



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)



2011 年 8 月
碩士學位論文

誘導面電流와 面積形 자기센서 配列을
利用한 常磁性體 金屬의 非破壞評價

朝鮮大學校 大學院

情報通信工學科

朴 英 敏

誘導面電流와 面積形 자기센서配列을
利用한 常磁性體 金屬의 非破壞評價
Non-Destructive Evaluation of Paramagnetic Metal Using the
Sheet Type Induced Current and Matrix Type Hall Sensors Array

2011年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

情報通信工學科

朴 英 敏

誘導面電流와 面積形 자기센서配列을
利用한 常磁性體 金屬의 非破壞評價

指導教授 李 鎮 伊

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2011年 4月

朝鮮大學校 大學院

情報通信工學科

朴 英 敏

朴英敏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



2011年 5月

朝鮮大學校 大學院

목 차

| | |
|--------------------------------|------|
| ABSTRACT | viii |
| 제 1장 서 론..... | 1 |
| 제 2장 원리 및 종래의 연구 | 10 |
| 제 1절 자기카메라 | 10 |
| 제 2절 자원 | 11 |
| 제 3절 센서배열 | 14 |
| 제 4절 신호처리회로..... | 17 |
| 제 3장 교류 면적형 자기카메라..... | 19 |
| 제 1절 수치해석 | 19 |
| 제 2절 시제품 제작 | 33 |
| 1. 면적형 유도전류..... | 33 |
| 2. 고밀도 센서 배열..... | 34 |
| 3. 스위칭 및 신호처리회로 | 35 |
| 제 4장 실험 및 고찰 | 40 |
| 제 1절 상자성체 금속의 결합탐상 | 40 |
| 1. 시험편 | 40 |
| 2. 실험 결과 및 평가..... | 44 |
| 제 2절 오스테나이트계 스테인레스강의 결합탐상..... | 54 |
| 1. 시험편 | 54 |
| 2. 실험 결과 및 평가..... | 56 |
| 제 5장 결 론 | 58 |

표목차

| | |
|-----------------------------------|----|
| Table 2-1 자원의 분류 | 11 |
| Table 3-1 각 요소의 물리적 특성 및 크기 | 21 |
| Table 4-1 원형 인공결합의 크기 | 41 |
| Table 4-2 인공결합의 형상 및 크기 | 42 |
| Table 4-3 각각의 결합 크기 및 체적 | 55 |

도목차

| | | |
|----------|--|----|
| Fig. 1-1 | 사우스웨스트항공 소속 보잉 737-300 추락사고 | 2 |
| Fig. 1-2 | 알로하항공 소속 243편 동체파손사고..... | 2 |
| Fig. 1-3 | 손상허용공학에서 결함탐상능력이 검사주기에 미치는 영향..... | 3 |
| Fig. 1-4 | 방사선 투과 검사 | 4 |
| Fig. 1-5 | 초음파검사 | 5 |
| Fig. 1-6 | 자분탐상법 | 5 |
| Fig. 1-7 | 와전류 탐상법 | 6 |
| Fig. 2-1 | 자기카메라 | 10 |
| Fig. 2-2 | 자원의 종류 | 12 |
| Fig. 2-3 | 여러가지 형태의 센서 배열 | 14 |
| Fig. 2-4 | 0.78mm 간격의 공간분해능을 가지는 1024개의 홀센서 배열..... | 15 |
| Fig. 2-5 | 홀 효과의 원리 | 17 |
| Fig. 2-6 | INA128을 이용한 홀센서 신호의 증폭회로도 | 18 |
| Fig. 3-1 | 유도면전류의 원리 | 19 |
| Fig. 3-2 | 수치해석 모델 | 20 |
| Fig. 3-3 | Crack 없을 때 유도주파수의 변화에 따른 침투깊이 수치해석 | 22 |
| Fig. 3-4 | 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 전기장 수치해석 결과..... | 23 |
| Fig. 3-5 | 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 전기장 수치해석 결과(crack : L10, W1, D4 [mm]) | 25 |
| Fig. 3-6 | 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 자기장의 수치해석 결과(crack 없 는 경우)..... | 28 |
| Fig. 3-7 | 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 자기장의 수치해석 결과(crack : L2, W1, D4 [mm]) | 30 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3-8 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 자기장 수치해석 결과(crack : L10, W1, D4 [mm]) | 32 |
| Fig. 3-9 시제작한 유도면전류 | 33 |
| Fig. 3-10 고밀도 센서 배열 | 34 |
| Fig. 3-11 스위칭회로 | 35 |
| Fig. 3-12 교류형 자기카메라 구동을 위한 신호처리 블록다이아그램..... | 36 |
| Fig. 3-13 고대역통과필터 회로도 | 36 |
| Fig. 3-14 홀센서와 교류증폭회로(INA128)의 회로도 | 37 |
| Fig. 3-15 평활화 회로도 | 38 |
| Fig. 3-16 교류형 자기카메라에 의한 교류 자기장의 가시화..... | 38 |
| Fig. 4-1 부식시험편 | 40 |
| Fig. 4-2 인공 결합의 형상 및 크기 | 42 |
| Fig. 4-3 피로균열 제작 방법 | 43 |
| Fig. 4-4 유도면전류를 자원으로 채택한 교류형 자기카메라에 의한 피로균열의 검출 | 44 |
| Fig. 4-5 결합 길이 및 인가 주파수에 의한 자기영상..... | 45 |
| Fig. 4-6 5kHz의 유도면전류에서 각각의 부식 표면결합의 탐상결과..... | 46 |
| Fig. 4-7 10kHz의 유도면전류에서 각각의 부식 표면결합의 탐상결과 | 47 |
| Fig. 4-8 유도면전류법에 의한 주파수별 인공결합 탐상 결과..... | 51 |
| Fig. 4-9 $\partial V_R / \partial x _{TOTAL}$ 과 실제 결합의 체적과의 상관관계..... | 52 |
| Fig. 4-10 유도면전류법에 의한 피로균열 탐상 결과..... | 53 |
| Fig. 4-11 오스테나이트계 스테인레스강 시험편(Unit: mm, thickness: 10mm) | 55 |
| Fig. 4-12 유도면전류법에 의한 오스테나이트계 스테인리스강 결합탐상 결과..... | 56 |
| Fig. 4-13 실제 결합 체적과 계산된 체적과의 관계..... | 57 |

기호 설명

| | |
|---------|--|
| PSI | Pre-Service Inspection |
| ISI | In-Service Inspection |
| NDT | Nondestructive Testing |
| RT | Radiation Testing |
| UT | Ultrasound Testing |
| MT | Magnetic Particle Testing |
| MFLT | Magnetic Flux Leakage Testing |
| ECT | Eddy Current Testing |
| PT | Penetration Testing |
| LT | Leakage Testing |
| VT | Visual Testing |
| AE | Acoustic Emission |
| IRT | Infrared Ray Testing |
| C-MFL | Cross-type Magnetic Flux Leakage |
| DC-MFL | Direct Current Magnetic Flux Leakage |
| V-MFL | Vertical-type Magnetic Flux Leakage |
| STIC | Sheet-Type Magnetic Induced Current |
| CIC-MFL | Combined Induced Current-Magnetic Flux Leakage |
| MFPT | Magnetic Fluid Penetration Testing |
| MR | Magnetic Resistance |
| GMR | Giant Magnetic Resistance |
| FSO | Full Scale Operational range |
| AC | Alternating current |
| DC | Direct current |

| | |
|---------------------------------|--|
| SSS | Single Hall sensor scanning |
| LIHaS | Linearly Integrated Hall Sensor Array |
| AIHaS | Area type Integrated Hall sensor Array |
| HPF | High Pass Filter |
| LPF | Low Pass Filter |
| CMRR | Common Mode Rejection Ratio |
| RMS | Root-Mean-Square |
| A-STS | Austenitic stainless steel |
| MAX | Maximum value of the differential RMS of Hall voltage to the STIC direction[V/mm] |
| MIN | Minimum value of the differential RMS of Hall voltage to the STIC direction [V/mm] |
| S/N | Signal-to-Noise ratio |
| B | Magnetic Flux Density [Wb/m ²] |
| V | Hall Voltage [V] |
| S | Sensor-resolution |
| $\partial V_{RMS} / \partial x$ | The Differential of V_{RMS} to Scanning Direction(x-direction) |
| L | Length of Crack [mm] |
| W | Width of Crack [mm] |
| D | Depth of Crack [mm] |
| δ | Skin depth [mm] |
| f | Frequency [Hz] |

아래 첨자

INSP Inspectable crack length

AC Alternating current

H Hall Sensor

RMS Root-Mean-Square

CF Cut off Frequency

TOTAL Total of Sensor Output

C Crack

ABSTRACT

Non-Destructive Evaluation of Paramagnetic Metal Using the Sheet Type Induced Current and Matrix Type Hall Sensors Array

Youngmin Park

Advisor: Prof. Jinyi Lee, Ph.D.

Dept. of Information and Communication Eng.

Graduate School of Chosun University

Large mechanical structures such as aircrafts and power generation plants are operated in corrosive environment under high temperature and high pressure. In such conditions, cracks can easily develop, initiate and propagate. These cracks lead to various types of fractures in the abovementioned large mechanical structures. And the fractures not only result in the loss of economy and even worse, of life but also environment pollution. Therefore, cracks need to be inspected with equipment having high detection capability before they can initiate fractures.

In this paper, a non-destructive testing method of metallic structures by visualization of alternating magnetic field is proposed. Up to now, the alternating magnetic field has been visualized by using the yoke-type magnetizer and linearly integrated Hall sensors array. Also, the static magnetic field has been visualized by using the matrix-type Hall sensors array. However, the 2-dimensional alternating magnetic field has not been visualized in real time.

To realize the visualization system of a 2-dimensional alternating magnetic field, that is, an AC-type magnetic camera, a sheet-type induced current, matrix-type Hall sensors array and signal processing circuits were developed. An alternating magnetic field is distorted by a crack on a metallic structure. Therefore, the AC-type magnetic camera can inspect cracks.

The crack inspection ability of the developed AC-type magnetic camera was verified by non-destructive testing of austenitic stainless steel and aluminum alloy. Austenitic stainless steel is used in nuclear power generation plants. Austenitic stainless steel is a paramagnetic metal, but it can have a ferromagnetic structure in certain environments. This ferromagnetic characteristic has obstructed the inspection of cracks in the previous non-destructive testing. Also, aluminum alloys are used in aircrafts. The fatigue cracks and corrosion of an aging aircraft have to be inspected and evaluated quantitatively.

The developed AC-type magnetic camera and crack inspection method of metallic structures can be used in the non-destructive testing of large mechanical structures. Furthermore, this inspection method, with its accurate prediction ability, can also be used for damage tolerance engineering. The lifetime evaluations of aged structures and machines, which have a high accident probability, can be carried out more accurately.

제 1장 서 론

항공기, 유인 우주스테이션, 로켓 엔진 등의 대형기기 및 각종 구조물 등은 높은 에너지 및 위험물, 고압가스 등을 보유하고, 부식, 고온 고압과 같은 열악한 환경에 노출되어 있다. 따라서, 핵심 부품 및 소재의 제조 공정 중에 발생한 결함이나 진동, 피로 및 부식 등에 의한 표면 혹은 내부 결함, 사용자 부주의 등의 복합적인 문제로 인하여 손상이 야기되면, 급격히 진전되어 사고에 이르게 된다. 결과적으로 막대한 인적·경제적 손실뿐만 아니라 환경 오염 등 국가적으로도 큰 문제를 일으킬 수 있다.

한 예로 2011년 4월 1일 미국 서부 아리조나주 피닉스 공항에서 승객 118명을 태우고 이륙한 사우스웨스트항공 737 비행기가 캘리포니아 새크라멘토로 향하는 중 기내 폭발음이 들린 후 천장에 약 150cm 정도의 구멍이 나는 사고가 발생하였다 [1]. 다행히 인명피해는 없었으나, 지금까지 300편 이상의 사우스웨스트항공의 운항스케줄이 최소되었고, 79대의 사우스웨스트항공기가 이륙이 중단된 상태에서 검사한 결과, 그 중 2대의 비행기에서 균열이 발생한 것이 밝혀졌고, 19대의 항공기는 문제가 발생되지 않아 다시 운항하게 되었다.

한편, 미국연방항공청(Federal Aviation Administration, FAA)의 자료에 의하면 2010년 3월의 검사결과 15년된 연식의 항공기 검사에서 10대의 항공기의 동체에서 균열이 확인되었고, 11대는 항공기 외부를 지지해주는 클립에 균열이 발생한 것을 보고하고 있다.

이와 유사한 사건으로는 1988년 발생하였던 알로하항공 비상착륙 사고를 들 수 있다 [2]. 1988년 4월 28일, 하와이 힐로와 호놀룰루간을 비행하던 알로하항공 소속 243편 항공기(B737-200)에서 발생한 폭발로 동체 상단 일부분이 날아가면서 마후이 카홀루이공항에 비상착륙하였다. 이 과정에서 객실승무원 1명이 항공기 외부로 빨려 나가며 사망했으나, 나머지 94명은 무사했다.



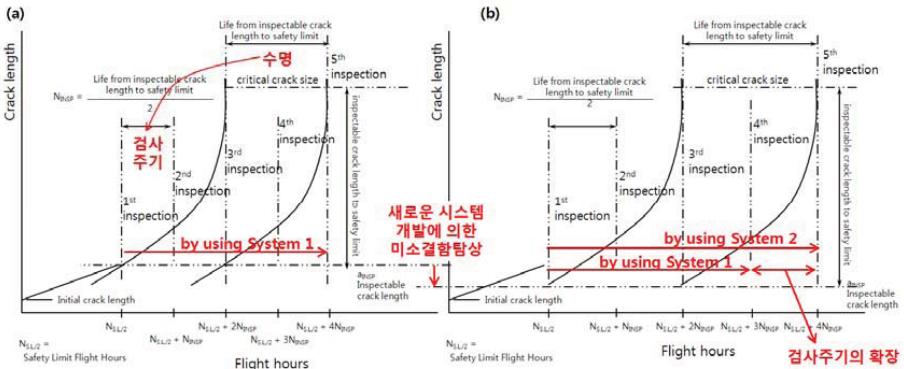
자료출처: http://www.koreadaily.com/news/read.asp?art_id=1178949

Fig. 1-1 사우스웨스트항공 소속 보잉 737-300 추락사고



자료출처: <http://www.hansfamily.kr/1107>

Fig. 1-2 알로하항공 소속 243편 동체파손사고



Report Number 2004F0053, F-15K FSMP, p.3-20

Fig. 1-3 손상허용공학에서 결합탐상능력이 검사주기에 미치는 영향

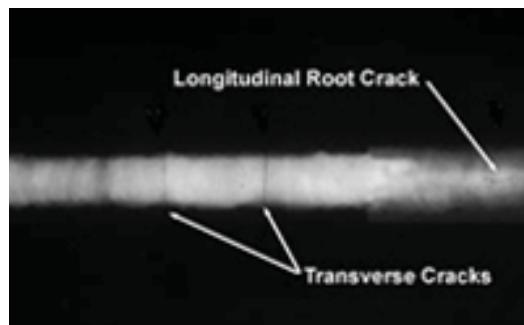
이러한 결합의 발생과 성장은 (1) 제조과정에 발생한 결합이 성장하는 경우와, (2) 가동후에 임의의 원인에 의하여 발생하고 성장하는 경우로 나누어 질 수 있다. 각 경우에 있어서 사용전 검사(PSI, Pre-Service Inspection)와 사용기간중 검사(ISI, In-Service Inspection)에 의하여 적절하게 유해한 결함을 검출하고 보수하도록 되어 있다. 한편 항공기는 지상 운송수단과 달리, 운항중 공중에서 정지하여 정비할 수 없다는 취약점을 가지고 있다. 따라서 항공기가 착륙하여 다음 이륙 및 운항시까지 기체를 포함한 구성품의 사용기간중 검사(ISI, In-Service Inspection)를 마쳐야 함은 매우 중요한 과제중의 하나이다.

한편, 보다 작은 손상을 보다 빠른 시간내에 검출하고 평가할 수 있다는 것은 (1) 검사결과에 보다 높은 신뢰성을 부여할 수 있으며, (2) 예측할 수 없었던 작은 손상도 검출할 수 있다는 장점을 가지는 한편, (3) 검사주기의 확장에 의한 막대한 경제적 이득(검사 경비 및 시간의 절감, 검사를 위한 운전정지횟수 감축)을 얻을 수 있다. 일반적으로 손상허용공학(Damage Tolerance) [3, 4]에서는 피로시험등을 통하여 구조물의 허용할 수 있는 결합크기(tolerance size, Fig. 1-3에서는 critical crack size로 표기)를 결정한다. 즉, 구조물에 존재하는 결합의 크기가 허용크기를 초과하면 급격히 진전하여 파단에 이르게 된다. 따라서, 미공군 검사절차서(F-15K, FSMP)에

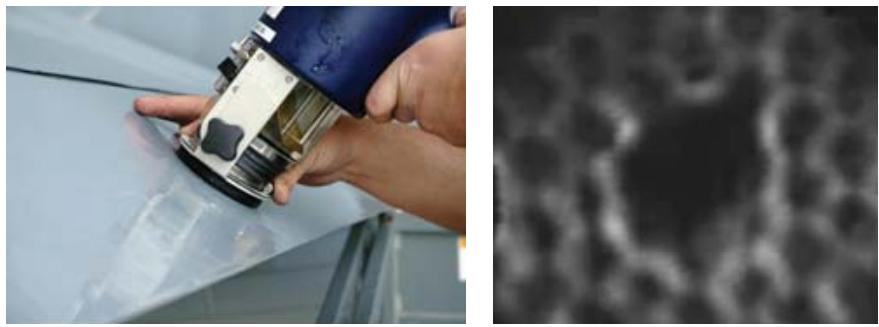
의하면 전술한 ISI 검사주기(N_{INSP})는 Fig. 1-3에 나타낸 바와 같이 검출가능결함크기(a_{INSP} , Inspectable crack length)에서 허용결함크기(critical crack size)에 이르는 시간(life from inspectable crack length to safety limit)의 50%를 기준으로 한다. 따라서, Fig. 1-3(a)에 나타낸 바와 같은 System 1에 비하여 보다 작은 손상을 검출하고 정량적으로 평가할 수 있는 System 2(Fig. 1-3(b))를 이용하면, 검사신뢰도의 고도화(a_{INSP} 의 최소화) 및 검사주기의 장기화(N_{INSP} 의 확장)가 가능해 진다.

비파괴검사법(Non-Destructive Testing)으로 대변되는 종래의 손상 계측 기술에는 방사선투과검사(RT, radiation testing), 초음파탐상법(UT, ultrasound testing), 자분탐상검사(MT, magnetic particle testing), 누설자속탐상법(MFLT, Magnetic flux leakage testing), 와 전류탐상법(ECT, eddy current testing), 침투탐상법(PT, penetration testing), 누설검사(LT, leakage testing), 육안검사(VT, visual testing), 음향방출검사(AE, acoustic emission), 적외선탐상법(IRT, infrared ray testing) 등 여러 가지가 있다 [5].

방사선투과검사(RT, radiation testing)는 방사선을 이용하여 방사선이 물질과의 상호작용 중 투과 및 흡수되는 성질을 이용하는 것이다. 시험체 내부의 불연속부에 대하여 불연속부의 밀도가 시험체의 밀도와 차이가 생기기 때문에 이를 투과하는 방사선의 양에 차이가 생겨 투과 사진상에 검고 어두운 정도를 관찰함으로써 시험체의 내부 상태를 알아볼 수 있는 방법이다. 하지만, 방사선에 대한 안전관리가 요구된다.



