

미소균열 탐상을 위한 자기광학소자를 이용한 비파괴탐상법의 제안과 적용

Application of a New NDI Method using Magneto-Optical Film for Inspection of Micro-Cracks

이형노*, 박한주**, 庄子 哲雄***

Hyoungno Lee*, Hanju Park** and Tetsuo Shoji***

초 록 항공기나 대형 플랜트 등의 경년구조물에 있어서 제조 및 설계 혹은 작업환경 등에 의해 발생하는 미소결함은 응력부식파괴로 이어지는 결정적인 원인으로 알려져 있다. 따라서 제조단계에서의 결함의 검출뿐만 아니라 운전개시 후에 있어서도 비파괴검사에 기초를 둔 정기적인 건전성평가가 요구된다. 특히 구조물내의 미소균열 평가는 구조 건전성 평가에 있어서 중요한 과제라 할 수 있다. 자기광학소자를 이용한 비파괴탐상법은 균열부근의 누설자속에 의한 자구 및 자벽의 변화를 이용하여 균열정보를 화상형태로 얻는다. 그러므로 빠른 탐상속도와 결과데이터 해석의 용이 그리고 실시간적으로 탐상결과를 획득할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

본 논문은 자기광학소자를 이용한 새로운 비파괴적 탐상법을 제안하고, 본 탐상법을 이용하여 구조물에 존재하는 표면결함의 검출가능성 및 균열깊이의 평가를 실증하였다. 표면결함을 갖는 시험편과 파이프의 내면에 존재하는 피로 균열을 대상으로 실험을 실시한 결과, 표면결함의 위치 및 2차원적 형상을 화상형식으로 얻을 수 있음을 증명하였다. 또한 피로시험중의 시험편을 대상으로 균열발생 및 균열전진과정을 평가를 통하여 원격탐상의 가능성을 제시하였다.

주요용어: 비파괴탐상, 자기광학소자, 자구, 자벽, lift-off 효과, 누설자속, 원격탐상

Abstract Micro-defects induced by design and production failure or working environments are known as the cause of SCC (Stress Corrosion Cracking) in aged structures. Therefore, the evaluation of structural integrity based on micro-cracks is required not only a manufacturing step but also in-service term. So we introduce a new nondestructive inspection method using the magneto-optical film to detect micro-cracks. The method has some advantage such as high testing speed, real time data acquisition and the possibility of remote sensing by using of a magneto-optical film that takes advantage of the change of magnetic domains and domain walls.

This paper introduces the concept of the new nondestructive inspection method using the magneto-optical film, also proves the possibility of this method as a remote testing system under oscillating load considering application on real fields by applying the method to four types of specimens.

Keywords: NDI(non-destructive inspection), MO film(magneto-optical film), magnetic domain, magnetic domain wall, lift-off, magnetic flux leakage, remote sensing inspection

1. 서 론

구조건전성 확보는 불가결한 과제중의 하나이다. 특히, 항공기나 원자력 발전설비 등의 경년구조물에 있어서의 가동중인 구조물에 있어서의 미소균열은 응력부식파괴로

이어지는 결정적인 위험요인으로 알려져 있다. 그러므로 구조물에 있어서 미소균열의 유무 및 존재위치의 파악은 구조건전성 평가에 있어서 대단히 중요하며 비파괴적 탐상법은 가동중의 구조물을 대상으로 한다는 점에서 커다란 장점을 가지고 있으며, 현재 자기광학소자와 누설자장을 이용한 비파괴탐상법의 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

이 등[4]은 원자력 발전설비에 사용되는 배관 내부에 존재하는 응력부식균열(SCC)을 대상으로 한 균열탐상법의 실효를 제시하였다. 하지만 본 탐상법의 적용성을 확대하기 위해서는 탐상법의 신뢰성과 응용가능성의 확보가 절실히 요구된다.

