

T peel 테스트에 의한 Cu/Cr/Polyimide계의 계면파괴에너지 평가

송재용, 유진

한국과학기술원 재료공학과

(E-mail; jinyu@cais.kaist.ac.kr)

Estimation of Interfacial Fracture Energy of Cu/Cr/Polyimide System by T Peel Test

J. Y. Song and Jin Yu

Dept. of Materials Science and Engineering, KAIST

1. 서론

전자 패키지는 수많은 금속/폴리머 계면구조로 이루어져 있으므로, 그 계면의 신뢰성 확보는 패키지의 수명과 기능의 안정성을 결정한다. 따라서 계면 접착의 신뢰성을 평가하기 위한 많은 기술이 발달하여 왔는데 본 연구에서는 산업계에서 흔히 사용되고 있는 peel test 중에서 T peel 테스트를 이용하여 계면파괴에너지를 얻는 실험적 방법을 제시하였다. T peel 테스트는 90° peel 테스트와 달리 연성의 필름상대인 이중재료의 접착력을 평가하기에 적합하다. peel 테스트는 실험방법이 용이한 장점이 있지만 측정된 peel 강도에는 계면파괴인성과 박리된 필름의 굽힘에 의한 소성 변형에너지가 매우 많이 포함되므로 계면 접착력을 측정하는 것이라고 보기 어렵다. 따라서 peel 테스트에서의 굽힘 소성 변형 에너지를 구하는 이론적 또는 실험적 방법이 많이 보고되었다[1-5]. 탄성/소성 해석에 의하면 굽힘 소성 변형 에너지는 peel 균열에서 필름의 최대 곡률에 의해 결정된다. Moidu 등은 굽힘에 의한 소성 변형 에너지를 구하는 이론적 해석을 제시하였고[2, 3] x-선 해석을 통한 실험적 방법도 보고되었다[1]. T peel 테스트에서는 폴리이미드 필름과 금속박막이 굽힘에 의해 소성 변형이 되므로 peel 강도는 두 필름의 소성 변형 에너지를 포함하게 된다. 굽힘 소성 변형 에너지는 계면 접착 에너지와 필름의 두께 및 기계적 성질에 의존하게 되므로 본 연구에서는 금속박막의 두께와 폴리이미드 표면의 rf 플라즈마 처리에 의한 계면 접착 에너지를 변화시키며 peel 강도와 peel 각도의 변화를 측정하였고 peel 균열에서의 필름의 최대 곡률을 디지털 광학 카메라로부터 직접 측정하여 탄성/소성 해석을 통하여 굽힘에 의한 소성 변형 에너지를 계산한 후 에너지보존으로부터 계면파괴 에너지를 유추하였다. 계면파괴 에너지는 rf 플라즈마 밀도의 증가에 따라 증가하다가 약 50 g/mm에서 포화되는 경향을 보였다. 본 연구로부터 얻은 계면파괴 에너지는 금속박막 두께의 변화에 상관없이 rf 플라즈마 밀도에 따라 변화하는 경향을 얻었는데 이것은 계면파괴인성에 가까운 재료 특성으로 추정된다.

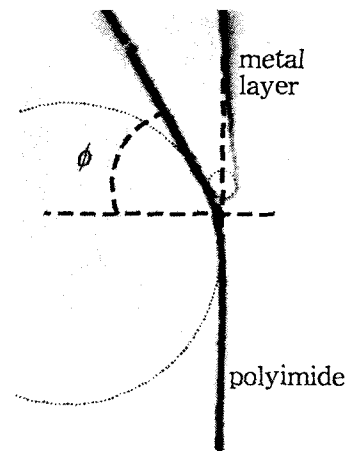


Fig. 1 Photograph of T peel test

2. 실험방법

Ar 압력 5 mTorr에서 두께 50 μm 의 Kapton H 폴리이미드 필름의 표면을 0.011 ~ 0.332 W/cm^2 의 rf 플라즈마 밀도 범위에서 5분간 전처리를 행하였다. 전처리 후 5 mTorr에서 Cr 박막과 Cu 박막을 25 nm와 400 nm로 각각 스퍼터 증착하였다. 박막증착 후 금속층 두께가 각각 13.5, 18과 23 μm 가 되도록 전해도금법을 이용하여 Cu를 성장시켰다. 폴리이미드와 도금된 Cu의 영계수는 nanoindentation에 의해 구하였으며, 응력-변형률 관계는 ASTM E 345-93과 D882-95a의 규정에 따라 일축인장 시험법으로 구하였다. peel 강도는 T peel 테스트의 안정상태에서 측정하였고 그때의 peel 각도와 peel 균열에서의 최대 곡률을 디지털 광학 카메라를 사용하여 20 ~ 60 배 확대 후 측정하였으며, 실제 T peel 테스트의 일례를 Fig.1에 보였다. peel 각도(ϕ)는 하중방향에 수직 한 축과 peel 되지 않은 필름과 이루는 각도로 정의하였다. Fig.1의 경우 peel 각도는 양의 값을 갖게 된다.