자료출처: <http://www.k2velosi.com/safety-training-services/non-testing.php>
Fig. 1-4 방사선 투과 검사



(a) Imperium Inc.DAV(Digital Acoustic Video)

(b) 허니컴 구조물

자료출처: <http://www.imperiuminc.com>

Fig. 1-5 초음파검사

초음파탐상법(UT, ultrasound testing)은 시험체에 초음파를 전달시켜 시험체 내에 존재하는 불연속(Discontinuity)으로부터 반사한 초음파의 에너지양, 초음파의 진행 시간 등을 분석하여 불연속의 위치 및 크기 등을 정확하게 알아내는 방법이다. 초음파탐상검사의 적용은 시험체 내에 존재하는 불연속의 크기 및 위치 측정은 물론 시험체의 크기, 두께, 시험체의 재질, 균일도, 부식상태 등 매우 광범위하게 적용하며, 이외에도 유속 측정, 콘크리트 검사 등 그 적용범위가 매우 넓어지고 있다.



(a) PHC PILE의 용접이음 부위 자분탐상

(b) 베어링 결함의 자분탐상

자료출처:<http://cafe.naver.com/noonejo/3026>

Fig. 1-6 자분탐상법

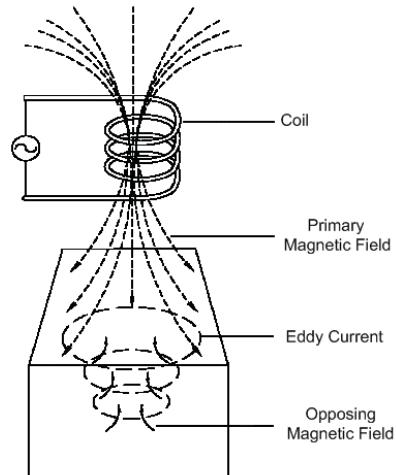
자분탐상법(MT, magnetic particle testing)은 강자성체 시험체의 표면 및 표면 바로 밑에 있는 결함을 검출하는 검사방법이다. 검사방법은 시험체에 자장(Magnetic field)을 걸어 자화시킨 후 자분(Magnetic Particle)을 적용하고 결함부에 발생된 누설 자장(Magnetic Flux Leakage)으로 인해 형성된 자분지시(Magnetic Particle Indication)를 관찰하여 결함의 크기, 위치 및 형상을 검출할 수 있다. 따라서 압력용기 및 구조물의 용접부 검사, 기계 부품의 제작 및 공정검사 및 특히 강자성체로 제작된 시험체의 사용 중에 나타나는 결함을 검출하는 보수검사에 널리 적용된다.

누설자속탐상법(MFLT, Magnetic flux leakage testing)은 구조물에 전기장 또는 자기장을 인가하였을 때, 손상의 존재 및 크기에 기인하여 손상 주변에서 자기장의 분포가 변화하는 원리를 이용한다. 이때, 자기장의 분포를 자기센서에 의하여 측정하여 손상을 검출한다.

와전류탐상법(ECT, eddy current testing)은 교류가 흐르는 코일에 전도체를 가까이 하면 코일 주위에 발생된 자계가 도체에 작용하게 된다. 코일의 자계는 교류에



(a) 항공기표면 미소결함 검사



(b) 와전류 탐상법의 원리

자료출처:http://www.qualitydigest.com/dec03/articles/01_article.shtml

Fig. 1-7 와전류 탐상법

의해 발생된 것이므로 도체를 관통하는 자속의 방향은 시간적으로 변화한다. 이때 도체에는 도체를 관통하는 자속의 변화를 방해하는 기전력이 생긴다. 이러한 현상을 전자기 유도(Electromagnetic Induction)라 하며 이 기전력에 의해 도체에 형성된 전류를 와전류라 한다. 와전류는 전도체(시험체)에 불연속이 존재하면 그 크기와 분포가 변화하게 되는데 이를 이용하여 불연속부를 검출하는 방법이 와전류 탐상검사이다.

침투탐상법(PT, penetration testing)은 구조물에 분사한 형광액체가 삼투압 현상에 의하여 손상 부위에 스며드는 원리를 이용한다. 상기 형광액체를 닦아낸 후, 자외선을 조사하면 손상부위에 잔류한 형광체에 의하여 손상을 검출할 수 있다.

누설검사(LT, leakage testing)는 시험체 내부 및 외부의 압력차 등에 의해서 기체나 액체를 담고 있는 기밀용기, 저장시설 및 배관 등에서 유체의 누출, 유입 여부를 검사하거나, 유출량을 검출하는 방법이다.

육안검사(VT, visual testing)는 구조물의 손상을 육안 또는 CCD 카메라로 관찰하여 손상 여부를 판단하는 방법이다.

위에서 상술한 비파괴 검사법은 각각의 장단점을 가지고 있다. 자분탐상법과 와전류 탐상법 그리고 누설자속 탐상법과 같은 전자기적 현상을 이용한 비파괴 검사방법은 금속 구조물의 표면 혹은 표면 근방에 존재하는 결함을 검출하는데 유용한 방법이다. 그러나, 자분탐상법은 전처리(Precleaning) 및 후처리(Post-cleaning) 과정이 필요하며 직통법의 경우 전기가 접촉되는 부위에 국부적인 가열이나 손상이 발생할 수 있고, 또한 유사 결함 형태의 구분이 어려워 정량적인 평가가 어렵다.

한편, 누설자속탐상법은 결함을 포함한 시험편 표면 근방의 자기장의 분포를 정량적으로 측정하여, 결함의 유무 및 위치뿐 아니라, 그 크기도 추정하는 정량 평가가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 결함의 누설자속이 공간적, 강도적으로 미소하기 때문에 자기센서를 시험편 표면에 접근시켜야 할 필요가 있다. 또한, 단일 센서의 스캔에 의한 측정 및 해석에 기인하여 많은 시간이 소요되는 것은 해결해야 할 문제중 하나이다. 와전류탐상법은 상자성 재료의 표면 피로균열과, 얇은

곳에 존재하는 내부결함 및 부식결함을 검출하고 평가하는데 사용되고 있는 중요한 기술 중 하나이다. 그러나, 인접한 코일간 간섭의 영향으로 공간분해능을 높이는데 한계를 가지고 있다. 결과적으로 많은 수의 코일을 배열할 수 없어서 탐상 속도가 빠르지 못하다는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 극복하기 위하여, 전세계적으로도 비파괴검사 방법은 다음과 같은 추세로 발전하고 있다. 즉, 기존의 검사에 사용되는 물리적 수단을 이용한 검사 방법의 종합화, 전기 전자분야의 기술발전으로 첨단기술을 이용한 초정밀화, 초고속화, 검사공정의 자동화, 검사결과의 화상화 및 검사결과의 보존 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

저자가 포함된 연구 그룹에서는 상술한 비파괴 검사 기법 중 자분 탐상법, 누설 자속 탐상법, 와진류 탐상법, 침투 탐상법 등의 단점 및 제약을 해결하기 위하여 순수 국산 원천기술인 자기카메라를 개발해 왔다. 자기카메라는 자기장 분포를 가시화할 수 있으며, 이러한 원리를 이용하면 금속 구조물의 비파괴 검사 및 평가에 적용할 수 있다.

지금까지의 자기카메라 기술은 요크형 전자석에 의하여, 시험편 표면근방의 좁고 긴 영역에 자기장 또는 유도전류를 인가하고, 획득하는 스캔형 자기카메라에 대한 연구가 주류를 이루었다. 또한, 매트릭스형으로 2차원 배열한 홀센서, 구동전원의 스위칭 및 출력신호조정회로의 병렬처리에 의하여 정자기장을 별도의 기계적 이송장치 없이 실시간 가시화한 바 있다 [14-16].

하지만 공간상의 2차원 면적상의 교변전자기장을 별도의 기계적 이송장치 없이 실시간 가시화하는 기술은 실현되지 못한 바, 본 연구를 통하여 해당 기술을 개발하였다. 즉, 보다 넓은 면적에 교변장기장을 인가하기 위하여, 면적형 유도전류인 가장치를 개발 및 수치해석하고, 시제품을 제작하였다. 또한 피측정체의 표면에 위치한 균열에 의하여 왜곡되는 전기장 및 자기장을 측정하기 위하여 2차원으로 배열한 홀센서 및 스위칭회로, 신호처리회로를 개발하였다. 이러한 구성에 의한 교류 면적형 자기카메라의 효율성을 검증하기 위하여, 강자성체와 상자성체가 혼재된 구

조재(오스테나이트계 스테인레스강) 및 상자성체(알루미늄 합금)의 평판 시험편에 인공결합 및 피로균열을 도입하고, 이를 검사 및 평가하였다 [11-13].

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 제1장은 서론이며, 제2장은 자기카메라의 원리 및 종래의 연구를 소개한다. 제3장은 교류면적형 자기카메라를 개발하기 위한 기반기술인 면적형 유도전류 인가법과 면적형 자기센서 배열, 병렬형 신호처리회로에 대하여 설명한다. 제4장은 교류면적형 자기카메라의 유용성을 검증하기 위하여 오스테나이트계 스테인레스강과 알루미늄 합금에 도입한 인공결합 및 피로균열을 검출한 결과를 보고한다. 제5장은 결론이다.

제 2장 원리 및 종래의 연구

제 1절 자기카메라

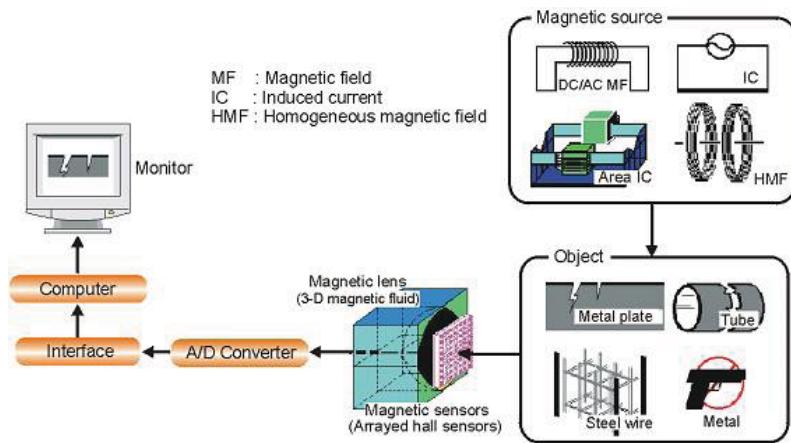


Fig. 2-1 자기카메라

자기카메라는 Fig. 2-1에 나타난 바와 같이 자원, 자기센서배열, 자기렌즈, 신호 처리 회로 및 AD변환기, 인터페이스, 컴퓨터(프로세서) 및 디스플레이로 구성된다.

직류자기장 [6, 7], 교류자기장, 전기장, 유도전류, 유도면전류 [14-21], 지자기와 같은 자원으로부터의 전자기장을 시험편에 입력하면, 강자성체 또는 결함의 존재에 기인하여 전자기장의 왜곡이 발생한다. 이러한 왜곡은 공간상의 자기장의 분포를 변화시키게 되며, 자기렌즈 [10]에 집속된다. 또한, 배열된 자기센서에 의하여 자기장의 분포는 아날로그 전기신호의 분포로 변화하게 되며, 이를 AD변환기를 이용하면 디지털 전기신호의 분포로 컴퓨터에 입력할 수 있게 된다. 본 장에서는 지금까지 연구되어 온 자원, 자기센서배열, 회로에 대하여 간단히 원리를 설명한다.

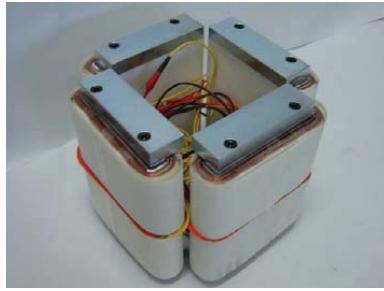
제 2절 자원

시험 대상체의 재질 및 목적에 따라 유효하게 결합을 탐상할 수 있도록 여러 가지 형태의 자원(magnetic source)을 연구 개발하여 왔다. 대표적인 방법이 교차자화법(C-MFL, cross type magnetic flux leakage) [23], 소형직류자화법(DC-MFL, direct current magnetic flux leakage), 수직자화법(V-MFL, vertical type magnetic field leakage), 유도면전류법(STIC, sheet type induced current) [14-21], 복합유도전류-누설자속법(CIC-MFL, complex induced current-magnetic flux leakage) [24-26] 및 자성유체침투법(MFPT, magnetic fluid penetration testing)^o다. 각각의 시험 대상체에 대한 자원의 선택 및 특징을 Table 2-1에 나타낸다.

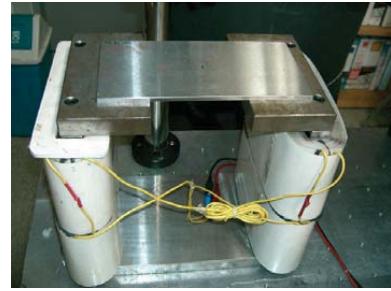
Table 2-1 자원의 분류

| Magnetic Source Type | Abbreviation | Specimen Material | Character | Application |
|--|--------------|--|---|--|
| Cross type magnetic flux leakage | C-MFL | Ferromagnetic | Crack inspection regardless of crack direction | ISI of steel and iron structure |
| Direct current magnetic flux leakage | DC-MFL | Ferromagnetic | Small size NDT system. Suitable in scan type magnetic camera | PSI in the steel-iron production line. ISI in train wheel |
| Plate type magnetic flux leakage | P-MFL | Ferromagnetic | NDT of pipe. Suitable in area type magnetic camera | ISI of steel structure. ISI of wire production |
| In-side solenoid magnetic flux leakage | IS-MFL | | | ISI of steel pipe |
| Vertical type magnetic flux leakage | V-MFL | Ferromagnetic, Paramagnetic and Mixed ferromagnetic & paramagnetic | NDT of metal. Suitable both of scan- and area-type magnetic camera. | ISI of aircraft and nuclear power plant |
| Sheet type induced current | STIC | | Suitable in scan type magnetic camera | ISI of aircraft and nuclear power plant |
| Improved sheet type induced current | I-STIC | | NDT of metal regardless of kinds. Suitable in scan-type magnetic camera | PSI in steel manufacturing line. ISI of aircraft and nuclear power plant |
| Combined induced current-magnetic flux leakage | CIC-MFL | All material | Opened surface crack | ISI of aircraft and nuclear power plant |
| Magnetic fluid penetration testing | MFPT | | | |

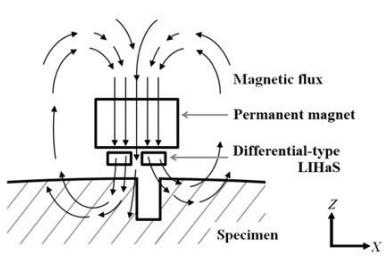
먼저, Fig. 2-2(a)의 교차자화법(C-MFL, cross type magnetic flux leakage) [10]은 누설 자속탐상법(MFLT, magnetic flux leakage testing) 또는 자분탐상법(MT, magnetic particle testing)의 경우 결함 길이 방향이 자화방향과 수평일 때, 결함을 탐상하기 곤란한 점을 보완하기 위하여 제시된 방법이다. 마주보는 두 개의 자극을 가지는 두 쌍의 극간식 자화기를 설치하고 교변 전류를 입력하면, 자화기위의 시험편은 서로 직각이 되는 방향으로 교차 자화된다. 이때, 결함의 길이 방향이 어느 쪽이라고 하더라도, 반드시 누설자속을 유기하여 탐상할 수 있게 되며, 정량적으로 결함을 평가할 수도 있다. 또한, Fig. 2-2(b)의 직류자화법(DC-MFL, direct current magnetic flux leakage)은 소형자화기를 조밀하게 배열된 자기센서의 이면에 설치하여, 제철제강 공정의 결함 검출 및 고속철도 차륜의 비파괴 검사에 적용한 바 있다.



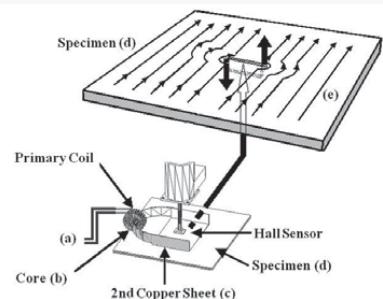
(a) 교차자화법(C-MFL)



(b) 직류자화법(DC-MFL)



(c) 수직자화법(V-MFL)



(d) 유도면전류법(STIC)

Fig. 2-2 자원의 종류

Fig. 2-2(c)의 수직자화법(V-MFL, vertical type magnetic field leakage)은 자기 센서을 수십 회 감은 코일 안에 위치시키고, 코일에 교류 전원을 인가하였을 때 시험 대상체에 수직방향으로 교변 자계가 유도된다. 이때 결함에 의한 자기장의 변화와 유도전류의 흐트러짐을 측정하여 결함을 탐상할 수 있다.

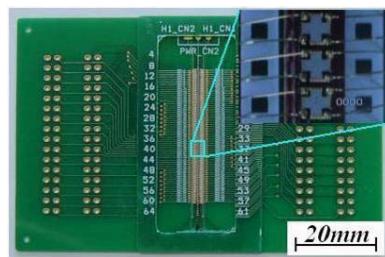
Fig. 2-2(d)의 유도면전류법(STIC, sheet type induced current)은 시험편의 표면에 면전류를 유도하고, 결함의 존재에 기인하는 면전류의 왜곡을 유도하는 방식이다. 즉 코일(coil)에 교류전류를 입력하면, 강자성체 코어(core)에 교류 자기장이 발생한다. 이 때 코어를 통과하는 동판(copper sheet)에는 교류 면전류가 유도된다 [14-21]. 도전성 시험편을 동판에 근접하면 시험편의 표면 근방에 유도면전류가 유도되고, 결함의 존재에 의하여 결함의 양 선단에서 유도면전류의 왜곡이 발생하여 자기장의 분포가 변화하게 된다. 이러한 자기장 분포의 변화를 감지함으로써, 강자성체, 상자성체, 강자성체 및 상자성체가 혼재된 구조물의 결함을 검출할 수 있게 된다.

제 3절 센서배열

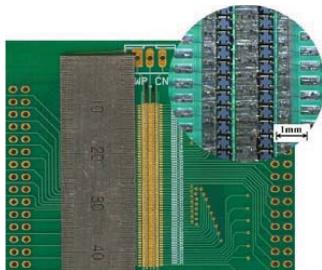
자기장의 분포를 정량적으로 측정하기 위한 자기센서로는 홀센서, 자기저항(MR, magnetic resistance) 센서, 거대자기저항(GMR, giant magnetic resistance) 센서등을 들 수 있다. GMR 센서는 2007년도 노벨물리학상을 수상한 GMR 효과에 기초한 초소형 자기센서로써, 비파괴검사분야에서 그 활용도가 기대되고 있음을 다수의 논문에서 보고하고 있다. 그러나, 홀센서(약 911배 증폭)에 의하면, $\pm 4\text{mT}$ 의 전구간동작범위(FSO, full scale operational range)에서 2.51V/mT 의 감도를 실현하고 있는 바, 보고된 GMR센서 또는 SDT(spin dependent tunneling)센서에 비하여 5~10배의 FSO를 가지면서, 10~100배 정도의 고감도를 실현하였다. 더욱이 표준편차도 0.01V 정도로써 약 $4\mu\text{T}$ 정도의 측정정밀도를 가진다.



