

PDMS와 실리콘 기판 사이의 점착 특성에 대한 공정 조건의 영향

Effects of process conditions on the adhesion properties between polydimethylsiloxane (PDMS) and silicon substrate

*김광섭, 장봉균, 최현주, #김재현, 이학주

*K. S. Kim, B. K. Jang, H. J. Choi, #J. H. Kim(jaehkim@kimm.re.kr), H. J. Lee
한국기계연구원 나노융합·생산시스템 연구본부

Key words : Adhesion, Polydimethylsiloxane(PDMS), Silicon, Transfer process

1. 서론

최근 전자 공정(transfer printing)을 이용하여 3 차원 멀티 스케일 구조물 및 디바이스가 제작되고 있다(1,2). 전자 공정을 이용한 디바이스 제작은 무기물 기반의 디바이스뿐만 아니라 유기물 기반의 디바이스의 제작에도 적용할 수 있으며, 유연 기관 등에도 디바이스를 집적하고 회로를 구성할 수 있어, 차세대 유연 전자 소재를 개발하는데 필요한 핵심 공정으로 주목을 받고 있다.

전자 공정은 전사하고자 하는 대상을 스탬프와 접촉시켜 기관(donor)으로부터 떼어내는 picking 공정과 떼어낸 대상물을 원하는 다른 기관(acceptor)에 옮겨 놓는 placing 공정으로 이루어진다. Picking 공정에서 스탬프를 이용하여 디바이스를 기관으로부터 원활히 떼어내기 위해서는 스탬프와 디바이스 사이의 점착력이 디바이스와 기관 사이의 점착력에 비해 상대적으로 커야 하며, 이와는 반대로 placing 공정에서는 디바이스와 원하는 기관 사이의 점착력보다 상대적으로 작아야 한다. 따라서 성공적인 전자 공정을 위해서는 접촉하는 재료 사이의 점착력을 적절히 컨트롤 하는 것이 매우 중요하다.

전자 공정에서 주로 사용되는 스탬프 재료는 polydimethylsiloxane(PDMS)이며, PDMS 스탬프와 디바이스 사이의 분리 속도를 조절함으로써 PDMS의 점탄성 특성을 이용하여 점착력을 제어하는 방법이 널리 이용되고 있다(3). 최근 스탬프와 기관 사이의 평행도 문제를 해결하기 위해 곡면의 PDMS 스탬프를 이용하려는 노력이 이루어지고 있으며, 이러한 곡면의 PDMS 스탬프와 디바이스 사이의 점착 특성에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 일정한 곡률 반경을 갖는 PDMS 렌즈와 Si 기관 사이의 점착 특성 및 이에 대한 분리 속도와 렌즈의 곡률 반경의 영향을 조사하였다.

2. 실험

PDMS와 실리콘 기판 사이의 점착력을 측정하기 위해 구형의 PDMS 렌즈와 실리콘 웨이퍼 조각을 준비하였다. 일정한 곡률을 갖는 볼록 PDMS 렌즈를 제작하기 위해 PDMS 몰딩 방법을 사용하였다. PDMS (Sylgard 184, Dow Chemical Co., Midland, MI)와 가교제를 10:1로 섞어 준 뒤, 일정한 곡률을 갖는 오목 렌즈 위에 부어주었다. 진공 펌프를 이용하여 기포를 제거하고, 75 °C의 오븐에서 3시간 동안 경화시킨 후에, 오목 렌즈를 경화된 PDMS로부터 떼어냈다. 곡률이 각각 10.3 mm와 25.8 mm인 오목 렌즈를 몰드로 사용하였다. 제작된 렌즈를 평평한 유리판에 점착시킨 후, 그 유리판을 실험기에 고정하였다. 실리콘 웨이퍼 조각은 20 mm x 20 mm 크기로 자른 후, 실험 전에 이소프로필알콜(isopropylalcohol)을 적신 솜으로 표면을 닦아 세척하였다.

