무잔류 응력상태 결정을 통한 표면 잔류응력장 평가에의 레이저 간섭계 적용

김동원† · 이낙규* · 최태훈* · 나경환* · 권동일**

Application of Laser Interferometry for Assessment of Surface Residual Stress by Determination of Stress-free State

Dong-Won Kim, Nak-Kyu Lee, Tae-Hoon Choi, Kyoung-Hoan Na and Dongil Kwon

Key Words : Nondestructive Test(비파괴 평가), Interferometry(간섭계), Annealing(어닐링), Thermo-elastic(열탄성), Residual Stress(잔류응력), Mapping(맵핑).

Abstract

The total relaxed stress in annealing and the thermal strain/stress were obtained from the identification of the residual stress-free state using electronic speckle pattern interferometry (ESPI). The residual stress fields in case of both single and film/substrate systems were modeled using the thermo-elastic theory and the relationship between relaxed stresses and displacements. We mapped the surface residual stress fields on the indented bulk Cu and the 0.5 ㎛ Au film by ESPI. In indented Cu, the normal and shear residual stress are distributed over -1.7 GPa to 700 MPa and -800 GPa to 600 MPa respectively around the indented point and in deposited Au film on Si wafer, the tensile residual stress is uniformly distributed on the Au film from 500 MPa to 800 MPa. Also we measured the residual stress by the x-ray diffractometer (XRD) for the verification of above residual stress results by ESPI.

기호설명

$\Delta\Phi$: 변형전·후의 위상차
λ: 레이저의 파장
d: 대상체의 변형량
α: 물체빔의 입사각
β: 물체빔의 반사각(1-D 면외변위 측정) 또는 제 2 물체빔의 입사각(1-D 면내변위 측정)
f: 프린지의 수
σ^r_{ii}: 잔류응력
ε^m_{ii}: 레이저 간섭계를 통해 측정된 열 변형률
ε^r_{ii}: 박막의 잔류 응력 유발을 위한 변형률
$\Delta\alpha$: 박막의 열팽창 계수-기판의 열팽창 계수
ΔT_d: 박막 제작 후 냉각시 온도차이 (=상온 - 증착 온도)
ε^{r*}_{ii}: 박막과 기판의 열팽창 계수 차이 이외에 잔류응력을 유발시키는 변형률
ε^a: 어닐링 시 온도차이에 의해 유발되는 박막의 열 응력을 유발시키는 변형률
ΔT_a: 어닐링 시 온도 - 상온
θ: 시편의 표면상에서 x-ray source 의 정사영이 이루는 상대적인 각
Ψ: x-ray source 와 시편 표면의 수직방향이 이루는 각

† 서울대학교 재료공학부
E-mail : dongwonk@gong.snu.ac.kr
TEL : (02)880-8025 FAX : (02)889-4380
* 한국생산기술연구원
** 서울대학교 재료공학부

1. 서 론

잔류응력은 기존의 파괴적 기법으로서 hole-drilling method 나 식각법에 의한 파괴적 방법에

의해 주로 평가되어 왔으며[1,2], 최근에는 비파괴적 방법으로서 X-ray, 중성자 회절빔 또는 자기적 평가법으로서 Barkhausen noise 를 이용한 잔류 응력 평가와 관련한 연구가 진행 중이다[3~5]. 그러나 일정 면적에서의 잔류응력장의 맵핑(mapping)을 효과적으로 이루어낸 연구는 전무하다고 할 수 있으며, FEA(Finite Element Analysis)와 같은 수치적 시뮬레이션 해석 기법을 이용하여 잔류응력장 맵핑을 시도하고자 하는 연구가 활발히 진행중이다[6]. 특정 면적상의 잔류응력장 평가는 시스템의 파손 취약부 분석과 함께 수명 예측 평가의 연구에 매우 중요한 분야라고 할 수 있다.

본 연구에서는 레이저를 일정 면적에 조사함으로서 변형장을 in- situ 기법으로 측정할 수 있는 레이저 간섭계의 일종인 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 이용하여 압입된 Cu 시편 및 증착된 Au 박막의 무잔류응력 상태의 평가와 함께 표면 잔류응력장을 맵핑하였다.