자기광학소자를 이용한 비파괴탐상법은 다음과 같은 장점을 갖는다[5,6]. 첫째, 탐상대상물과의 비접촉탐상이 가능함으로써 시험편 혹은 대상이 되는 구조물 표면의 피복이나 도료 등을 제거할 필요가 없고, 균열부 주위에서 발생하는 누설자속이 자기광학소자의 표면에 2차원적으로 전사됨으로 공간분해능이 우수하며, 탐상속도가 빠르다. 둘째, 균열정보를 지닌 균열화상을 리얼타임으로 데이터화 할 수 있고, 컴퓨터 혹은 비디오 레코더등을 이용하여 손쉽게 데이터를 저장 및 해석이 간편하다.

본 탐상법은 자기광학소자의 자구(Magnetic domain)의 광투과성을 이용함으로써 비교적 간단한 시스템 구성과 자화방법 및 자화방향 등의 변화를 이용하여 구조물의 표면균열 평가를 대상으로 하는 새로운 비파괴탐상법이라 할 수 있다.

하지만 위와 같은 장점과는 달리 자기광학소자의 자구 및 불규칙한 자벽(Magnetic domain wall)의 형상으로 인하여, 균열화상에 있어서 균열부위의 누설자속 영향부의 윤곽이 확실하지 못하며, 특히 자벽이 빛의 입사방향과 수평방향으로 입사되었을 경우, 빛이 자벽을 투과하지 못하기 때문에 자벽의 광투과성을 이용한 탐상에 있어서 중요한 문제점이라고 할 수 있다[7].

따라서 본 연구에서는 자기광학소자를 이용한 새로운 비파괴적 탐상법을 제안하고, 구조물에 존재하는 표면결합의 검출가능성 및 균열의 깊이평가를 위하여 표면결합을 갖는 시험편과 중공형파이프의 내면에 존재하는 피로균열을 대상으로 평가를 실시하였다. 또한 원격탐상에 대한 가능성을 실증하기 위하여 피로시험중의 CT(Compact Test) 시험편을 대상으로 균열발생 및 균열진전과정을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시험편

본 실험에서는 4가지 종류의 시험편(이하 각각의 시험편을 *SP1*, *SP2*, *SP3*, *SP4*로 표시)이 사용되었으며 Table 1에 각각의 시험편 특성을 나타내고 있다.

Table 1 Characteristics of specimens

Type	재료	결함종류	시험편형상	비고
<i>SP1</i>	SS400	인공균열	평판	
<i>SP2</i>	JIS STS410	피로	중공형배관	>700 μ m
<i>SP3</i>	Unknown	피로	CT	
<i>SP4</i>	SA336F22F	피로	CT	

SP1 시험편은 길이 200mm, 폭 100mm, 두께가 5mm인 평판 형상으로 시험편 중앙에 방전가공에 의하여 형성된 길이 10mm, 폭 0.5mm, 깊이가 각각 1.5mm, 3.0mm, 4.5mm인 인공균열(fabricated crack)을 가지고 있다. 탐상위치는 균열의 중앙부분과 선단부분, 그리고 각각의 시험편에 대하여 균열이 있는 면과 그 반대면에 대하여 실험을 실시하였다.

실 구조물에 있어서의 본 탐상법을 적용하기 위해서 다음과 같은 두 가지 종류의 시험편이 준비되었다. *SP2* 시험편은 원자력 발전설비에 사용된 중공형 배관으로 환경 온도 290 $^{\circ}$ C, 용제의 탄소농도 1 ppm의 환경 중에서 피로 실험을 실시한 후 축 방향으로 절단한 것이다. *SP2*는 내부벽에 약 700 μ m 이하의 미소균열(응력부식균열)들이 존재하며 이를 대상으로 실험을 실시하였다. 두 번째 *SP3*는 CT시험편으로서 피로실험을 실시한 후, 두께방향으로 각각 1mm, 2mm, 4 μ m, 6mm, 8mm 두께로 절단하여 시험편의 두께에 따른 균열화상의 변화를 평가하였다.

*SP4*는 CT시험편으로써 동적하중하에서 MTS에 의한 피로실험 과정중의 균열개시(crack initiation) 및 균열진전(crack propagation) 과정의 평가를 위하여 준비되었다. 이는 본 탐상법을 동적하중을 받고 있는 시험편에 적용하여 원격탐상법으로서의 탐상 가능성을 증명하기 위한 것이다.