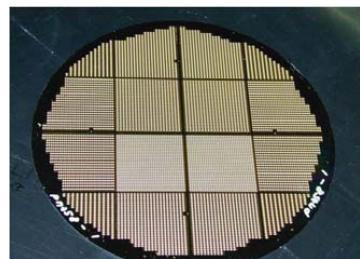
(a) SSS(Signle Sensor Scanning)



(b) Single LIHaS(Linearly integrated Hall sensor array)



(c) Differential LIHaS(Linearly integrated Hall sensor array)



(d) AIHaS(Area type integrated Hall sensor array)

Fig. 2-3 여러가지 형태의 센서배열

따라서, 자기카메라에서는 주로 홀센서를 사용하여 왔다. 즉, Fig. 2-3(a)와 같이 1개의 자기센서를 2차원 평면상에서 정밀하게 스캔하는 방법(SSS, single sensor scanning), Fig. 2-3(b)와 Fig. 2-3(c)처럼 선형으로 조밀하게 배열한 자기센서를 1차원으로 스캔하는 방법(LIHAs, linearly integrated Hall sensor array), Fig. 2-3(d)와 같이 면적형으로 배열한 자기센서를 이용하는 방법(AIHAs, area type integrated Hall sensor array)이 있다. 조밀하게 센서를 배열하는 방법에는 Single LIHAs(Fig. 2-3(b)), Differential LIHAs(Fig. 2-3(c)) 두 가지 방법을 사용하여 결합을 탐상하고 있다. Single LIHAs는 InSb 홀센서를 0.52mm 또는 0.78mm간격으로 1열로 배치함으로써 종래에 상용으로 판매되는 패키지된 홀센서(삼성, HE12AF1U12)를 사용한 경우에 비해 높은 공간분해능, 센서의 핀 수와 패키지의 크기, PCB에 배열한 센서간의 높이 차이, 경사로 인한 바이어스 오차 및 감도 오차를 보완한 방법이다 [6]. 하지만, Single LIHAs의 결합 누설 자속은 주변 자기장 및 자화기의 자극으로부터 발생한 자장에 영향을 받아 포화되는 단점을 가지고 있다. 이를 보완한 방법이 Differential LIHAs이다 [7].

Differential LIHAs는 InSb 홀센서를 0.52mm 또는 0.78mm간격으로 2열로 평행하게 배치하였다, 차동형 홀센서는 일반적이 홀센서와는 달리 포화되지 않고 각각의 홀센서에 상이한 자기장이 입력될 때만 그 차이를 출력하기 때문에 외부자기장의 영향을 최소화 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.



Fig. 2-4 0.78mm 간격의 공간분해능을 가지는 1024개의 홀센서 배열

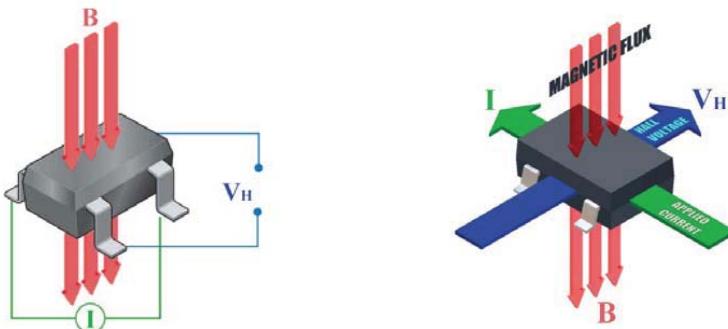
또한, 0.78mm 및 0.52mm의 공간분해능을 가지는 AIHaS는 1,024개의 InSb 헐센서에 의해서 측정된다. NiZn ferrite wafer에 InSb Hall sensor를 0.78mm 간격으로 32×32 개(1,024개)를 배열하고, 자체 제작한 센서 전용 PCB에 실장한 후, wire ball bonding에 의하여 결선함으로서 $24.96 \times 24.96\text{mm}^2$ 의 영역에서 0.78mm의 공간분해능을 가진다.

현재 0.5mm 분해능의 SSS, 0.52mm 및 0.78mm의 공간분해능을 가지는 LIHaS, 0.78mm 및 3.5mm의 공간분해능을 가지는 AIHaS(Fig. 2-3(d))가 개발되어 있다.

제 4절 신호처리회로

홀센서의 경우에는 2개의 입력단자와 2개의 출력단자로 구성된다. 입력단자에 정전압 또는 정전류 구동에 의하여 전기장을 인가하고, 센서면의 법선방향으로 자기장을 인가하면, 출력단자간의 전압차가 자기장의 세기에 비례하여 증가한다. 따라서, 자기장의 세기를 정량적으로 측정하기 위해서는 차동증폭회로가 필요하게 된다. 그리고, 필요한 주파수대역대의 신호를 추출하거나 잡음을 제거하기 위해서는 고대역통과필터(HPF, high pass filter)와 저대역통과필터(LPF, low pass filter)를 적절히 이용해야 한다. 또한, 자원이 교류전류에 의하여 구동되는 CIC-MFL, STIC에서는 센서에 출력되는 신호가 교류전류의 주파수와 동일하게 되므로 위상차, 진폭변화, 최대치변화등이 결함의 존재 및 크기와 관련있는 유효한 정보가 된다.

홀 효과 현상(Fig. 2-5)을 이용한 홀 센서는 전류가 흐를 수 있는 반도체 물질에 정전류 I 를 흐르게 하고 전류에 직각인 방향으로 B 를 인가하면 Lorentz Force가 전자의 흐름에 작용하게 되어 전자 분포의 웨곡이 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. (1)로 나타낸다. 여기서 k 는 홀 상수이며, θ 는 감자면(減磁面)에 입사되는 자기장의 각도이다.



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

Fig. 2-5 홀 효과의 원리

$$V_H = k \cdot I \cdot B \cdot \cos \theta \quad (1)$$

정자기장을 가시화하는 자기카메라는 이러한 누설 자속 분포에 따른 홀센서의 출력전압 즉, 전위 차이를 차동식 연산증폭기(OP-Amp)를 이용하여 측정한다. 고정밀 차동 증폭을 위하여 높은 동상신호제거비(CMRR, Common Mode Rejection Ratio)를 갖는 INA128를 도입한 Fig. 2-6과 같은 회로가 이용되고 있다. INA128 한 개의 외부 저항(R_G)을 연결하는 것만으로도 쉽게 0~80dB의 이득값을 얻을 수 있다. 차동 증폭 회로에 연결되는 두 개의 전압 플로어(A_1, A_2)들은 작은 오차를 갖고면서도 높은 입력 임피던스를 보인다. 또한, 구동 저항이 R_G 이상으로 불균형 되는 것을 허용할 수 있다. 한편, 차동 증폭회로의 이득은 Eq. (2)에 나타낸 바와 같이 $R_5 = R_7, R_8 = R_9$ 일 때 R_5 과 R_8 에 의하여 결정된다.

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

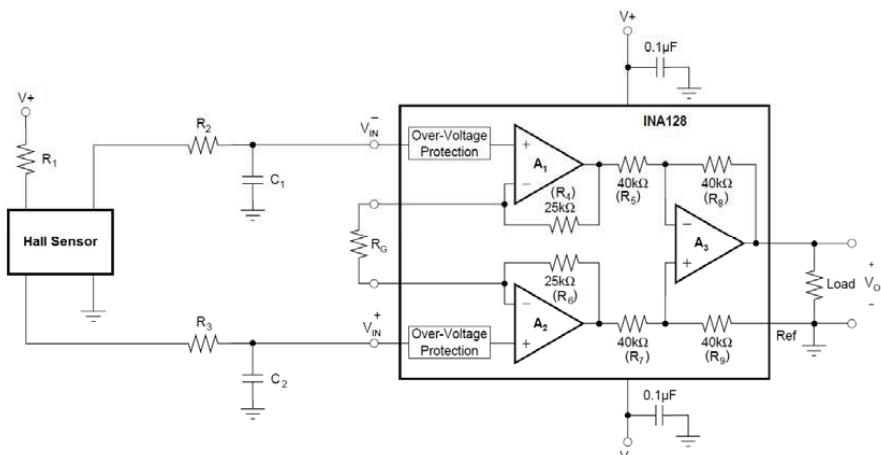


Fig. 2-6 INA128을 이용한 홀센서 신호의 증폭회로도

제 3장 교류 면적형 자기카메라

제 1절 수치해석

유도면전류(STIC, Sheet Type Induced Current)는 Fig. 3-1에 나타낸 바와 같이 8자형의 코어의 중심에 1차 코일을 감고, 2차 코일(동판)을 통과시키는 형태로 제작된다. 1차 코일에 교류전류(I_{AC})를 입력하면, 8자형 코어에 자기장(Magnetic flux)이 발생되며, 이에 기인하여 동판에 유도전류(Induced current)가 발생된다. 이를 시험편에 가까이 접근시키면, 시험편에 면적형 유도전류가 발생하고, 결합에 의한 유도전류의 왜곡 및 자기장의 분포가 변화하게 된다. 변화된 자기장의 분포를 측정함으로써, 결합의 유무, 위치 및 크기를 추정할 수 있게 된다 [21, 22].

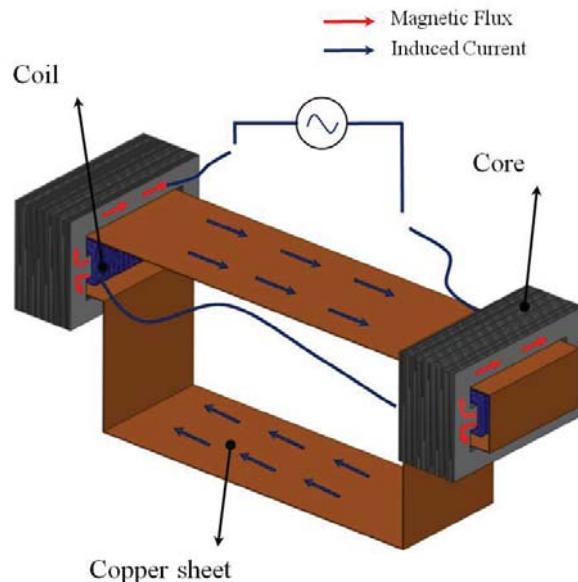


Fig. 3-1 유도면전류의 원리

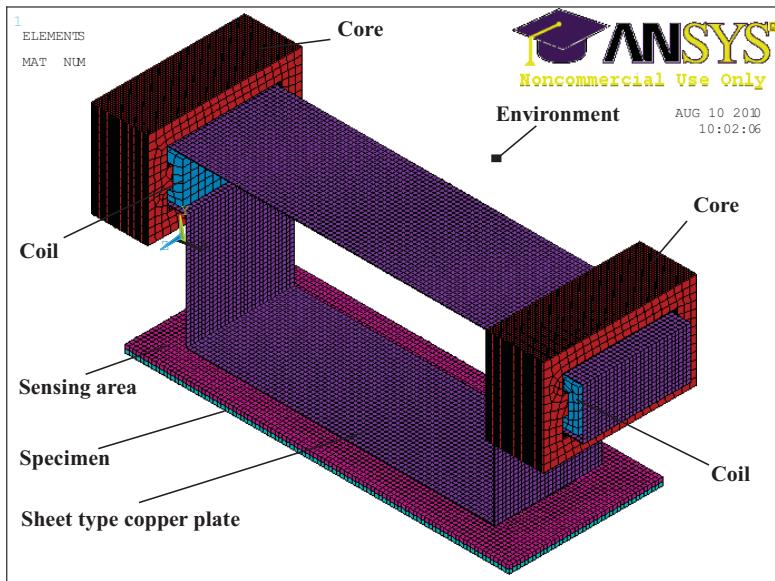


Fig. 3-2 수치해석 모델

시험편에 유도면전류를 발생시켰을 때, 각각의 주파수에서 시험편의 깊이에 따른 전기장 및 자기장의 세기 및 방향이 어떻게 변화하는지를 알기 위하여, Fig. 3-2에 나타낸 바와 같은 3차원 모델에 의하여 수치해석하였다. 수치해석은 상용 전자기장 해석 프로그램인 ANSYS Program (Ver. 11.0 SP1 UP20070830, EMAG)에 의한 유한요소해석을 수행하였다. 각 요소의 물리적 특성 및 요소의 크기를 Table 3-1에 정리하였다.

Table 3-1 각 요소의 물리적 특성 및 크기

| Item | Material | Magnetic Properties | Size [mm] | Meshing size[mm] | ANSYS model type |
|-------------------------|---------------|------------------------------|---|------------------|------------------|
| Specimen | Aluminum | MURX1.000022 RSVX 2.82e-8 | 40 × 100 × 1 | 1 | SOLID117 |
| Core | Silicon Steel | MURX 4000 RSVX 4.72e-8 | 25 × 40 × 0.35 2 cores with 30 slides of each. | 2 | SOLID117 |
| Coil | Copper | MURX0.999994 RSVX 1.68e-8 | 21× 28 × 11 2 coils × 17 turns × 2.5A | 2 | SOLID117 |
| Sheet type copper plate | Copper | MURX0.999994 RSVX 1.68e-8 | 28 × 126.4 × 44 thickness 0.2 | 1 | SOLID117 |
| Sensing area | Air | MURX 1 | 40 × 100 × 1 | 1 | SOLID117 |
| Crack | Air | MURX 1 | 1 × 10 × 4 | 2 | SOLID117 |
| Environment | Air | MURX 1 | 50 × 170 × 70 | 5 | SOLID117 |

Fig. 3-3, Fig. 3-4 및 Fig. 3-5은 알루미늄 시험편(두께 5mm)에 결함이 없을 때와 길이가 2mm 및 10mm인 결함에서 주파수에 따른 각 깊이에서의 전기장의 수치해석 결과를 나타낸다.

Fig. 3-3에 나타낸 바와 같이 주파수가 높을수록 표피효과에 의하여 시험편의 표면에 유도전류가 집중되고 있음을 알 수 있다. 또한, 주파수가 낮으면, 시험편의 깊은 곳까지 유도전류가 인가된다. 따라서, Fig. 3-4 및 Fig. 3-5에 나타낸 바와 같이 저주파수에서는 결함의 존재에 기인한 와전류가 시험편 표면에서 내부까지 전반적으로 발생하며, 결과적으로 보다 많은 자기장이 폭넓게 발생하게 된다. 반면에 고주파수에서는 결함의 선단에 집중된 자기장이 발생하게 된다.

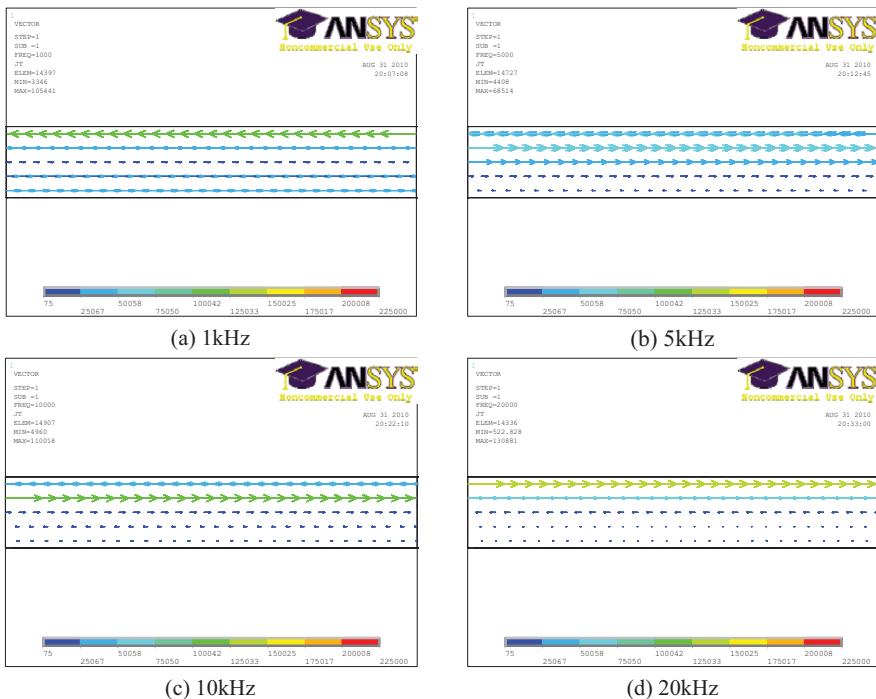


Fig. 3-3 Crack 없을 때 유도주파수의 변화에 따른 침투깊이 수치해석
(XY section view)

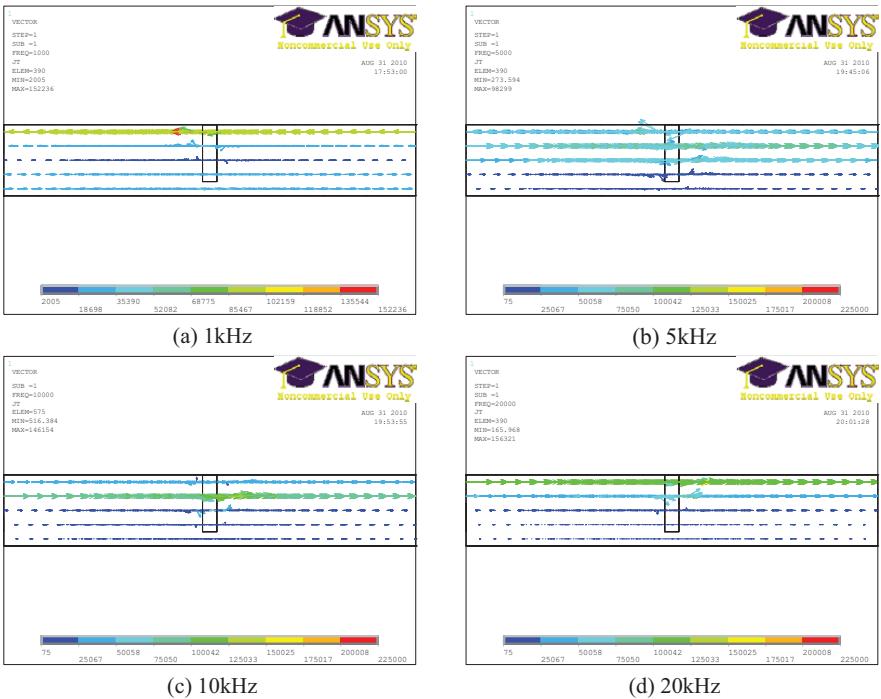
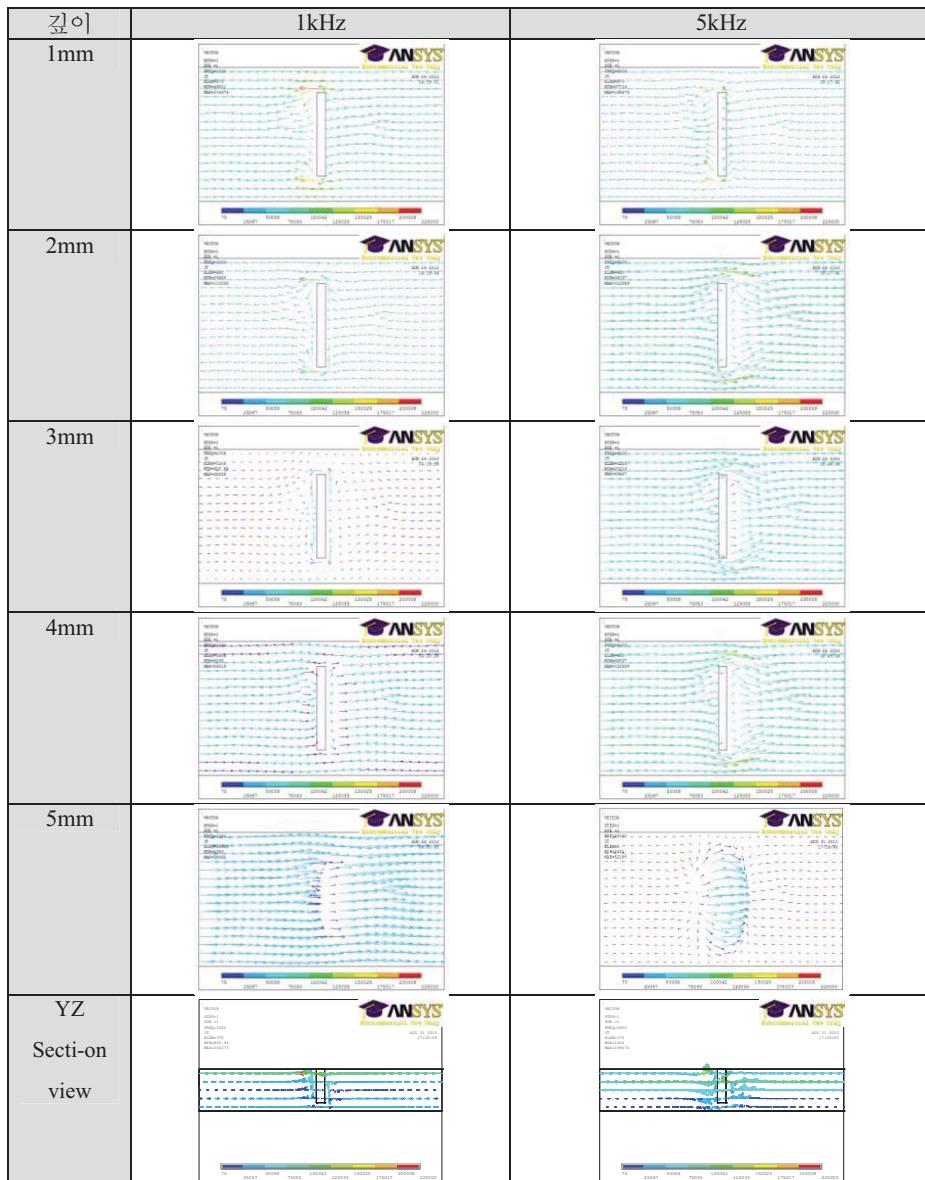


Fig. 3-4 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 전기장 수치해석 결과
(crack : L2, W1, D4 [mm])

Fig. 3-5는 길이가 10mm인 결합에서 주파수에 따른 각 깊이에서의 전기장의 수치해석 결과로서, 주파수가 낮아질수록 유도전류가 시험편의 깊이 방향으로 보다 많이 발생하고 있음을 나타낸다. 또한, 결합의 양단에서 유도전류의 왜곡에 기인한 와전류가 발생하며, 그 방향은 각각 반대 방향이다. 따라서, 결합의 길이가 짧으면 서로 상쇄되어 결합 겹출능이 저하됨을 알 수 있다.