2. ESPI 를 이용한 변형장 측정

ESPI 시스템은 레이저가 물체에 조사될 때 물체 표면의 거칠기에 의해 발생하는 레이저 스페클(speckle)의 간섭현상을 이용하여 미소 변위를 측정하는 기술이다. 레이저 광원을 출발한 빔은 스플리터(beam splitter)를 통과하면서 기준 빔(reference beam)과 물체 빔(object beam)으로 나뉜다. 측정 대상체에 조사되는 물체 빔은 대상체의 표면에서 반사되어 CCD 카메라로 입사되면서 기준 빔과 간섭을 일으키고, 측정된 상은 CCD 카메라를 통해 저장된다. 대상체가 변형시 물체 빔의 반사 경로가 미세하게 변하여 기준 빔과의 간섭에 변화를 일으키게 된다. 변형 후의 상을 저장하여 변형 전의 상과 비교하면 위상차에 의한 프린지 패턴을 얻을 수 있고, 이를 분석하면 대상체의 상대적인 변형을 정량적으로 평가할 수 있다. 면내변위를 측정하기 위해서는 면외 변위 측정의 경우와는 달리 두 개의 물체 빔이 대상체에 조사되는데, 이 중 하나는 기준 빔의 역할을, 다른 하나는 물체 빔의 역할을 한다.

Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 면외 변형이 발생하는 경우 경로차가 발생하게 되고, 위상차는 파수와 경로차의 곱과 같게 되므로 식 (1)과 같은 관계가 성립된다.

$$\Delta\Phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \times [d(\sin\alpha + \sin\beta)] \qquad (1)$$

면외 변위의 경우 프린지 수와 변위사이에는 식 (2)과 같은 직선적인 비례관계가 성립되고 이로부터 변위를 평가한다.

$$d = \frac{f\lambda}{\sin\alpha + \sin\beta} \qquad (2)$$

면내 변위에서는 Fig. 1(b)와 같은 변위가 형성되어 광원의 입사각과 반사각을 동일하게 유지시킨다면 식 (3)과 같은 프린지 수와 변위의 관계가 성립된다[7].

$$d = \frac{f\lambda}{2\sin\alpha} \qquad (3)$$

또한 식 (2), (3)과 같이 변위와 프린지 수와의 선형적 관계를 보다 정량적으로 분석하기 위하여 위상 천이법 (phase shift method)을 도입하여 모니터 상의 프린지의 방사 강도를 총 256 개의 정량적인 phase 로 분석하여 각 방사 강도에 따른 위상의 변화 값을 상호 대응시켰다. 연속적인 방사 강도로 유도한 식으로부터 미지수를 4 번의 인위적인 위상변위에 대한 방사 강도로부터 결정하였다(4 단계 위상 천이법)[8]. 또한 다양한 크기의 시스템의 미소변형 평가에 적용하기 위하여 원거리 렌즈 (×10)와 초점거리 및 작업거리(working distance) 조절기능을 향상시키기 위해 줌렌즈(×2)를 배열하였다. 그러므로 두 개의 렌즈 배열에 따라 1~20 배의 배율 조절이 가능하며 최적 초점거리 선택이 용이하다.

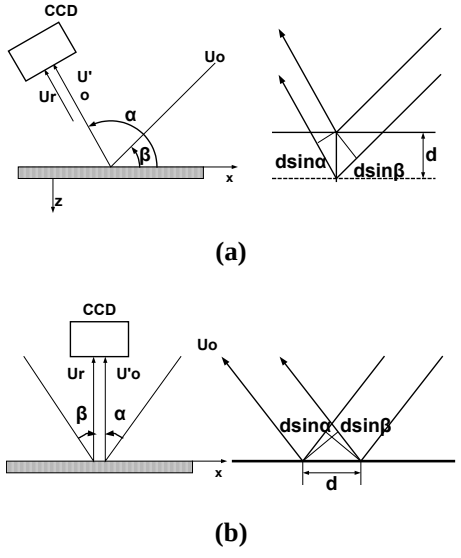


Fig. 1 Schematic diagram of evolving (a) out-of-plane and (b) in-plane displacements.