본 실험에서 사용된 자기광학소자의 특성은 막의 두께 10 μ m, Faraday 회전계수 65000deg/cm, 투과율(transmittance) 0.85, 자구폭 44 μ m, 포화자장 1600A/m의 (GdBi)₃(FeAl)₅O₁₂의 제질로 구성되었으며 광원으로써 레이저와 편광광원을 사용하였다. 특히, 자기광학소자는 자화방향에 민감하게 반응하는데 이로 인하여 자장에 대한 방향성을 갖게 되어 균열의 길이방향에 수직방향으로 자장을 걸어주었을 때 명확한 균열화상을 얻을 수 있다.

2.2. 실험 절차

Fig. 1은 자기광학소자를 이용한 비파괴탐상법의 기본 시스템 개념도이다. 실험에서 사용된 레이저는 파장 670nm, 출력 10mW이며 실험절차는 다음과 같다. 레이저에서 나온 직선 편광된 빔이 빔익스펜더에 의하여 직선성을 유지하면서 시험편에 부착된 자기광학소자에 입사된다. 이때 시험편은 직류자장에 의해서 자화상태에 있으며 전류컨트롤러에 의해서 전류세기를 조절함으로써 자장세기를 변화시킨다. 이렇게 자기광학소자에 입사된 빔은 자기광학소자 뒷면의 알루미늄 코팅면으로부터 반사되어 검광자 및 렌즈를 통과한 후 스크린에 투영되며, 스크린에 투영된 균열화상 데이터는 CCD카메라를 이용하여 컴퓨터로 입력되어 분석된다.

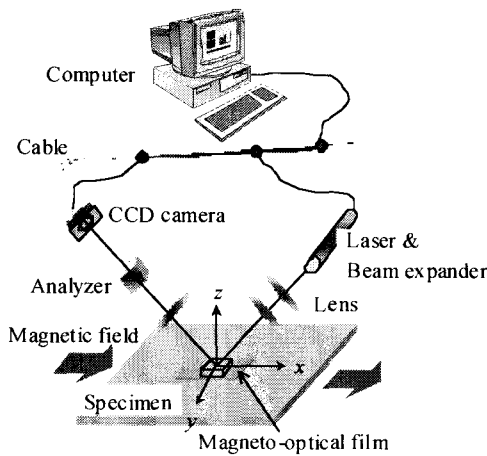


Fig. 1 System concept of a new inspection method

2.3. 반복하중하의 시스템 구성

본 실험은 반복하중을 받고 있는 시험편에서의 균열의 발생과 진전과정을 실시간적으로 모니터링함으로써 본 탐상법을 이용한 원격탐상의 실예를 증명하기 위한 실험이다.

Fig. 2는 원격탐상법의 간략한 개념도이다. 3차원 좌표계에서 시험편의 표면을 X-Y평면으로 정의한다. 여기서 X방향은 하중방향, Y방향은 균열의 예상진전방향 그리고 Z방향은 X-Y평면에 대하여 수직방향으로 정의한다. X방향으로 자장을 걸어줄 때, 균열부 부근에서 Z방향으로 누설자속이 발생하게 된다. 이때 자기광학소자의 자구(magnetic domains)는 자장의 3차원 좌표계에서 오직

Z방향의 B_z 성분에만 반응한다.

실험조건은 다음과 같다. 최소하중 $P_{min}=1.9kN$, 최대하중 $P_{max}=38kN$ 이며 주파수는 1Hz이다. 자화기에 의해서 시험편상의 자장세기를 조절하게 되며, 이때 사용된 자화기의 특성은 다음과 같다. 입력전압 DC 3.19A, 코일의 감은 횟수 130회, 자화기의 극간거리 48mm이다.