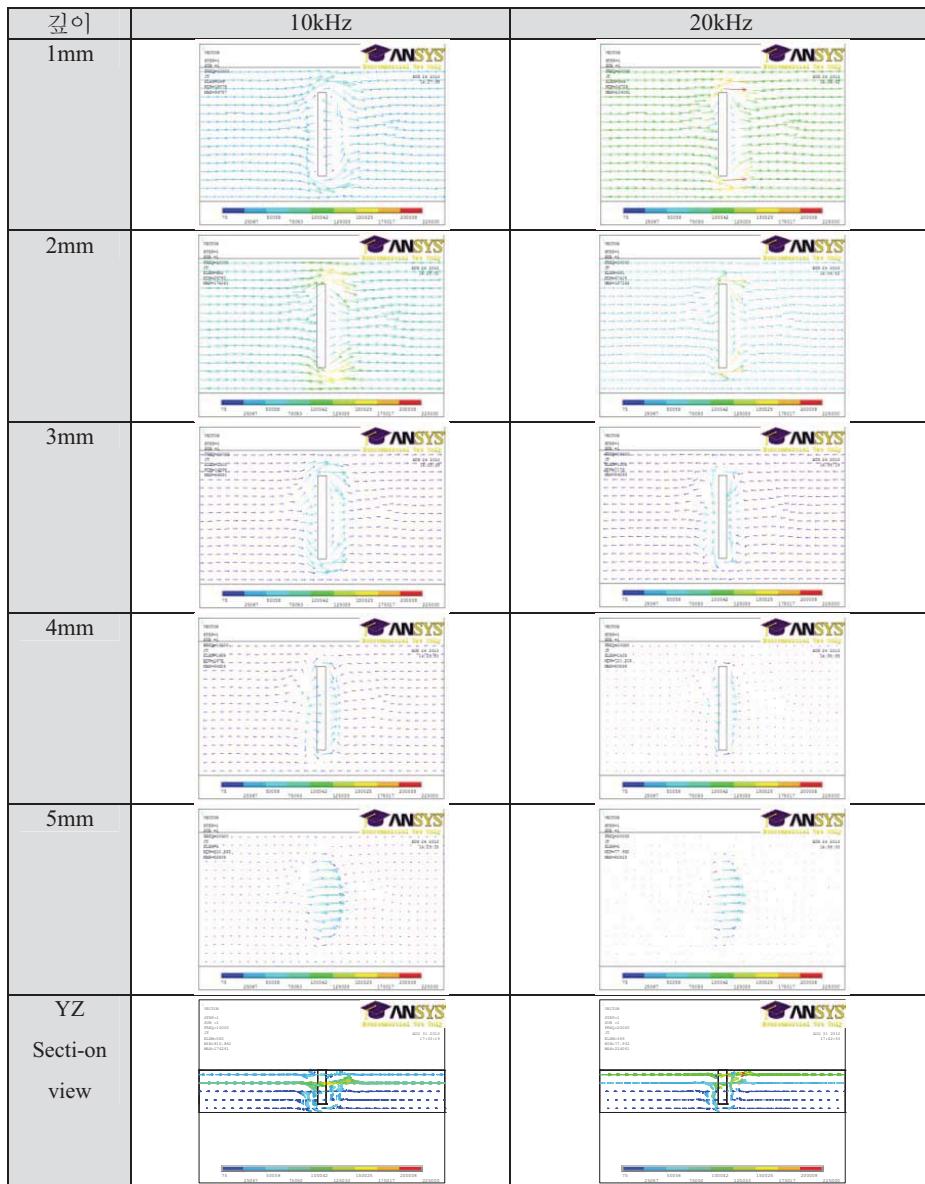


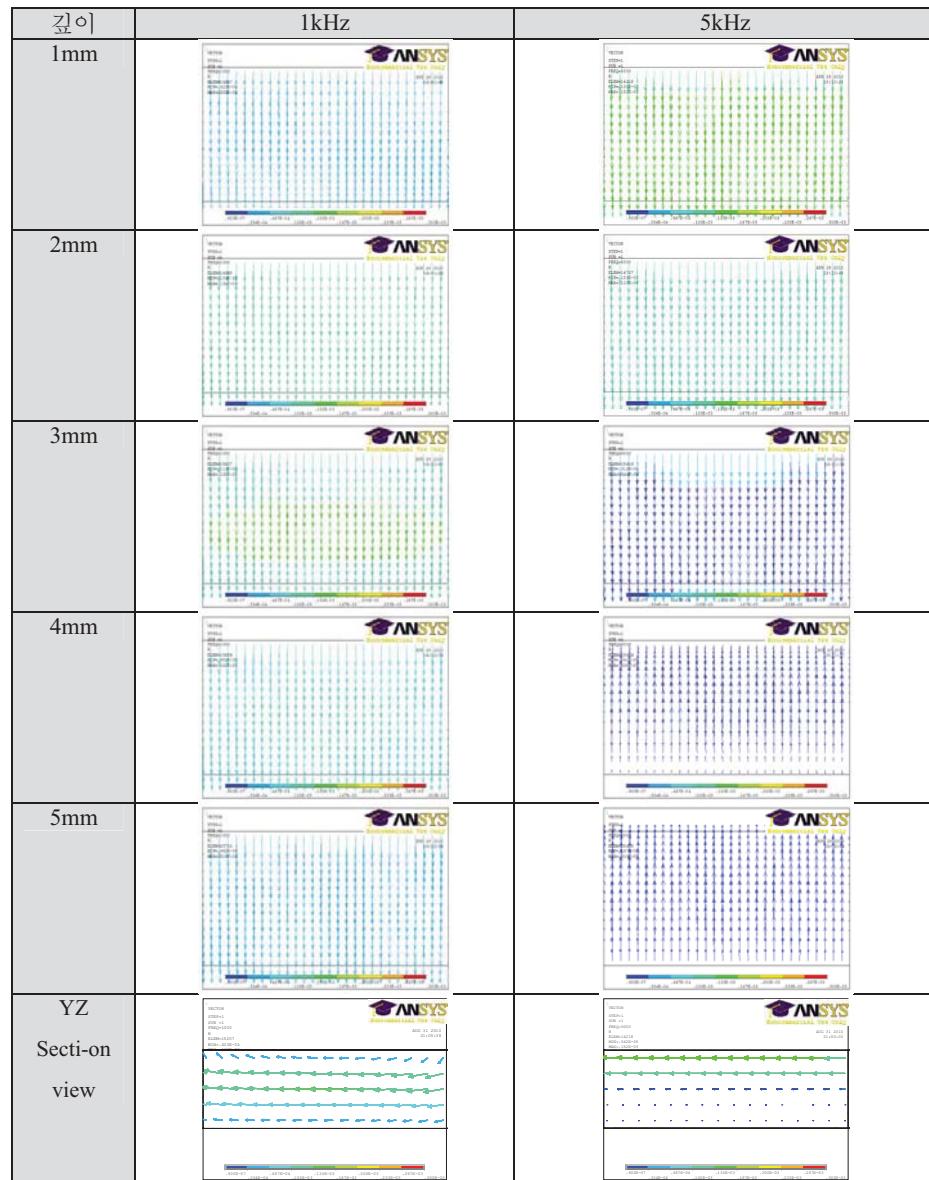
Fig. 3-5 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 전기장 수치해석 결과
(crack : L10, W1, D4 [mm])

Fig. 3-6, Fig. 3-7 및 Fig. 3-8은 주파수별 각 깊이에서의 유도면전류의 왜곡에 기인한 자기장의 수치해석 결과로서, 균열이 없을 때, 균열의 길이가 2mm 및 10mm인 각각의 경우의 수치해석 결과를 나타낸다.

Fig. 3-6은 균열이 없는 경우, 주파수별 유도면전류의 자기장의 수치해석 결과를 나타낸다. 자기장은 전기장에 수직인 방향으로 발생하며, 보다 이해를 용이하게 하기 위하여 자기장 해석결과는 색깔별로 고정하였다. 즉, 청색은 낮은 자기장, 연청색 또는 황색은 높은 자기장을 나타낸다. 5kHz 및 10kHz는 깊이 3mm 근방에서, 20kHz는 깊이 2mm에서 청색이 나타나고 있다. 즉, 주파수가 높아질수록 깊이에 따른 자기장의 세기가 청색에 가까워지고 있음을 알 수 있으며, 이는 표피효과에 기인한다. YZ section-view로부터도 표피효과를 관찰할 수 있다.

Fig. 3-7은 균열의 길이 2mm, 폭 1mm, 깊이가 4mm인 경우에 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 자기장의 수치해석 결과를 나타낸다. 1kHz에서는 깊이 4mm 까지 충분한 자기장이 발생되고 있음을 알 수 있으나, 결합 선단에서 상호 반대방향의 와전류가 발생하여 자기장이 상쇄되어, 결합에 기인한 자기장의 세기는 결합 길이가 긴 경우에 비하여 크지 않다. 또한, 자기장도 표피효과에 의하여 높은 주파수에서 표면근방에 집중되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3-8은 Fig. 3-7과 균열의 폭 및 깊이는 동일하나, 균열의 길이가 10mm인 경우, 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 자기장의 수치해석 결과를 나타낸다. 결합의 길이가 긴 경우에는 결합 선단에서 상호 반대방향의 와전류가 발생하더라도, 서로 상쇄하기 곤란함으로, 결합 길이가 긴 경우가 결합 검출능이 뛰어나다. 또한, 1kHz, 1mm에서 해석한 바와 같이 다른 주파수에 비하여 자기장의 분포가 결합의 양 선단에서 폭 넓게 발생하고 있음을 알 수 있다.



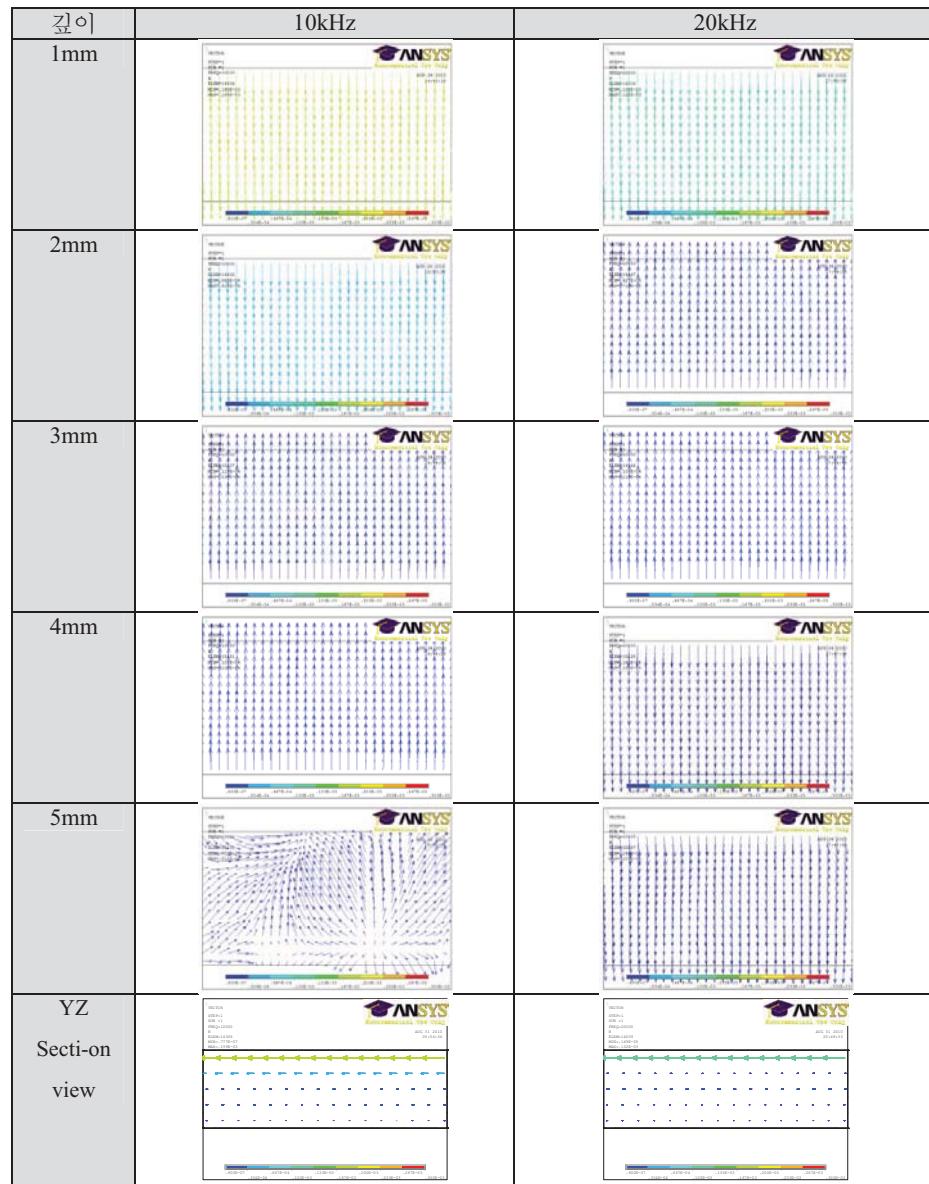
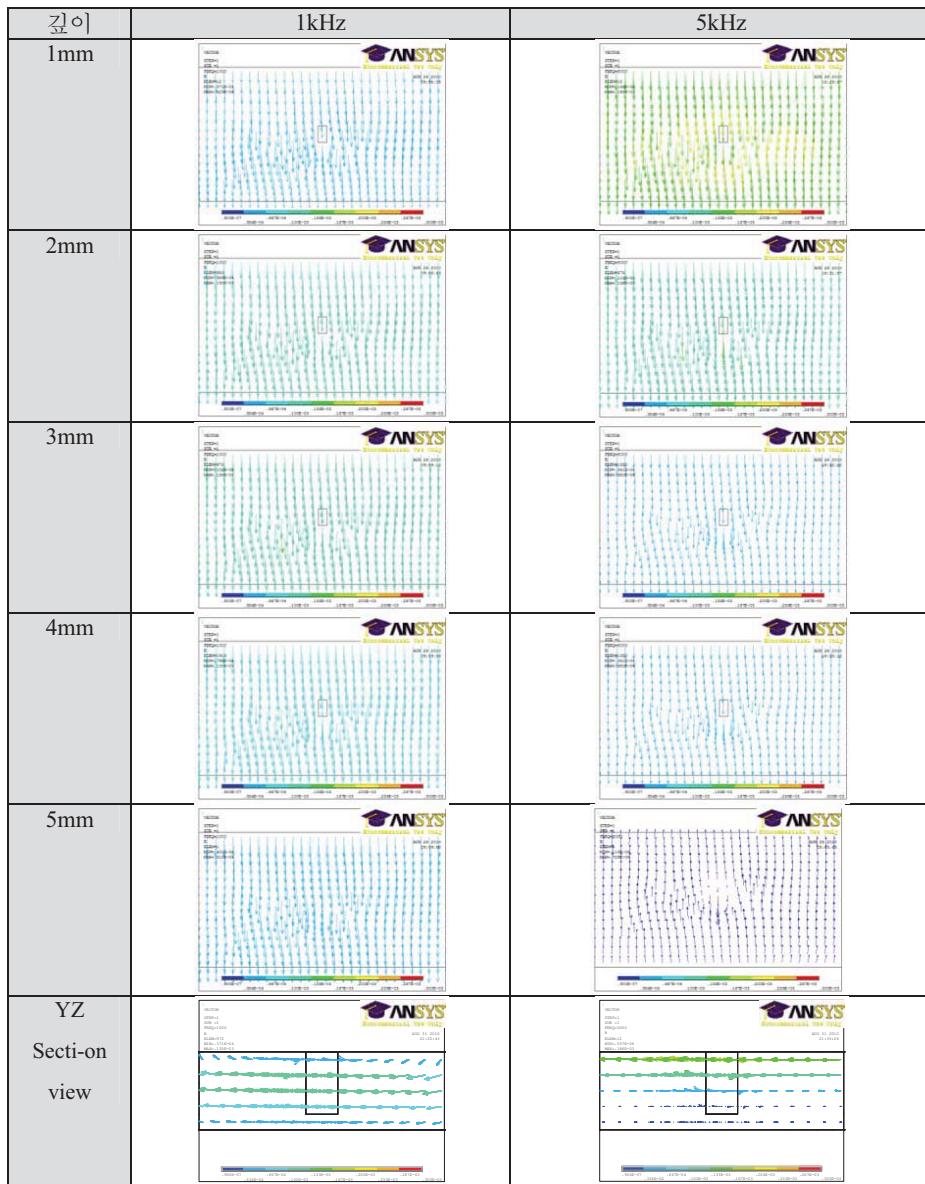


Fig. 3-6 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 자기장의 수치해석 결과
(crack 없는 경우)



