

자유지지 박막의 기계적 물성 측정을 위한 띠굽힘시험기의 개발 및 검증

박정민[†] · 김재현^{*} · 이학주^{*}

Development and validation of strip bending tester
for measuring mechanical properties of freestanding thin films

Jungmin Park, Jae-Hyun Kim and Hak-Joo Lee

Key Words : Freestanding thin film(자유지지 박막), Strip bending test(띠굽힘시험), Measurement of strain(변형률 측정)

Abstract

Strip bending test has been frequently utilized to measure the mechanical properties of freestanding thin films in substitute for the micro-tensile test. However, in spite of its simplicity and reliability, strip bending test has a few problems, for example, the measurement of strain and the calculation of stress at zero strain. In this study, these problems are precisely reviewed and proved. Upon this review, strip bending tester has been developed, which uses the confocal laser displacement meter to measure the deformed configuration of the specimen and the possibility and limitation of this testing system is carefully investigated including the estimation of uncertainty of the measurement of strain. Finally, to prevent errors and to improve the accuracy of this testing system, the shape of the specimen has been carefully studied and is proposed.

기호설명

F	: 하중
δ	: 변위
B	: 시험편 폭
h	: 시험편 두께
L	: 시험편 길이
θ	: 시험편 변형각도 ($\arctan(\delta/L)$)
ε	: 변형률
σ	: 응력
E	: 소재 탄성계수
l	: 시험편 표점거리
a	: 표점거리의 수평 성분

b	: 표점거리의 수직 성분
Δa	: 수평방향 측정 불확도
Δb	: 수직방향 측정 불확도
$\Delta \varepsilon$: 변형률 측정 불확도
0	: 초기상태 (아래첨자)

1. 서론

자유지지 박막(free-standing thin films)의 기계적 물성 평가는 MEMS 구조물의 설계뿐 아니라 제작 공정의 이해를 위해서 반드시 필요하다. 최근까지 소재의 기계적 물성을 평가하기 위하여 미소인장 시험(micro-tensile test)을 통해 인장물성(탄성계수, 항복응력, 파단강도 등)을 직접적으로 평가하는 방법이 널리 사용되고 있으나 이 방법은 자유지지 박막(free-standing thin films)의 특성상 수 마이크로 미터(μm)에서 수백 나노미터(nm)로 매우 얇은 시

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원, 나노기계연구본부
E-mail : wordblue@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7273 FAX : (042)868-7884

* 한국기계연구원, 나노기계연구본부

험편의 조작 및 정렬, 부착, 하중과 그에 따른 변위의 측정 등 까다로운 단점이 있어 간접적인 방법으로 물성을 평가하는 방법들이 고안되어 사용되고 있다.⁽¹⁾ 그 중, 띠굽힘시험은 시험편에 균일한 인장응력이 유도되어 미세인장시험과 유사한 상태가 되며, 미소인장시험에 비해 시험편의 조작이 간편하면서 안정적으로 데이터를 획득할 수 있는 장점이 있어 박막의 물성 측정 등에 다양하게 활용되고 있다.^(2~5) 그러나 띠굽힘시험은 소재의 인장물성을 간접적으로 측정하므로, 단순모델식을 적용하여 소재의 응력과 변형률을 계산하기 때문에 몇 가지 오차 요인을 가지고 있다. 시험편의 정렬 문제는 띠굽힘시험의 중요한 오차 요인으로 지적되어 왔고 박 등⁽⁶⁾은 압자와 시험편이 각 방향에 대해 5°이하의 범위에서 정렬이 맞춰질 경우 물성의 오차는 4% 미만임을 유한요소해석을 통해 설명하였다.

본 연구에서는 시험편 정렬 이외의 띠굽힘시험의 문제점을 검토하고 이를 개선할 수 있는 방법을 제안하며, 실제 띠굽힘시험기를 구성하여 도출된 문제점의 개선 가능성을 확인하고자 한다.

2. 띠굽힘시험의 문제점

2.1 띠굽힘시험 개요

띠굽힘시험은 자유지지 박막의 기계적 물성을 비교적 적은 노력으로 정확하게 측정할 수 있는 유용한 방법이지만, 몇 가지 가정을 전제로 하여 하중과 그에 따른 변위 관계를 해석하기 때문에 시험 데이터의 분석 시 주의가 필요하다.

