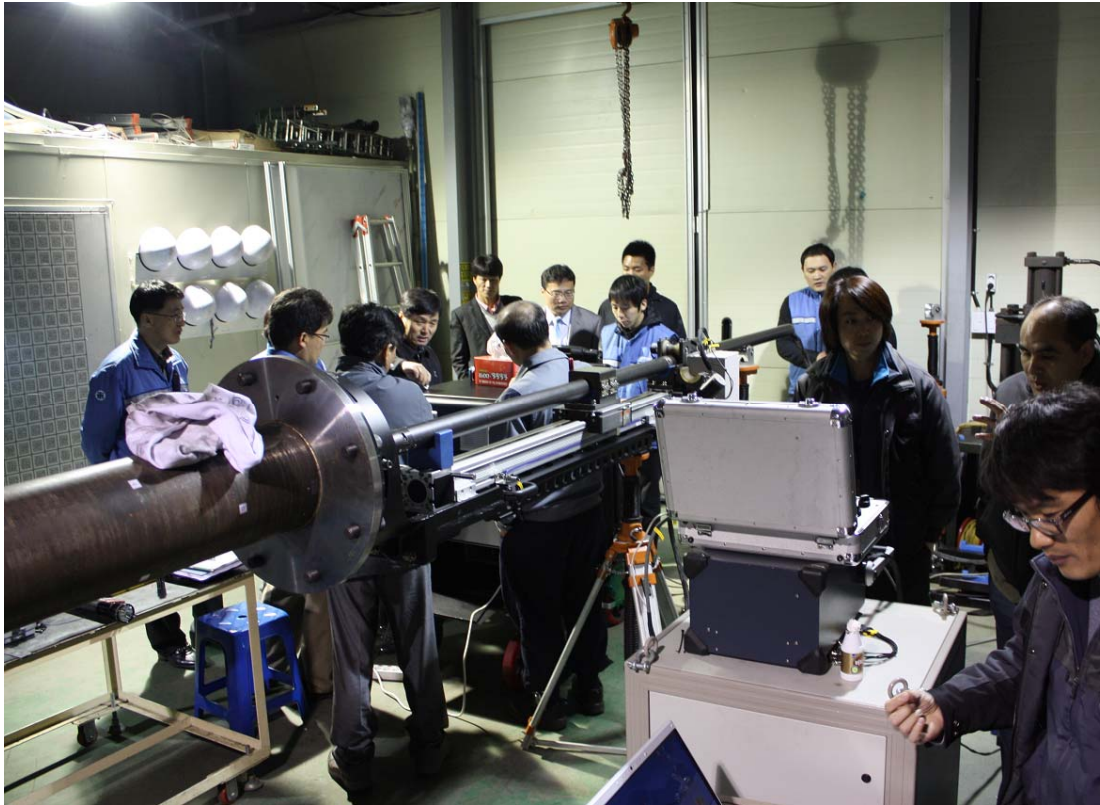


Fig. 4-6 실기시험

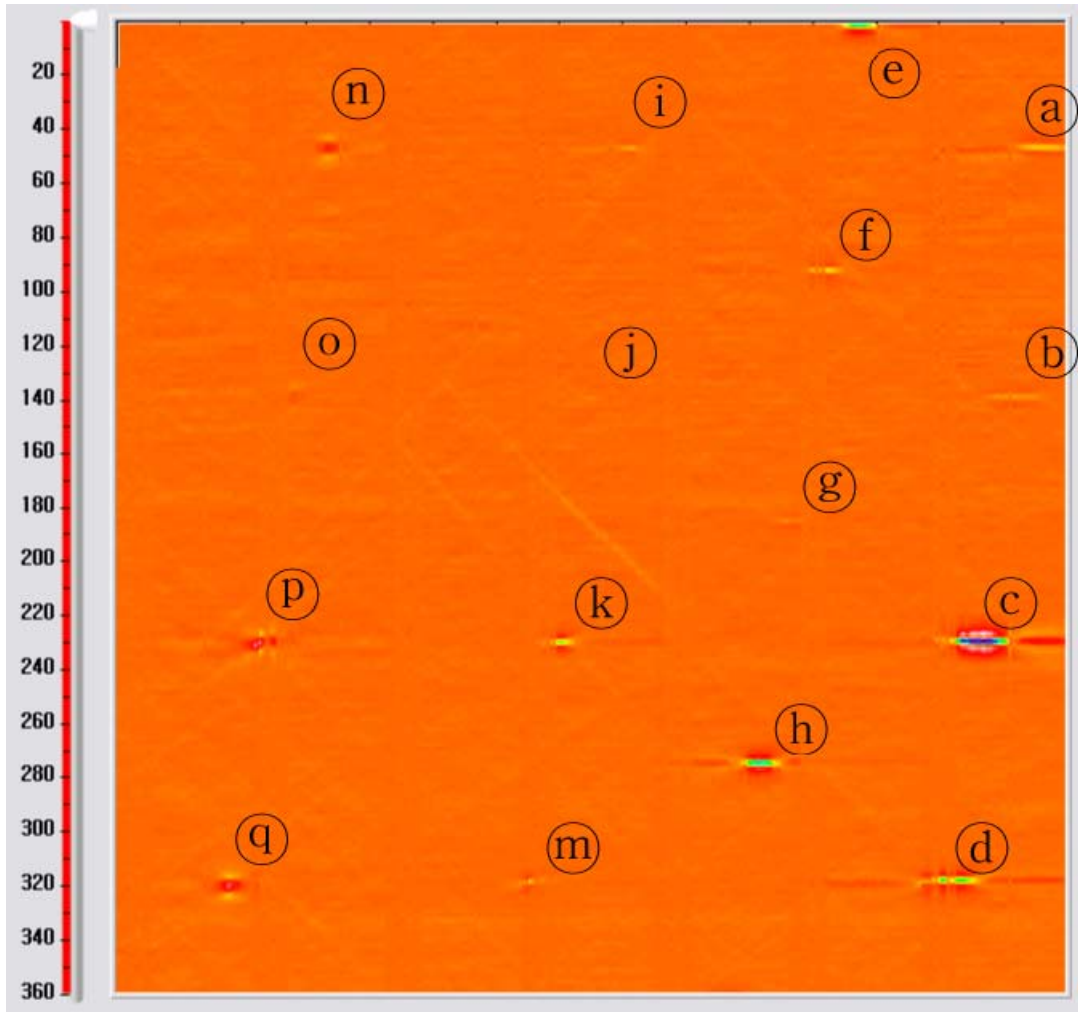


Fig. 4-7 스캔용 로봇 시스템으로 취득한 배관형 시험편 내측면 결함 자기영상

Fig.4-6은 실증실험을 통해 취득한 탄소강 강관의 각 결함의 자기장 분포(V_H)를 스캔방향(θ)으로 미분한 영상($\partial V_H/\partial\theta$)을 나타내며, 결함의 방향 및 길이, 깊이에 따라 그 크기가 달라지고 있음을 알 수 있다.

한편, 상술한 결함의 정량평가 알고리즘을 통해 검출한 각 결함을 정량적으로 추정 할 수 있었으며, 축방향 이송거리 정보를 위한 인코더 펄스신호와 회전각도 정보를 위한 인코더 펄스신호를 취득하여 LIHaS 신호와 동기화를 시켜 각 결함의 위치도 추정할 수 있었다.

