

동 박막의 피로한도

허용학[†] · 김동진^{*} · 이해무^{*} · 홍성구^{*} · 박준협^{**}
(2009년 7월 29일 접수, 2009년 8월 13일 수정, 2009년 8월 17일 심사완료)

Fatigue Limit of Copper Film

Yong-Hak Huh, Dong Jin Kim, Hae Moo Lee, Sung Gu Hong
and Jun Hyub Park

Key Words: High Cycle Fatigue(고주기피로), Copper Film(동 박막), Stress Ratio(응력비), S-N Curve(응력-수명 곡선), Fatigue Limit(피로한도)

Abstract

Fatigue limit of the copper film coated by Sn was estimated using Goodman diagram and Gerber diagram. To obtain the high cycle fatigue life curve, S-N curve, of the film, the high cycle fatigue test was carried out by applying the constant amplitude load to the film specimen with three different stress ratio of 0.05, 0.3 and 0.5 and the frequency of 40 Hz at room temperature in air. The free-standing film specimen 15.26 μm thick was fabricated by etching process. The fatigue limits and S-N curves at the respective stress ratios were determined from the experimental works. It was shown that the S-N curves were dependent on the stress ratio and the fatigue limit was increased with decreasing the stress ratio. The dependency of the fatigue behavior was presented in empirical relationship. Using these relationships, the fatigue limit was predicted.

기호설명

- R : 응력비
- N_f : 파단 수명
- S_a : 응력 진폭
- S_u : 인장 강도
- $R_{po.2}$: 항복 강도
- E : 탄성계수

1. 서 론

다양한 MEMS 제품의 상용화를 위해서는 이들

제품의 설계, 제작에서 신뢰성은 중요한 문제가 된다. 예로서 LCD(Liquid Crystal Display), PDP(Plasma Display Panel), 이동전화 그리고 RF 스위치와 같은 MEMS 제품에서는 사용 환경 조건에 따라 열 피로와 시간 변동성 하중이 발생하며, 이러한 하중은 반복적인 사용으로 치명적인 피로 손상을 야기시키고 이는 이들 제품에서 신뢰성을 확보하기 위하여 해결해야할 중요한 문제 중의 하나로 간주되고 있다. 피로 하중에 기인한 신뢰성을 해결하기 위해서는 피로 하중에 대한 재료 및 마이크로 구조물의 피로 특성에 대한 정보가 필수적이다. 이는 일반적으로 박막 피로 저항성에 대한 물성을 기본으로 측정하고 있으며, 이에 대한 특성을 다양한 측정 기법을 사용하여 측정하고 있다.⁽¹⁻⁶⁾

본 연구에서는 LCD와 같은 전자디바이스에 사용되는 동 박막의 신뢰성 설계를 위하여 피로 한도를 실험적 관계로 부터 예측하였다. 동 박막은 폴리라미드위에 증착하여 Sn으로 코팅되었고, 이

[이 논문은 2009년도 신뢰성부문 춘계학술대회(2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임]

† 회원, 한국표준과학연구원 산업측정표준본부

E-mail : yhhuh@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5386 FAX : (042)868-5635

* 한국표준과학연구원

** 동명대학교 메카트로닉스공학과

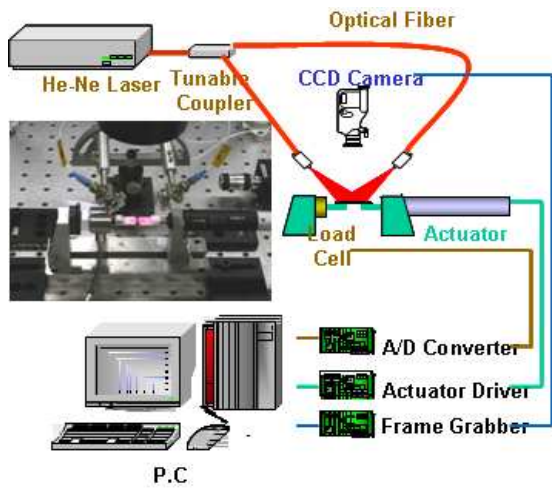


Fig. 1 Schematic diagram for micro-tensile testing system⁽⁷⁾

를 사용하여 다양한 하중비에서 피로 선도를 결정하였다. 이를 기반으로 응력비 $R=-1$ 에 대한 피로한도를 Goodman 선도와 Gerber 선도를 이용하여 예측하였다. 또한 동 박막의 인장 특성이 평가 되었다.

