

# 자기광학센서를 이용한 강자성체 결함 탐상 The Detection of Defects in Ferromagnetic Materials Using Magneto-Optical Sensor

김 훈  
Hoon Kim

**Key Words** : Magneto optical Sensor(자기광학센서), Magnetic Domain(자구), Domain Wall(자벽), Remote Sensing(원격탐상), Leakage Magnetic Flux(누설자속), Laser Ray(레이저광)

**Abstract** : A new non-destructive inspection technique has been developed. One characteristic of the technique is that defects are visualized by laser ray. Magnetic domains and domain walls of a magneto-optical sensor(MO sensor) are varied by the magnetic flux leaked by defects, and the variations are observed by the reflected light of the laser ray. The information of defect can remotely be inspected by this technique in a real time. This paper describes the results estimated on the 2-dimensional surface defects and opposite-side defects in a ferromagnetic material and the natural surface defect in a clutch disk wheel. The light region of a visible image and the magnitude of a reflected light increases as the input current of the magnetizer increases. The natural surface defect, that has not the width of crack's open mouth, can be also visualized like as 2-dimensional artificial defects.

## 1. 서 론

원자력 화력 발전설비, 항공기, 화학플랜트 등의 대형기기 및 구조물은 안전성 및 건전성을 확보하기 위하여, 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 이들 부재에는 제조공정에서부터 (허용)결함이 존재하며, 건조시 가공이나 용접 등에 의하여 결함이 발생한다. 또한 가동기간동안에 부하, 구성재료 및 환경적 인자에 의하여, 구조물에 경년열화가 발생하게 된다. 이런 결함들은 대형기기 및 구조물의 수명을 단축시키고, 예기치 못한 파괴를 일으키는 요인이 되고 있다<sup>1)</sup>. 더욱이 최근에는 대형구조물에 대한 미국 기계학회의 보수, 관리 기준에는 재료의 특성을 파악하고, 부재에 존재하는 결함을 검출하여, 부재에 작용하는 응력과 변형을 해석하여 구조물의 안전성을 평가한 결과 안전여유가 충분히 확보된다면 결함이 존재하는 상태에서 가동을 허용하는 손상허용 방법이 도입되고 있다<sup>2)</sup>. 따라서 구조물이 충분한 안전여유를 확보한 상태에서 가동하기 위해서는, 구조

물에 발생한 결함이 안전성에 영향을 미치지 전에 정확한 평가를 실시하는 것이 중요하다.

결함의 평가인자는 위치, 크기(길이, 깊이) 및 형상이다. 결함은 구조물이 파괴되기 전에 정확히 평가하는 것은 매우 곤란하기 때문에 주로 비파괴 탐상법이 이용되고 있다. 결함을 검출하기 위하여, 방사선, 초음파, 와전류, 자기 등을 이용한 비파괴 탐상법이 사용되어왔고, 검출감도를 향상시키기 위한 연구개발과 더불어 새로운 검출방법이 개발되고 있다<sup>3)5)</sup>. 고온, 고압이나 화학, 방사선 분위기 등에서 가동되고 있는 구조물은 현장접근이 어렵기 때문에, 기존의 탐상법을 적용하는 데는 한계가 있다.

본 연구에서는 피검체를 자화시키고, 결함에 의하여 누설되는 자속을 자기광학센서(Magnetic Optical Sensor, 이하 MO 센서로 표기함)로 검출하는 방법에 대해 고찰하고 있다. 기존의 자속누설법은 홀소자나 자기저항소자를 이용하여 누설된 자속의 변화에 따른 분포를 측정하여 결함의 크기를 정량적으로 평가하는 방법으로 가능한 근접된 거리에서 측정이 실시되었다<sup>6)</sup>. 자기광학센서는 큰 공간분해능을 가지고 있고, 광학적인 수단을 이용하여 비접촉으로 원격 탐상과 결함의 정보를 실시간으로 가시화가 가능하고, 광량을 정량적으로 평가하여 결함

접수일 : 2004년 7월 23일  
김 훈(책임저자) : 여수대학교 자동차공학전공  
E-mail : khoon97@osu.ac.kr, Tel : 061-659-3224

깊이를 예측할 수 있다<sup>7)</sup>.