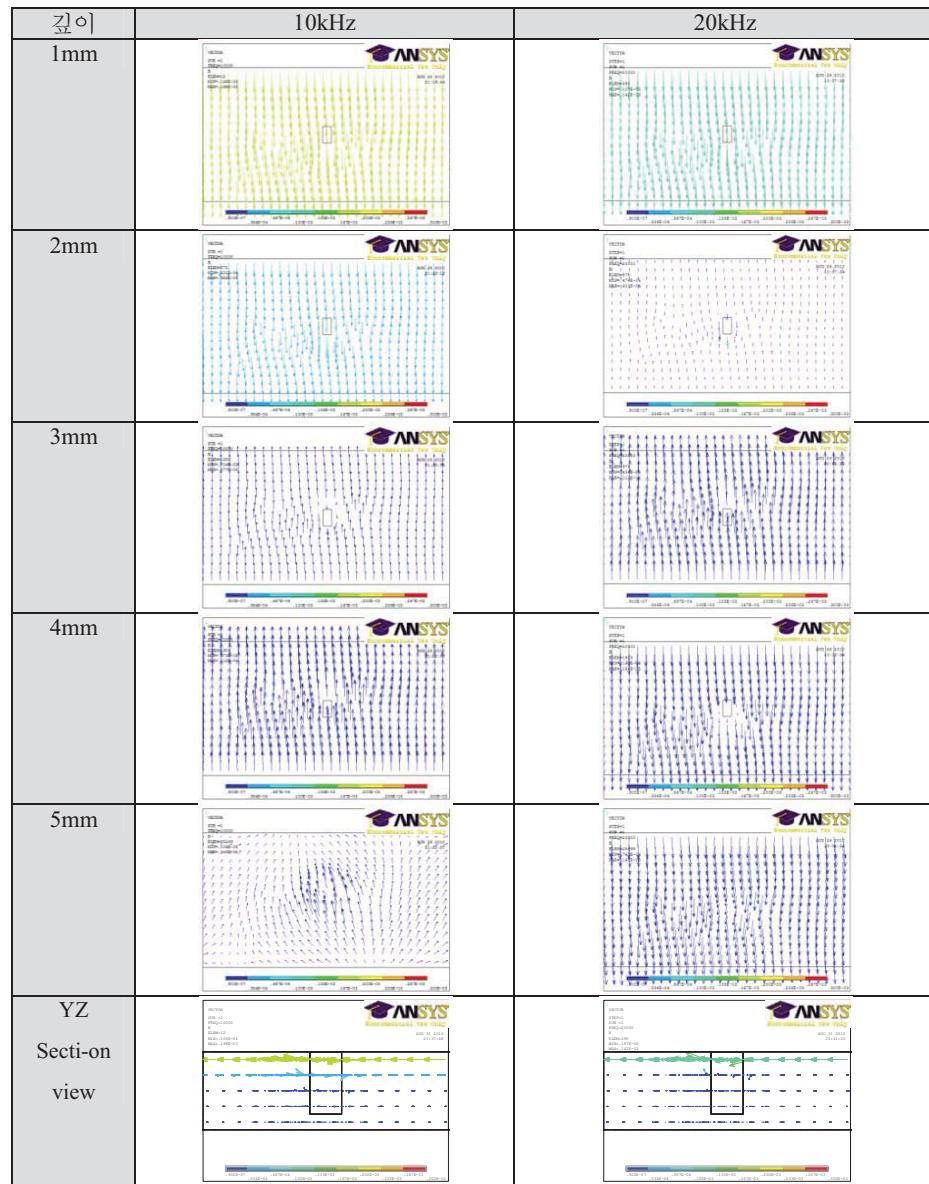
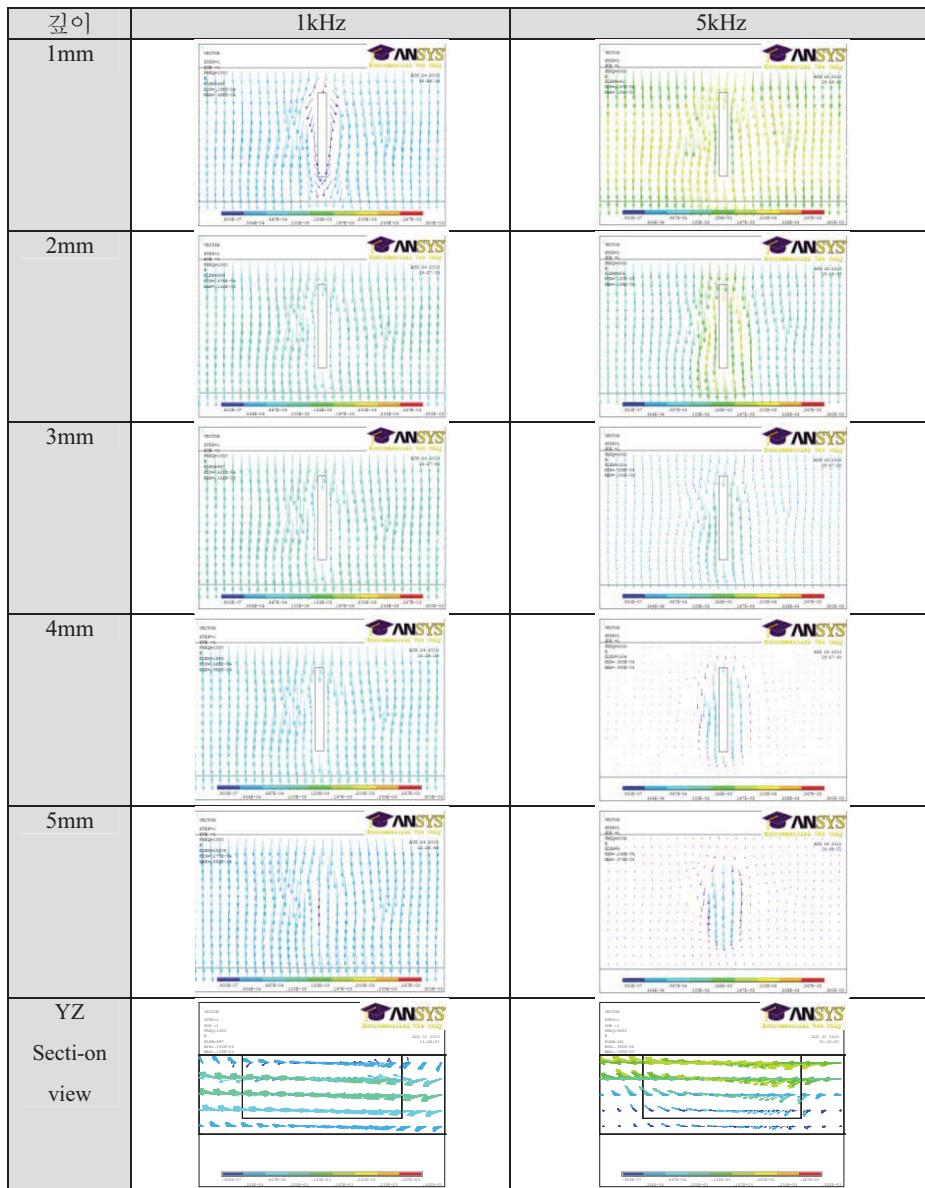


Fig. 3-7 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 자기장의 수치해석 결과
(crack : L2, W1, D4 [mm])



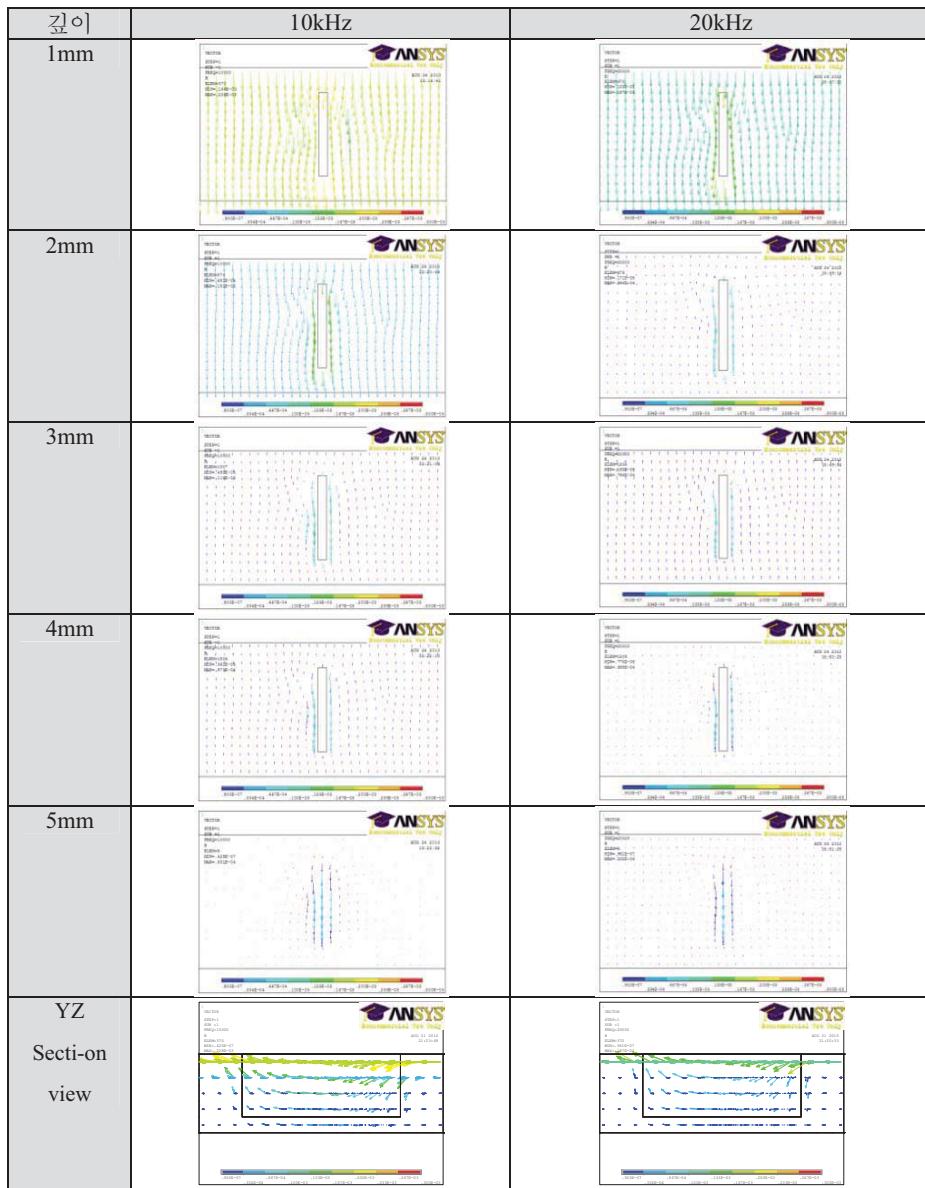


Fig. 3-8 주파수별 유도면전류의 왜곡에 기인한 자기장 수치해석 결과
(crack : L10, W1, D4 [mm])

제 2절 시제품 제작

1. 면적형 유도전류

전술한 바와 같이 유도면전류(STIC, Sheet Type Induced Current)는 8자형의 코어의 중심에 1차 코일을 감고, 2차 코일(동판)을 통과시키는 형태로 제작된다. 1차 코일에 교류 전류(I_{AC})를 입력하면, 8자형 코어에 자기장이 발생되며, 이에 기인하여 동판에 유도전류가 발생된다. 이를 시험편에 가까이 접근시키면, 시험편에 면적형 유도전류가 발생한다. 이러한 원리에 기본하여, Fig. 3-9에 나타낸 바와 같은 STIC을 시제작하였다. 길이 370mm, 폭 100mm, 두께 0.1mm인 동판이 이용되었으며, 특히 센서 배열 부근에서는 폭을 70mm로 축소하여 유도면전류가 집중되도록 하였다. 또한, 코어는 고투자율을 가지는 실리콘강에 의하여 제작하였으며, 17회의 권수를 가지는 코일에 2.5A, 1~20kHz의 전류를 입력하였다. 또한, 코일 및 코어는 2개를 장착하여 유도전류가 보다 많이 유도되도록 하였다.

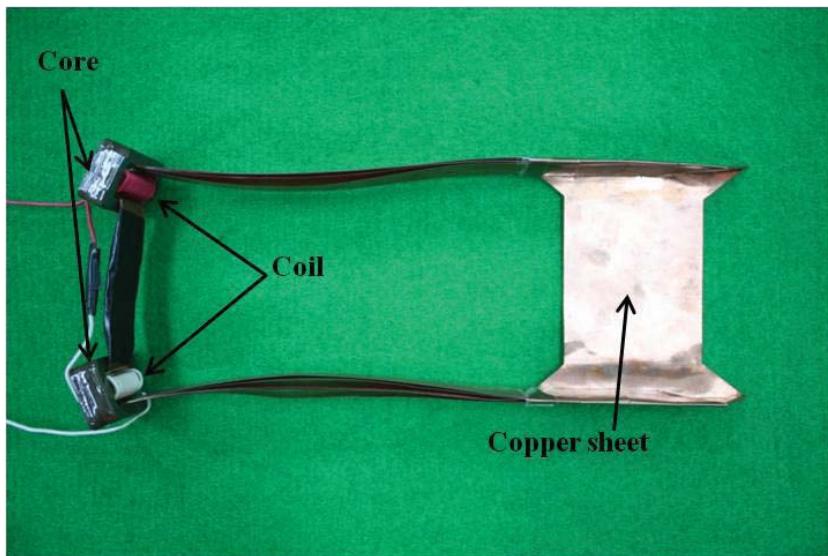
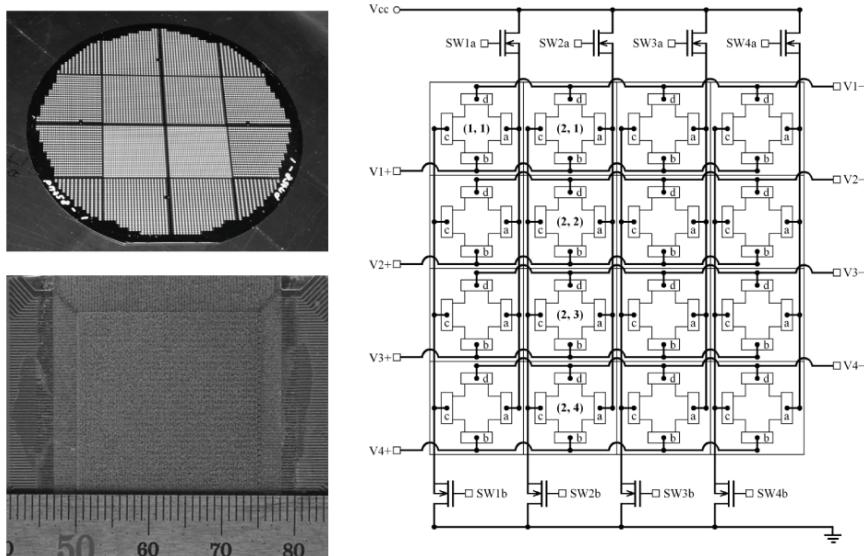


Fig. 3-9 시제작한 유도면전류

2. 고밀도 센서 배열

Fig. 3-10(a)는 NiZn 페라이트 웨이퍼에 2차원으로 배열한 InSb 홀센서를 나타낸다. 홀센서는 780um의 간격으로 32행 32열로 배열되어 있으며, Fig. 3-10(b)에 나타낸 바와 같이 배선되어 있다. 즉, 각각의 홀센서는 열방향으로 전원공급선이, 행방향으로 신호출력선이 공통배열되어 있다. 이러한 구조에서는 열방향의 하나의 전원공급선을 연결하고, 행방향으로 신호출력선을 병렬형 신호처리회로에 의하여 각각의 홀전압을 출력할 수 있다. 따라서, 열방향의 전원공급선을 번갈아 가면서 차례로 연결, 즉 스위칭하고 출력전압에 대한 신호처리회로를 동기화하면 $24.96 \times 24.96\text{mm}^2$ 의 영역에서 0.78mm의 공간분해능을 가지는 자기장의 분포를 정량적으로 측정할 수 있다 [27, 28].



(a) 면적형으로 2차원 배열한 홀센서

(b) 구동전원의 스위칭 및 출력신호 조정회로

Fig. 3-10 고밀도 센서 배열

3. 스위칭 및 신호처리회로

스위칭 회로를 구현하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 3-11과 같은 스위칭 회로를 개발하였다. 스위칭 회로는 TR, FET 및 Decoder로 구성되고, 30ms의 스위칭 펄스에 의하여 450mA의 입력전류가 상기 Fig. 3-10(b)의 하나의 열방향으로 홀센서에 입력된다.

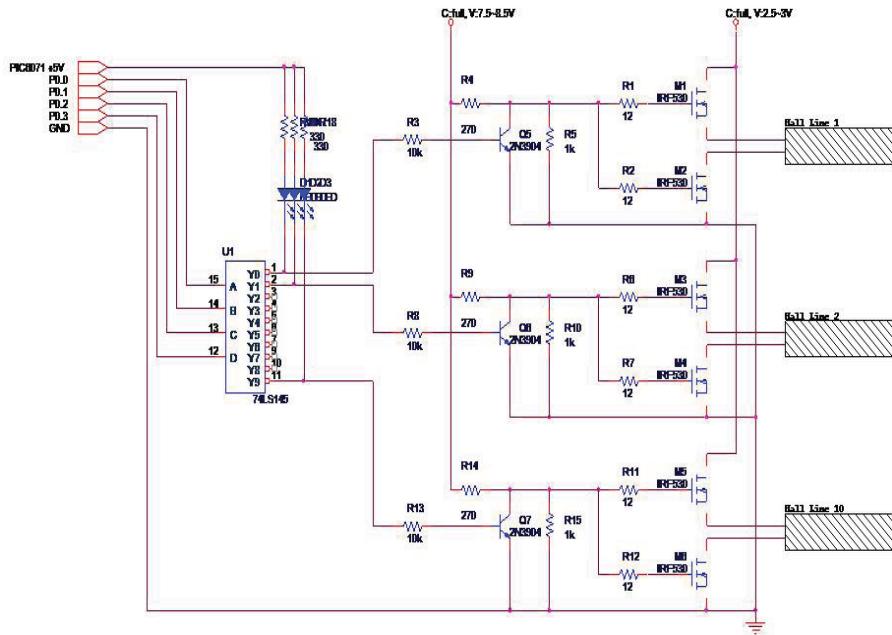


Fig. 3-11 스위칭회로

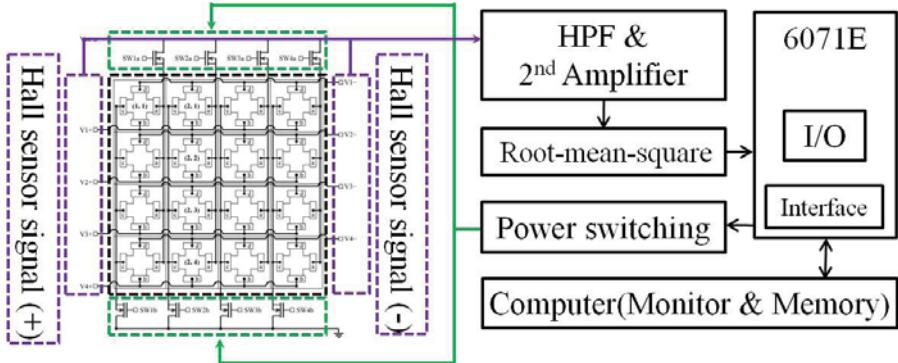


Fig. 3-12 교류형 자기카메라 구동을 위한 신호처리 블록다이아그램

고대역 통과필터(HPF, High-Pass-Filter), 차동형 연산증폭회로(OP-Amp) 및 교류-직류신호 변환 회로(RMS to DC converter circuit)로 구성되는 교류형 자기카메라의 경우, Fig. 3-12에 나타낸 바와 같이 OP-Amp의 전면과 후면에 HPF 및 교류-직류신호 변환 회로를 추가하였다.