2. 실험방법

15 μm 두께의 동 막(copper film)을 전착(electro deposition)으로 제작하여 이를 폴리라미드 테이프 위에 열과 압력으로 부착하였다. 폴리라미드 위의 동 박막을 본 시험에 사용하는 시험편의 형상으로 펀치하여 시험편 아래의 폴리라미드를 제거하여 동막 시험편만이 남도록 하였다. 시험편의 산화를 방지하기 위하여 Sn으로 전기 도금하고 확산 공정으로 0.26 μm 두께의 Sn층이 형성되도록 하였다. 본 연구에 인장 및 피로 시험편은 시험부 길이 8 mm와 너비 2 mm이다.⁽⁷⁾

피로 시험은 대기중에서 40 Hz의 속도로 일정 하중 진폭으로 TYTRON 250을 사용하여 수행하였다. 0.05, 0.3 그리고 0.5의 응력비에 대한 피로 하중을 부과하였다. 각 응력비에서는 일정 진폭 하중을 부과하여 파단까지 수명을 측정하였으며, 최대 10^7 사이클까지 측정하였다. 인장 시험은 Fig. 1과 같은 마이크로 인장 시스템을 사용하여 수행하였으며, 시험 시스템은 인장 하중이 부과되는 동안 비접촉식으로 인장 변형을 측정할 수

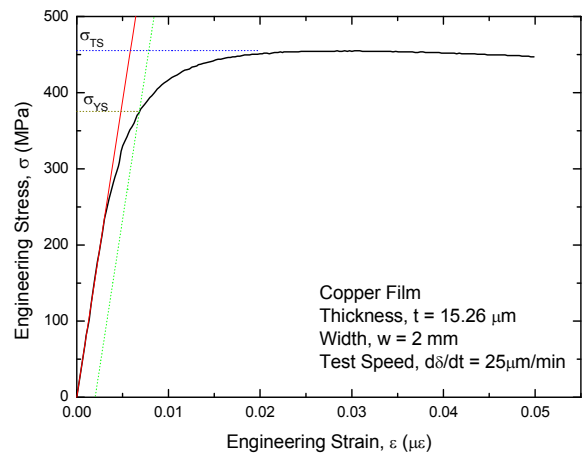


Fig. 2 Typical engineering stress-strain curve of the Cu film obtained from micro-tensile test

있는 마이크로 ESPI 시스템과 5 N 하중 용량을 가지는 마이크로 하중 시스템으로 구성되어 있다.⁽⁸⁾ 마이크로 ESPI 시스템은 시험편의 인장 변형을 632.8 nm의 파장을 가지는 He-Ne 레이저를 이용하여 측정하며, 이는 레이저 광이 시험편에 입사하여 변형에 따라 나타나는 간섭무늬의 영상 이미지를 획득하여 분석하여 각 변형에 대한 정량적인 변형량을 계산하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 인장 특성

마이크로 인장 시험 시스템을 이용하여 인장 변형률과 응력 곡선을 결정하였다. 인장 변형률은 Fig.1에서 보여준 바와 같은 마이크로 ESPI 시스템을 이용하여 측정하였다. Fig.2는 마이크로 인장 시험 시스템을 이용하여 결정한 응력-변형률 곡선을 나타낸다. Fig. 2와 같은 인장 응력-변형률 곡선으로부터 탄성 계수, 항복강도, 인장 강도를 각각 결정할 수 있으며, 본 연구에 사용한 동 박막의 탄성계수, 0.2% 항복 강도 그리고 인장 강도는 각각 78.5 GPa, 362.4 MPa 와 453.8 MPa 이었다.

3.2 피로 특성

동 박막의 고주기 피로 특성은 40 Hz의 되풀이

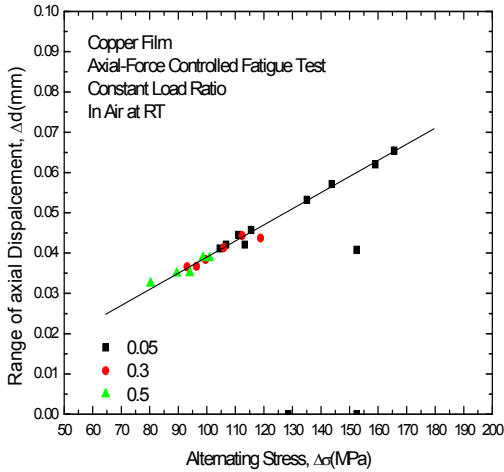


Fig. 3 Relationship between the axial deformation range and the alternating stress at various stress ratios

속도로 다양한 하중비 즉 0.05, 0.3 그리고 0.5로 일정하중 진폭으로 피로 하중을 부하하여 얻었다. 본 시험에서 선택한 하중 수준은 탄성 변형 영역으로 국한하였으며, Fig. 3은 고주기 피로 하중 시험을 수행한 각 응력비에 대하여 응력 진폭과 시험편 축 변위 폭을 도시한 것이다. Fig. 3에서 보여준 바와 같이 본 연구에서 선택한 세 응력비에 무관하게 모든 시험 하중 폭과 변위 폭은 선형적인 관계를 보이고 있다. 이는 고주기 피로 시험에 사용한 하중 조건은 탄성 영역에서 선택되었음을 의미한다.