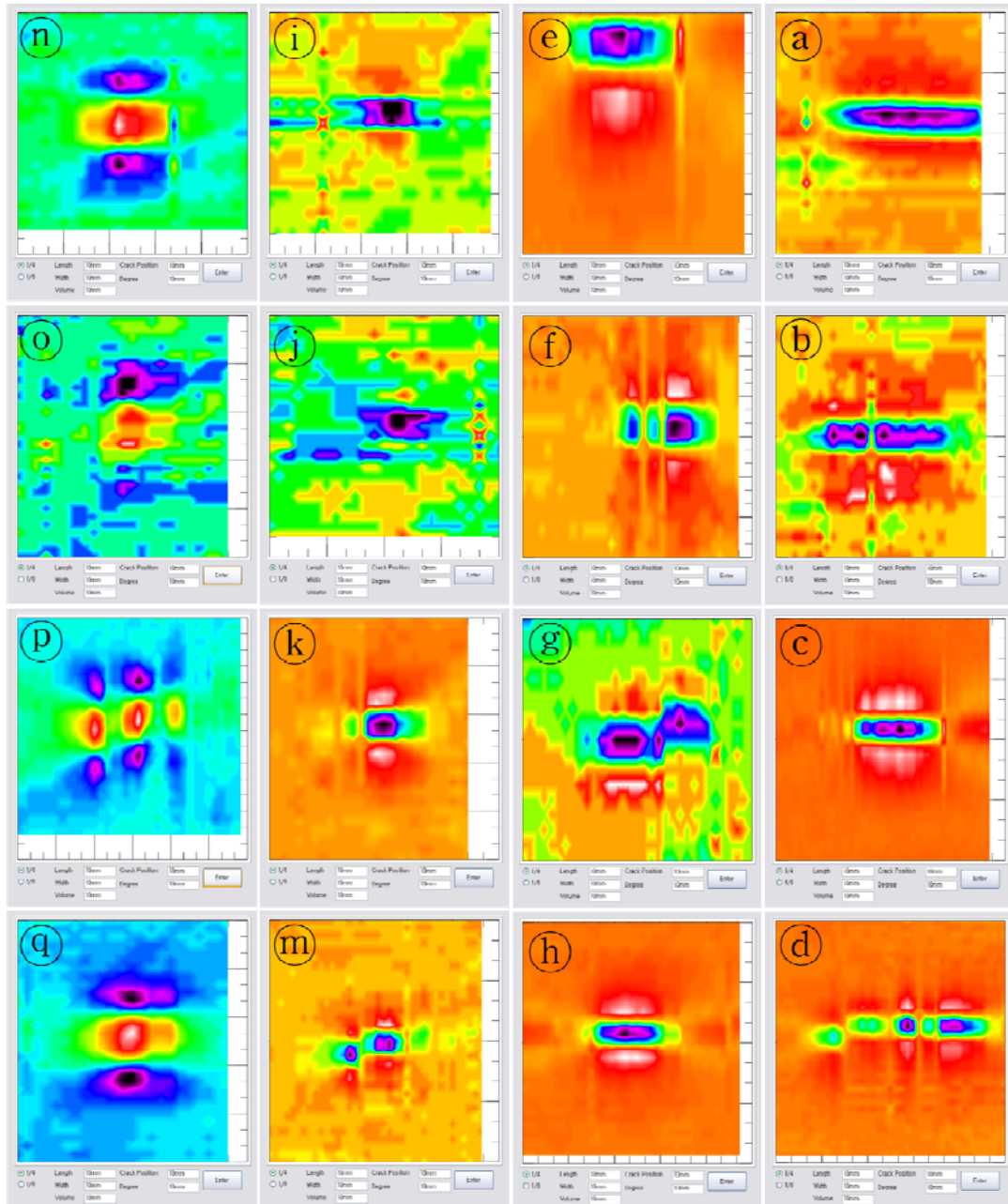


Fig. 4-8 각 결함의 확대 자기영상

Fig.4-7은 Fig.4-6의 실증실험 결과 자기영상에서 결함으로 판단된 자기영상 영역을 소프트웨어의 Drag기능(Fig.3-15, Table 3-3)을 이용하여 확대한 자기영상을 나타낸다.