3. ESPI 를 이용한 잔류 응력장 평가

3.1 ESPI 를 이용한 무 잔류 응력상태 결정

실 시스템의 제작과정이나 구동 중에 탄소성

변형을 일으키면 시스템의 각 요소(element)는 서로 불연속적인 변형을 유발하게 되어 상호 연속성 및 상호 적합성(compatibility)을 유지하지 못하게 만든다. 그러므로 재료 외부에서는 적합성을 유지시켜 주기 위해 가상의 외력이 작용하게 된다. 생성된 외력과 힘 균형을 이루기 위해서 시스템 내부에서는 잔류응력이 유발되게 된다[9].

잔류응력을 이완시키기 위한 방법으로서 총 6개의 응력 성분을 상호 유기적으로 이완시켜줄 수 있는 방법으로는 어닐링을 통한 방법을 많이 사용하고 있다. 어닐링을 통한 잔류응력 이완에 대해서는 많은 연구들이 진행되고 있지만, 완전한 잔류응력의 이완 즉, 무 응력 상태의 평가와 이를 통한 이완된 잔류응력의 정량화에 대한 연구는 전무하다고 할 수 있다.

잔류응력이 존재하는 시스템의 무 잔류 응력 상태를 유발하기위한 열처리 조건의 규명은 다양한 어닐링 온도에 있어서 어닐링 시간에 따른 변위의 평가에 의해 평가될 수 있고, 일정 온도 및 시간에서 더 이상의 변위가 나타나지 않는 조건을 완전 무 응력 상태로 규명할 수 있다고 알려져 있다[10]. ESPI 는 in-situ 열변형을 측정할 수 있는 장치이므로 위와 같은 방법에 적용하기가 적합하다 할 수 있다.

3.2 단일 소재 시스템의 잔류 응력장 모델링

잔류응력이 존재하는 단일 재료로 이루어진 시스템에 있어서 각 요소는 변형된 형태로서 유지되고, 어닐링을 통해 무잔류응력이 유발된 상태에서는 각 요소가 뒤틀어지지 않은 구조를 갖게 된다[9].

어닐링 시 외부에서 가해주는 열은 응력이완을 위한 구동력으로서 작용하게 되며 잔류 응력에 의해 뒤틀어진 요소를 무응력 상태의 요소형태로 변화시켜준다. 그리고 이완된 응력으로부터 초기 잔류응력을 평가할 수 있다(식 (4)).

$$\sigma^r = -\sigma^{rel} \tag{4}$$

어닐링 시에 나타나는 열변형을 ESPI 로 평가함으로서 응력 이완시의 변형률을 측정할 수 있고 탄성론 및 식 (4)를 이용하여 표면 잔류 응력장을 평가 할 수 있다(식 (5)).

$$\begin{aligned} \sigma^r_{xx} &= -\frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon^m_{xx} + \nu\varepsilon^m_{yy}\right) \\ \sigma^r_{yy} &= -\frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon^m_{yy} + \nu\varepsilon^m_{xx}\right) \\ \tau^r_{xy} &= -G\gamma^m_{xy} \end{aligned} \tag{5}$$

3.3 박막의 잔류응력장 평가

박막의 제조 및 구동 시에 잔류응력의 유발은 미세 조직적인 영향에 의해 발생하기도 하지만 주로 박막과 기판의 열팽창 계수의 차이로부터 발생한다. 전단 잔류응력을 무시하기 위해 박막 두께 방향에서의 응력 분포는 균일하다고 가정하였다. 그리고 잔류응력 유발을 위한 변형률과 잔류응력의 관계는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon^r_{xx} &= \frac{1}{E}\left(\sigma^r_{xx} - \nu\sigma^r_{yy}\right) = -\Delta\alpha\Delta T_d + \varepsilon^{r*}_{xx} \\ \varepsilon^r_{yy} &= \frac{1}{E}\left(\sigma^r_{yy} - \nu\sigma^r_{xx}\right) = -\Delta\alpha\Delta T_d + \varepsilon^{r*}_{yy} \end{aligned} \tag{6}$$

구동중인 시스템의 잔류응력을 평가하기 위해서는 열화 시 나타나는 제작 조건 및 구동 조건을 알아야 하나, 실제로 주어진 시스템의 공정 및 열화 조건을 규명하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 잔류응력 생성 조건을 모르는 상태에서 잔류응력장을 평가하는 모델을 제시한다.