3. 결과 및 고찰

T peel 테스트에 의해 각 필름에 발생하는 굽힘 소성변형에너지는 필름의 기계적 성질에 의존하게 된다. 본 연구에서 사용된 전해도금된 Cu의 영계수는 약 136 GPa로 Cu의 두께가 5 ~ 35 μm 사이에서 거의 일정한 값을 보였으며, 폴리이미드의 영계수는 3.8 GPa로 측정되었다. 도금 Cu의 일축인장시험에 의한 응력-변형률 곡선은 탄성/완전소성 재료로 해석을 하기에 충분한 곡선을 나타내었다. 응력-변형률 곡선으로부터 구한 인장강도의 값을 굽힘에 의한 소성변형에너지를 계산할 때 탄성/완전소성 재료의 항복응력으로 사용하였는데 그 값은 400 MPa 이었다. 한편, 폴리이미드의 경우에는 bilinear 재료로 해석을 하였는데 이때의 변형경화지수(α)가 0.3 이고, 항복응력은 67

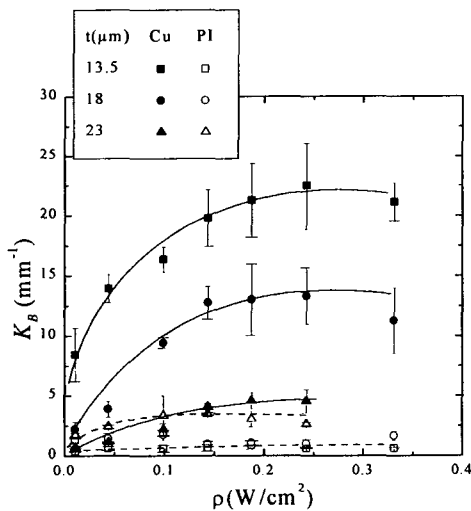


Fig.2 Variations of maximum curvatures of Cu and PI films with ρ at different metal layer thickness

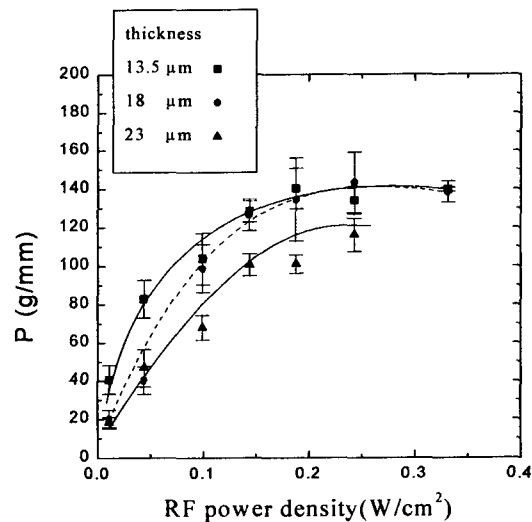


Fig.3 Variations of peel strength, P , with ρ and metal thickness

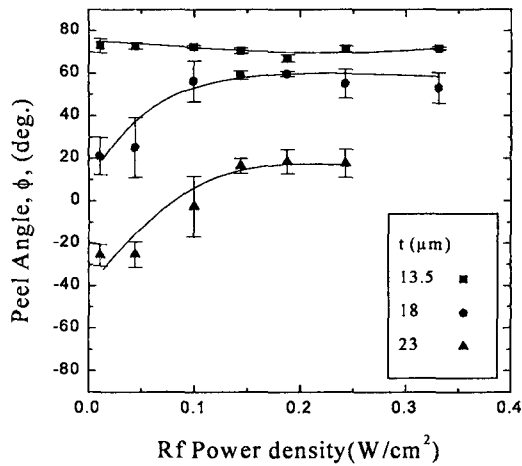


Fig.4 Variations of peel angle with ρ

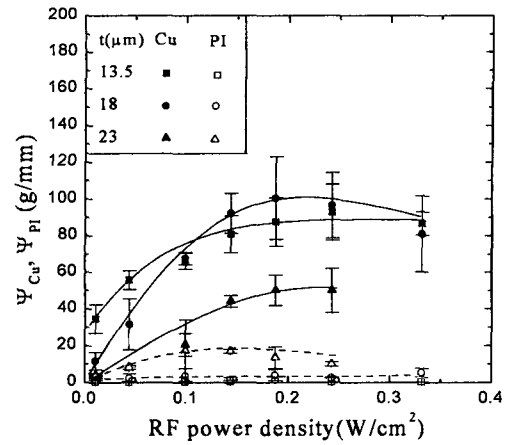


Fig.5 Variations of plastic bending energies of Cu and PI films with ρ

MPa 이었다. 이때 α 는 E_p/E 로 정의되는데 E_p 는 응력-변형을 곡선에서 변형경화 부분의 기울기이며 E 는 폴리이미드의 영계수이다.