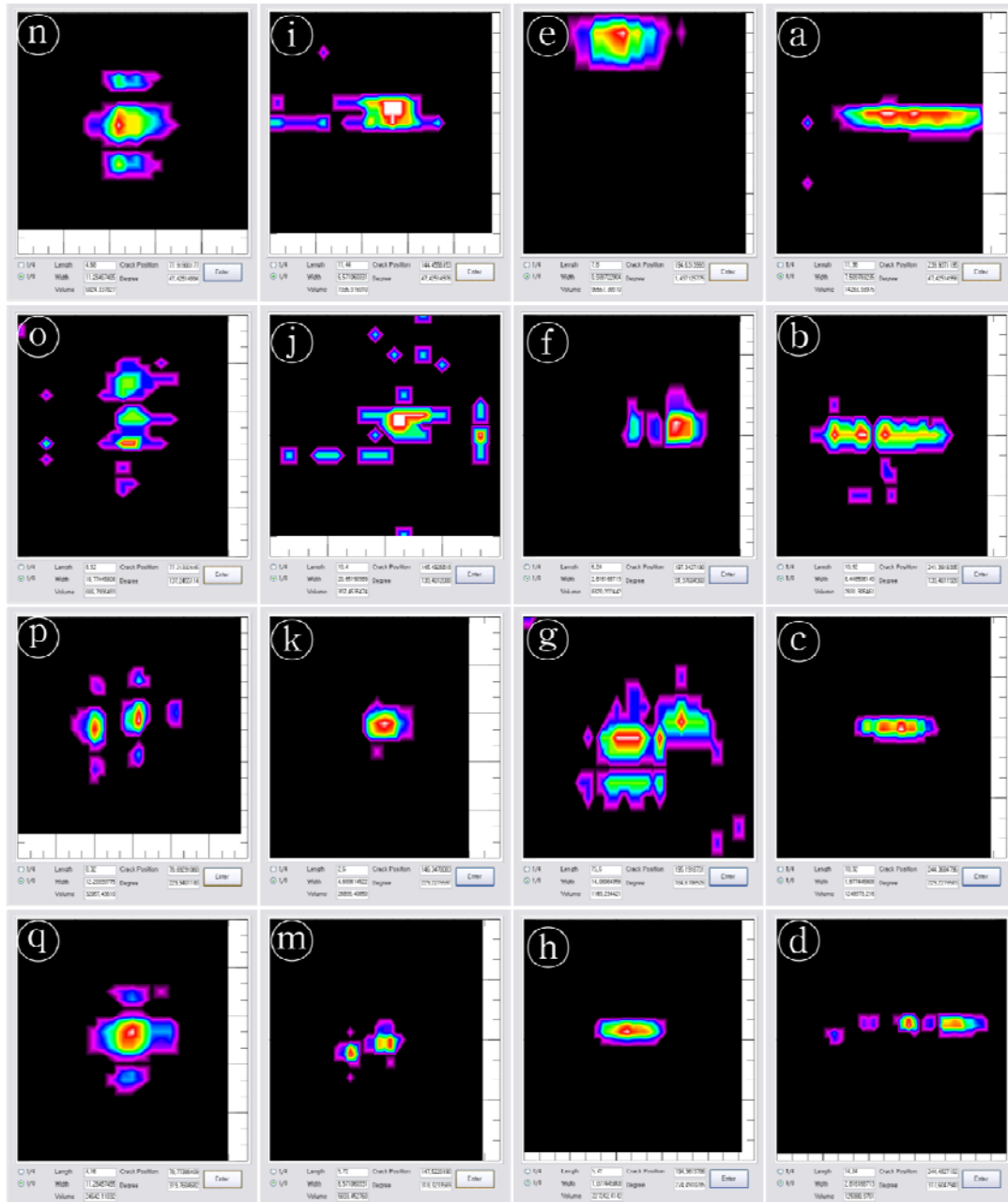


Fig. 4-9 1/8 알고리즘을 적용한 각 결함의 확대 자기영상

Fig.4-8은 1/8 알고리즘을 통해 얻어진 각 결함의 확대 자기영상을 나타낸다. $1/n$ 알고리즘의 n 값을 8로 선택하여 처리하였으며, 결함 정량평가에 의해 추정된 결함의 크기, 축방향 위치, 각도등도 알 수 있다. 실제 결함의 위치와 결함 정량평

가로 추정된 결함의 위치 비교는 Table 4-3에 정리하였다. 여기에서 각 결함의 축방향 위치는 배관형 시험편의 뒤쪽 결함부터 측정하였기에, 위치 값은 내림순으로 나타난다. 이때, 각 결함의 축방향 위치를 추정한 위치 값의 평균 오차는 4.75mm였고, 회전방향 위치 값의 평균 오차는 3.15° 로 높은 정확도를 확인할 수 있다.

Table 4-3 실제 결함의 위치와 추정 결함의 위치 비교

| No. | Real Position (from Axis) | Estimated Position (from Axis) | Error | Real Position (from Angle) | Estimated Position (from Angle) | Error |
|-----|------------------------------|-----------------------------------|-------|-------------------------------|------------------------------------|-------|
| Ⓐ | 250mm | 240mm | -10mm | 45° | 47° | +2° |
| Ⓑ | 250mm | 241mm | -9mm | 135° | 139° | +4° |
| Ⓒ | 250mm | 244mm | -6mm | 225° | 229° | +4° |
| Ⓓ | 250mm | 244mm | -6mm | 315° | 317° | +2° |
| Ⓔ | 200mm | 194mm | -6mm | 0° | 1.4° | +1.4° |
| Ⓕ | 200mm | 197mm | -3mm | 90° | 92° | +2° |
| Ⓖ | 200mm | 195mm | -5mm | 180° | 185° | +5° |
| Ⓗ | 200mm | 194mm | -6mm | 270° | 274° | +4° |
| Ⓙ | 150mm | 144mm | -6mm | 45° | 47° | +2° |
| Ⓚ | 150mm | 145mm | -5mm | 135° | 139° | +4° |
| Ⓛ | 150mm | 146mm | -4mm | 225° | 229° | +4° |
| Ⓜ | 150mm | 147mm | -3mm | 315° | 318° | +3° |
| Ⓝ | 80mm | 78mm | -2mm | 45° | 47° | +2° |
| Ⓞ | 80mm | 77mm | -3mm | 135° | 137° | +2° |
| Ⓟ | 80mm | 79mm | -1mm | 225° | 229° | +4° |
| Ⓠ | 80mm | 79mm | -1mm | 315° | 320° | +5° |