Fig. 1은 측면에서 본 띠굽힘시험의 개략도이다. 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 자유지지 박막 형태의 시험편의 자유지지 영역의 길이는 $2L$ 이며, 그 중앙에서 압자(indenter)에 의한 하중 부하가 이루어진다. 시험편의 형상 및 하중의 대칭성 때문에 띠굽힘시험편의 시험편 길이는 자유지지 영역의 길이의 반인 L 로 표시된다. 시험편에는 굽힘모멘트가 작용하지 않으므로 인장시험에서와 같은 균일한 인장응력이 유도될 수 있다. 따라서 띠굽힘시험으로 측정된 하중과 압자의 변위 또는 시험편의 변형각도로부터 시험편의 변형률과 응력은 식(1, 2)의 단순모델식으로 구해질 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{L^2 + \delta^2}}{L} - 1 = \frac{1}{\cos \theta} - 1 \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F}{2Bh \sin \theta}, \text{ when } \theta > 0 \quad (2)$$

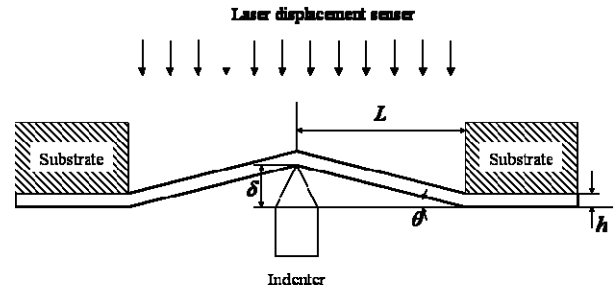


Fig. 1 Schematic diagram of strip bending test

2.2 변형률 측정

띠굽힘시험에 관한 이전 연구는 변형률을 계산하기 위하여 시험편의 길이(L)의 변화를 직접 측정하지 않는다.^(2~4) 길이에 비해 두께가 얇은 띠굽힘시험편은 굽힘모멘트를 지지하지 않으므로 변형되면서 Fig. 1과 같이 삼각형을 이룬다. 따라서, 간접계 등을 사용하여 시험편 전체의 높이 변화를 측정하고 이를 변형각도(θ)로 환산한 후 변형률을 계산한다. 그러나 변형각도로부터 변형률을 계산하는 방법은 시험편에 균일한 인장응력이 유도되어 시험편 전체가 균일하게 변형되는 것을 가정한 것으로 소성변형에 의한 네킹(Necking) 등의 원인으로 일정 영역에 변형이 집중되면 위의 가정에 위배된다. 또한 Espinosa 등⁽²⁾과 같이 시험편의 중앙 및 자유지지 영역 끝단에 파단 방지를 위하여 곡률형태로 폭을 넓게 만들어 준 경우에는 시험편의 중앙에 변형이 국한되므로, 변형각도에 의한 변형률 계산에서 오차가 발생하게 되며, 이는 측정된 탄성계수에 수 십 퍼센트(%)의 오차를 유발할 수 있다.⁽⁶⁾

2.3 초기응력의 계산 오류

시험편에 하중이 가해지지 않은 경우를 가정해 보면, 즉, $\theta = 0$ 인 경우, 식(2)의 응력은 정의할 수 없다. 띠굽힘시험의 가정에 의해 시험편에는 균일한 인장응력이 유도되어야 하나 시험 초기에는 굽힘모멘트가 작용하게 되므로 시험편의 초기 변형은, 즉, $\theta \rightarrow 0$ 일 때, 양단지지 보(Beam)와 같은 거동을 한다고 가정할 수 있다. 이 가정으로부터 무부하 상태의 극한값을 계산해보면 식(3)과 같다.

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \sigma = E \left(\frac{h}{L} \right)^2 \quad (3)$$

즉, 무부하 상태의 응력을 계산하면 소재의 탄성계수와 시험편 두께 및 길이로 나타낼 수 있으며, 항상 0이 아니다. 따라서 이 값을 고려하지

얇은 상태에서 잔류응력(Residual stress)을 평가하는 오류를 범할 수 있으므로 세심한 주의가 필요하다. 식(3)에서 시험편의 세장비(시험편의 길이에 대한 두께의 비, h/L)를 작게 하면 계산상의 오류를 줄일 수 있으므로 시험편 설계 시 참고할 수 있을 것이다.

