

Micro Bulge 실험을 통한 박막의 기계적 물성 평가 및 해석 Mechanical Properties Measurement of Thin Films by Micro Bulge Testing

*이헌기¹, #한준수², 박현철³

*H. K. Lee¹(qq9481@postech.ac.kr) #J. S. Han²(hanpd78@lge.co.kr), H.C. Park³(hcpark@postech.ac.kr)

¹ 포항공과대학교 기계공학과, ² LG전자, ³ 포항공과대학교 기계공학과

Key words : Thin Films, Bulge test, Biaxial stress

1. 서론

MEMS/NEMS 기술이 발달하면서, 구조물의 안정성 평가를 위해 기계적 물성측정이 중요시되고 있다. 또한 미세구조물의 피로 및 파괴에 중요한 영향을 미치는 잔류응력의 평가는 박막 연구에 있어서 그 중요성이 점차 증가하고 있는 실정이다. 기계적 물성치와 더불어 잔류응력의 평가를 위한 여러 가지 실험방법 중, 벌지 실험은 모재의 영향을 피하면서 박막의 물성을 직접 얻을 수 있는 방법이다. 벌지 실험은 외적 지지구조를 가지지 않는 박막(free standing) 시편을 이용하여 물성을 측정하는 방법으로 그 정확성과 신뢰성에 대한 연구는 오래 전부터 계속 진행되어 왔다. 현재는 실리콘 웨이퍼에 나노/마이크로 단위로 증착시킨 금속이나 세라믹 등의 박막의 기계적 거동 및 MEMS 시스템의 신뢰성 확보를 위한 연구로 주로 쓰이고 있다. 이 논문에서는 MEMS 공정을 통하여 정사각형 및 직사각형 형상의 패턴을 낸 실리콘 질화막 박막에 대한 벌지 실험을 수행하였다.

2. 벌지 박막 이론

박막의 기계적인 물성치를 측정하는 벌지 실험에서 가장 중요한 요소 중 하나는 벌지 형상에 대한 해석이다. 벌지 시편의 형상은 크게 구형 박막, 정사각형 박막, 직사각형 박막시편으로 나뉜다. 이 중 구형 박막 모델은 여러 형상들 중에 가장 기본적인 간단한 모델로 Fig. 1에 나타내었다. 박막의 응력은 압력용기에서의 힘 평형을 적용하여 유도된 일반식을 사용하며 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{Pa^2}{4ht} \quad (1)$$

여기서 P는 박막에 가하는 압력, σ 는 박막의 응력, t는 박막의 두께, R은 bulge 형상의 곡률 반경, a는 박막의 반경을 나타낸다. 한편 변형률(strain)은 처음 호의 길이(original arc length)에 대한 변형된 호의 길이(deformed arc length)의 비로 정의할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{2h^2}{3a^2} \quad (2)$$

식 (1), (2)로부터 응력과 변형률간의 관계를 유도할 수 있다. 또한 외적 지지구조를 갖지 않는 박막은 반경 방향과 원주 방향에서 응력상태가 동일하므로 이축탄성계수(Y, Biaxial Modulus)를 적용하여 응력-변형률간의 관계로부터 압력-처짐간의 관계를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P = \frac{8Yt}{3a^4} h^3 \quad \text{where } Y = \frac{E}{1-\nu} \quad (3)$$

하지만 외적 지지구조를 가지지 않는 박막을 증착시키는 과정에서 잔류응력(residual stress)이 발생할 수 있다. 이를 고려하여 잔류응력에 의한 초기의 부풀림(taut)이나 찌그러짐(wrinkle)에 대한 추가항이 필요하다. 따라서 변형률은 부풀림에 의한 변형과 잔류응력에 의한 변형의 합으로 다음과 같이 표현되어진다.

$$\epsilon = \epsilon_{bulge} + \epsilon_o = \frac{2h^2}{3a^2} + \frac{\sigma_o}{Y} \quad (4)$$

잔류응력을 고려한 변형률을 고려하여 압력-처짐간의 관계를 다시 정리하면 다음과 같은 일반식을 얻을 수 있다.

$$P = C_1 \frac{\sigma_o t}{a^2} h + C_2 (\nu) \frac{Yt}{a^4} h^3 \quad (5)$$

여기서 C_1 은 상수값(constant)이고, C_2 는 푸아송비(Poisson's ratio)에 대한 함수값이다. 식 (5)에서 벌지 실험시 초기 박막의 높이(h_i)에 대한 부정확성을 감안하면 다음과 같은 일반식으로 나타내어진다.