이상의 결과로부터, 중공축 내벽의 균열을 검출함에 있어서, 본 논문에서 제시한 방법에 의하면, 결함의 위치, 방향 및 길이를 추정할 수 있으며, 정략적으로 결함을 평가 할 수 있음을 알 수 있다.

제 5장 결 론

막대한 자금, 인력 및 시간에 걸쳐 제작하게 되는 국가기간설비인 원자력 및 화력발전소, 장기운영항공기, 고속철도, 석유화학플랜트, 선박과 같은 대형기기 구조물은 고온, 고압, 고에너지, 피로 및 부식과 같은 열악한 환경에 노출되어 있어서, 균열 및 부식의 발생이 용이하다. 또한, 이러한 결함을 적시에 검출하지 못하면 상술한 열악한 환경하에서 급격히 진전되어, 결과적으로 막대한 인적·경제적 손실뿐만 아니라 환경 오염 등 국가적으로도 큰 문제를 일으킬 수 있다.

한편, 원자력·화력발전소 및 석유화학플랜트의 많은 부분이 배관구조물로서, 고온 또는 고압의 유체를 전송하기 때문에 응력 및 부식에 취약하다. 또한, 그 형상은 좁고 길기 때문에 종래의 비파괴검사법들에 의하면 결함의 검출이 용이하지 않다는 단점이 있다.

본 연구에서는 좁고 긴 형태의 배관내에 존재하는 결함을 탐상함에 있어서 (1) 중력에 의한 탐상 능력의 불균일성 해소, (2) 전처리 및 후처리 공정의 최소화, (3) 고전류 전원 사용의 지양, (4) 작업시간의 단축, (5) 비접촉식 센서의 활용, (6) 공간분해능의 고도화, (7) 탐상능력의 균열 길이방향 의존성의 최소화를 해결한 NDT 방법을 제안하였다. 즉, (1) 종래의 자분탐상법 대신에 소형 요크형 전자석과 선형으로 배열한 자기센서에 의하여 구성되는 누설자속탐상법을 도입하여, (2) 자분의 사용을 억제하고, (3) 소형 요크형 전자석에 의한 자화법을 도입하였으며, (4) 탐상시스템을 자동화함으로써 작업시간을 단축하고, (5) 중간 매질을 사용하지 않는 전자기 센서를 활용한 자기장 분포를 측정하였으며, (6) 특히 반도체 공정을 통하여 선형으로 배열한 520um 간격의 홀센서를 사용하여 공간분해능을 고도화하였다. (7) 또한, 실리콘강편을 경사지게 배열한 소형 요크형 전자석을 도입함으로써, 결함의 길이방향 의존성을 최소화한 방법을 제안하였다.

이러한 방법의 유용성을 확인하기 위하여, (1) 평판형 시험편에 의한 결함 방향

성 실험과 (2) 배관 내부에 도입한 결함 시험편 및 실기 실험에 의한 결함검출능 평가 및 결함 자동 검출 알고리즘 적용, 결함 체적 평가 알고리즘의 적용을 시도하였다. 이때, 방향성 실험에서는 직경 0.5mm, 깊이 1mm인 특정한 방향성을 가지지 않는 작은 원형 결함도 검출이 가능하였으며, 직류형 자화기를 사용하는 결함 검출 방법상 검출능이 최저가 되는 스캔 방향과 수평이 되는 결함의 검출도 경사형 자화기를 도입함으로써 종래의 방법보다 우수한 결함 검출능을 보임을 알 수 있었다. 또한, 실기 실험에서는 자원으로 도입한 교류 경사형자화기와 자기센서배열을 이용하여 결함을 검출하였다. 이때, 회전속도는 3rpm 및 축방향 이동속도 1.5mm/sec로 스캔하여, 직경 150mm, 길이 3m의 피측정체인 로터보어의 내부를 측정하는데 약40분 소요되었으며, 길이 3.2mm, 깊이 0.2mm, 폭 0.15mm인 원주방향 및 원호방향 결함을 검출할 수 있었다. 종래의 방법에 의하면 약 1주일이 소요되는 실험결과임을 감안하면, 종래의 검사법에 비하여 향상된 결함 탐상능력임에도 불구하고, (1) 비약적인 탐상 속도로서, (2) 결함을 실시간 검출하는 한편, (3) 데이터베이스를 생성할 수 있음을 알 수 있다.