Fig. 1은 점착 실험에 사용한 시험기의 개략도를 보여준다. 챔버 내에 3축 스테이지가 고정되어 있으며, 그 위에 점착력 측정을 위한 로드셀이 설치되어 있다. 로드셀 위의 샘플 스테이지에 실리콘 기판이 놓여지게 된다. 챔버의 상판에는 PDMS 렌즈가 고정되며, 렌즈 위쪽에 고속 CCD 카메라가 장착된 현미경이 설치되어 있다. 현미경을 이용하여 점착 실험 중의 접촉면의 형상 변화를 실시간으로 관찰하였다. 챔버 측면에 챔버 내의 습도를 조절하기 위한 배기 포트 및 챔버 내의 온습도를 측정하기 위한 온습도계가 설치되어 있다.

점착 실험은 고정된 PDMS 렌즈에 대해 실리콘 웨이퍼를 접촉시켰다가 떼어내는 방법으로 수행된다. Fig. 2(a)는 점착 실험의 개략도를 보여주며, Fig. 2(b)는 시간에 따라 측정된 하중을 보여준다. Fig. 2(b)에서 보여지듯이 PDMS 렌즈와 실리콘 웨이퍼를 일정 시간 동안 접촉시켰다가 떼어낼 때 작용한 최대 인장력을 점착력으로 정의하였다. 모든 실험에서 설정 접촉 하중은 약 11 mN으로 일정하게 하였으며, 점착력에 대한 분리 속도의 영향을 알아보기 위해 분리 속도를 1 ~ 1000 μm/s로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 실험 조건은 표 1에 기재되어 있다.

Table 1 Experimental conditions for adhesion test

Contact materials	PDMS, Si
Radius of curvature of PDMS lens (mm)	10.3, 25.8
Approach speed, v_{app} (μm/s)	20
Dwell time (s)	5
Separation speed, v_{sep} (μm/s)	1 - 1000
Load (mN)	10 - 12
Temperature and relative humidity in the chamber	21 ± 1°C, 40 ± 2%

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 분리 속도에 따른 점착력의 변화를 log-log 스케일로 보여준다. 렌즈의 곡률반경에 상관없이 1 - 1000 μm/s의 분리 속도 범위에서 속도가 증가함에 따라 점착력이 선형적으로 증가하였다. 렌즈의 곡률반경이 증가하면, 점착력 또한 증가하였다. 렌즈의 곡률반경이 25.8 mm인 경우, 속도에 따른 점착력의 증가율은 0.27 이고, 곡률반경이 10.3 mm인 경우에는 0.31 이었다. 즉, 렌즈의 곡률반경이 큰 경우에 증가율은 약간 감소하였다.

탄성계수가 작은 재료 사이의 접촉 해석에 많이 적용되는 JKR 접촉 이론을 이용하면 식(1)을 이용하여 점착일(work of adhesion, W_{ad})을 계산할 수 있다. 점착일은 접촉한 두 재료를 서로 완전히 떼어내는데 필요한 에너지를 의미한다.

$$W_{ad} = F_{pull-off} / (1.5\pi R) \tag{1}$$

여기서 $F_{pull-off}$ 는 측정된 점착력이며 R은 렌즈의 곡률 반경이다.

식 (1)을 이용하여 측정된 점착력 결과로부터 점착일을 계산하였으며, 분리 속도에 따른 점착일의 변화는 Fig. 4에서 보여지는 것과 같다. 곡률 반경이 10.3 mm인 경우의 점착일이 25.8 mm인 경우보다 모든 분리 속도 조건에서 크

게 나타났다. 또한 분리 속도가 작은 경우에는 점착일의 차이가 크지 않지만, 분리 속도가 증가함에 따라 차이가 점점 증가하는 것으로 나타났다.