시험편은 탐상시스템으로부터 약 1m정도 떨어져 있으며 광원으로서 선형편광 레이저가 사용되었다. 레이저빔은 빔익스펜더에 의해서 증폭된 후, 자기광학소자에 입사된다. 입사된 빔은 다시 자기광학소자로부터 반사되어 검광자 및 렌즈를 통과한 후, 스크린에 투영되어지는데, 이때 빔은 시험편의 균열정보를 포함하고 있으며, 균열정보는 CCD 카메라를 거쳐 컴퓨터에 의해서 최종적으로 처리된다.

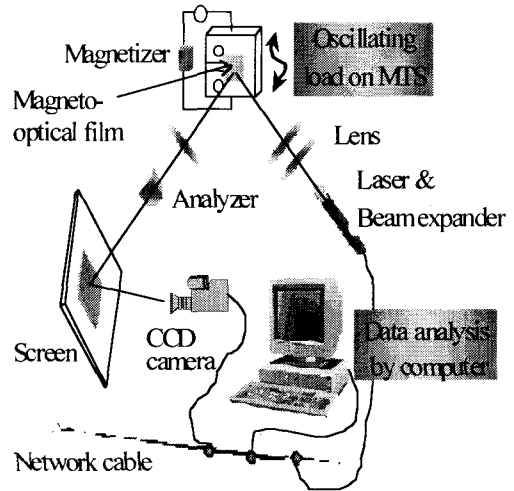


Fig. 2 Remote inspection concept of a new inspection method

3. 실험 결과

3.1. 레이저를 이용한 탐상결과

Fig. 3은 레이저를 이용한 탐상법에 의한 탐상결과로, SPI시험편(SS400)의 균열화상을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 시험편의 균열형상이 누설자속에 의하여 자기광학소자에 2차원 형상으로 전사되며, 이때, 레이저빔의 입사 및 반사 과정에 의해서 자기광학소자에 전사된 균열형상이 스크린에 투영된다. 시험편내의 자속(magnetic flux)이 시험편내에서 균열부근을 통과시 누설자속(magnetic flux leakage)이 발생한다. 이때 자화용이방향성을 갖는 자기광학소자의 자구와 자벽은 누설자속에

반응하여 자화방향에 따른 일련의 정렬이 이루어진다. 그 결과 누설자속의 자속방향과 동일한 자구의 영역이 넓어짐으로서 균열의 2차원 형상이 자기광학소자에 전사되어지며 빔에 의하여 화상정보가 스크린에 투영된다.

특히, 레이저를 이용한 탐상법에 있어서 탐상감도를 결정하는 두 가지 인자가 있다. 하나는 검광자의 편광각도이며 다른 하나는 빔이 자기광학소자에 입사될 때의 입사각이다.

Fig. 4는 빛의 강도에 대한 빔입사각의 영향을 나타내고 있다. 여기에서 I/I_0 는 입사각이 0° 일 때의 빛의 세기를 기준으로 한 각 입사각에서의 빛의 세기를 나타내는 무차원 단위이다. 편광자의 편광각을 90° 로 고정된 후 빔입사각과 빛의 세기와의 관계를 조사한 결과 빔입사각이 $8^\circ \sim 12^\circ$ 사이에서 최적의 빛의 세기가 검출되었으며 자기광학소자의 자벽은 광투과성이 없기 때문에 입사각이 일정 이상일 경우, 자기광학소자에 입사하는 빛이 산란 및 전반사 등의 현상으로 최종적으로 돌아오는 빛의 강도가 저하된다. 빛의 강도는 명확한 균열화상을 검출하는데 있어서 중요한 인자이며 이를 근거로 입사각을 $8^\circ \sim 12^\circ$ 로 고정된 후 실험을 진행하였다.

Fig. 5는 균열깊이와 균열화상의 명암 영역과의 관계를 조사하기 위해서 균열이 있는 면과 그 반대면에 대하여 실시하였다(Fig. 3의 기호 참조). 균열깊이가 증가함에 따라 균열화상의 밝은 영역(W_b)이 증가하였다. 이러한 경향은 균열이 있는 면과 그 반대면에서 동일하였고 다른 논문의 결과[8]와 일치한다는 점에서 실험의 신뢰성이 증명된다.

