

# 모아레 간섭 법을 이용한 계면균열을 가진 연성 접합 층 내의 응력 분포 측정

## The Measurement of Stress Distribution near a Interface Crack in a Ductile Adhesive Layer Using the Moire Interferometry

황 상준\*, 강 기주\*\*

\* 전남대학교 대학원

\*\* 전남대학교 기계공학과

### 1. 서 론

비접촉식으로 물체의 변형을 측정하는 대표적인 방법은 빛을 이용하는 것이다. 빛을 이용한 변형 측정 방법으로는 모아레 간섭법, 광 탄성법, 홀로그래피 법, 스펙클 간섭계(Speckle Interferometry) 법 등이 있는데 특히 모아레 간섭 법은 다양한 측정 범위와 측정 대상, 높은 측정 민감도를 가지는 장점이 있어 물체 표면의 변형률을 측정하는데 널리 적용되고 있다. 모아레는 원래 물결 무늬를 뜻하는 불어인데, 현재에는 유사한 주기의 조도 패턴(Intensity Pattern)을 가지는 두 격자가 겹쳐졌을 때 생기는 보다 큰 주기의 조도 패턴을 일컫는 용어로 널리 쓰이고 있다. 모아레를 이용하여 평면 내의 변형(In Plane Deformation)을 측정하는 방법은 여러 연구자들에 의해서 지난 40년 간 끊임없이 개발되어 왔다. 1874년 Rayleigh에 의해 회절 격자의 검사에 사용될 수 있음이 처음으로 제안된 이후에 1967년 Post<sup>(1)</sup>는 무늬 배가(Fringe Multiplication)방법에 의해 모아레 측정 민감도를 높이는 기술을 개발하여 높은 민감도로 평면 내 변형을 측정할 수 있는 모아레 간섭계(Moire Interferometry)로 발전 시켰다.

본 연구에서는 모아레 방법을 이용하여 연성접합층 내 균열 선단의 응력 분포를 측정하고자 한다. 측정하고자하는 영역은 균열선단 유한변형(finite deformation)영역으로 수치해석이나 기타 실험적 방법으로 응력 또는 변형률 분포를 측정하기 어려운 구간에 속한다. PEMI(Portable Engineering Moire Interferometry, Phtomechanics COM.)장비를 이용 모아레 무늬를 잡은 후 이미지 후처리를 하는 방법을 이용하여 모드 I 하중 하에 있는 황동/뿔납/황동 시편의 계면균열선단 근처의 응력분포를 실험적으로 측정하고자 한다.

### 2. 모아레 간섭법의 원리

Fig. 1은 모아레 무늬가 얻어지는 방식을 나타내는 개략도 이다. 시편에 1200lines/mm의 격자(Grating)가 붙여지고 PEMI 장비를 이용하여 시편에 49.4°만큼 회전된 레이저로 가상 격자를 만들어 준다. 하중을 가하기 전에 시편 격자와 가상격자를 먼저 Null Field형태로 보정(Calibration)하고 하중을 증가시키면서 부착된 격자 변형에 의한 Moire무늬 변화를 CCD 카메라를 이용하여 촬영한다. 변위 장(Displacement Field)은 모아레 무늬로의 Full Field에서  $N_x$ ,  $N_y$ 를 측정하여 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{1}{f} \left[ \frac{\partial N_x}{\partial x} \right], \quad \epsilon_y = \frac{1}{f} \left[ \frac{\partial N_y}{\partial y} \right], \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{f} \left[ \frac{\partial N_x}{\partial y} + \frac{\partial N_y}{\partial x} \right] \quad - (1)$$