굽힘 소성변형에너지를 계산하기 위하여 peel 균열에서의 박리된 필름층의 최대 곡률을 알아야 하는데 디지털 광학 카메라로 측정된 최대 곡률을 Fig.2 에 나타내었다. 최대 곡률은 rf 플라즈마 밀도의 증가에 따라 증가 후 포화되었으며 13.5 μm 금속층으로 이루어진 시편의 최대 곡률이 가장 큰 값을 보였다. 13.5와 18 μm 금속층으로 이루어진 시편들은 폴리이미드의 최대곡률이 매우 작은 값을 나타내며 rf 플라즈마 밀도의 변화에 따라 거의 변화를 보이지 않는 반면에 23 μm 금속층으로 이루어진 시편은 금속층과 폴리이미드의 최대곡률이 5 mm^{-1} 이하의 작은 값으로 서로 비슷한 값을 나타내며 변화하였다.

peel 강도는 rf 플라즈마 밀도의 증가에 따라 선형적으로 증가한 후 포화되는 양상을 나타내었다(Fig.3). 0.1 W/cm^2 이하의 rf 플라즈마 밀도에서 13.5 μm 금속층 시편의 peel 강도가 가장 크게 나타나고 23 μm 금속층 시편의 peel 강도가 비교적 작게 나타나는 것은 compliance 효과와 crystal volume 효과의 상호작용에 기인한 것으로 보인다.

peel 각도는 금속의 두께와 각 필름의 기계적 성질뿐 아니라 계면 접착력에 의존하여 변화를 하는데 Fig.4에서 보는 바와 같이 18과 23 μm 금속층 시편의 경우 $\rho < 0.1 \text{ W}/\text{cm}^2$ 의 범위에서 rf 플라즈마 밀도의 증가에 따라 peel 각도가 증가하였다. 하지만 13.5 μm 금속층 시편은 peel 각도가 거의 변화를 보이지 않았다. 이에 대한 해석은 향후 계속될 것이다.

Cu의 굽힘에 의한 소성변형에너지의 계산은 탄성/완전소성 재료의 순수 굽힘 이론을 가정하여 다음과 같이 구하였다[5].

$$\Psi_{Cu} = M_0 K_e \left[2k_B - 5 + \frac{10}{3k_B} \right] \quad (1 \leq k_B \leq 2) \quad \Psi_{Cu} = M_0 K_e \left[\frac{2}{3k_B} + \frac{1}{3} k_B^2 - 1 \right] \quad (2 \leq k_B) \quad (1)$$

이때 $k_B = K_B/K_e$ 인데 K_B 는 peel 균열의 최대곡률이고 K_e 와 M_0 는 다음과 같이 정의된다. t 는 박막의 두께를 나타내고 σ_Y 는 항복응력인데 Ψ_{Cu} 의 계산에서는 Cu의 항복응력 대신에 인장강도 값을 사용하였다.

$$K_e = \frac{\sqrt{3}\sigma_Y}{Et}, \quad M_0 = \frac{\sigma_Y t^2}{2\sqrt{3}}$$

폴리이미드의 굽힘에 의한 소성변형에너지는 bilinear 재료를 가정할 때 다음과 같다[3].

$$\Psi_{Cu} = M_0 K_e (1-\alpha) \left[\frac{2}{3k_B} + \frac{1}{3} k_B^2 - 1 \right] \quad (1 \leq k_B \leq 1 + \frac{1}{1-\alpha})$$

$$\Psi_{PI} = M_0 K_e \left[\frac{1}{3} (\alpha^3 - 3\alpha + 2\alpha) k_B^2 - (\alpha^3 - 5\alpha^2 + 6\alpha - 2) k_B \right] - \frac{2}{3k_B(1-\alpha)} (\alpha^4 - 10\alpha^3 + 6\alpha^2 - 28\alpha + 6) + (\alpha^3 - 7\alpha^2 + 13\alpha - 5) \quad (k_B \geq 1 + \frac{1}{1-\alpha}) \quad (2)$$