박막과 같이 이종 접합부를 가지고 있는 시스템은 단일 소재로 이루어진 시스템의 어닐링 과정과 다른 양상이 나타난다. 일정한 어닐링 온도와 시간에서 변형률의 포화점이 나타나는 것은 초기 잔류응력과 함께 열변형을 통한 열응력이 이완되는 상태로서 해석될 수 있을 것이다. 즉 포화 변형률 형성 조건에서 ESPI 에 의해 측정된 변형률은 박막과 기판의 열팽창 계수의 차이로부터 나타나는 생성된 열응력이 이완됨에 의해 형성된 변형률과 기존에 박막상에 존재하고 있던 잔류응력이 이완됨에 따라 형성된 변형률의 합으로서 나타낼 수 있을 것이다(식 (7), Fig. 2).

$$\begin{aligned} \varepsilon^m &= -\varepsilon^r - \varepsilon^a \\ &= \Delta\alpha\Delta T_d - \varepsilon^{r*} + \Delta\alpha\Delta T_a \end{aligned} \tag{7}$$

식 (6)과 (7)을 조합함으로써 최종적으로 박막에서의 표면 잔류응력을 식 (8)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma^r_{xx} &= -\frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon^m_{xx} + \nu\varepsilon^m_{yy}\right) + \frac{E}{1-\nu}\Delta\alpha\Delta T_a \\ \sigma^r_{yy} &= -\frac{E}{1-\nu^2}\left(\varepsilon^m_{yy} + \nu\varepsilon^m_{xx}\right) + \frac{E}{1-\nu}\Delta\alpha\Delta T_a \end{aligned} \tag{8}$$

식 (8)에 나타난 바와 같이 박막 제조 및 구동 시의 조건을 알 수 없더라도, 포화 어닐링 조건(온도)과 그 때의 변형률 그리고 박막과 기판의 열팽창 계수로부터 표면 잔류 응력장을 평가할 수 있다. 또한 단일 소재로 이루어진 시스템의 잔류응력장은 식 (8)에서 열팽창 계수차이가 없으므로 식 (5)와 같이 표현 될 수 있고, 이와 같은 두 가지 경우의 일반적인 잔류 응력장은 식 (8)에 의해 대표적으로 표현 될 수 있다.

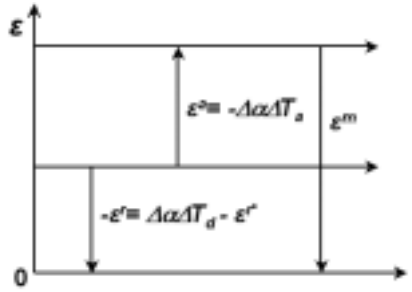


Fig. 2 Schematic diagram of the relationship among the variations of the residual strain, the thermal strain in interface and the strain evaluated by ESPI.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 광학용 진공 열챔버 제작

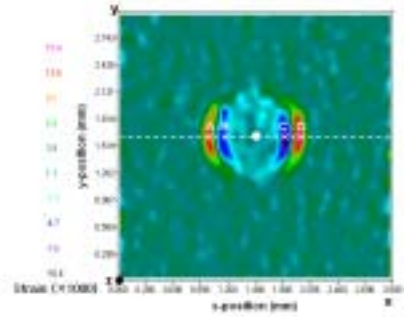
어닐링(annealing) 열처리를 위한 광학용 진공 열챔버를 설계 및 제작하였다. 가열시 공기의 대류로 인한 ESPI 레이저 입사 빔의 왜곡 현상을 막기 위하여 챔버 내부를 진공 상태(약 10^{-3}Torr)로 유지할 수 있도록 하였으며 챔버 외부에서 레이저가 시편에 입사 후 반사될 수 있도록 쿼츠(quartz) 재질의 지름 214 mm 의 광학 창을 설치하였다. 온도 조절은 프로그램 타입의 콘트롤러를 사용하여 ±1℃의 정확도를 가지며, 승온속도, 유지시간 등의 조절이 가능하게 제작하였다.