REFERENCE

- [1] http://cafe.naver.com/aceshigh.cafe?iframe_url=/ArticleRead.nhn%3Farticleid=75
- [2] <http://blog.daum.net/kelriyoon/13121878>
- [3] <http://blog.naver.com/sakuras122?Redirect=Log&logNo=110005875568>
- [4] http://radar.ndsl.kr/tre_View.do?cn=GTB2001110389&ct=TREND&lp=SI
- [5] Miyamoto., "Investigation of the derailment accident of the express train," Ken-yusha Inc. Annual Review. 1, (1995), pp. 5.
- [6] Goranson UG, "Damage Tolerance – Facts and Fiction", Proceedings of the 17th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue. Stockholm, (1993).
- [7] Hwang DY. "Damage Tolerance Design and Prediction of Fatigue Life in Aircraft Structure", KSME Int J 1995;35(6), pp.468-480.
- [8] 이태구, "원전 건설, 운영 인허가 제도 개선의 필요성", The Plantech Journal, Vol.3, No.1, (2007), pp.35-44.
- [9] 은윤수, "월성원전 1호기 수명 연장 논란... 갈등 심화", 한국일보 14C면, (2010.1.6)
- [10] 한국비파괴검사진흥협회, "비파괴검사 안전관리 및 육성제도 구축에 관한 연구", 2003년도 원자력정책연구사업 최종보고서, (2004.8).
- [11] "비파괴검사 국제시장 동향 및 경쟁력 분석", 원자력국제협력재단, (2009.1)
- [12] <http://www.phoenix-xray.com/en/applications/index.html>
- [13] Lasser R., Lasser M., Gurney J., Kula J., Rich D., "Multi-angle low cost ultrasound camera for NDT field applications", Imperium, Inc.
<http://www.imperiuminc.com/PDF/ASNT-Paper-Summary-2005.pdf>
- [14] <http://www.olympus-ims.com/en/eddycurrenttesting/>
- [15] J. Jun, J. Lee, and D. Park, "NDT of a nickel Inconel specimen using by the complex induced current - magnetic flux leakage method and linearly integrated hall sensor array", Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing, Korea, 27(2007.10), pp. 375-382.

- [16] Jiseong Hwang, Jongwoo Jun, Seho Choi, Cheolwoong Kim, Kazuhiro Ogawa and Jinyi Lee, "A Study of Magnetic Charge per Unit Area of Dipole Model for the NDE", *Key Engineering Materials*, 353-358 (2007.9), pp.2371-2374.
- [17] Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Jiseong Hwang and Sehoon Lee, "Development of Numerical Analysis Software for the NDE by using Dipole Model", *Key Engineering Materials*, 353-358 (2007.9), pp.2383-2386.
- [18] Jongwoo Jun, Jiseong Hwang, Keejoo Kim, Kazuhiro Ogawa and Jinyi Lee, "Development of Signal Processing Circuit of a Magnetic Camera for the NDT of a Paramagnetic Material", *Key Engineering Materials*, 353-358 (2007.9), pp.2379-2382.
- [19] Jinyi Lee, Jiseong Hwang, Kyungchul Lee, Seho Choi, "A Study of Leakage Magnetic Flux Detector Using Hall Sensors Array", *Key Engineering Materials*, 306-308 (2006.3), pp.235-240.
- [20] Jinyi Lee, Jiseong Hwang, Seho Choi, Jaekyu Lim, "Detection Probability Improvement for Nondestructive Evaluation Using a Magnetic Camera", *Key Engineering Materials*, 306-308 (2006.3), pp.241-246.
- [21] Jinyi Lee, Jiseong Hwang, "The Detection Probability Improvement of the Far-Side Crack on the High Lift-off Using the Magnetic Camera", *International Journal of Modern Physics B*, 20(25-27), (2006), pp.4631-4636.
- [22] Jinyi Lee, Jiseong Hwang, Seho Choi, "The QNDE Using Image Processing of the Magnetic Camera ", *International Journal of Modern Physics B*, Vol.20, Nos.25-27, (2006), pp.4625-4630.
- [23] Jinyi Lee, Jiseong Hwang, "A Study of the Quantitative Nondestructive Evaluation Using the Cross Type Magnetic Source", *Key Engineering Materials*, 321 (2006), pp.1447-1450.
- [24] Jiseong Hwang, Jinyi Lee, "Modeling of a Scan Type Magnetic Camera Image Using the Improved Dipole Model", *JMST*, 20(10), (2006), pp.1691-1701.