Fig. 4는 고주기 피로시험으로부터 얻어진 동박의 피로 응력-수명(S-N) 곡선을 나타낸다. 고주기 피로 시험은 각 응력비 및 응력 수준에서 파단 시까지 진행하였으며, 최대 수명을 1×10^7 까지로 제한하였다. Fig. 4에서 보여준 바와 같이 응력-수명선도는 일정 하중비에서는 이중 로그 그래프상에서 선형적인 특성을 보이고 있다. Park 등⁽⁶⁾은 본 연구에서 사용한 동일한 동 박막을 이용하여 고주기 피로에서의 평균 응력의 영향을 수행하였으며, Fig. 4에 나타난 바와 같이 동일한 응력-수명 곡선을 나타내었다. Fig. 4에서 보여준 바와 같이 동 박막의 응력-수명 곡선은 응력비에 따라 다른 선형적인 관계를 보이고 있다. 즉, 응력비, R이 작을수록 동일한 응력 수준에서 피로

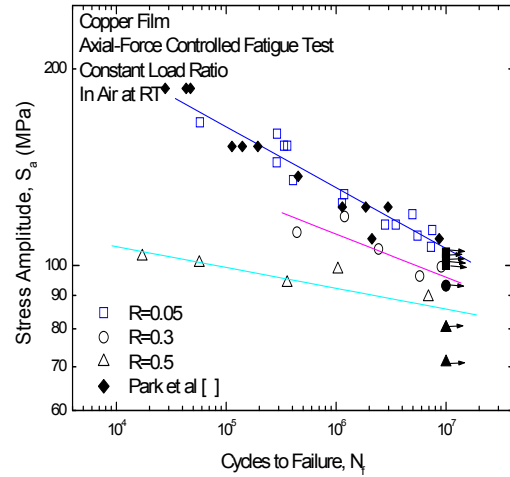


Fig. 4 S-N curves at various stress ratios for Copper film

수명은 증가하고 있다. Fig. 4의 각 응력비에서의 피로 응력-수명 선도로부터 각 응력비에서 피로 강도 계수(fatigue strength coefficient)와 피로 강도 지수(fatigue strength exponent)를 결정할 수 있으며, 이는 응력비가 증가할수록 피로 강도 계수는 감소하고 피로 강도 지수는 응력비의 증가에 대해 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 각 응력비에서 얻어지는 피로 한도를 결정할 수 있으며, 여기서는 1×10^7 사이클에서의 응력 수준으로 정의하였다. 각 응력비의 피로 한도도 응력비의 의존성을 보이고 있으며, 응력비의 증가에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다.

3.3 피로 한도 예측

Fig. 4에서 보여준 바와 같이 각 응력비에서의 피로 한도를 실험적으로 결정할 수 있다. 그러나 이러한 동 박막의 피로한도는 응력비가 0이상에서 얻어진 결과이며, 박막의 기하학적 특성으로 평균응력이 0인 즉 응력비 R이 -1일 때의 피로한도를 얻는 것은 어렵다. 일반적으로 피로 저항 구조물의 설계에서는 피로설계시 응력비가 -1인 평균 응력이 0인 설계데이터가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 Goodman 선도와 Gerber 선도의 특성을 이용하여 평균 응력이 0인 조건에 대한 피로 한도를 예측하였다.

Fig. 4로부터 동 박막의 피로수명이 1×10^7 , 1×10^6 그리고 4×10^5 사이클에서의 응력 수준을 평가하여 Fig. 5와 같은 동일한 수명에 대한 피로 한도를 평균 응력과 응력 진폭의 선도를 작성하였다.

이러한 평균 응력과 응력 진폭의 관계를 설명하는 방법으로는 일반적으로 Goodman 선도, Gerber 선도 그리고 Solderberg 선도 등이 사용된다. Solderberg 선도는 Goodman 선도와 Gerber 선도에 비해 평균 응력 효과를 상대적으로 잘 표현하지 못하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 Goodman 선도와 Gerber 선도를 이용하여 Fig. 5에 도시한 바와 같이 피로 한도를 예측하였다. Goodman 관계식과 Gerber 관계식은 식 (1)과 식 (2)로 각각 표시된다.