본 논문에서는 강자성체 시험편에 방전가공으로 도입한 표면과 이면결함에 대하여 가시화하고, 결함 깊이의 변화에 따른 광량의 변화를 측정하였다. 또한 마찰에 의하여 발생한 자연표면균열에 대해서도 가시화에 의한 탐상 가능성을 살펴보았다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

실험에 제공된 재료는 원자로 압력용기용으로 사용되는 A508 Cl, III 강이다. 이 강의 비투자율과 비전도율 등의 전자기 특성을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 평판 시험편의 형상이다. 두께 20mm의 시험편에 와이어 방전가공기를 이용하여 폭 0.3mm, 깊이 1, 2.5, 5, 10, 15mm의 2차원 표면균열을 측정 표면에 직각으로 가공하였다. 자연균열 측정용 시험편은 상용 자동차의 플라이휠인 FC25 강철이며, 클러치 접촉으로 인한 마찰로 표면에 균열이 생성되어 있다.

Table 1 Electromagnetic properties of A508 Cl, III steel

Magnetic property	Relative permeability	Electric conductivity ( $\Omega/m$ )
Ferromagnetic	750	$0.17 \times 10^7$

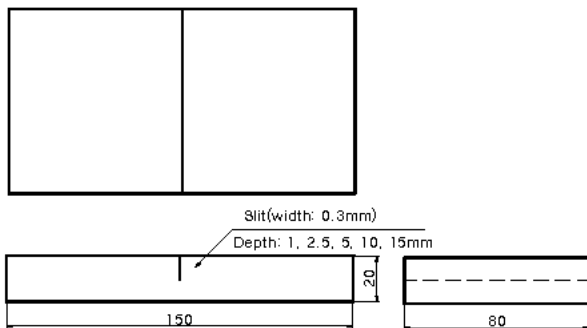


Fig. 1 The geometry of 2-D crack specimen

### 2.2 실험장치 구성 및 측정방법

Fig. 2는 본 실험에서 이용한 원격 탐상장치의 개략도이다. 측정장치는 광원부, 검출부, 전원부 및 데이터 처리부로 나눌 수 있다. 광원부는 레이저와 빔확대기(Beam expander)로 구성되어있다. 레이저는 광원의 직진성을 이용한 것으로, 본 연구에 사용된

레이저는 직선편광 레이저이며, 632.8nm 파장과 15mW 최대출력을 갖는다. 빔 확대기는 레이저광을 적당한 크기로 확대하여 평행광으로 만드는 장치로 MO센서의 크기에 맞게 적당히 조절한다. 검출부는 자기광학센서와 검광자로 구성되어있다. MO센서는 강자성체 박막으로, 센서의 특성은 페러데이 회전정수(Faraday rotation parameter) 65000deg/cm, 자구폭 20 $\mu$ m, 박막 두께 11 $\mu$ m, 포화자장 50Oe이다<sup>8)</sup>. 데이터 처리부는 디지털카메라, 스크린, 광량센서로 구성되어 있다. 스크린은 결함에 의하여 변화된 MO센서의 표면에서 반사된 광을 확대하여 실시간으로 자구와 자벽의 변화를 나타내며, 이 광의 세기는 광량센서를 이용하여 전압으로 정량화 한다. 본 실험에서 사용된 광량센서는 CL-1L5R형 포토다이오드이며, 이 다이오드의 특성은 파장 700~1000nm, 지향특성은 입사광의  $\pm 20^\circ$ 에서 출력의 감도가 좋다. 전원부는 전원과 전자석으로 구성되어 있다. 전원은 최대전류1.2A를 출력할 수 있다. 전자석은 페라이트계 철심에 직경 0.5mm인 에나멜선을 이용하여 1접을 520회, 총 7접(총 코일 권수 3640회)을 감았고, 극간거리는 150mm이다.