3.2. 편광빔을 이용한 비파괴탐상법

본 절에서는 편광광원을 사용하여 동일한 실험을 실시하였다. 이 방법은 레이저를 사용할 수 없는 소형 시험편 혹은 미소균열의 평가에 적합하다. 또한, 비교적 시스템 구성이 간단하다는 점과 시험편의 크기가 상대적으로 작고 미소균열을 대상으로 할 경우에 있어서도 높은 탐상감도를 얻을 수 있다는 장점을 갖는다.

Fig. 6은 편광빔을 이용하여 얻은 SP3 시험편의 균열 화상이며 균열화상이 자장세기(전류세기)에 의해서 변화하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 자장세기가 증가할수록 균열면을 중심으로 어두운 영역이 증가하고 있으며, 이는 레이저를 이용한 탐상결과와 일치한다.

Fig. 6에서의 결과를 보다 자세히 검토하기 위하여

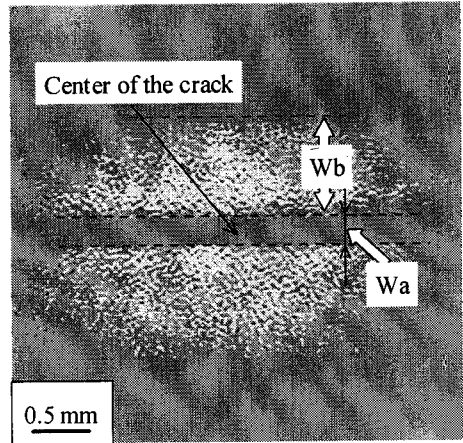


Fig. 3 Photograph of the defect, SP1

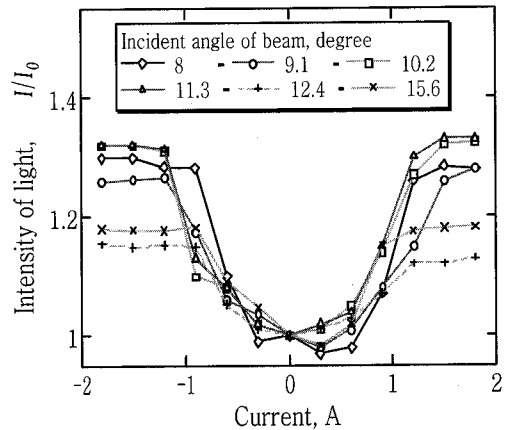


Fig. 4 Effect of incident angles on light intensity

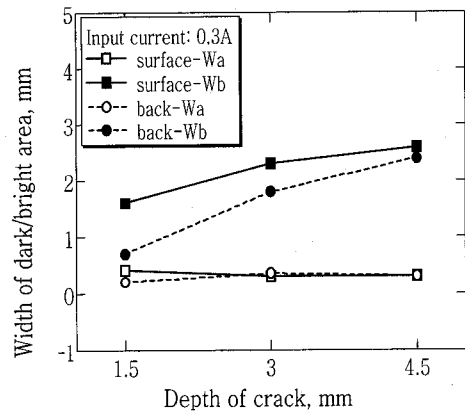


Fig. 5 Relation between crack depth and bright/dark areas

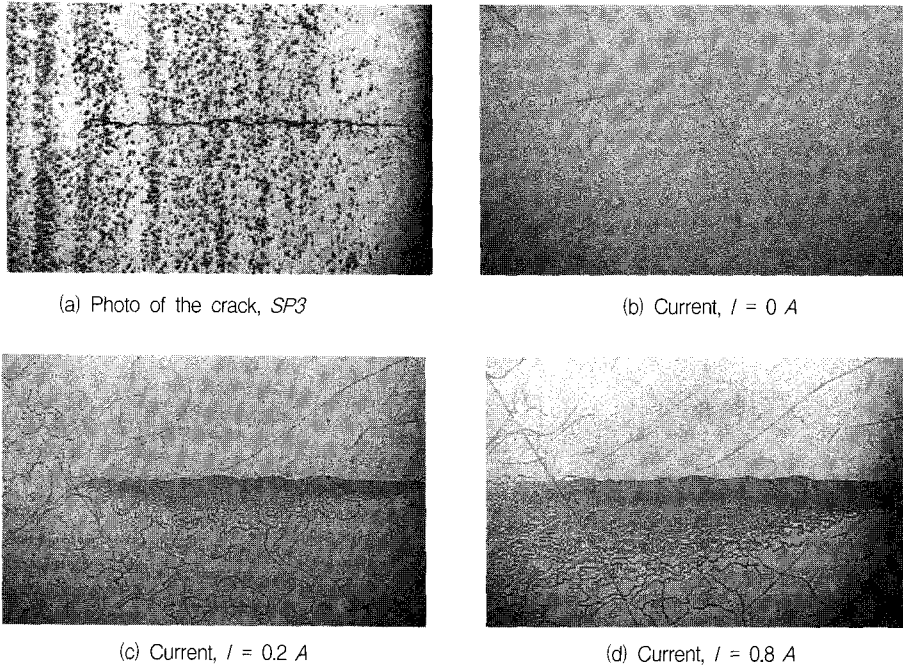


Fig. 6 Photographs of the crack by magneto-optical inspection method, SP3

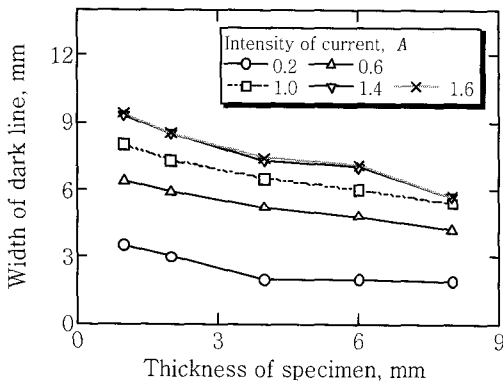