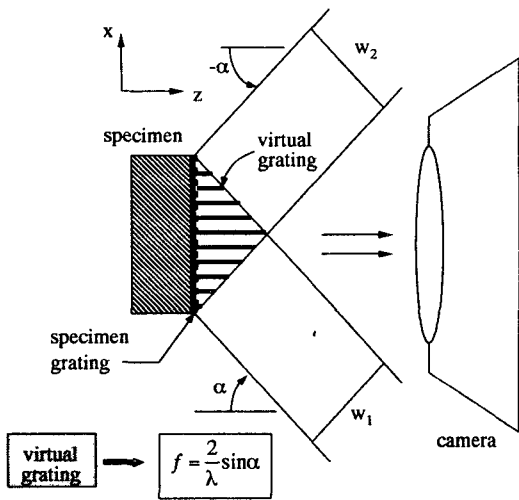


Fig 1. Principle of Moire Interferometry

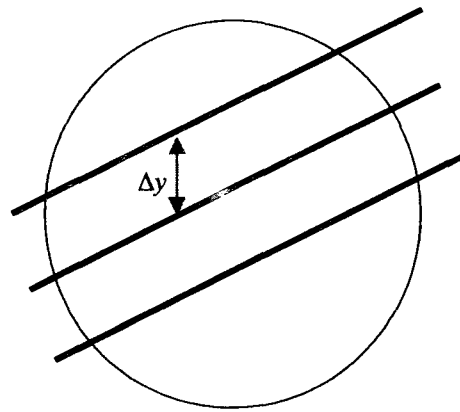


Fig 2. Strain Analysis from Moire Pattern (V-field)

여기서  $f$ 는 가상격자(virtual Grating)의 주파수(Frequency)로 Fig. 1로부터 계산해 보면  $f = \frac{2}{\lambda} \sin \alpha$  로부터  $\lambda = 632.8\text{nm}$  (He-Ne Laser의 파장, 10mw),  $\alpha = 49.4^\circ$  이므로  $f \approx 2400$  lines/mm이다.  $f = 2400$ 이 보정(Calibration)조건이나  $f$ 값은  $\lambda$ 가 고정된 값이므로  $\alpha$ 값에 영향을 받는다. 여기서  $\alpha$ 는 레이저 입사 각도로 장비로써 조절하므로 초기 설정 시 오차가 발생할 수 있으나 1%내로 무시 할 수 있다.

Fig. 2는 모아레 무늬로부터 변형률을 계산하는 간단한 모델이다. 그림으로부터 V-Field(Y-방향) 모아레 무늬로부터  $\epsilon_y$ 를 구한다면 모아레 무늬의 줄 사이의 간격이 최소 측정 단위이므로 식 (1)으로부터  $\partial N_y$ 는 측정 범위에 모아레 무늬의 개수,  $\partial y$ 는 측정 범위거리 값을 대입하면 모아레 무늬 전체로부터 각 점의 변형률 값을 구할 수 있다.

### 3. 실험 방법

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 황동/뿔납/황동 샌드위치 CTS(Compact Tension Shear)시험편<sup>(2)</sup> 형상이다. 중간층(뿔납) 두께는 0.5mm이고 시편 두께는 10mm인 것을 사용하였다. 각 재료의 물성은 Table 1과 같다.

먼저 유압용 시험기를 이용하여 예비균열을 낸 후 예비균열 이후로부터 뿔납 층을 따라서 격자를 붙였다. 예비균열이 만들어진 시험편은 기계식 인장시험기로 파단 실험을 하는 도중에 모아레 무늬를 잡았고 모아레 무늬는 흑백 CCD Camera (Pulnix TM72-EX)와 Frame Grabber Board를 통해 컴퓨터 상에 실시간으로 저장 되게끔 했다.

실제로 PEMI를 이용하여 모아레 무늬를 잡으면 이 줄 무늬로부터 Data를 분석하게 되는데 일부 무늬에서는 Noise가 상당히 심하게 발생하여 모아레 무늬를 분석하는데 상당한 어려움이 발생한다. 따라서 화상 이미지의 필터링(Filtering)과정이 필수적이다. 필터링에 쓰이는