원격 탐상장치는 직선 편광 레이저광을 빔 확대기로 확대하고(시험편 위치에서 직경 약 8mm), 시험편 위에 부착시킨 MO센서에 입사시킨다. MO센서에 반사된 레이저광은 검광자에 이어 렌즈로 확대되어 스크린에 상을 맺히게 하거나, 광의 세기를 광량센서로 측정하여 정량화 한다. 이 스크린의 화상은 결함에 의하여 변화하는 MO센서의 표면(자구와 자벽의 변화)을 실시간으로 나타낸다. 화상은 전체적으로 결함 중심에는 어두운 영역이, 그 양측에는 밝은 영역이 나타난다. 밝은 영역은 자구가 발달된 영역이고, 어두운 영역은 자벽의 밀도가 증가한 곳이다. 화상데이터는 카메라 등으로 영구 보존한다. 직선편광 레이저와 검광자의 이루는 각도  $\theta$ 는, 자기광학센서의 표면과 저면에서 반사되는 광의 간섭모양을 제거하기 위해서  $90^\circ$ 로 고정하였다. MO센서와 레이저와의 거리는 840mm, 입사 및 반사광의 각도는  $14^\circ$ 이며, MO센서와 광량센서의 거리는 182mm이다. 광량을 측정하는 광량센서는 검광자 뒷면에 고정하였다. 시험편에 유입된 자속은 결함의 길이 방향에 직각으로 자화되도록 하였다.

본 실험에서는 결함의 종류에 따른 화상과 광의 세기변화를 알아보기 위하여, 표면결함과 이면결함

에 대하여 관찰하였고, 결함의 개구 폭이 거의 없는 자연균열에 대해 적용하였다. 또한 여자전류의 크기에 따른 검출감도의 변화를 보기 위하여, 전자석에 공급되는 전류를 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 [A]로 하였다.

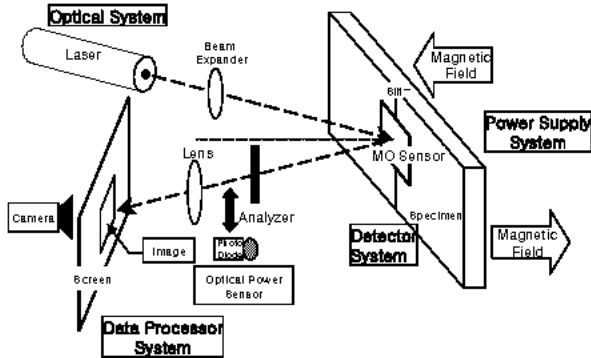


Fig. 2 Schematic diagram of a remote magneto-optical inspection system

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 2차원 표면결함에 대한 적용

본 절에서는 MO센서 원격 탐상장치를 2차원 표면결함에 적용하여, 센서가 균열깊이에 따라 변화하는 화상과 레이저의 광량변화를 관찰하였다.

Fig. 3은 2차원 표면결함에 대하여 여자전류의 크기를 변화시키면서 측정된 결과 중에서 0.6과 1A 여자전류에 대한 2.5와 10mm 결함깊이의 화상을 나타내고 있다. 그림은 MO센서의 가운데에 결함이 세로방향으로 놓여 있는 것으로, 중심에 형성된 부분이 결함에 의하여 센서의 자벽과 자구가 변화한 것이다. 결함의 위치에서는 자벽의 밀도가 증가하여 광의 입사와 반사가 어려워 어둡게 나타나며, 결함 주위는 자구가 넓어져 입사된 광의 반사가 용이하여 밝게 나타나고 있다. Fig. 3 a)와 b)는 결함깊이 2.5mm에 대하여 여자전류를 변화시킨 화상으로, 여자전류를 증가시키면 결함에 의해 누설되는 자속이 증가하여 밝은 영역이 증가하게 된다. Fig. 3 c)는 결함깊이 10mm에 대하여 0.6A의 여자전류를 공급한 화상으로, 같은 여자전류를 공급한 Fig. 3 a)와 비교할 때 밝은 영역이 증가하고 있다. 이는 결함의 크기에 따라 누설되는 자속의 양이 변화하여 MO센서의 자벽과 자구의 변화에 영향을 주기 때문에 화상에 차이가 있는 것을 알 수 있다. 그러나 10mm