Fig. 7 Relation between specimen thickness and width of dark area

Fig. 7에 자장세기(전류세기)의 변화에 따른 시험편 두께와 균열화상에서의 명암 영역관계를 조사하였다. 먼저, 시험편 두께가 증가함에 따라 균열면을 중심으로 어두운 영역이 점점 감소함을 알 수 있다. 이러한 경향은 전류세기에 관계없이 같은 경향을 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7의 결과로부터 균열화상에서의 명암영역은 전류의 세기 및 시험편의 두께에 관계가 있음을 알 수 있다. 이는 누

설자속의 양에 비례하여 자기광학소자의 자구와 자벽이 반응하게 되므로 이와 같은 비례관계가 성립한다고 사료된다.

3.3. 배관 시험편의 탐상

본 실험에서 제안한 탐상법은 평판의 표면균열을 대상으로 높은 탐상감도가 얻어졌다. 그러나 기존의 탐상법으로는 곡면과 같은 배관시험편을 대상으로 할 경우, 자기광학소자 본래의 특성으로 인한 lift-off현상이 발생하게 되어 탐상감도의 저하 혹은 탐상자체가 불가능한 경우가 발생한다. Fig. 8은 탐상시 이용하는 누설자속성분과 lift-off와의 관계를 나타내고 있다. 여기서 lift-off현상이란 탐상시 사용되는 자기광학소자와 탐상대상물과의 간격을 의미한다. 즉, 자기광학소자와 대상물과의 간격이 멀어질수록 자기광학소자에 도달하는 누설자속의 양이 감소하게 되며, 따라서 자구 및 자벽의 영역변화가 발생하기 힘들게 되어 탐상감도의 저하를 초래하게 된다.

그러므로 lift-off를 최소화하기 위한 방법으로 자기광학소자 자체 사이즈를 소형화하는 방법과 Fig. 8과 같이 대상물의 곡면과 동일한 곡률로 가공한 자기광학소자를

대상물의 곡면에 수직으로 위치시켜 누설자속 B_x 성분을 이용하는 방법을 시도하였다.