3. 띠급힘시험기 구성

본 연구에서는 Fig. 2 와 같이 띠급힘 전용시험기를 제작하였다. 띠급힘시험은 시험편의 정렬 상태에 따라 측정된 물성에 수 퍼센트의 오차가 발생할 수 있으므로⁽⁶⁾ 제작된 시험기는 시험편의 정렬을 정교하게 제어할 수 있는 5 자유도의 스테이지에 시험편을 장착할 수 있도록 설계하였다. 그리고 미소하중 측정을 위한 로드셀은 미소구동기(최소 변위 50 nm)에 장착되어 있으며, 시험편에 선하중을 부하할 수 있도록 로드셀의 끝단에 곡률 반경 1 μm 의 다이아몬드 압자를 제작하여 설치하였다.

시험편의 변형형상은 공초점방식 레이저변위계(KEYENCE, LT-9000)를 사용하여 측정하였다. 간섭계를 사용하여 시험편의 변형을 측정한 연구들과 비교할 때, 본 연구에서 사용한 레이저 변위계는 수직방향 분해능이 10 nm, 수평방향의 분해능은 2 μm 로 상대적으로 수평방향 분해능이 낮으나, 수직방향의 높이가 차는 비교적 정밀한 측정이 가능하다. 또한 시험편 전체를 스캐닝(scanning)하는 방식임에도 불구하고 측정속도가 수 초 이내로 빠른 장점이 있다.

변위계의 특성상 시험편 전체를 스캐닝하기 위하여 소요되는 시간이 0.5 에서 수 초(s)이므로 이 시간 동안 미소구동기가 정지되면 변위계는 시험편의 길이 방향으로 높이를 측정한다. 측정이 끝나면 다시 미소구동기가 압자를 이송하여 다음 측정 시간까지 작동하는데 이러한 과정을 반복하여 파단 시까지 실험을 진행한다.

시험편의 변형형상을 측정하기 위해 소요되는 시간을 스캔시간으로 정의할 때, 하중-변위 관계를 도시하면 Fig. 3 과 같다. 그림은 스캔시간이 약 4 초인 경우로 소성 변형이 발생한 이후에는 구동기가 정지해 있는 동안 하중이 떨어지는 현상이 발생한다. 이러한 현상은 소재의 항복응력 및 파단 강도의 측정에 직접적으로 영향을 미치므로 스캔 시간을 짧게 할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 현상을 고려하여 스캔시간을 2 초 이내로 제한하였다.

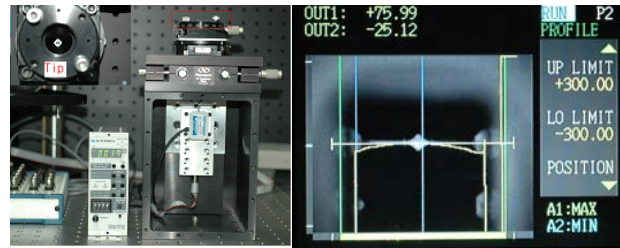


Fig. 2 Configuration of tester and specimen

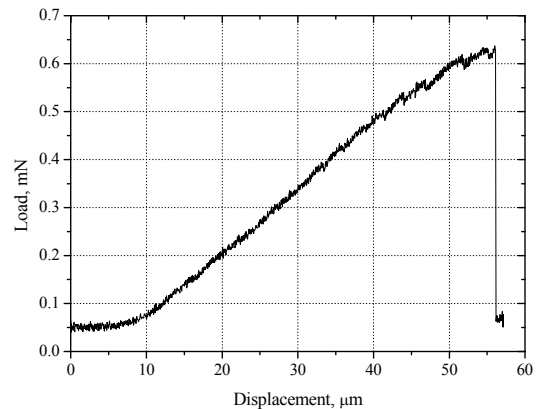


Fig. 3 Effect of the scan time on load (scan time : 4 s)