결함깊이에 대해 여자전류를 0.6과 1A로 변화시킨 Fig. 3 c)와 d)를 비교하여 보면, 밝은 영역의 면적 변화를 화상으로써 구분하기 어렵다. 이는 결함에 의해서 누설된 자속이 MO센서의 자구와 자벽을 변화시켜 결함의 정보(위치와 깊이)를 화상으로 나타내지만, 여자전류의 증가에 의하여 누설자속의 양이 증가하였다하더라도, MO센서의 자기 포화점 이상으로 되면 자구와 자벽의 변화가 거의 없다. 따라서 측정시 적당한 여자전류의 선택이 요구되는 것을 알 수 있다. 이상의 화상데이터로부터, 본 연구에서 사용된 전자석에 대하여 적절한 여자전류의 선택과 더불어 결함의 깊이를 정량적으로 평가할 수 있는지를 살펴 볼 필요성이 있다.

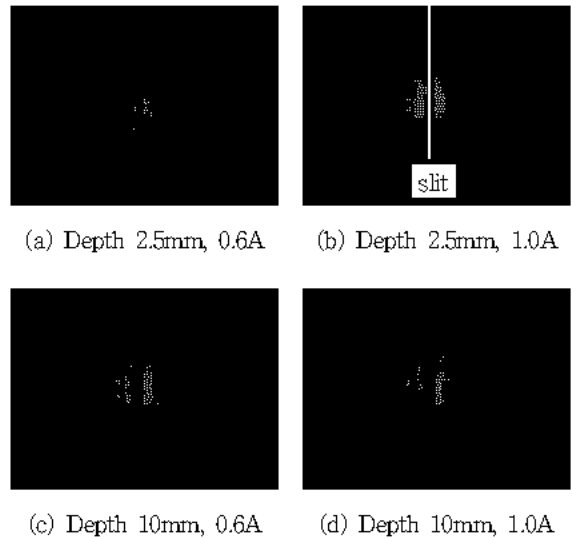


Fig. 3 Photographs on screen for surface cracks at the magnetizer input current 0.6 and 1A

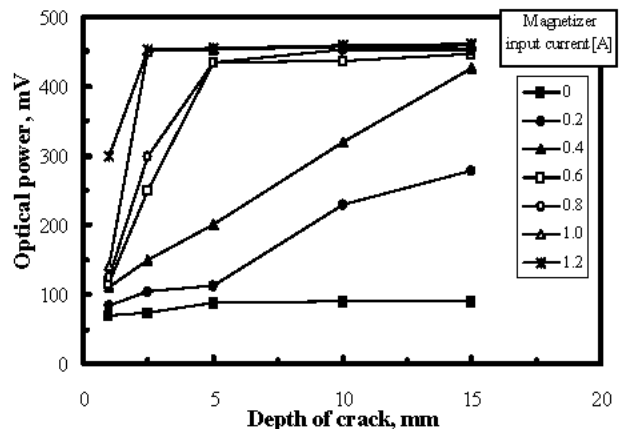


Fig. 4 The optical power for each surface crack at the various magnetizer input currents

Fig. 4는 여자전류를 변화시키면서 MO센서의 자구와 자벽의 변화량을 광학센서로 측정된 광량을 결함깊이에 대하여 나타낸 것이다. 여자전류를 0.2A로 공급한 경우 5mm이하의 결함깊이는 거의 차이가 없고, 0.5A 이상으로 공급한 경우 깊이가 작은 결함은 광량이 뚜렷한 차이를 보이고 있으나, 깊이가 커져도 약 450mV에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 결함에 대해 누설 자속의 양이 증가하더라도, MO센서의 자기 포화점 이상의 자속이 되면 MO센서의 자구와 자벽의 변화가 거의 일정하게 되는 것을 의미한다. 0.4A 여자전류의 경우, 광량과 결함깊이와의 관계는 직선 식으로 나타낼 수 있으므로, 광량의 측정치로부터 결함깊이를 실시간으로 예측할 수 있다.