Fig. 9는 배관내부의 응력부식균열의 탐상결과를 나타내고 있다. Fig. 9(a)는 배관내부에 존재하는 응력부식에 의한 피로균열의 실제 사진이며, crack1($700\mu\text{m}$)과

crack2($350\mu\text{m}$)를 대상으로 실험하였다. Fig. 9(b)는 소형화된 자기광학소자를 이용한 탐상결과이며 Fig. 9(c)는 시험편의 내부표면에 수평방향인 누설자속 성분 B_x 를 이용한 탐상결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 위의 두 가지 방법에서 모두 만족할 만한 결과가 얻어졌다.

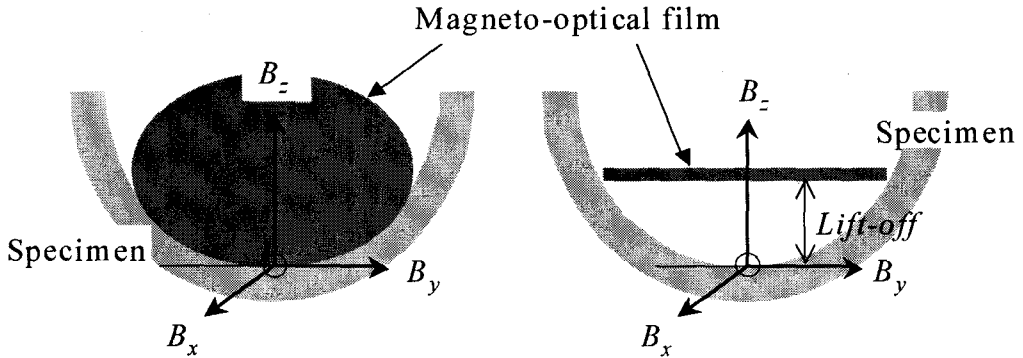
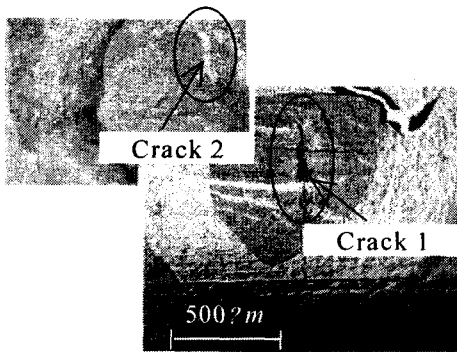
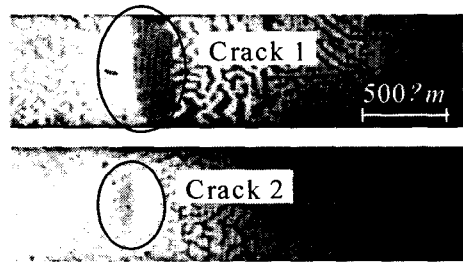


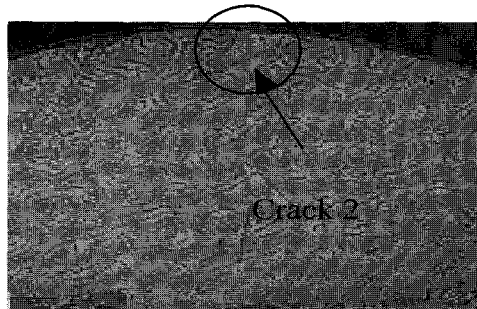
Fig. 8 Lift-off in case of using different magnetic flux components



(a) Photograph of cracks



(b) Photograph by B_z component of magnetic flux



(c) Photograph by B_x component of magnetic flux

Fig. 9 Photograph of cracks by inspection method taking advantage B_z & B_x component of magnetic flux, respectively. SP2

3.4. 반복하중하의 탐상법 적용의 실예

동적하중하에서의 본 탐상법의 적용가능성을 증명하기 위해서 MTS에 의해 반복하중을 받고있는 시험편내의 균열발생과 균열전과과정을 모니터링함으로써, 반복하중을 받는 실구조물에 대한 탐상 가능성을 실험하였다. 실험조건은 최소하중 $P_{min}=1.9kN$, 최대하중 $P_{max}=38kN$ 이었다

Fig. 10은 동적하중하에서의 최대하중이 작용할 때 SP4시험편의 균열화상 탐상결과를 나타내고 있다. 균열 중심부를 기준으로 양쪽으로 어두운 영역이 존재하고 있는데, 이는 자기광학소자의 자구들이 균열부근에서 발생한 누설자속에 반응하여 자구의 자화방향과 일치하는 영역이 넓어짐으로써 발생된다. 본 탐상법을 이용하여 동적하중하에서 탐상가능한 최소균열 길이는 약 $500\mu m$ 였으며 실험 후 균열의 최종길이는 약 3.3mm였다.