- [25] 이진이, 황지성, 송하용, "마이크로프로세서를 이용한 자기카메라 전용 임베디드형 AD 변환기 및 잡음 감소에 관한 연구", 한국비파괴검사학회지, 26(2), (2006.4), pp.99-107.
- [26] Jinyi Lee, Dowon Seo, Tetsuo Shoji, "Numerical Consideration of Magnetic Camera for Quantitative Nondestructive Evaluation", Key Eng. Mat., 270(1) (2004.10), pp.630-635.
- [27] Jinyi Lee, etc., "A display apparatus of magnetic flux density using 2D array magnetic sensor and 3D magnetic fluid", Korea, 10-0376892-0000 (Mar. 7, 2003).
- [28] Jinyi Lee, etc., "Magnetic flux density apparatus for, e.g., detecting an internal crack of a metal or a shape of the metal", US 6,683,452 B2, (Jan. 27, 2004).
- [29] Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Jiseong Hwang, "Magnetic sensor array and apparatus for detecting defect using the magnetic sensor array", PCT/KR2007003801, (May. 8, 2008).
- [30] 이진이, 김정민, 전중우, 황지성, "원통형 자기카메라에 관한 기초연구", 2008년도 한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, (2008), pp.247-252.
- [31] 김정민, 이진이, "원통형 자기카메라에 의한 배관 내부결함탐상", 2009년도 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, (2009), pp.333-338.
- [32] Jiseong Hwang, Jungmin Kim, Jinyi Lee, "Magnetic images of surface crack on heated specimen using an area-type magnetic camera with high spatial resolution", Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, (2009.5), p.1546-1551.
- [33] 황지성, "고속철도 차량의 건전성 평가를 위한 스캔형 자기카메라 개발 및 지능형 결함평가", 조선대학교 대학원 박사학위논문(2010.2).
- [34] Lee, J., Lyu, S. and Nam, Y., "An Algorithm for the Characterization of Surface Crack by Use of Dipole Model and Magneto-Optical Non-Destructive Inspection System," KSME International Journal, Vol. 14, No. 10, (2000), pp.1072-1080.
- [35] J. Jun, J. Lee, and D. Park, "NDT of a nickel Inconel specimen using by the complex induced current - magnetic flux leakage method and linearly integrated hall sensor array", Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing, Korea, 27(2007.10), pp. 375-382.

- [36] D. Minkov, T. Shoji and J. Lee, "Study of the Dipole Model of a Crack," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, (2000), pp.521-528.
- [37] T.Stubbs, "The Role of NDE in The Life Management of Steam Turbine Rotors", 16th World Conference on NDT, Montreal, Canada, (2004)
- [38] 유승우, 장희준, 박현근, "로터 중심공 자동 초음파검사 시스템 개발", 2006년도 한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, (2006), pp.180-185.
- [39] C. Lee Friant, Mark A. Richter, and Sanford Buxbaum, "Concurrent Ultrasonic/Eddy Current Examination of Turbine/Generator Rotor Bores", Baltimore Gas and Electric Company

Acknowledgments

제 인생의 큰 전환점이 될 결심을 하고 광주에 온지 벌써 2년이 되었습니다. 힘들게 보낸 사회 초년병시절보다 더 낫설고 힘들었던 광주에서의 생활을 잘 견디고 적응 할 수 있었던건, 이진이 지도교수님의 관심과 걱정, 배려와 더불어 주위의 많은 분들의 도움이 있었기에 가능했던 것 같습니다. 항상 가슴 속 깊이 감사한 마음을 가지며 더 노력하는 사람이 되겠습니다.