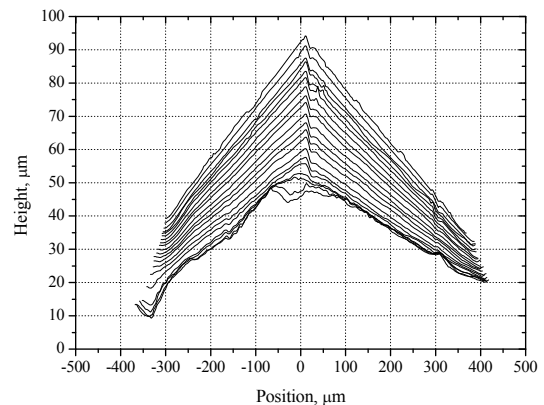


Fig. 4 Deformation of specimen during test

4. 측정 결과

금(Gold) 박막 시험편의 변형형상을 측정한 결과는 Fig. 4 와 같다. 시험편의 자유지지 영역 전체를 측정하였지만 레이저의 반사문제로 인해 시험편의 끝단은 측정되지 않았다. 그림과 같이 시험이 시작되기 전 시험편은 이미 약 6° 변형되어 있고 압자가 시험편과 접촉된 후에도 시험편이 완전히 퍼지지 않았으며 어느 정도 이상 변형되어야

삼각형 형태를 이루는 것을 볼 수 있다.

압자의 이송량을 시험편의 변위(δ)로 간주하고 변형률을 계산할 경우, 그림에서와 같은 시험편의 초기 변형은 인지할 수 없게 되어 시험편의 초기 변형각도는 어떠한 경우에도 0 이 되지만, 실제의 경우 6°의 변형이 발생한 상태이므로 응력 및 변형률 계산시 차이가 발생할 것이다.

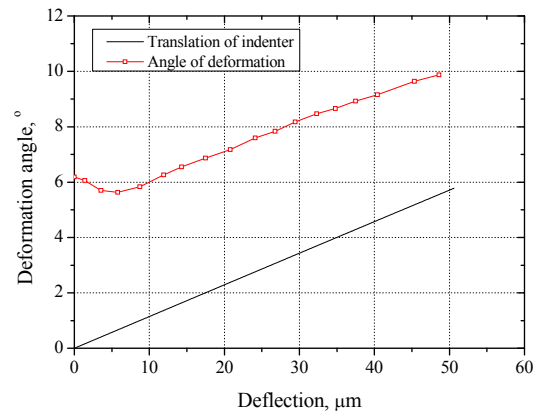
측정된 변형형상을 토대로 변형각도를 계산하면 Fig. 5 (a)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 압자의 이송량을 변위로 보고 그 값으로부터 변형각도를 계산한 결과와 시험편 변형형상으로 변형각도를 계산한 결과를 비교하면 초기 변형각도 만큼의 차이를 보이고 있음을 알 수 있으며 이 차이는 응력-변형률 관계를 나타낸 Fig. 5 (b)와 같은 차이를 유발한다. Fig. 5 (a)에서 변형각도가 일시적으로 감소하는 것은 시험편의 초기 변형상태에서 완전히 퍼지기 전까지는 시험편이 완전한 삼각형 형태를 이루지 못하므로 변형각도에 편차가 발생하는데 이는 변형률이 음에서 양으로 변화하는 현상으로 해석될 수 있으나 이는 잘못된 해석이다. 따라서 이러한 오류를 방지하기 위해서는 시험 시작 시점에 대한 정의를 압자가 시험편에 접촉되는 순간이 아닌 시험편이 완전히 퍼진 상태로 변경할 필요가 있다. 시험편의 초기 변형을 고려하여 그 때의 변형각도를 θ_0 라고 하면, 식(1)은 다음과 같이 수정된다.

$$\varepsilon = \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} - 1 \quad (4)$$

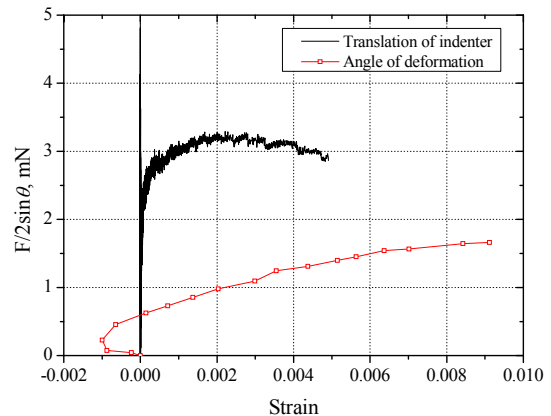
압자 이송량에 초기 변형각도의 영향을 추가하고 식(4)를 통해 각 각의 응력과 변형률을 다시 계산하면 응력-변형률 관계는 Fig. 5 (c)와 같게 된다. 그림에서 보여지는 차이는 압자 이송량과 변위계의 측정결과의 편차에 기인한 것으로 이 결과는 압자 이송량을 토대로 변형각도를 계산할 경우 오차가 발생할 수 있음을 의미한다.