위 실험을 통하여 본 탐상법을 동적하중을 받고 있는 시험편의 균열발생과 전과과정의 모니터링에 성공함으로써 실제 구조물의 원격탐상법에의 적용 가능성이 증명되었다.

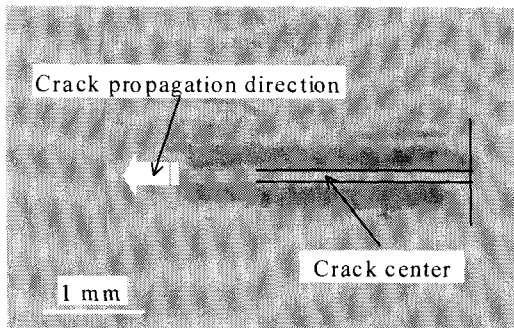


Fig. 10 Photograph of the crack of CT-specimen under oscillating loads, $P=38 kN$

4. 결 론

본 연구는 자장에 의한 자기광학소자의 자구 및 자벽의 변화를 이용한 비파괴적 탐상법에 관한 것으로 가공된 시험편과 실구조물에서 얻은 시험편을 대상으로 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 구조물 표면에 존재하는 표면결함의 평가가 가능한 자기광학소자를 이용한 새로운 비파괴 탐상법을 제안하였다.
2. 자기광학소자의 소형화 및 대상물 표면에 수평방향의 누설자속성분 B_x 를 이용하여 평가가 곤란한 파이프

내면에 존재하는 표면균열의 평가가 가능함을 실증하였다.

3. 동적하중하의 피로실험에 본 탐상법을 적용한 결과, 균열발생과 균열전과 과정의 실시간 모니터링에 성공함으로써 실구조물에 적용가능한 원격탐상법으로서의 가능성을 증명하였다.

참고문헌

- [1] Fitzpatrick, Gerald L., Thome, Richard L., et al., "Magneto-optic/Eddy Current Imaging of Aging Aircraft: A New NDI Technique," *Materials Evaluation*, Vol. 51, pp. 1402-1407, (1993)
- [2] Fitzpatrick, Gerald L., Thome, Richard L., et al., "Novel eddy current field modulation of magneto-optic garnet films for real-time imaging of fatigue cracks and hidden corrosion," *Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering*, Publication by Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, WA, USA, Vol. 2001, pp. 210-222, (1993)
- [3] Theodoulidis, T P. Panas, et al., "Eddy current detection of crack orientation using elliptical excitation," *IEEE Proceedings, Part A, Science, Measurement & Technology*, Vol. 141, pp. 41-47, (1994)
- [4] J.Y. Lee, H.N. Lee, et al., "Application of Magneto-optical Method for Inspection of the Internal Surface of a Tube," *Studies in Applied Electromagnetic and Mechanics*, IOS Press, pp. 49-57, (1998)
- [5] Pullian, GR., et al., "Large Stable Magnetic Domains," *Journal of Applied Physics*, Vol. 53, pp. 2754, (1982)
- [6] J.Y. Lee and T. Shoji, "Development of a New NDI System by use of Magneto-optical Film," *Proceedings of JSNDI Spring Conference*, pp 185-188, (1997)
- [7] K. Saito, "Light and magnetism," *Asakurashoten*, pp. 89-105, (1988)
- [8] M. Ishihara, T. Sakamoto, et al., "Advanced Magnetic Flux Leakage Testing System Using Magneto-optical Film," *JSNDI*, 45(4), pp. 283-289, (1996)