$$P = C_1 \frac{\sigma_o t}{a^2} (h + h_i) + C_2 (\nu) \frac{Yt}{a^4} (h + h_i)^3 \quad (6)$$

반면 정사각형 및 직사각형 박막 모델은 구형 박막 모델과 같이 직접적으로 응력-변형률간의 관계를 유도할 수가 없는 데 이는 변형시 보이는 비선형성 때문이다. 따라서 원형이 아닌 다른 형상에 대한 박막의 변형 해석은 에너지 최소화 방법(energy minimization method)을 통해 해석할 수 있으며 식 (6)과 같은 형태로 나타내어진다.

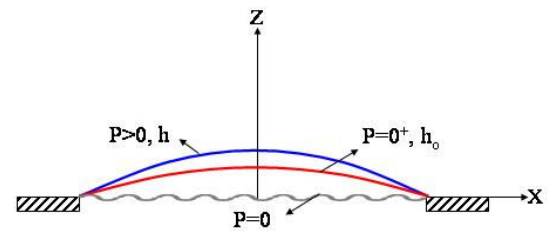


Fig. 1. Schematic of a Spherical Membrane

3. 실험 방법

본 연구에서 수행되는 벌지 실험은 외적지지 구조를 가지지 않는 박막에 압력을 가함으로 인해 유발되는 부풀림의 정도를 측정하여 기계적인 물성치를 얻어내는 방법이다. 시편의 중심에 변위 센서(displacement sensor)를 위치시키고, 함수 발생기(function generator)를 이용하여 시편에 유압을 가함으로써 시편의 변형을 유도하며, 이때 이 변형량을 변위 센서로 측정한다. 이와 동시에 압력 센서(pressure sensor)를 통해 유압의 압력을 얻어낸다. 이렇게 얻은 변위와 압력은 DAQ(data acquisition)에 의해 수집되고 이 데이터를 토대로 곡선적합(curve fitting)을 수행한다. 이때 곡선 적합에 쓰이는 상수는 정사각형 박막의 경우는 Vlassak과 Nix의 해석해를 사용하였으며, 직사각형 박막의 경우에는 Bonnette 등의 해석해를 사용하였다. 각 상수들은 Table 1에 정리하였다.

본 실험에 쓰인 시편은 저압화학기상증착(LPCVD) 방법을 이용한 실리콘 질화막(SiNx) 금속 박막이다. 패턴 형상은 정사각형 및 직사각형 두 가지로 제작되었으며, 패턴 형상이 간단하면서도 높은 해상도를 요구하지 않기 때문에 필름 마스크(film mask)를 선택하였다. 시편의 크기는 정사각형(square)은 5×5 mm, 직사각형(rectangular)은 5×2.5 mm, 두께는 0.5, 0.75, 1.0μm이다. 각각의 시편은 3개씩 제작되었으며, 시편 제작후 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 시편의 실제 두께를 측정하였다. 벌지 실험의 해석에 사용한 시편의 실제 두께는 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Values of the Constants C₁ and C₂

	Square Membrane		Rectangular Membrane (aspect ratio n=2)	
	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂
Vlassak and Nix	3.400	(0.800+0.062v) ⁻¹		
Bonnette et al.			8.720	17.32 - 3.14v

Table 2 Thickness of specimens

	Thickness, μm
0.50 μm	0.460 ± 0.007
0.75 μm	0.634 ± 0.018
1.00 μm	0.997 ± 0.020

3. 실험결과

같은 두께를 가진 시편은 MEMS 공정에 의해 3개씩 제작되어 벌지 실험을 수행하였다. 또한 반복도와 신뢰성 평가를 위해 각 시편에 대한 Fig. 2와 같이 실험을 반복하였다. 벌지 실험을 통해 얻은 압력-변위 데이터의 곡선 적합을 구할 때에는 비선형 함수(non-linear function)에 대한 곡선 적합이 우수한 LMA (Levenberg-Marquart Algorithm) 방법을 사용하였다. 두께에 따른 벌지 실험의 결과는 Table 3에 나타내었다.