4.2 압흔 주위의 잔류 응력장 평가

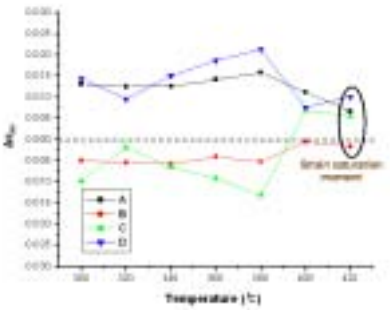
압흔 주위의 잔류응력장 평가를 위하여 Cu 에 400 ㎛ 깊이로 압입 실험을 수행하였으며, ESPI 측정면적은 3×3 ㎟이다. Cu 의 탄성계수와 포아송비는 각각 110GPa 와 0.35 를 이용하였다. 어닐링 유지시간은 시간에 따른 변위 포화 시간의 평가로부터 185 min 로 결정하였으며, 어닐링 온도는 각 변위 포화 시간에서 변형률 구배의 변화량 감소를 조사하기위해 20℃의 차이를 주어 300~420℃에서 실험을 수행하였다. 그리고 각 온도에서의 변형장을 정량적으로 표현하기 위하여 Fig. 3(a)에서와 같이 최대 및 최소 x 방향의 수직 변형률을 나타내는 지점(A,B,C,D)에서의 x 방향 수직 변형률 구배 변화를 측정하였다(Fig. 3(b)). Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 변형률 구배의 변화는 400℃에서 포화되는 양상을 보이고 있으며, 이로부터 400~420℃에서 185min 어닐링시 무잔류응력 상태가 나타남을 알 수 있다.

무잔류응력 상태 유발을 위한 어닐링 시의 변형률 및 식 (5)를 이용하여 Fig. 4 와 같은 잔류응력장이 맵핑되었다. Fig. 4 의 (a)는 표면에서의 x 방향의 수직 잔류응력장을 나타내고 (b)와 (c)는 yz 와 xz 방향의 전단 잔류응력장을 나타낸다.

Fig. 4(b)와 (c)에서 측정된 바와 같이 yz 및 xz 방향의 전단 잔류응력은 압입자와 시편의 접촉 부위에서 절대값이 최고가 나타나고, 수직 잔류응력은 –1.7GPa~700MPa 정도이며 전단 잔류응력은 –800~600MPa 정도임을 알 수 있다. 압축 수직 잔류응력이 크게 평가된 것은 압입 시 생성된 pile-up 부분에서의 고온 크립에 의해 변형률이 과대평가되어 나타난 현상으로 분석된다.

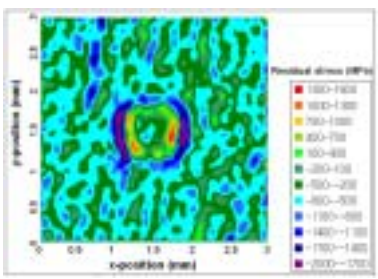


(a)

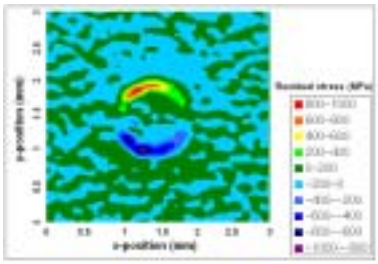


(b)

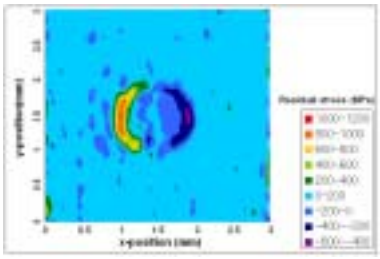
Fig. 3 (a) 4 arbitrary points (A, B, C and D indicating max. and min. normal strains) on the map of x-dir. normal strains at 300℃ and (b) the variations in the strain changes in annealing at the 4 arbitrary points in indented Cu.