5. 변형률 측정 방법의 개선

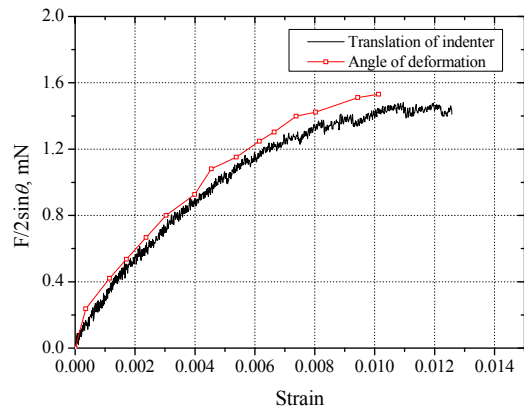
앞 장의 측정결과는 변형각도를 측정하는 기준의 연구결과와 동일한 방법으로 변형률을 계산한 것으로 이는 띠굽힘시험의 문제점으로 설명한 바와 같이 변형률 계산에 있어 오차가 발생할 가능성이 있다. 이러한 오차를 방지하기 위해 미소인장시험에서와 같이 시험편내의 표점거리의 길이 변화를 측정하고 이를 통해 변형률을 계산하는 방법을 생각할 수 있다.



(a) Deformation angle and its difference due to the initial deformation

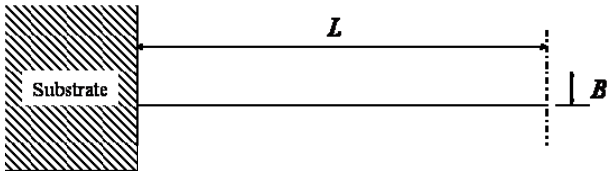


(b) Stress-strain relation without consideration of the initial deformation

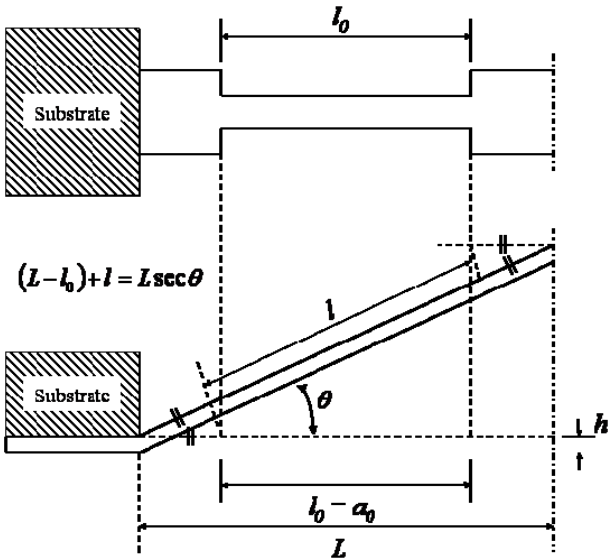


(c) Stress-strain relation considering the initial deformation

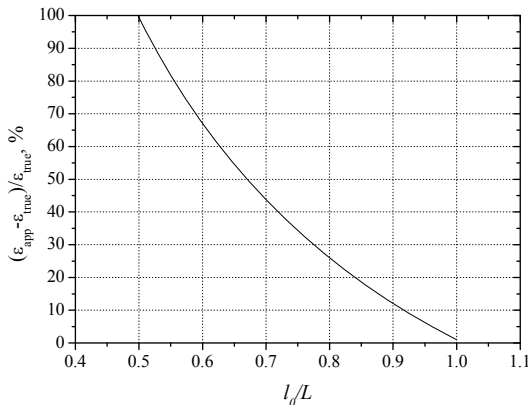
Fig. 5 Comparisons of test results between different methods of deflection measuring



(a) Straight type specimen (top view)



(b) Ideal model for tapered type specimen and its strain measure

Fig. 6 Schematics of deformed configuration of specimen**Fig. 7** Difference between real and approximated strain

5.1 수평방향 변위의 영향도

시험편의 변형형상을 측정하기 위해 사용한 공초점 레이저변위계의 수평방향 분해능은 최소 2

μm 이다. 이는 수직방향 분해능 10 nm 와 비교할 때 매우 큰 값으로 변형률 측정의 불확도는 수평방향 분해능에 좌우됨을 의미한다. 그러나 시험편 전체에서 변형이 동일하게 발생하는 이상적인 경우 수평방향의 변형량은 0 이 되어 수평방향 분해능의 영향이 무시될 수 있을 것이다.