Fig. 3-13은 커�패시터, 저항 및 OP-Amp로 이루어진 고대역통과필터를 나타낸 회로도이다. HPF의 cut-off 주파수는 다음 식 Eq. (3)에 의하여 결정되며, 본 연구에서는 저항과 콘덴서를 조절함으로써, 100~10kHz의 cut-off 주파수를 실현하였다.

$$f_{cf} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

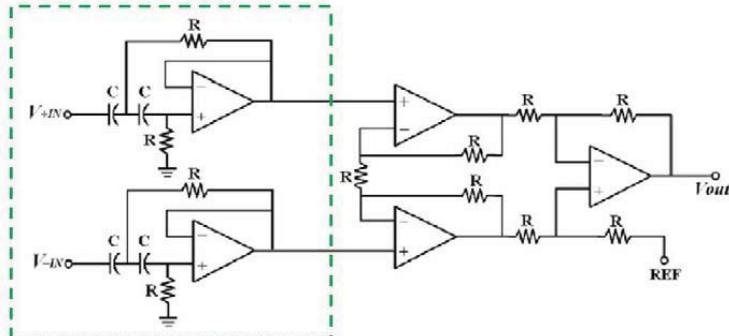


Fig. 3-13 고대역통과필터 회로도

또한, OP-Amp는 Fig. 3-14에 나타낸 바와 같이 R_G 값을 조정함으로써, 다음 식 Eq. (4)으로 표현되는 증폭비를 획득할 수 있으며, 본 연구에서는 72dB의 증폭비를 활용하였다.

$$\begin{aligned} Gain &= \frac{R_8}{R_5} \left(1 + \frac{2R_4}{R_G} \right) = \frac{40k\Omega}{40k\Omega} \left(1 + \frac{2 \cdot 25k\Omega}{R_G} \right) \\ &= 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \end{aligned} \quad (4)$$

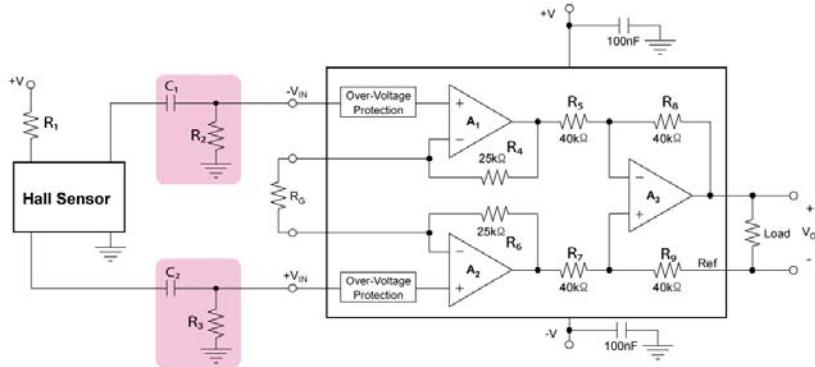


Fig. 3-14 홀센서와 교류증폭회로(INA128)의 회로도

또한, Fig. 3-15는 AD637(ANALOG DEVICE, Wideband RMS-to-DC Converter)을 이용한 RMS-to-DC 변환 회로도이고, C_{AV} 를 조절함으로써 DC 출력값의 리플(Ripple) 값을 줄일 수 있다. HPF의 도입에 의하여 DC성분이 제거되고 AC성분의 진폭은 RMS-to-DC 변환 회로에 의하여 DC신호로 변환된다 [29].

DC신호, 즉 결함의 존재에 기인한 와전류의 세기를 AD변환기 및 인터페이스에 의하여 입력 및 신호처리한다.

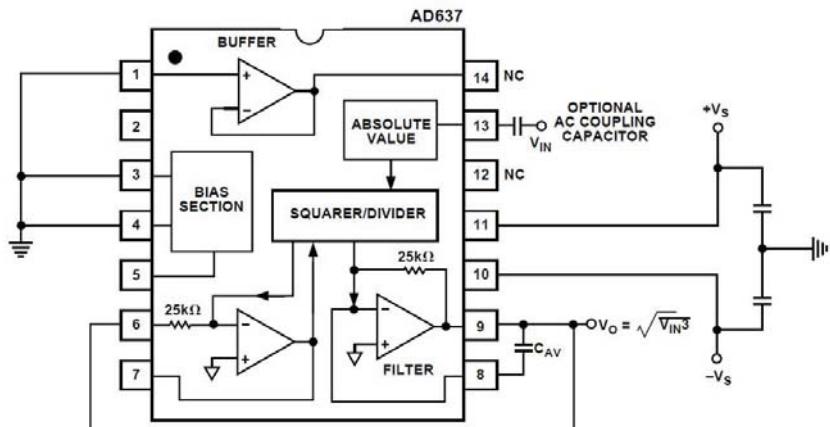


Fig. 3-15 교류-직류신호 변환 회로(RMS to DC converter circuit)

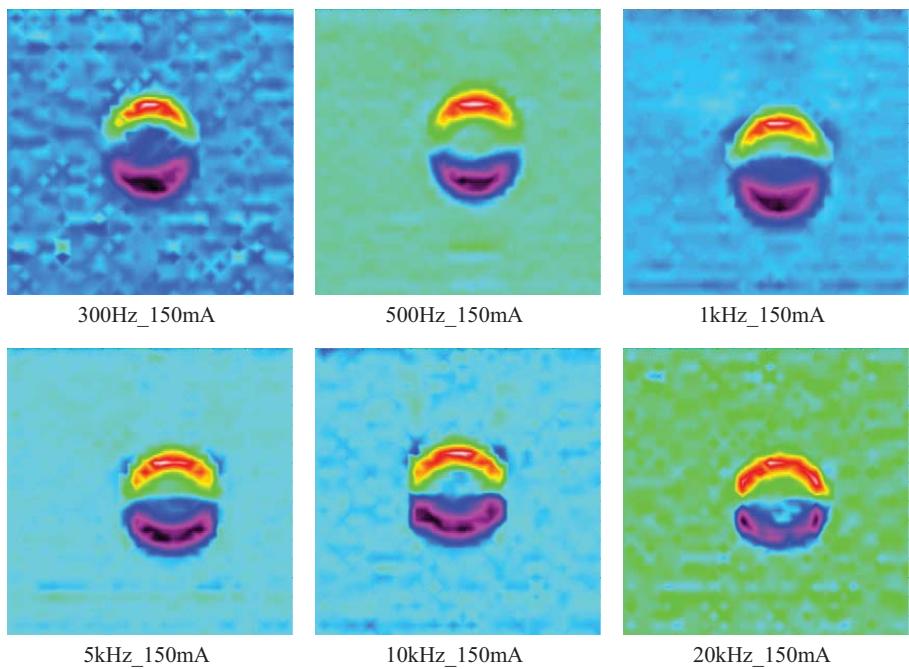


Fig. 3-16 교류형 자기카메라에 의한 교류 자기장의 가시화

이상의 신호처리회로를 이용하여 교류전류를 가시화할 수 있음을 확인하기 위하여, 직경 6.5mm의 원형코일에 300Hz~20kHz의 교류전류(150mA)를 입력하여 발생 시킨 교류자기장을 영상화하였다. Fig. 3-16은 교류자기장의 분포를 수직방향(전원공급방향)으로 미분한 영상을 나타내며, 300Hz에서 20kHz의 폭넓은 주파수영역에서 교류자기장을 영상화할 수 있음을 알 수 있다.

제 4장 실험 및 고찰

제 1절 상자성체 금속의 결합탐상

1. 시험편

제3장에서 서술한 유도면전류, 고밀도 2차원 센서 배열, 스위칭 및 신호처리회로를 적용하여 결합 검출의 유효성을 증명하기 위하여, 항공기에서 널리 활용되고 있는 알루미늄 합금(Al7075)으로 제작한 판재시험편의 인공결함(Fig. 4-1, Fig. 4-2) 및 피로균열의 비파괴검사에 적용하였다.

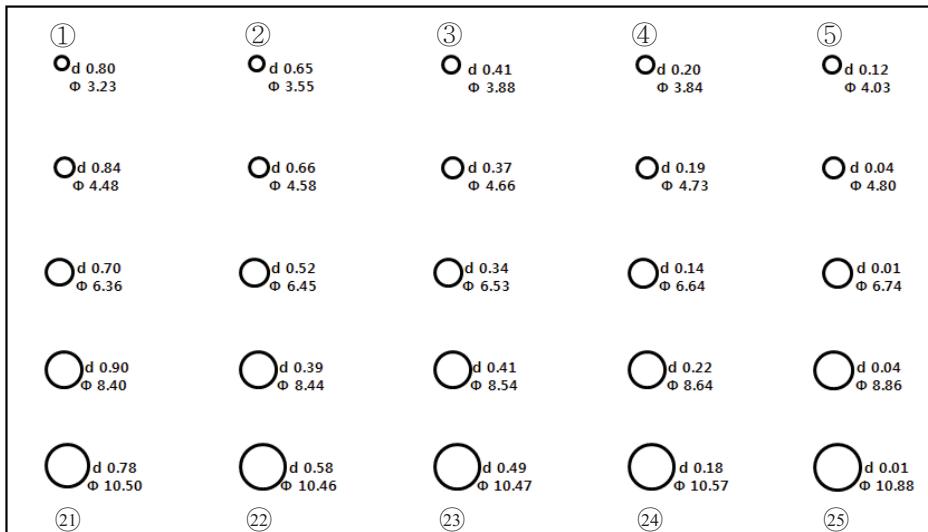


Fig. 4-1 부식시험편

먼저 원형 인공결함은 Fig. 4-1에 나타낸 바와 같이 직경 3.2mm~10.8mm인 인공 결함을 밀링(milling)에 의하여 도입하였다. 각각의 크기를 Table 4-1에 정리하였다. 또한, Fig. 4-2와 같이 200mm×200mm×5mm의 사각형 판재에 구형, 삼각형 및 타원 형의 인공결함을 방전가공으로 도입하였으며, 각각의 형상 및 크기를 Table 4-2에 정리하였다.

Table 4-1 원형 인공결함의 크기

| Crack No. | Diameter [mm] | Depth [mm] | Crack No. | Diameter [mm] | Depth [mm] |
|-----------|---------------|------------|-----------|---------------|------------|
| 1 | 3.23 | 0.80 | 14 | 6.64 | 0.14 |
| 2 | 3.55 | 0.65 | 15 | 6.74 | 0.01 |
| 3 | 3.88 | 0.41 | 16 | 8.40 | 0.90 |
| 4 | 3.84 | 0.20 | 17 | 8.44 | 0.39 |
| 5 | 4.03 | 0.12 | 18 | 8.54 | 0.41 |
| 6 | 4.48 | 0.84 | 19 | 8.64 | 0.22 |
| 7 | 4.58 | 0.66 | 20 | 8.86 | 0.04 |
| 8 | 4.66 | 0.37 | 21 | 10.50 | 0.78 |
| 9 | 4.73 | 0.19 | 22 | 10.46 | 0.58 |
| 10 | 4.80 | 0.04 | 23 | 10.47 | 0.49 |
| 11 | 6.36 | 0.70 | 24 | 10.57 | 0.18 |
| 12 | 6.45 | 0.52 | 25 | 10.88 | 0.01 |
| 13 | 6.53 | 0.34 | | | |

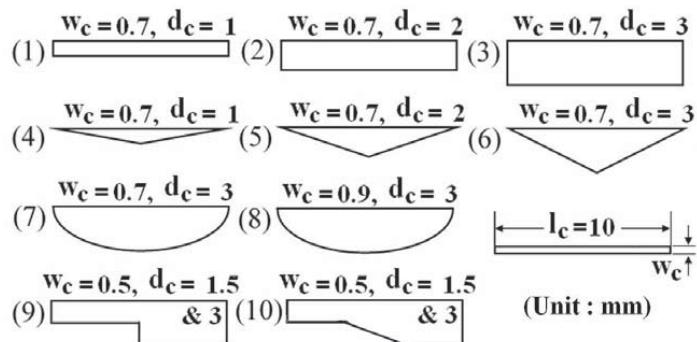


Fig. 4-2 인공 결합의 형상 및 크기

Table 4-2 인공결합의 형상 및 크기

| Crack No. | Shape | Width [mm] | Depth [mm] | Length [mm] | Section area[mm ²] | Crack volume[mm ³] | Crack angle[deg] |
|-----------|--------------|------------|------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|
| 1 | Rectangle | 0.8 | 1.0 | 10 | 10 | 8 | 90° |
| 2 | Rectangle | 0.8 | 2.0 | 10 | 20 | 16 | 90° |
| 3 | Rectangle | 0.8 | 3.0 | 10 | 30 | 24 | 90° |
| 4 | Triangle | 0.7 | 1.0 | 10 | 5 | 3.5 | 11.3° |
| 5 | Triangle | 0.8 | 2.0 | 10 | 10 | 7 | 21.8° |
| 6 | Triangle | 0.7 | 3.0 | 10 | 15 | 12 | 30.96° |
| 7 | Circular Arc | 0.7 | 3.0 | 10 | 23.55 | 16.5 | 61.9° |
| 8 | Circular Arc | 0.9 | 3.0 | 10 | 23.55 | 21.2 | 61.9° |
| 9 | Step | 0.5 | 1.5&3.0 | 10 | 22.5 | 11.25 | 90° |
| 10 | Step | 0.5 | 1.5&3.0 | 10 | 30 | 15 | 90° |

Fig. 4-3은 피로균열의 제작 방법을 나타낸 것이다. 피로균열은 Al6061(140mm×70mm×5mm, 70mm×50mm×5mm)의 판재에 요철형 시험편에 노치(notch)를 도입한 후, 3점 굽힘시험에 의하여 피로균열을 진전시켰다. 피로균열이 요철부에 도달하는 것을 육안관찰한 후, 요철부를 삭제하여 평판 피로시험편으로 활용하였다. 따라서, 각 피로균열의 표면길이는 요철형 시험편의 요철부분의 폭에 상응하며, 1mm, 3mm, 5mm, 7mm의 길이를 갖는다. 또한, 같은 방식으로 200mm×100mm×5mm의 판재에 도입한 9.5mm 길이의 피로균열도 본 연구에 의한 교류면적형 자기카메라의 유효성을 검증하기 위하여 활용하였다.

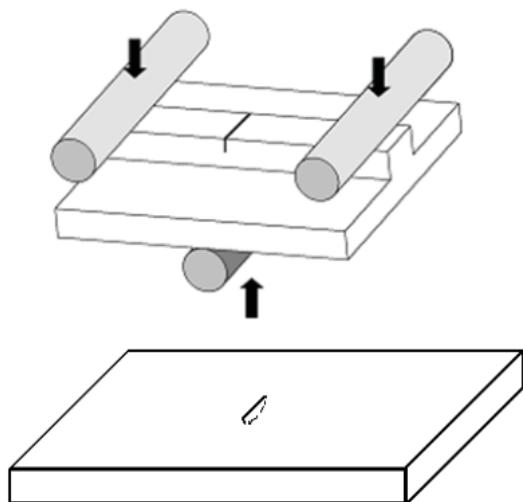


Fig. 4-3 피로균열 제작 방법

2. 실험 결과 및 평가

유도면전류, 고밀도 2차원 센서배열, 스위칭 및 신호처리회로에 의한 교류면적형 자기카메라의 주파수특성을 확인하기 위하여, 길이 9.5mm의 알루미늄 피로시험편의 자기영상을 5frame/sec의 속도로 취득한 결과를 Fig. 4-4에 나타내었다. STIC의 입력전류, I_{AC} 는 2.5A, 주파수는 각각 2.5kHz, 5kHz, 10kHz 및 20kHz를 인가하였고, 주파수가 높을수록 표피효과에 의하여 시험편의 표면근방에만 유도전류가 집중되고, 결과적으로 결합의 양선단에서 발생하는 유도전류의 왜곡, 즉 와전류의 분포가 좁아지는 현상을 볼 수 있다. 반면에 주파수가 낮으면 시험편의 내면까지 전류가 유도되며, 결과적으로 양선단에서 발생하는 와전류의 분포가 커지고 있음을 알 수 있다. 또한, 실험적으로는 약 5kHz 근방에서 최적의 결합 탐상 결과를 얻을 수 있었다.

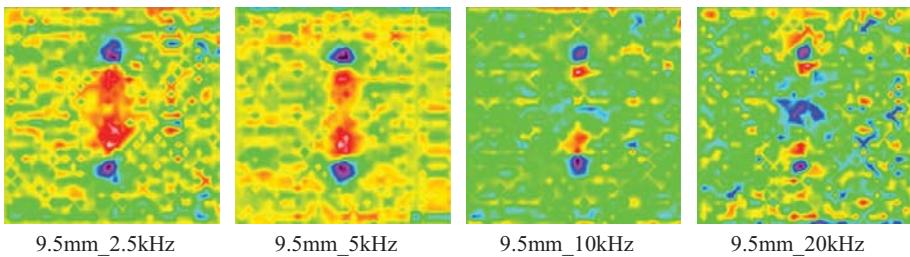


Fig. 4-4 유도면전류를 자원으로 채택한 교류형 자기카메라에 의한 피로균열의 검출

전술한 유도면전류법에 의한 교류형 자기카메라에 의하여 알루미늄 합금에 도입한 길이 1mm, 3mm, 5mm, 7mm의 피로균열의 결합 탐상 능력을 Fig. 4-5와 같이 각 주파수별로 확인하였다. 결합의 양선단에서 와전류가 발생하고 있으며, 그 간격으로서 결합 길이를 추정할 수 있다. 그러나, 길이 1mm인 경우에는 이러한 경향에서 벗어났으며, 피로균열 도입시의 착오에 의하여 결합 길이가 잘못 추정된 것으로 파악된다. 또한, 전술한 바와 같이 주파수 5kHz에서 가장 깨끗한 자기영상, 즉 가장 높은 S/N 비를 얻을 수 있었다.