3.2 2차원 이면결함에 대한 적용

Fig. 5는 20mm 두께에 대해 10, 15mm 깊이를 갖는 이면결함을 여자전류 0.6과 1.0A에서 관찰한 화상이다. 그림에서 나타나는 것과 같이 결함의 선단이 측정 표면에 가까운 곳에 위치한 결함의 경우, 본 실험방법에 의하여 결함을 확인 가능하며, 여자전류가 증가할수록 뚜렷한 화상을 얻을 수 있다. 이는 자속이 표면뿐만이 아니고 이면으로도 누설되어 결함에 대한 정보를 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 5 a)와 같이 낮은 여자전류를 공급하였을 때, 이면결함의 화상이 표면결함의 화상에 비하여 뚜렷한 화상 구분이 안 되는 이유는, 동일조건 하에서 표면결함에 비해 이면결함에 의해 누설되는 자속이 작기 때문이다.

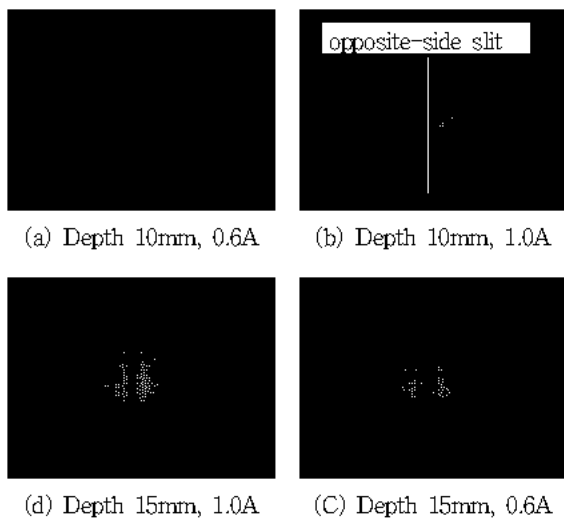


Fig. 5 Photographs on screen for opposite-side cracks at the magnetizer input current 0.6 and 1A

시험편의 두께에 비해 상대적으로 측정하는 면에서 결함 선단까지의 거리가 작은 경우(Fig. 5 c)와 d)), 누설자속이 거의 MO센서의 자기 포화점 이상으로 되어 화상으로 구분하기가 어렵고, 표면결함의 화상(Fig. 3 c)와 d))과 거의 같은 것을 알 수 있다. 이상에서 이면결함의 경우 결함의 깊이와 여자전류의 변화는 화상에 매우 민감한 영향을 주고 있으며, 화상으로부터 결함 검출의 한계 및 결함의 깊이를 평가하기는 매우 곤란하다. 따라서 광량센서를 이용하여 광량을 측정함으로써, 결함 깊이와 여자전류의 변화에 따른 광량을 정량화할 필요가 있다.

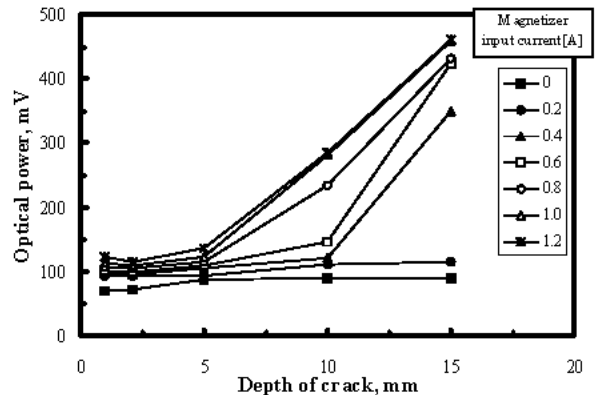


Fig. 6 The optical power for each opposite-side crack at the various magnetizer input currents