Fig.2에 보인 Cu와 폴리이미드의 최대곡률과 실험적으로 구한 기계적 특성값을 식(1)과 (2)에 대입하여 각 필름의 굽힘 소성변형에너지를 계산하여 Fig.5에 나타내었다. 소성변형에너지는 rf 플라즈마 밀도에 따라 증가 후 포화되는데 이것은 최대곡률의 변화와 잘 일치한다. 한편, Fig.2에서 13.5와 18 μm 두께의 금속층 시편은 서로 다른 최대곡률의 값을 보였지만 소성변형에너지의 값은 크게 다르지 않았다. 이것은 crystal volume 효과와 compliance 효과의 균형으로 모멘트-곡률 곡선이 이루는 면적이 거의 비슷하기 때문이다. 이때 폴리이미드의 굽힘 소성변형에너지는 매우 작은 값을 나타내는데 이것은 폴리이미드의 최대곡률과 영계수가 작기 때문이다. 23 μm 두께 금속층 시편은 비교적 작은 최대곡률값 때문에 굽힘 소성변형에너지가 상대적으로 작게 소모되지만, 금속

층과 폴리이미드가 비슷한 최대곡률을 나타남에도 불구하고(Fig.2) Ψ_{Cu} 가 Ψ_{PI} 보다 큰 것은 도금 Cu가 폴리이미드보다 영계수가 매우 크기 때문이다.

T peel 테스트에서의 에너지 보존으로부터 계면파괴에너지(Γ)를 다음과 같이 구하였다.

$$2P = \Psi_{Cu} + \Psi_{PI} + \Gamma$$

Cu/Cr/폴리이미드계의 계면파괴에너지는 Fig.6에 나타난 것과 같이 금속층의 두께에 비교적 무관하게 rf 플라즈마 밀도의 증가에 따라 증가하다가 약 50 g/mm에서 포화되었다. rf 플라즈마 밀도의 변화에 따라 각 두께별 시편의 계면파괴에너지의 변화가 차이를 보이는 것은 굽힘 소성변형에너지를 계산할 때 재료를 탄성/완전소성 또는 bilinear 재료로 가정한 것에서 기인한 것으로 보인다. Fig.6에는 x-선 해석에 의한 계면파괴에너지의 결과를 점선으로 보여주는데[1] rf 플라즈마 밀도에 따른 계면파괴에

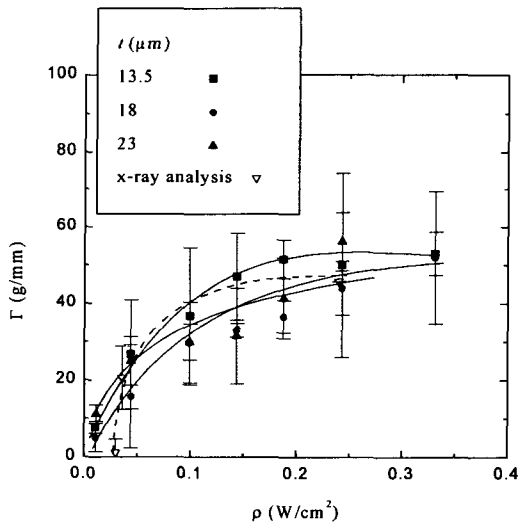


Fig.6 Variations of the interfacial fracture energy with the rf power density

너지 증가 경향이 다르기는 하지만 거의 같은 계면파괴에너지의 값을 나타내는 것으로 보아 T peel 테스트의 신뢰성을 뒷받침한다. 본 연구에서 구한 계면파괴에너지는 rf 플라즈마 밀도의 변화에 따라 금속층 두께와 무관하게 비교적 일정한 값을 보이므로 Cr과 폴리이미드 계면의 재료상수가 될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. I. S. Park and Jin Yu, An X-ray Study on the Mechanical Effects of the Peel Test in a Cu/Cr/Polyimide System, *Acta Mater.* Vol.46, No.8 (1998), pp.2947-2953.
2. Moidu, A. K. et al, Analysis of the Peel Test: Prediction of Adherend Plastic Dissipation and Extraction of Fracture Energy in Metal-toMetal Adhesive Joints, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.23, No.4(1995), pp.241-253.
3. Moidu, A. K. et al, On the Determination of Fracture Energy Using the Peel Test, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.26, No.3(1998), pp.247-254.
4. Kinloch, A. J. et al, The Peeling of Flexible Laminates, *International Journal of Fracture*, Vol.66(1994), pp45-70.
5. Kim, K.-S. et al, Elasto-plastic Analysis of the Peel Test, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.24, No.4(1988), pp.417-435.