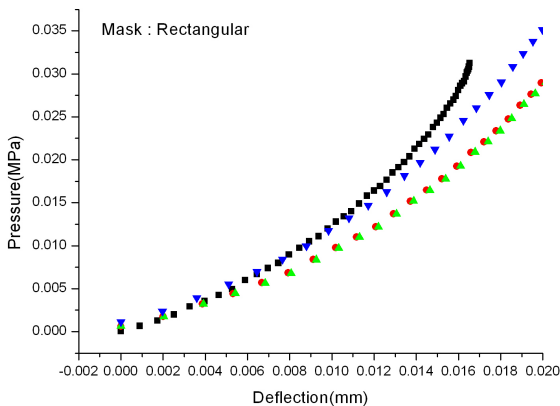


Fig. 2. Pressure-Deflection Relation of 1.00 μm Silicon Nitride

Table 3 Mechanical Properties of Silicon Nitride

	Square Membrane		Rectangular Membrane (aspect ratio n=2)	
	Elastic Modulus (GPa)	Residual Stress (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Residual Stress (MPa)
0.50 μm	236.06 ± 22.75	66.67 ± 4.11	247.22 ± 20.15	81.60 ± 0.99
0.75 μm	249.25 ± 45.87	71.35 ± 27.94	221.16 ± 13.33	71.05 ± 6.35
1.00 μm	237.28 ± 39.03	71.84 ± 30.88	208.50 ± 26.03	114.72 ± 32.30

Table 3에서 볼 수 있듯이 정사각형 형상의 경우와 직사각형 형상의 경우는 탄성계수의 값이 두께에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 잔류응력의 측면을 보았을 때 실리콘 질화막의 경우 잔류응력은 질화막 증착 온도(deposition temperature)와 증착 시 가스의 배합(the ratio of dichlorosilane to ammonia)의 영향을 많이 받는다고 알려져 있으며, 본 실험에서 사용된 실리콘 질화막

의 경우 공정 조건이 835 °C의 온도에서 사염화규소(SiH₂Cl₂)와 암모니아(NH₃)의 가스 부피비는 5:1(SiH₂Cl₂:NH₃)을 유지한다. Sekimoto에 의하면 이 공정 조건의 경우에 실리콘 질화막은 100 MPa 이하의 잔류응력을 가진 박막이라 볼 수 있다. Table 3 에서 보는 바와 같이 두께에 따른 잔류 응력의 영향을 분석한 실험 결과를 보면 잔류응력은 100 MPa 전후반에 걸쳐 측정되어 저응력(low stress)을 가진 박막임을 확인시켜 주고 있다.

4. 결론

박막에 대한 이론식을 이용하여 Bulge 실험을 통해서 얻어진 압력-변위간의 데이터를 바탕으로 곡선 적합(curve fitting)을 통해 기계적 물성치인 탄성계수(elastic modulus)와 잔류응력(residual stress)을 구하였다. 아울러 본 연구에서는 bulge 실험기에 대한 신뢰성을 검증하였으며, 이 장비를 바탕으로 피로-파괴 및 층간 분리 등과 같은 박막에 대한 다른 방향의 연구도 가능하리라 생각한다.

참고문헌

- 1 Karlsson, L., Hultman, L., and Sunggren, J.E., "Influence of Residual Stresses on the Mechanical Properties of TiC_xN_{1-x} Thin Films Deposited by Arc Evaporation," *Thin Solid Films*, Vol. 371, pp. 16 7 ~ 77, 2000
- 2 Vlassak, J.J., and Nix, W.D., "A New Bulge Test Technique for the Determination of Young's Modulus and Poisson's Ratio of Thin Films," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 12, pp. 3242 ~ 3249, 1992
- 3 Martha, K.S., Vlassak, J.J., Powell, S.F., Daniels, B.J., and Nix, W.D., "Accuracy and Reliability of Bulge Test Experiments," *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 308, pp. 159 ~ 164, 1993
- 4 Paviot, V.M., Vlassak, J.J., and Nix, W.D., "Measuring the Mechanical Properties of Thin Metal Films by means of Bulge Testing of Micromachined Windows," *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 356, pp. 579 ~ 84, 1995
- 5 Misao, Sekimoto, Hideo, Yoshihara, and Takashi, Ohkubo, "Silicon Nitride Single-Layer X-ray Mask," *Journal of vacuum science technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 1017~1021, 1982[
- 6 E., Bonnotte, P., Delobelle, and L., Bornier, "Two Interferometric Methods for the Mechanical Characterization of Thin Films by Bulging Tests. Application to Single Crystal of Silicon," *Materials Research Society*, Vol. 12, No. 9, pp. 2234~2248, 1997