Fig. 6은 여자전류를 변화시키면서 관찰한 Fig. 5의 화상을 광학센서로 측정된 광량을 이면결함의 깊이에 대해 나타낸 것이다. 결함 선단이 측정 면으로부터 가까이 있는 결함(결함깊이가 깊은 결함)은 작은 여자전류에서도 검출이 가능하고, 측정 면으로부터 선단이 점점 멀어 질수록 검출감도가 작아진다. 이는 누설되는 자속의 양이 점점 작아져 MO센서로 감지가 할 수 없다. 그러나 여자전류를 0.8, 1과 1.2A로 증가시킨 경우, 두께 20mm에 대해 5mm 깊이의 결함도 검출할 수 있으며, 5mm 이상의 결함에 대해서는 깊이에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있고, 1과 1.2A의 여자전류의 경우 거의 선형으로 측정되고 있다. Fig. 5의 c)와 d)에서 여자전류의 변화에 따른 화상의 차이를 구분하기 어렵지만 광량으로 측정된 경우 약간의 차이를 보이고 있다. 이상의 이면결함에 대한 결과에서, 이면결함의 검출능력을 향상시키기 위해서는 표면결함에 적용할 때보다도 여자전류를 크게 하는 것이 필요하다. 또한 표면결함에 적용했을 때와 같이 실시간 화상으로 검출이

가능하며, 광량을 측정하여 측정면으로부터 결함선단까지의 거리를 예측할 수 있다.

### 3.2 자연균열의 결함 탐상

지금까지 결함의 폭이 있는 인공결함에 대한 검출에 대해서 적용한 결과를 논하였다. 그러나 구조물에 존재하는 결함은 초기에 거의 육안으로 확인하기 어렵고, 어느 정도 진전하였다 하더라도 결함의 개구 폭은 거의 관찰하기 어렵다. 본 절에서는 자연균열에 대해 적용한 것으로, 자연결함 검출 시험편은 클러치 접촉에 의한 마찰로 표면에 균열이 생긴 상용자동차의 플라이휠이다.

Fig. 7은 플라이휠의 사진으로 일부분을 나타내고 있고, MO센서의 부착하여 관찰한 위치를 표시하고 있다. 플라이휠의 표면에는 커다란 단일 균열뿐만 아니라 균열의 성장으로 서로 연결된 결함과 미소 결함이 근접한 다중결함 등이 존재한다. 본 실험에서는 결함의 개구 폭이 거의 없고 서로 근접한 결함에 대해 검출을 실시하였다.

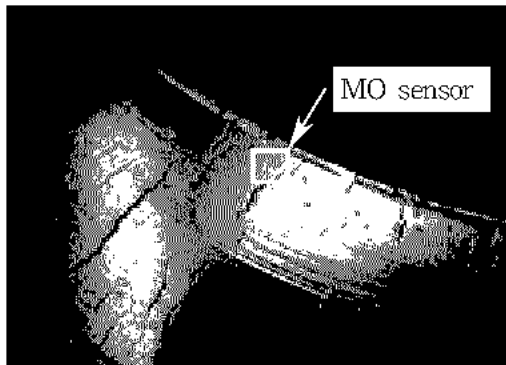


Fig. 7 Photograph of a clutch disk wheel

Fig. 8은 여자전류를 1.2A 공급하였을 때 관찰부위의 화상을 나타내고 있다. 그림에서 근접한 두 개의 균열의해 MO센서가 변화하여, 앞 절에서 관찰한 표면과 이면 결함의 화상과 마찬가지로 결함위치에는 자벽의 증가로 인해 어둡게 관찰되고, 결함주위에는 자벽의 감소로 인한 자구의 증가로 인해 밝게 나타내고 있다. 화상을 관찰할 때 유의하여야 할 점은 MO센서에서 반사된 광은 크기를 증가시키기 위하여 렌즈를 통과하기 때문에, 스크린에 맺히는 화상은 실물에 대해 상하, 좌우가 반대로 바뀐다. 이상에서와 같이 균열의 개구 폭이 거의 없는 결함에 대해서도 화상으로 검출이 가능하며, 결함이 서로 근접한 경우에도 각각의 결함을 관찰할 수 있었다.