Fig. 6 (a) 와 같이 직선형 시험편은 시험편에 균일한 변형이 발생하므로 식(1)에 의한 변형률 계산이 가능하다. 그러나 이 경우 압자에 의해 하중이 인가되는 자유지지 영역의 중앙부와 웨이퍼에 의해 고정되는 자유지지 영역의 끝단에서 파손될 가능성이 높다. 결국, 이 곳을 보강한 시험편을 사용하는 것이 바람직하지만 이 경우 측정된 결과에 수 십 퍼센트의 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 곡률형 시험편을 사용할 경우 표점거리를 정하여 이 거리의 변화를 직접 측정할 필요가 있다.

문제를 간단하게 하기 위하여 곡률형 시험편의 이상적인 경우를 가정하면 Fig. 6 (b) 같이 자유지지 영역의 중앙부와 끝단을 보강하고 폭이 얇은 영역 전체를 표점거리로 한 시험편을 생각할 수 있다. 변형은 시험편의 표점거리 내에서만 발생할 것이므로 변형각도에 따른 길이의 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$l = L \cdot (\sec \theta - 1) + l_0 \quad (5)$$

이 때, 시험편의 실제변형률은 식(6)과 같다.

$$\varepsilon_{true} = \frac{l}{l_0} - 1 = \frac{L}{l_0} (\sec \theta - 1) \quad (6)$$

만일, 변위계의 수평방향 분해능을 무시하기 위해 시험편 표점거리 내의 높이 변화만을 고려하고 수평방향의 변위를 무시하여 $a = a_0 = l_0$ 라 가정하고 이 변형률을 가상변형률(ε_{app})이라하면, 식(7)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{app} &= \frac{l_{app}}{l_0} - 1 = \frac{\sqrt{a_0^2 + b^2}}{a_0} - 1 \\ &= \sqrt{1 + \left(\frac{L}{l_0} (\tan \theta - \sin \theta) + \sin \theta \right)^2} - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

두 변형률의 편차를 비교하면 $((\varepsilon_{app} - \varepsilon_{true}) / \varepsilon_{true})$, Fig. 7 과 같이 시험편 길이에 대한 표점거리의 비 (l_0/L)가 1 에 가까워질수록, 즉 직선형 시험편에 가까워 질수록 그 차이가 작아지는 것을 알 수 있다. 이 결과는 직선형 시험편은 수평방향의 분해능을 무시할 수 있으며 곡률형 시험편은 표점거리가 작아질수록 수평방향 분해능의 영향이 커짐을 의미한다.

앞서 설명한 바와 같이 직선형 시험편은 자유지지 영역의 중앙부 또는 끝단에서 파손될 가능성이

있으므로 이 부분을 보강한 곡률형 시험편을 제작하게 된다. 이 때 시험편 길이에 대한 표점거리의 비를 0.95 이상이 되도록 시험편을 설계하면 실제 변형률에 대한 가상변형률의 편차는 약 5%가 된다. 또한 식(6, 7) 및 Fig. 6 (c)는 곡률형 시험편 중 이상적인 경우를 가정한 것으로 실제 편차는 Fig. 7의 결과보다 작을 것이다.

5.2 변형률 측정 불확도 예측

변형률 측정에 있어, 변위계의 각 방향 분해능의 영향을 보기 위하여 수식(1)을 다시 쓰면 수식(8)과 같이 표점거리의 수평(a), 수직(b)성분으로 정리할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0} - 1 = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\sqrt{a_0^2 + b_0^2}} - 1 \quad (8)$$

변형률 측정 불확도는 수직, 수평방향의 불확도로부터 식(9)와 같이 표현되며,

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon &= \frac{1}{2}(a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (a_0^2 + b_0^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot 2a \cdot \Delta a \\ &+ \frac{1}{2}(a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (a_0^2 + b_0^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot 2b \cdot \Delta b \\ &= \frac{1}{l \cdot l_0} (a \cdot \Delta a + b \cdot \Delta b) \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)는 다시 식(10)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{(l-l_0)} (\Delta a \cos \theta + \Delta b \sin \theta) \quad (10)$$