(a)



(b)



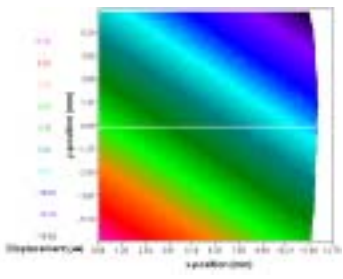
(c)

Fig. 4 The maps of (a) normal residual stress field in x direction and surface shear residual stress fields in (b) y-z and (c) x-z directions of indented Cu.

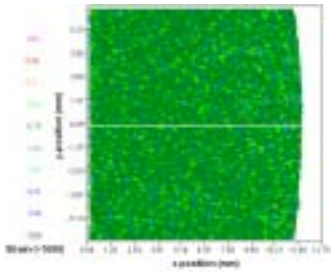
4.2 Au 박막의 표면 잔류 응력장 평가

500 ㎛ Si 기판에 0.1 ㎛ Cr 완충막을 입힌 후 0.5 ㎛ Au 박막을 증착하였다. 어닐링 시간은 변위 포화 시간의 평가로부터 170min 로 결정하였으며 어닐링 온도는 50℃ 간격을 두고 250℃ ~400℃로 열처리 하였다. 측정면적은 12.75×12.75mm^2 이며, Au 와 Si 의 탄성계수는 각각 74 와 107GPa 이고 Au 의 포아송비는 0.44 이다. Au 와 Si 의 열팽창 계수는 각각 13.8×10^{-6}/℃와 2.6×10^{-6}/℃ 이다.

400℃에서 170min 동안 어닐링하였을 때 x 방향의 변위장과 수직 변형률을 Fig. 5 에 나타내었고, y=0 에서의 변위와 변형률의 분포를 Fig. 6(a)와 (b)에 나타내었다. 변위 포화점은 400℃, 170 min 에서 나타남을 확인할 수 있고 이 때가 무잔류응력 상태의 도출을 위한 어닐링 조건이 된다.

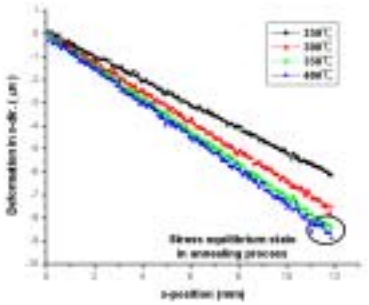


(a)

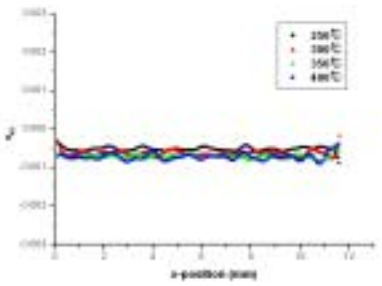


(b)

Fig. 5 (a) The displacement and (b) the normal strain maps in x-direction at 400℃ annealing.



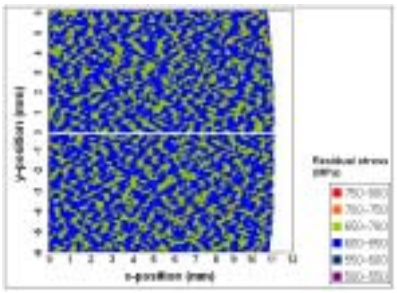
(a)



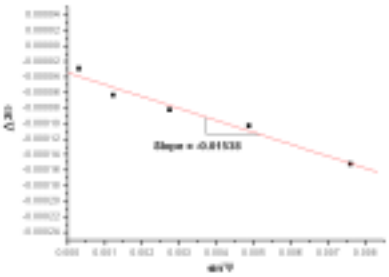
(b)

Fig. 6 The variations of (a) the deformation and (b) the normal strain profiles in x-direction on y=0 line at each annealing temperature.