가장 힘들고 바쁜시기에 논문이 나오는 바람에 이진이 지도교수님과 연구실 연구원분들께 더 걱정과 힘겨움을 드린 것 같아 죄송스럽습니다. 그럼에도 불구하고 좋은 논문이 될 수 있도록 많은 가르침과 관심을 주신 이진이 지도교수님, 고낙용 교수님, 조창현 교수님께 감사드린다는 말씀 전하고 싶습니다. 대학원 과정에 많은 가르침 주신 최한수 교수님, 장순석 교수님, 반성범 교수님, 광근창 교수님, 조창현 교수님께도 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 특히, 광근창 교수님께는 좋은 가르침을 바른 자세로 받지 못하였기에 죄송스럽고 항상 마음이 무겁습니다. 이 마음 잊지않고 항상 모든 일에 최선을 다하도록 하겠습니다.

무더운 여름, 추운 겨울임에도 불구하고 항상 같이 고생하시고 많은 도움주신 (주)네드텍과 (주)리노NDT의 직원 여러분들께도 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 최근호 대리님, 서민수대리님, 이세훈님, 김원일 차장님께는 제가 더 의지하고 많은 도움 받은 것 같습니다. 정말 감사 드립니다. 그리고, 좋은 연구결과가 나올 수 있게 힘이 되어주시고, 많은 가르침과 기회를 주신 두산중공업의 류승우 차장님, 에네스코의 김광식 부장님께도 감사 드립니다.

저희들의 연구에 항상 관심가져주시고 격려를 주시며 많은 도움을 주시는 POSCO 기술연구소의 최세호 박사님, 김구화 박사님, 오기장 박사님께 감사드립니다. 저희들의 연구를 믿고 많은 부분에 적용할 수 있게 배려해주신 한국철도기술연구원의 권석진 박사님, 유원희 박사님, 서정원 박사님께 감사드립니다. 그리고, 많은 관심가져주신 공군 군수사령부 한성주 사령관님과 공군 항공기술연구소의 이경

한 소장님, 황영하 대령님께도 감사 드립니다. 국방대학교의 신기수 교수님, (주)삼성전기의 정호철 부장님, 장기훈 대리님, 센트로닉스의 강웅천 소장님, 이민경 대리님, 엠코테크놀러지코리아(주)의 최호민 부장님, 양성환 차장님. 이해발 과장님께도 진심으로 감사 드립니다. 저희들이 부족함이 없이 연구에 전념할 수 있도록 많은 힘이 되어주시는 한국과학재단, 한국철도기술연구원, POSCO, 지식경제부 관계자 여러분께 깊은 감사드립니다.

항상 밤낮없이 고생하시는 이진이 지도교수님과 전종우 박사님, 황지성 박사님, 이재선, 박영민, 최호운, 최명기, LE MINH HUY, 김태석, 이현정... 너무 너무 고맙고 감사합니다. 항상 노력하고 열심히하는 모습으로 감사의 마음을 대신하겠습니다. 그리고, 일일이 호명하지는 못했지만 제어계측공학 대학원생 여러분들께도 감사드립니다. 항상 웃으며 맞아주시고 좋은 모습으로 저를 반겨주셔서 제게 많은 힘이 되었습니다. 감사합니다.

이렇게 많은 분들의 관심과 격려, 도움이 있었기에 지금의 자리에 제가 있는 것 같습니다. 다시하번 감사의 마음을 전합니다. 부족한 사위이지만 아들처럼 사랑해주시고 아껴주시는 아버님, 어머님 진심으로 감사드립니다. 가을에 결혼하시는 형님께도 감사드리며, 항상 행복하시길 바랍니다. 그리고, 어머니...앞으로는 더 잘하겠습니다. 동생이지만 항상 내가 의지하는 사랑하는 동생 고맙다. 낯선 광주에 데려와서 늘 외롭게 만들고 고생만 시켜 미안한 아내에게 고맙고 사랑한다는 말 전합니다.

2010년 5월
김 정 민

저작물 이용 허락서

| | | | | | |
|------|--|-----|----------|-----|----|
| 학 과 | 제어계측공학 | 학 번 | 20087576 | 과 정 | 석사 |
| 성 명 | 한글: 김 정 민 한문 : 金正玟 영문 : Kim jung Min | | | | |
| 주 소 | 광주광역시 동구 금동 57-38 한스빌라 301호 | | | | |
| 연락처 | E-MAIL : ekanus@naver.com | | | | |
| 논문제목 | 한글 : 로터 중심공 비파괴검사 및 정량평가 영어 : Nondestructive Testing and Evaluation of Rotor Bore | | | | |

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(O) 반대()

2010년 5월 31일

저작자: 김 정 민 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하