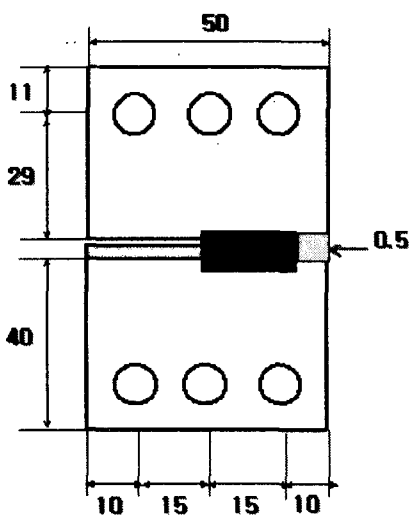


Fig. 3 Specimen(attached grating)

Table 1. Material properties of brass and solder

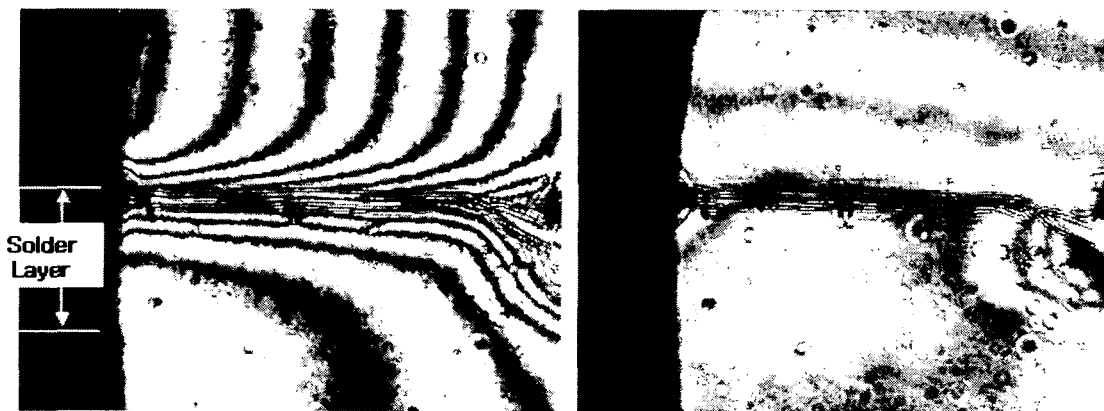
|                       | Young's Modulus<br>E (GPa) | Poisson's Ratio<br>$\nu$ | Yield Stress $\sigma_0$<br>(MPa) | Strain Hardening<br>Exponent, n | Strain Hardening<br>Coefficient $\alpha$ |
|-----------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|
| Brass<br>(substrates) | 90                         | 0.397                    | $\infty$                         | —                               | —  |
| Solder<br>(adhesive)  | 15                         | 0.35                     | 35                               | 10.7                            | 0.85                                     |

Kernel은 3\*3, 7\*7, 9\*9 (3가지)를 사용했는데 일반적인 화상은 Kernel의 차수가 높아질수록 훨씬 선명하게 얻어질 수 있으나 이미지 전체의 밝기의 영향에 의해서 3\*3 고주파 강화 필터링 영상에서 선명하게 얻어질 수도 있다. 따라서 동일 모아레 무늬를 3가지의 필터링을 사용하여 가장 선명한 영상을 사용하면 된다. 또한 Gray영상은 밝기 값이 0부터 255사이 값을 가져야 하므로 픽셀 (Pixel) 연산 과정에서 보여지는 밝기 값의 초과 현상은 에러를 발생시키게 된다. 따라서 Saturation 기법으로 영상의 명도 값을 0에서 255값으로 보정해 주었다.

#### 4. 실험 결과

시편 표면은 평면 응력(plane stress) 상태에 있으므로 각 점의 응력 또는 변형률 상태는  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{xy}$ (두께 방향: z)에 의해 표현될 수 있다. 모아레 방법을 이용하여 변형률 분포를 측정하기 위해서는 식 (1)에서와 같이 x방향과 y방향 모아레 간격인  $N_x$ ,  $N_y$ 를 각 점에 대해 얻어야 한다. Fig. 4(a)와 (b)는 외부하중 160[kg]에서 CCD 카메라를 이용하여 촬영한 y방향과 x방향의 모아레 간섭무늬이다. 그림에서 모아레 간격이 좁을수록, 모아레 무늬의 개수가 많을수록 큰 변형상태에 있음을 나타낸다. 또한 균열을 가진 황동/땀납 윗 계면이 아래 계면에 비해 모아레 무늬가 조밀하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 계면 균열진전의 지배 인자인  $\sigma_{yy}$ 분포를 얻고자 한다. 강기주 등<sup>(3)</sup>과 김동학<sup>(4)</sup>은 각각 슬립선장 이론해석과 유한변형(finite deformation)을 고려한 유한요소 해석을 이용하여 균열선단 응력