시험편은 Fig. 6 (b)와 같다고 가정하고 식(5)를 대입하면 식(10)은 아래와 같이 정리된다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{L \sec \theta - 1} (\Delta a \cos \theta + \Delta b \sin \theta) \quad (11)$$

본 연구에서 사용한 금 박막의 경우 시험편의 길이 500 μm , 폭 20 μm , 두께 0.5 μm 일 때, 시험편은 파손시까지 약 10° 변형된다. 이처럼 띠굽힘 시험에서 변형각도는 작으므로 식(10)에서 변위계의 수평방향 분해능의 영향은 수직방향과 비교할 때 상대적으로 더 커지게 되며 이는 간섭계와 같은 측정장비에서도 동일하게 적용된다.

위와 동일한 형태의 시험편일 경우 식(11)로부터 변형률 측정 불확도를 계산해보면 약 26%로 측정 결과를 신뢰할 수 없다고 판단할 수 있다. 그러나 앞 절에서와 같이 변위계의 수평방향 분해능을 무시할 수 있도록 시험편을 설계하면 이 때의 변형률 측정 불확도는 0.025%가 된다.

따라서, 시험편의 길이에 대한 표점거리의 비를 0.95 이상이 되도록 설계한다면 띠굽힘시험을 통해 소재의 인장물성을 약 5%의 오차에서 비교적

정확하게 측정할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구를 통해 띠굽힘시험은 변형률의 측정 및 시험초기의 응력계산에 있어 단순모델식을 적용할 경우 오차가 발생할 수 있으며 이러한 계산 오차는 시험편의 길이에 대한 두께의 비를 작게 함으로써 줄일 수 있다.

그리고 공초점 레이저변위계를 적용하여 시험편의 변형형상을 빠른 시간내에 측정하고 변형각도를 계산한 후 응력-변형률 관계를 확인할 수 있는 시험장비를 제작하였고, 변형률 계산 방식에 따른 결과의 차이를 살펴본 결과 압자의 이송량을 기준으로 변형률을 계산하는 방식은 시험편의 초기 변형을 고려할 수 없기 때문에 바람직하지 않음을 확인하였다.

그러나 직선형 시험편이 아닌 경우 변형각도를 측정하는 방식 또한 변형률 측정 오차를 유발할 가능성이 있으므로 시험편에 표점거리를 표시할 것을 제안하였고, 이 경우 이론적으로 시험편 설계에 따라 변형률의 측정 불확도 5% 정도의 비교적 정확한 측정이 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발 사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업단의 지원 (08-K1401-00610)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Sharpe, W. N., 2001, "The MEMS Handbook," CRC Press, 3-1 to 3-33.
- (2) Espinosa, H. D. and Prorok, B. C., 2003, "A methodology for determining mechanical properties of freestanding thin films and MEMS materials," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 51(1), pp. 47-67.
- (3) Peng, B., Pugno, N. and Espinosa, H. D., 2006, "An analysis of the membrane deflection experiment used in the investigation of mechanical properties of freestanding submicron thin films," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 3292-3305.
- (4) Kim, D. I., Huh, Y. -H., Kim, D. J., Lee, Y. H. and Kee, C. D., 2007, "Measurement of mechanical properties of film material using out-of-plane micro-

- ESPI technique,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 187-188, pp. 232-235.
- (5) Zhang, T. -Y., Su, Y. -J., Qian, C. -F., Zhao, M. -H. and Chen, L. -Q., 2007, “Microbridge Testing of Silicon Nitride Thin Films Deposited on Silicon Wafers,” *Acta Materialia*, Vol. 48, pp. 2843-2857.
- (6) Park, J. M., Kim, J. H. and Lee, H. J., 2007, “A study on error sources of strip bending test using finite element analysis,” *Proceedings of KSPE 2007 Autumn Conference*.
- (7) Park, J. M., Kim, J. H. and Lee, H. J., 2008, “Error analysis and design improvement of freestanding MEMS structures for mechanical characterization,” *Proceedings of The 10th Korean MEMS Conferences*.