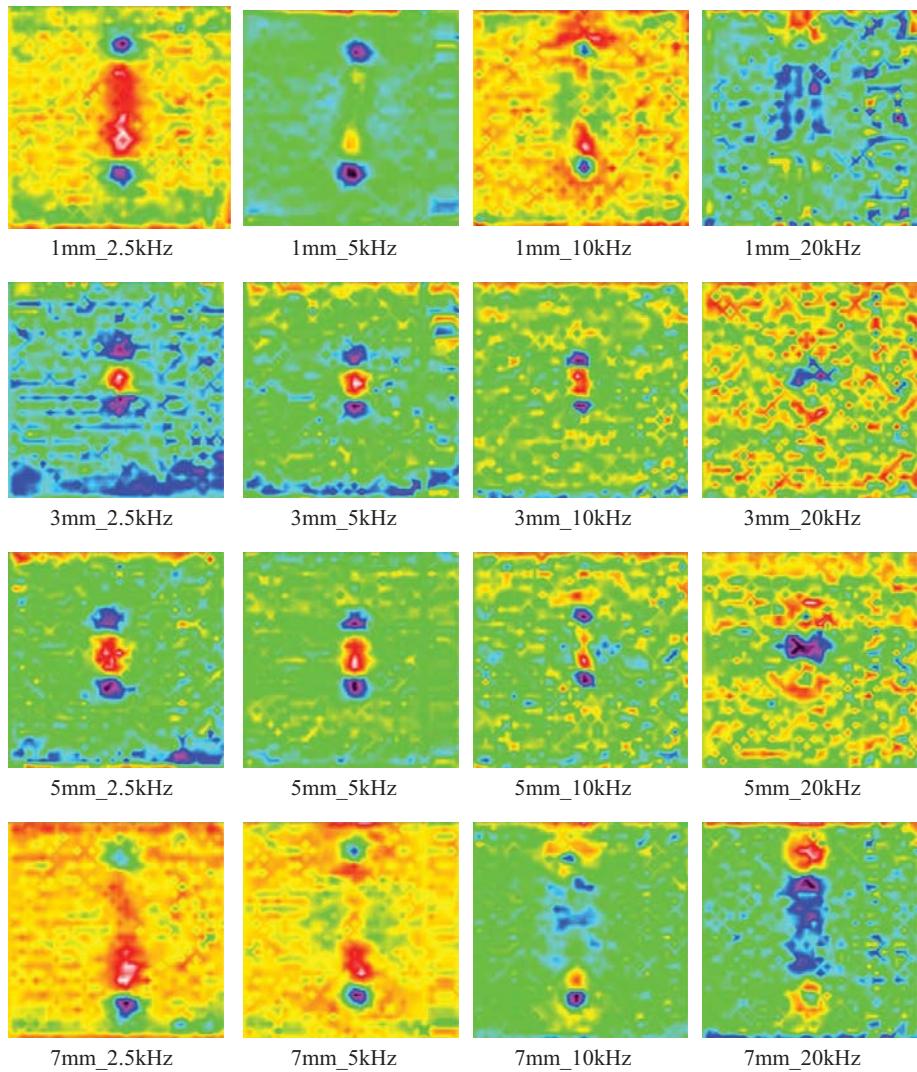


Fig. 4-5 결합 길이 및 인가 주파수에 의한 자기영상

Fig. 4-6과 Fig. 4-7은 Fig. 4-1의 부식시험편의 표면에서 5kHz 및 10kHz의 유도면 전류에 대한 자기영상을 나타낸다. 전체적으로 부식 결함의 형태가 원형임을 알 수 있으며, 자기장 영상에서 부식결함을 나타내는 원형의 크기는 결함의 직경과 밀접한 관계를 가진다. 또한, 명암의 차이가 보다 확실하게 나타나는 것은 결함의 깊이가 깊기 때문이다. Fig. 4-6의 우측 위에서 3번째 및 5번째는 결함의 깊이가 0.01mm로 얕은 관계로 결함 탐상능력이 저하되고 있음을 알 수 있다.

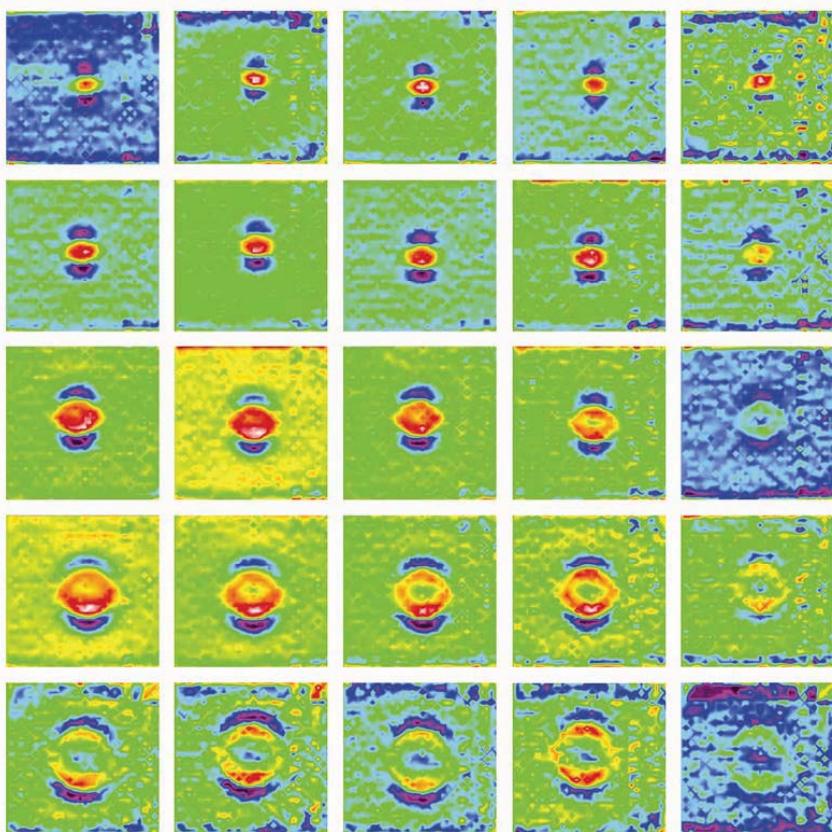


Fig. 4-6 5kHz의 유도면전류에서 각각의 부식 표면결함의 탐상결과

또한, Fig. 4-7에 나타낸 바와 같이 10kHz의 주파수를 가지는 유도면전류의 경우의 각각의 자기영상으로부터 주파수에 관계없이 부식 결합의 형태가 원형으로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 5kHz에 비하여 10kHz의 경우가 표피효과에 의하여 유도전류가 표면에 집속되는 관계로 우측 위에서 3번째 및 5번째의 결합에서 알 수 있듯이 얇은 부식결합도 보다 용이하게 검출할 수 있다.

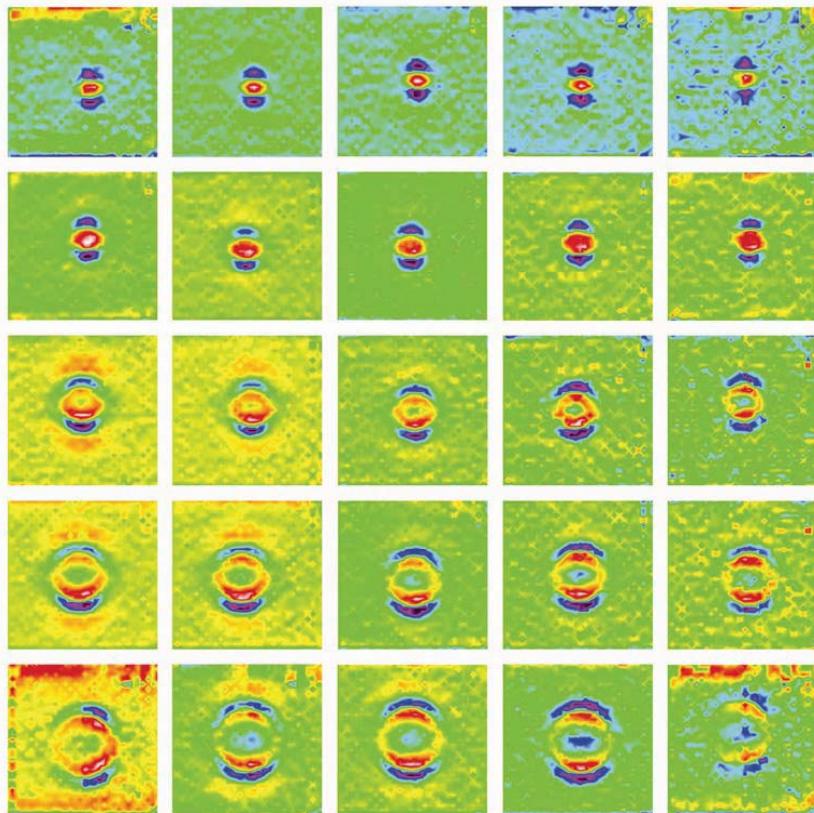
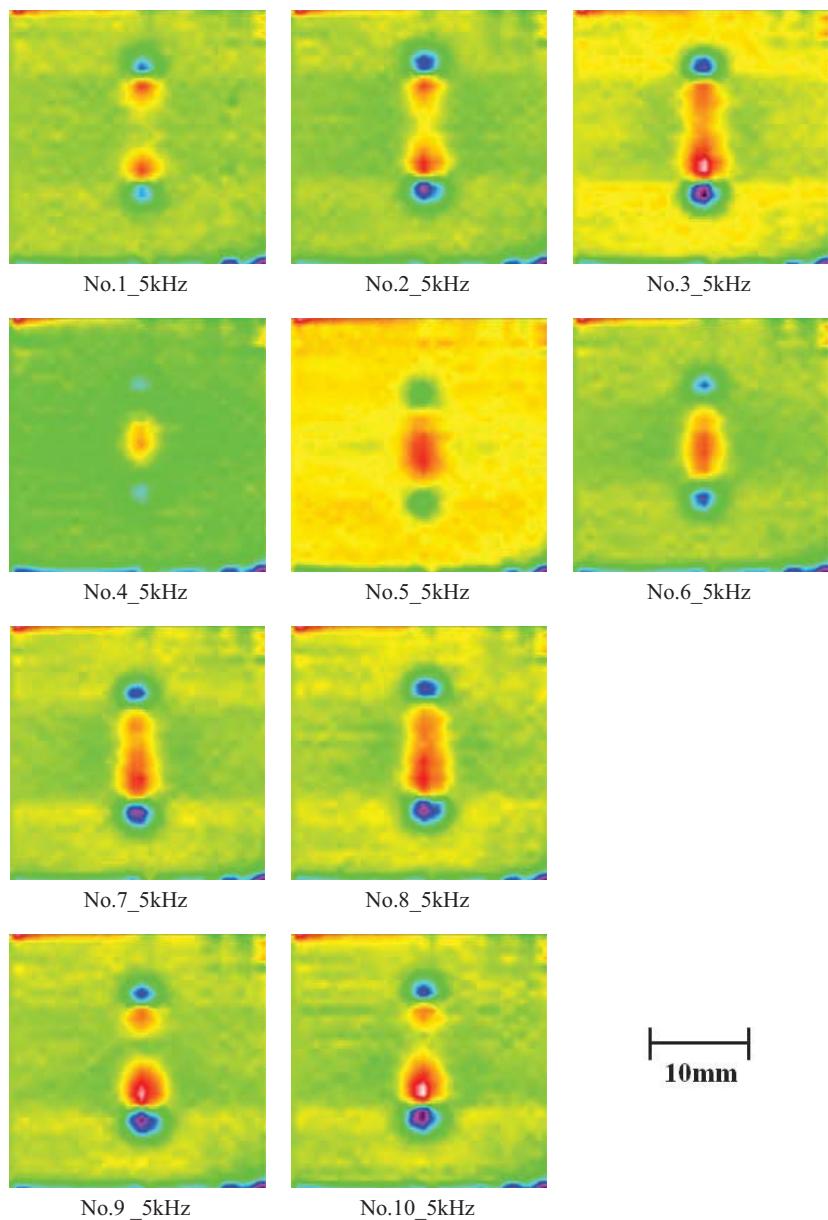
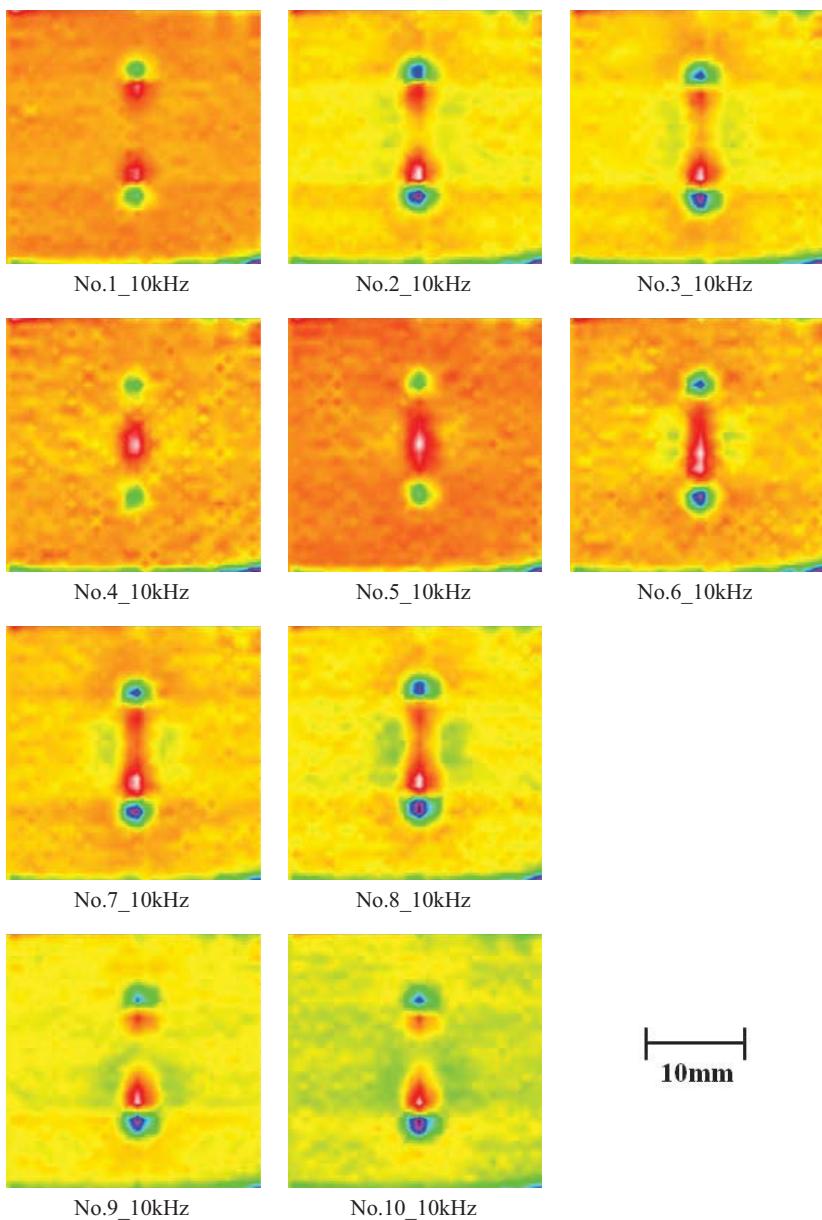


Fig. 4-7 10kHz의 유도면전류에서 각각의 부식 표면결합의 탐상결과

한편, Fig. 4-8은 인공결합 시험편(Fig. 4-2, Table 4-2)의 탐상결과를 나타내며, 5kHz에서 가장 선명한 결합영상을 얻을 수 있었다. 또한, 주파수가 낮으면 결합의 양선단에서 보다 넓은 자기장의 분포를, 주파수가 높으면 보다 좁은 자기장 분포를 획득할 수 있다. 전체적으로 모든 결합의 길이가 10mm로서 동일함에도 불구하고, 결합의 형태가 삼각형 또는 타원형인 경우에는 구형인 경우에 비하여 약간 짧게 나타나고 있다. 삼각형의 경우 결합의 깊이가 짧을 때, 결합길이가 보다 더 작게 표현되고 있음을 알 수 있다.





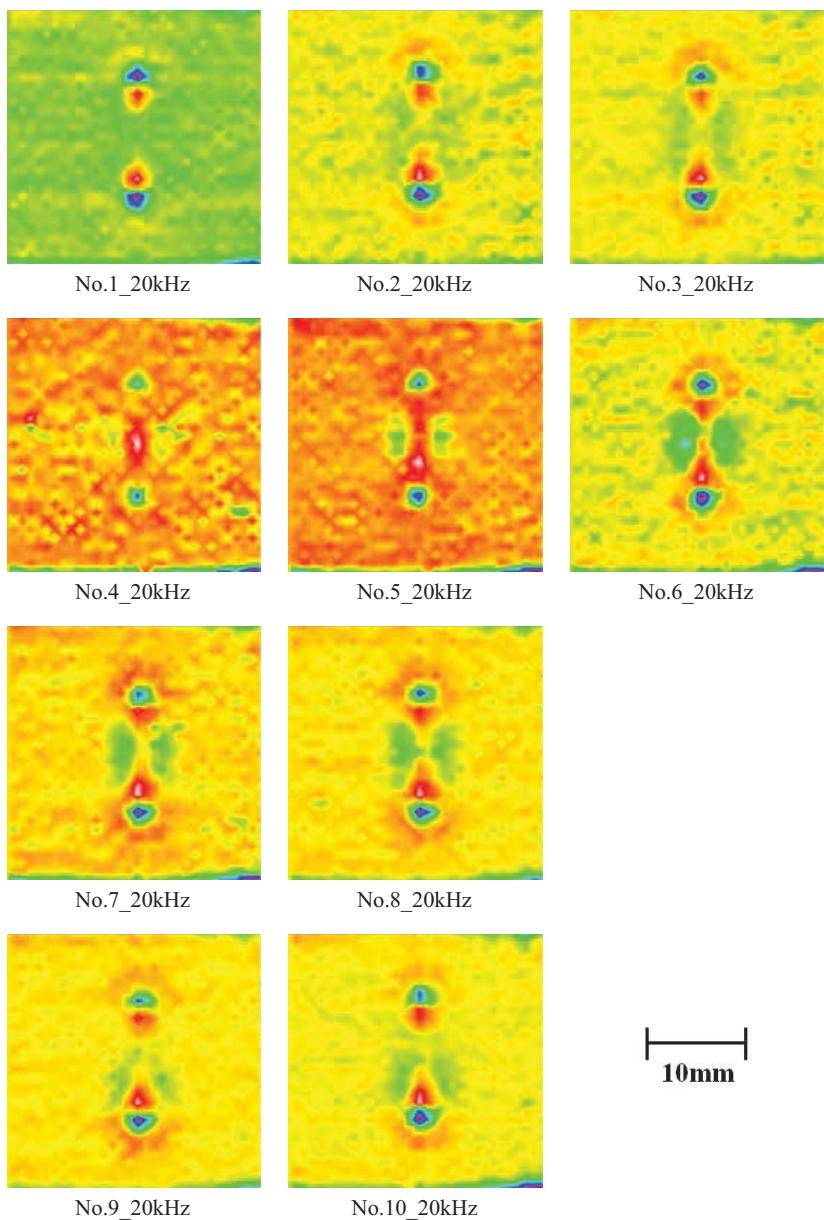


Fig. 4-8 유도면전류법에 의한 주파수별 인공결합 텁상 결과

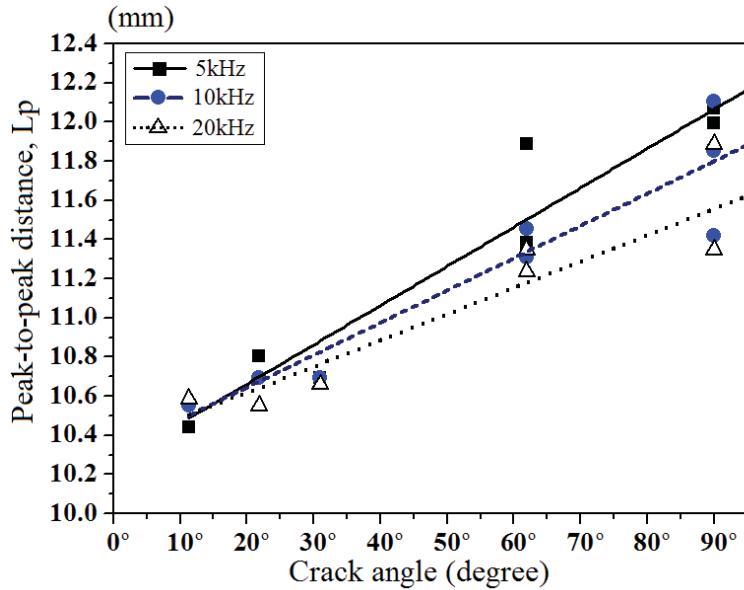


Fig. 4-9 $\partial V_R / \partial x|_{TOTAL}$ 과 실제 결합의 체적과의 상관관계.

또한 Eq. (4)의 $\partial V_R / \partial x|_{TOTAL}$ 을 이용하여 실제 크랙의 체적과 $\partial V_R / \partial x|_{TOTAL}$ 의 상관관계를 알 수 있다. 여기에서 m과 n은 횡축과 종축의 센서수를 의미한다.

$$\left. \frac{\partial V_R}{\partial x} \right|_{TOTAL} \approx \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial V_R(i, j)}{\partial x} \right| \quad (4)$$

Fig. 4-9는 $\partial V_R / \partial x|_{TOTAL}$ 과 실제 결합의 체적과의 상관관계를 나타낸 것이다.