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{S_a}{S_f} + \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

여기서 S_a 는 응력 진폭, S_m 는 평균응력, S_u 는 인장 강도 그리고 S_f 는 $R=-1$ 에서의 응력 진폭, 피로한도를 나타낸다. Fig. 5에서와 같이 Goodman과 Gerber 선도로 각 수명에 대한 응력 수준과 비교를 하였다. 동 박막에서 얻어진 피로 수명은 Goodman 선도보다는 Gerber 선도가 비교적 잘 실험결과와 일치하고 있음을 보이고 있다. 이에 반해 Park 등⁽⁷⁾은 동 박막의 피로 수명에서의 평균 응력의 효과를 Goodman 관계와 Gerber 관계로 비교적 잘 표현하였으며, Goodman 관계식의 간편성으로 동 박막의 설계에서 사용되기를 권고하고 있다.

본 연구에서는 동 박막의 평균 응력이 0인 $R=-1$ 에서 피로한도를 Goodman과 Gerber 선도를 이용하여 각각 예측하였으며, 이는 각각 149.5 MPa 과 110.8 MPa 로 예측되었다. 이들 두 예측치는 약 26%의 차이가 있다. Fig. 5에서 보여준 실험에서 얻어진 피로수명 데이터와 일치성을 고려하면 Gerber 선도로 예측된 결과가 상대적으로 Goodman 선도로 예측된 결과보다 더 실제 피로 한도와 근접할 것으로 판단된다.

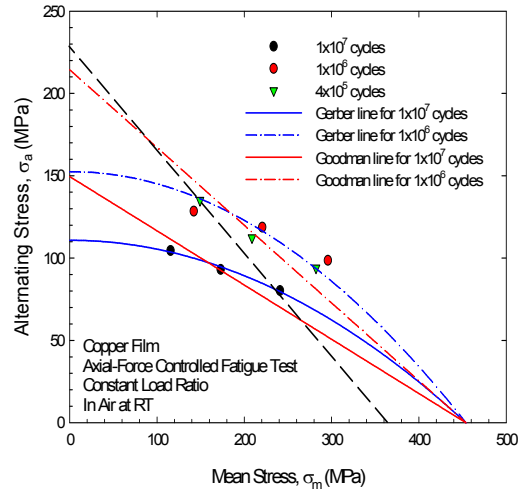


Fig. 5 Prediction of fatigue limit using Goodman diagram and Gerber diagram

4. 결론

두께 15.26 μm 의 동 막(copper film)의 인장 강도 특성을 평가하고 피로 한도를 Goodman 선도와 Gerber 선도를 이용하여 예측하였다.

(1) 동 박막의 응력-수명(S-N) 선도는 일정 응력비에서 이중 로그 그래프상에서 선형적인 특성을 보이고 응력비의 의존성을 보여주고 있으며, 응력비가 감소함에 따라 피로 수명의 증대와 피로 한도의 증가되고 있었다.

(2) 응력비 $R=-1$ 에 대한 피로 한도를 Gerber 선도와 Goodman 선도를 이용하여 예측하였고 Gerber 선도가 비교적 실험 결과와 잘 일치되고 있었다.

(3) 동 박막의 인장 물성이 마이크로 인장 시험 시스템과 마이크로 ESPI 시스템을 이용하여 평가되었고, 탄성계수, 0.2% 항복 강도 그리고 인장 강도는 각각 78.5 GPa, 362.4 MPa 와 453.8 MPa 이었다

참고문헌

(1) Spearing, S. M., 2000, "Materials Issues in Micro Electromechanical Systems," Acta Materialia, 48, pp. 179~196.

- (2) Nix, W. D., 1989, "Mechanical Properties of Thin Films," *Metall. Trans.* 20A, pp.2217~2245.
- (3) Vinci, R. P. and Vlassak, J. J., 1996, "Mechanical Behavior of Thin Films," *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 26, pp.431~462.
- (4) Kraft, O. and Volkert, C.A., 2001, "Mechanical Testing of Thin Films and Small Structures," *Adv. Eng. Mater.* 3, pp. 99~110.
- (5) Sharpe, W.N. and Bagdahn, J., 2004, "Fatigue Testing of Polysilicon - A Review," *Mech. and Mater.* 38, pp. 3~11.
- (6) Jun-Hyub Park and Yun-Jae Kim, 2007, "A Novel Tensile Specimen and Tensile Tester for Mechanical Properties of Thin Films," *Trans. of the KSME A*, 31, No. 6, pp. 644~650.
- (7) Park, J.-H., An, J.-H., Kim, Y.-J., Huh, Y.-H. and Lee, H.-J., 2008, "Tensile and High Cycle Fatigue Test of Copper Thin Film," *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 39, No. 2 pp.187~192.
- (8) Huh, Y.-H., Kim, D.I., Kim, D.J., Park, P., Kee C.D. and Park, J.-H., 2004, "Application of Micro-ESPI Technique for Measurement of Micro-Tensile Properties," *Key Eng. Materials* 270, 744~747.