특이장을 만족하는 영역보다 적은 거리에서는  $\sigma_{yy}$ 가 거리에 따라 증가하고 또한 어느 이상의 외부하중에서  $\sigma_{yy}$ 가 포화되어 더 이상 증가하지 않는 특성이 있음을 보고한 바 있다. Fig. 5는 거리



(a) V-Field

(b) U-Field

Fig. 4 Moire Pattern

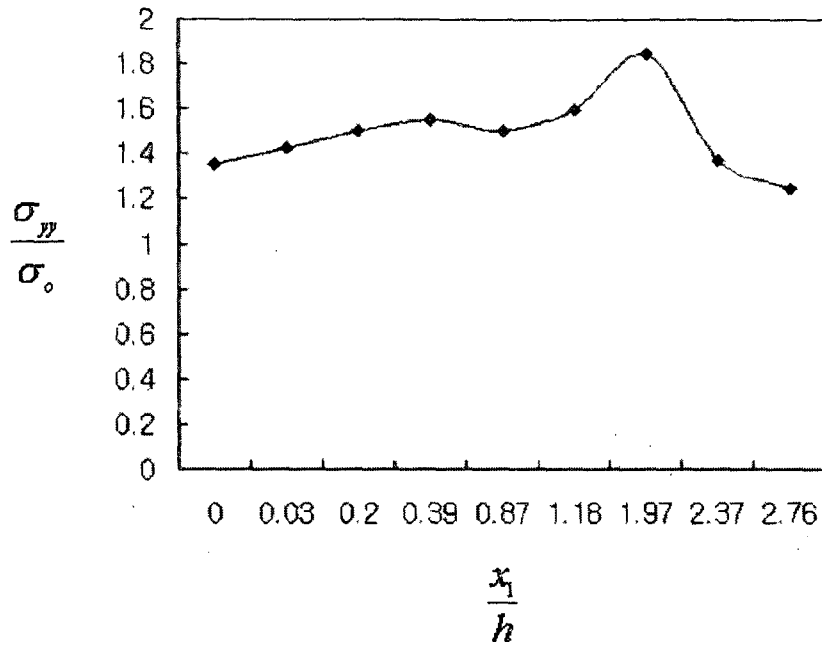


Fig. 5 Interface crack-tip stress field in the region of the finite deformation under remote loading, 160[kg] : h is a layer thickness,  $\sigma_0$  is yielding stress of solder

에 따른  $\sigma_{yy}$  분포를 나타내는데 기존 연구결과와 유사하게 거리에 따라 응력값이 증가한 후 감소하는 양상을 보여준다. 또한 다양한 하중조건에 대해 모아레 무늬를 관찰한 결과 140[kg] 이상의 하중에서  $\frac{x_1}{h}$  가 1.5보다 작을 때 외부하중에 무관한  $\sigma_{yy}$  분포를 보였다.

#### 참고문헌

1. Post D., han B. and Ifuju P : High Sensitivity Moire, Springer-Verlag(1994)
2. 송부근 : 납땜 접합층 강도에 관한 파괴 역학적 연구, 전남대학교 대학원 졸업논문(1997)
3. 강기주, 김동학, 김도형 : 연성접합층 계면균열 선단 근처의 응력 분포, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집(1999), pp66-70
4. 김동학 : 탄성체에 의해 샌드위치된 연성접합층에서의 균열진전 거동에 대한 파괴 역학적 해석, 전남대학교 대학원 졸업논문(1998)