Fig. 4-10은 피로균열 시험편의 결합탐상 결과를 나타낸다. 시험편의 넓이가 유도면전류 및 센서의 크기인 $50\text{mm} \times 70\text{mm}$ 이상이면, 해당 결합을 검출할 수 있다. 한편, 피로균열의 길이가 3mm 이상인 경우, 검출할 수 있었으며, 주파수 20kHz 이상의 유도면전류에 의하면 결합을 거의 검출할 수 없었다. 이것은 1차코일에 입력하는 전류가 고주파수일 때, 유도되는 교류자기장 및 2차 코일(동판)에 유도되는 전류의 세기가 약해지기 때문으로 판단된다. 따라서, 현 상태에서는 5~10kHz의 유도면전류가 적합할 것으로 판단된다.

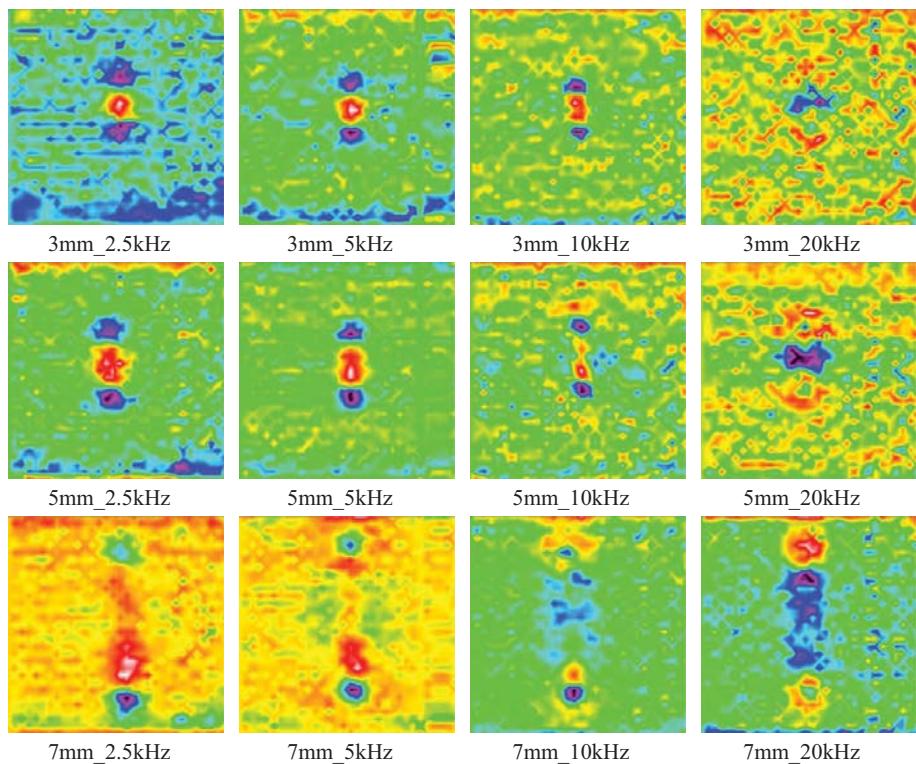


Fig. 4-10 유도면전류법에 의한 피로균열 탐상 결과

제 2절 오스테나이트계 스테인레스강의 결함탐상

1. 시험편

오스테나이트계 스테인레스강(이하, A-STS)은 우수한 내식성, 내충격성, 용접성 및 기계가공성으로부터 원자력 플랜트 및 항공우주, 식품분야 등에서 널리 사용되고 있다. 그러나, 기계부하 및 불완전한 최종 열처리로 국부적으로 δ -ferrite조직이 발생한다. 강자성체인 이러한 조직은 국부적인 자화를 띠게 되며, 결과적으로 종래의 방법인 와전류 탐상법에 의하면 상자성체인 A-STS의 표면결함을 검출하기 곤란하다. 본 연구에서는 δ -ferrite 조직을 가지는 A-STS의 표면에 발생한 결함을 실시간으로 검출 및 가시화하기 위하여, 교류면적형 자기카메라를 적용하였다. Table 4-3는 A-STS의 표면에 도입한 인공결함정보를 나타낸 것이고, Fig. 4-11은 시험편을 나타낸 것이다.

Table 4-3 각각의 결합 크기 및 체적

| Crack No. | Depth [mm] | Width [mm] | Length [mm] | Volume [mm ³] |
|-----------|------------|------------|-------------|---------------------------|
| 1 | 2 | 0.79 | 10 | 15.8 |
| 2 | 4 | 0.82 | 10 | 32.8 |
| 3 | 6 | 0.82 | 5 | 24.6 |
| 4 | 6 | 0.61 | 10 | 36.6 |
| 5 | 6 | 0.80 | 10 | 48.0 |
| 6 | 6 | 0.98 | 10 | 58.8 |
| 7 | 6 | 0.74 | 15 | 66.6 |
| 8 | 8 | 0.80 | 10 | 64.0 |
| 9 | 9 | 0.80 | 10 | 72.0 |

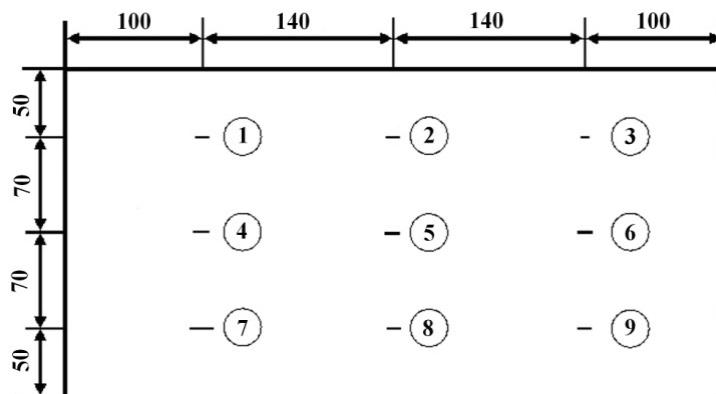


Fig. 4-11 오스테나이트계 스테인레스강 시험편(Unit: mm, thickness: 10mm)

2. 실험 결과 및 평가

10kHz, 2.5A의 정현파를 코일에 입력하여 유도면전류를 유도하고, 홀센서의 구동전류를 450mA를 입력하여 Table 4-3의 각각의 크랙을 측정하였다.

Fig. 4-12는 STIC과 AIHaS를 이용하여 각각의 시험편을 측정한 $\partial V_{RMS}/\partial x$ 의 이미지를 나타낸 것이다. Fig. 4-12의 이미지에서 L_c 는 크랙의 길이와 밀접한 관계를 가지는 것을 알 수 있고, $\partial V_{RMS}/\partial x$ 는 크랙의 폭, 길이, 깊이와 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

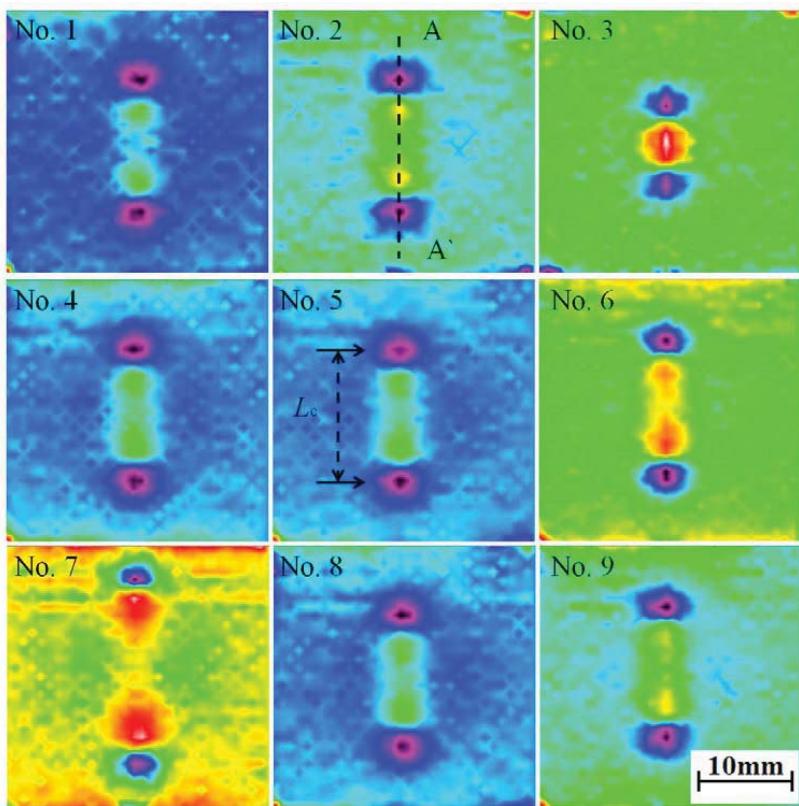


Fig. 4-12 유도면전류법에 의한 오스테나이트계 스테인리스강 결합탐상 결과

또한 Eq. (5)의 $\partial V_{RMS}/\partial x|_{TOTAL}$ 을 이용하여 실제 크랙의 체적과 $\partial V_{RMS}/\partial x|_{TOTAL}$ 의 상관관계를 알 수 있다. 여기에서 S는 센서의 분해능 0.78mm 이다.

$$\left. \frac{\partial V_{RMS,i}}{\partial x} \right|_{TOTAL} = \sum_{i=1}^{L_{C,S}} \left[\text{Max} \left(\frac{\partial V_{RMS,i}}{\partial x} \right) + \text{Abs} \left(\text{Min} \left(\frac{\partial V_{RMS,i}}{\partial x} \right) \right) \right] \quad (5)$$

Eq. (5)와 실제 크랙의 체적을 이용하여 Eq. (6)을 유도할 수 있다.

$$V_{Calculated} = 62.89 \left(\left. \frac{\partial V_{RMS}}{\partial x} \right|_{total} \right) - 67.09 \quad (6)$$

Eq. (6)을 이용하여 크랙의 추정치 체적을 구할 수 있으며, Fig. 4-13은 실제 크랙의 체적과 STIC과 면적형 자기센서로 측정한 값으로 유도해낸 추정 체적의 상관관계를 나타낸 것이다.

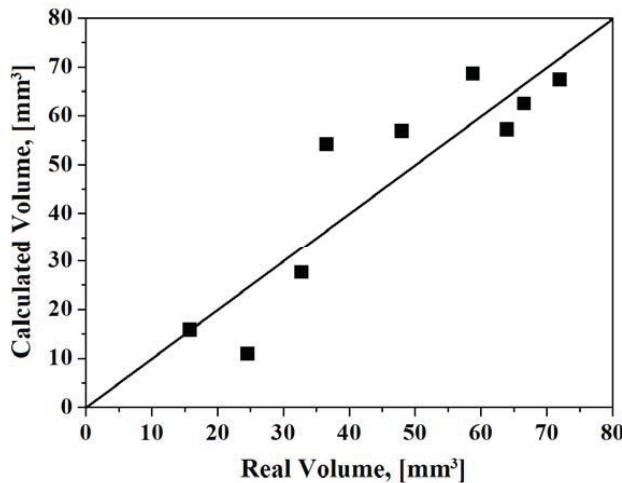


Fig. 4-13 실제 결합 체적과 계산된 체적과의 관계

제 5장 결 론

항공기, 유인 우주스테이션, 로켓 엔진등의 대형기기 및 각종 구조물은 상자성 체 및 강자성체와 상자성체가 혼재된 재질에 의하여 구성되어 있다. 이들은 높은 에너지 및 위험물, 고압 가스 등을 보유하고, 부식, 고온 고압과 같은 열악한 환경에 노출되어 있다. 따라서, 핵심 부품 및 소재의 제조 공정 중에 발생한 결함이나 진동, 피로 및 부식 등에 의한 표면 혹은 내부 결함, 사용자 부주의 등의 복합적인 문제로 인하여 손상이 야기되면, 급격히 전전되어 사고에 이르게 된다. 결과적으로 막대한 인적·경제적 손실뿐만 아니라 환경 오염 등 국가적으로도 큰 문제를 일으킬 수 있다.

이러한 결함의 발생과 성장은 (1) 제조과정에 발생한 결함이 성장하는 경우와, (2) 가동후에 임의의 원인에 의하여 발생하고 성장하는 경우로 나누어 질 수 있다. 각 경우에 있어서 사용전 검사(PSI, Pre-Service Inspection)와 사용기간중 검사(ISI, In-Service Inspection)에 의하여 적절하게 유해한 결함을 검출하고 보수하도록 되어 있다. 한편 항공기는 지상 운송수단과 달리, 운항중 공중에서 정지하여 정비할 수 없다는 취약점을 가지고 있다. 따라서 항공기가 착륙하여 다음 이륙 및 운항시까지 기체를 포함한 구성품의 사용기간중 검사(ISI, In-Service Inspection)를 마쳐야 함은 매우 중요한 과제중의 하나이다.

본 연구에서는 항공기와 같이 짧은 검사 시간을 요구하는 상자성체 금속의 비파괴 검사를 실시간으로 결함 검출을 가능하게 하였다. 보다 넓은 면적에 교번장기장을 인가하기 위하여, 면적형 유도전류인가장치를 개발 및 수치해석하고, 시제품을 제작하였다. 또한 피측정체의 표면에 위치한 균열에 의하여 왜곡되는 전기장 및 자기장을 측정하기 위하여 상자성체 및 상자성체와 강자성체가 혼재된 재질에서 결함의 데이터를 추출하고, 낮은 주파수 잡음을 제거하기 위해서 HPF(High Pass Filter)를 전 처리부에 도입하고, 저전력 저잡음 고주파용 OP-Amp의 도입으로 미약한 결함의 신호

를 얻을 수 있었으며, AD변환기와 컴퓨터의 빠른 신호처리와 신호해석의 용이함을 위해 교류-직류신호 변환 회로(RMS to DC converter circuit)를 도입하여 보다 더 정밀하고 빠르게 결합 신호를 처리할 수 있었다.

한편, 원자력발전소의 주요 구성재료인 오스테나이트계 스테인레스강은 기계적 가공 및 열처리에 의하여 상자성체 금속에 강자성체 조직이 포함되어 결합 검출이 곤란하였으나, 본 연구를 통하여 개발된 교류형 자기카메라에 의하여 조직의 변화에 따른 영향을 최소화하고 결함을 검출할 수 있었다.

이러한 연구에 의하여 교류 자기장 측정이 가능하고, 상자성체 또는 상자성체 및 강자성체가 혼재된 구조물의 결함을 가시화하거나 정량적인 평가가 가능한 교류형 자기카메라를 개발하여 그 결과를 확인하였다.

REFERENCE

- [1] http://www.koreadaily.com/news/read.asp?art_id=1178949
- [2] <http://www.hansfamily.kr/1107>
- [3] U. G. Goranson, 1993, "Damage tolerance-facts and fictions," Proc. 17th Int. Conf. in Aeronautical Fatigue Sweden: Stockholm, Vol. 1, pp. 3-105.
- [4] Hwang, D. Y., 1995, "Damage tolerance design and prediction of fatigue life in aircraft structure," KSME Int. Journal, Vol. 35, pp. 468-480.
- [5] <http://www.ndtis.kr/>
- [6] Jinyi Lee, Jiseong Hwang, Jongwoo Jun and Seho Choi, "Nondestructive Testing and Crack Evaluation of Ferromagnetic Material by Using the Linearly Integrated Hall Sensor Array", Journal of Mechanical Science and Technology, 22(12)(2008.12), pp.2310- 2317.
- [7] Jiseong Hwang, Jinyi Lee and Sukjin Kwon, "The Application of a Differential Type Hall Sensors Array to the Nondestructive Testing of Express Train Wheels", NDT & E International, 42(1)(2009.1), pp.34-41.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 이진이, 전종우, "자성유체 침투에 의한 상자성체 비파괴검사", 2008년도 한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, (2008), pp.223-228.
- [11] Jinyi Lee, Jongwoo Jun, "Quantitative Nondestructive Evaluation of Fatigue Crack on the Aluminum Alloy Using by Magnetic Camera", NDT&E Int., (2008), contribute.
- [12] Jun JW, Hwang JS, Lee JY, "Quantitative Nondestructive Evaluation of the Crack on the

Austenite Stainless Steel Using the Induced Eddy Current and the Hall Sensor Array”, 2007 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Warsaw, (2007); #7085.

- [13] Jongwoo Jun and Jinyi Lee, “Nondestructive evaluation of a crack on austenitic stainless steel using the sheet type induced current and the Hall sensor array”, Journal of Mechanical Science and Technology, 22(9)(2008.9), pp.1684-1691.
- [14] Jongwoo Jun, Jungmin Kim, Jinyi Lee and Youngmin Park “A hand held magnetic camera system for real time crack inspection”, Sensors Applications Symposium(SAS), 2011 IEEE Proceedings, (2011), pp298-301.
- [15] JUN, J. W. KIM, J. M. LEE, J. Y. Park, Y. M “Real Time Crack Inspection Using the Hand Held Magnetic Camera”, Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC '09. IEEE Proceedings, (2010), 1546-1551.
- [16] Jongwoo Jun, Youngmin and Jinyi Lee “THE REAL TIME VISUALIZATION OF MAGNETIC FIELDS USING A 2-DIMENSIONAL INTEGRATED HALL SENSOR ARRAY” Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL 61. NO 7, 2010, 32-35.
- [17] J.Y. Lee, J.S. Hwang and T. Shoji, “Numerical Analysis of Magneto-Optical Eddy Current Imaging Using FEM, Key Engineering Materials”, Korea, 306~308 (2006) 235-240.
- [18] D.K. Thome, G.L. Fitzpatrick, R.L. Skaugset and W.C.L. Shih, “Aircraft Corrosion and Crack Inspection Using Advanced Magneto-Optic Imaging Technology”, The International Society for Optical Engineering- SPIE Proceedings, 2945 (1996) ,pp.365-373.
- [19] Jun JW, Hwang JS, Lee JY, “Nondestructive Testing of the Paramagnetic Materials Using a Hall Sensor”, Proceedings of the KSME 2006 Fall Conference (2006), pp.1-6.
- [20] Lee JY, Jun JW, Hwang JS. Patent Pending KR 10-2006-0107338, 2006.
- [21] Fitzpatrick GL, Thome DK, Skaugset RL, Shih WCL, Shih EYC. “Magneto-Optic/Eddy Current Imaging of Aging Aircraft: A New NDI Technique”, Materials Evaluation, 51(12)(1993), pp.1402-1407.

- [22] Jinyi Lee, Jongwoo Jun, "NDT of the crack on the austenite stainless steel using the improved sheet type induced current and the linearly integrated Hall Sensor Array", Abstracts of 13th ENDE, (2008.5), p.48.
- [23] Lee, J. and Hwang, J., 2006, "A Study of the Quantitative Nondestructive Evaluation Using the Cross Type Magnetic Source and the Magnetic Camera," Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 1447-1450.
- [24] 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
- [25] Jinyi Lee, Jongwoo Jun, "Nondestructive Evaluation of the Rivet Connection Parts in Aging Aircraft Using a CIC-MFL and LIHaS", NDT&E Int., (2008), contribute.
- [26] Jongwoo Jun, Myungki Choi and Jinyi Lee, "Nondestructive Evaluation of Austenitic Stainless Steel using CIC-MFL and LIHaS"
- [27] Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Jiseong Hwang, "Magnetic sensor array and apparatus for detecting defect using the magnetic sensor array", PCT/KR2007003801, (May. 8, 2008).
- [28] Lee JY, Jun JW, Hwang JS. Patent Pending KR 10-2006-0107338, 2006.
- [29] 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.