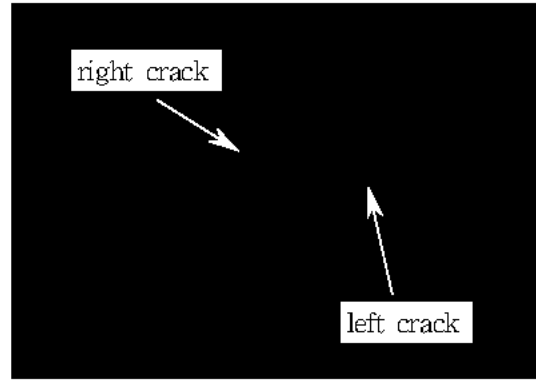


Fig. 8 Photograph on screen at the magnetizer input current 1.2A

## 4. 결 론

MO센서와 레이저광을 이용한 원거리 탐상법을 강자성체에 도입한 인공 2차원 표면결함과 이면결함을 대상으로 결함깊이와 여자전류의 변화에 대한 평가를 실시하고, 구조물에 발생한 결함의 개구 폭이 없는 근접 결함에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

표면결함의 화상은 동일 결함에 대하여 여자전류가 증가할수록 자구의 증가로 생기는 밝은 영역의 면적이 증가하며, 같은 크기의 여자전류라도 균열깊이가 크면 밝은 영역의 면적이 증가한다. 결함이 깊은 경우나 여자전류가 큰 경우 누설자속의 증가로 인하여 MO센서의 자구와 자벽의 변화가 포화점에 이르면, 화상으로 결함의 깊이를 평가하기 곤란하다. 표면결함에 대한 광량은 여자전류가 클수록, 깊이가 작은 결함에서도 포화점에 이르게 되고, 여자전류가 작아지면 작은 깊이의 결함에 대해 차이가 없기 때문에, 깊이를 평가하기 곤란하다. 표면결함에 대한 본 실험의 경우, 0.4A의 여자전류에서 결함 깊이에 대한 광량의 변화가 선형으로 측정되었다.

이면결함은 여자전류가 증가할수록 뚜렷한 화상으로 결함을 확인 할 수 있으며, 측정 표면에서 결함 선단까지의 거리가 가까운 결함은 상대적으로 작은 여자전류에서도 결함을 검출할 수 있다. 이면결함에 대한 광량은 여자전류가 클수록, 측정면에서 가까운 결함일수록 증가한다. 본 실험 조건의 경우, 0.8A이상의 여자전류에서 두께 20mm에 대해 약 5mm 깊이를 갖는 결함에 대해서도 광량으로 평가할 수 있다.

균열의 개구 폭이 거의 없는 결함에 대해서 화상으로 검출이 가능하며, 결함이 서로 근접한 경우에도 각각의 결함을 관찰하였다.

참고문헌

1. T. D. Copper, 1978, "Fatigue in Machine and Structure", ASM, Materials Science Seminar.
2. ASME Boiler and Pressure Vessel Code - An America National Standard Section III(ANSI/ASME BPV-III) Division I, 1977 edition, Appendix G, American Society of Mechanical Engineer.
3. 김 훈, 나의균, 2002, "교류전류를 이용한 비접촉 결함탐상법에 관한 연구", 비파괴검사학회논문집, Vol. 22, No. 1, pp. 53-58.
4. G. L. Fitzpatrick, R. L. Thorne, et al., 1993, "Magneto-optic/Eddy Current Imaging of Aging Aircraft: A New NDI Techique", Materials Evaluation, Vol. 51, pp. 1402-1407.
5. H. Kim and T. Shoji, 2004, "The detection of Defects in Paramagnetic Materials Using Locally Focused Electromagnetic Field Technique", Key Materials, in press.
6. J. Lee, M. Kim, M. Kang, D. et. al., 2004, "Development of Magnetic Camera Using 2-D Arrayed Holl Elements", Proc. APCFS & ATEM'01. pp. 222-227
7. 李鎭伊, 1998, "磁氣光學探傷システムの開發に關する研究", 東北大學大學院工學研究科 航空宇宙工學專攻博士學位後期論文.
8. 李鎭伊, 1998, "磁氣光學探傷システムの開發に關する研究", 東北大學大學院工學研究科 航空宇宙工學專攻博士學位後期論文, p. 54