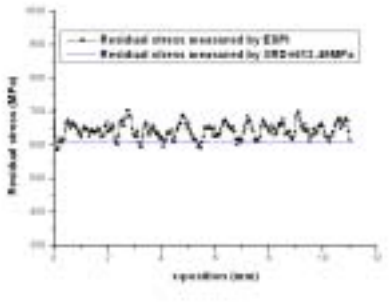
각각의 무잔류응력 상태 도출을 위한 어닐링 온도와 함께 열 변형률, 열팽창 계수의 차이로부터 식 (8)을 이용하여 x 방향의 수직 잔류응력을 맵핑하였다(Fig. 7(a)). 결과로부터 증착된 Au 박막의 잔류응력은 균일한 분포를 이루고 있으며, 500~800MPa 의 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 위의 결과를 검증하기 위하여 x-ray diffractometer(XRD)를 이용한 잔류응력 평가 실험을 수행하였고(Fig. 7(b)), 612.49MPa 의 잔류응력을 평가할 수 있었다. 이로부터 ESPI 의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다(Fig. 7(c)).



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 (a) The normal residual stress field in x-direction, (b) the relationship of variation of 2θ and $sin^2\Psi$ in XRD test and (c) the residual stress profile on y=0 line of 0.5 ㎛ Au film .

5. 결 론

분해능 향상을 위해 위상 천이법을 이용한 ESPI 와 함께 광학용 진공 열챔버를 이용하여 열변형장을 측정하였으며, 정량적인 무잔류 응력상태의 정량화 이로부터 얻은 결과를 이용하여 단일소재 및 박막소재로 이루어진 시스템의 표면 잔류 응력장 평가를 위한 모델링을 수행하였다.

압입된 Cu 와 Au 박막에서의 잔류 응력장을 각각 평가하였다. 압입 후 압입자와의 접촉영역에서는 인장 잔류 응력이 pile-up 이 형성된 부분에서는 압축 잔류 응력이 형성됨을 알 수 있었고, Au 박막의 표면에서는 균일한 인장 잔류 응력이 형성됨을 알 수 있었다. 또한 ESPI 를 이용한 잔류응력 측정 결과는 XRD 를 이용한 결과와 매우 잘 일치함을 검증하였다.

광학적 비파괴법을 이용한 표면 잔류 응력장의 매핑 결과는 잔류응력 분포의 분석과 함께 열화 집중부 결정 및 잔류수명 결정에 이용될 수 있다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 주관 『고기능 초미세 광·열유체 마이크로부품 기술 개발』 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) D. V. Nelson and A. Makino, The holographic- hole drilling method for residual stress determination, *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 27, 1997, pp. 3-23.

(2) Ignacio H. Lira, Cristiān Vial and Kimberly Robinson, The ESPI measurement of the residual stress distribution in chemically etched cold-rolled metallic sheets, *Measurement of Science Technology*, Vol. 8, 1997, pp. 1250-1257.

(3) Bernd Kämpfe, Investigation of residual stresses in microsystems using X-ray diffraction, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 288, No. 2, 2000, pp. 119-125.

(4) G. A. Webster and R. C. Wimpory, Non- destructive measurement of residual stress by neutron diffraction, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 117, No. 3, 2001, pp. 395-399.

(5) J. Gauthier, T. W. Krause and D. L. Atherton, Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique, *NDT & E International*, Vol. 31, No. 1, 1998, pp. 23-31.

(6) S. Fricke, E. Keim and J. Schmidt, Numerical weld modeling - a method for calculating weld- induced residual stresses, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 206, No. 2-3, 2001, pp. 139-150.

(7) Gary L. Cloud, Opical methods of engineering analysis, *Cambridge University Press*, 1995, pp. 453-491.

(8) K. Creath, Phase shifting speckle interferometry, *Applied Optics*, Vol. 24, 1985, pp. 3053-3058.

(9) S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, Theory of elasticity (3rd-ed), *McGraw-Hill International Editions*, 1970, pp. 433-484.

(10) T. Fuchiyama and N. Noda, Analysis of thermal stress in a plate of fuctionally gradient material, *JSAE Review*, Vol.16, 1995, pp. 263-268.