실리콘 웨이퍼의 탄성계수는 PDMS의 탄성계수보다 약 100 배 이상 크다. 따라서 PDMS가 실리콘 웨이퍼와 접촉하면 PDMS 렌즈가 변형하여 넓은 접촉 면적이 형성되며, 점착 특성은 PDMS의 변형 및 점탄성 특성에 의해 많은 영향을 받을 것으로 예상된다. 점착 실험 동안, 시간에 따른 하중 변화뿐만 아니라 접촉면의 변화도 실시간으로 저장되었다. 하중 및 접촉면적의 변화를 분석하여 속도에 따른 점착력 및 점착일의 변화 메커니즘을 분석할 것이다.

4. 결론

다양한 분리 속도 조건에서 PDMS 렌즈와 실리콘 웨이퍼 사이의 점착력을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 분리속도가 1 ~ 1000 $\mu\text{m/s}$ 범위 내에서 PDMS 렌즈와 실리콘 웨이퍼 사이의 점착력은 log-log 스케일에서 속도 증가에 따라 선형적으로 증가한다. 렌즈의 곡률반경이 증가하면 점착력 또한 증가하며, 속도에 따른 점착력의 증가율은 곡률이 작은 렌즈가 더 크다.

후기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발(과제번호: 10033309)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Meitl, M. A., Zhu, Z.-T, Kumar, V., Lee, K. J., Feng, X., Huang, Y. Y., Adesida, I., Nuzzo, R. G. and Rogers, J. A., "Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp," *Nature Materials*, **5**, 33-38, 2006
2. Park, S.-I., Xiong, Y., Kim, R.-H., Elvikis, P., Meitl, M., Kim, D.-H., Wu, J., Yoon, J., Yu, C.-J., Liu, Z., Huang, Y., Hwang, K.-C., Ferreira, P., Li, X., Choquette, K. and Rogers, J. A., "Printed assemblies of inorganic light-emitting diodes for deformable and semitransparent displays," *Science*, **325**, 977-981, 2009
3. 장봉균, 김재현, 송선아, 이학주, "속도 의존적 점착 특성을 이용한 나노 스케일 구조물의 능동적 전사 제어," 대한기계학회 추계학술대회, 3031-3034, 2009

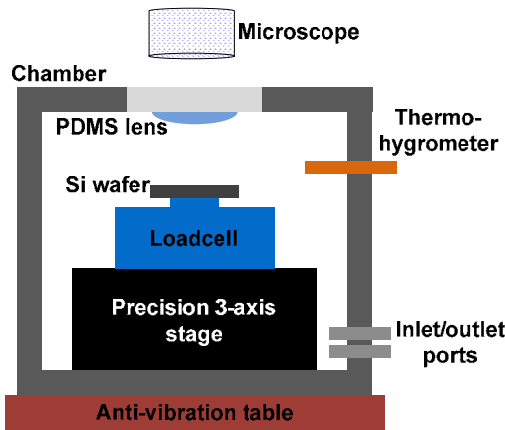


Fig. 1 Schematic diagram of adhesion tester

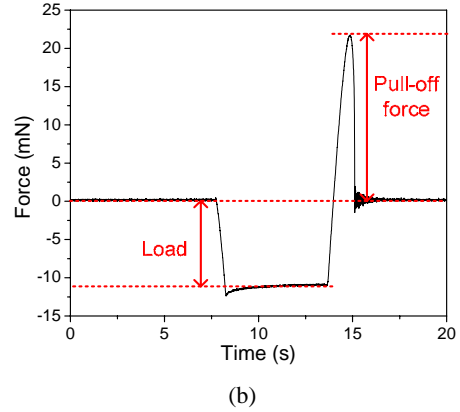
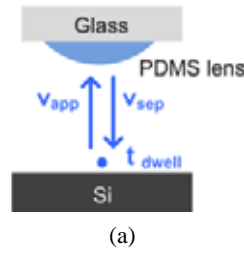


Fig. 2 Schematic diagram of adhesion test (a) and an example of test data (b)

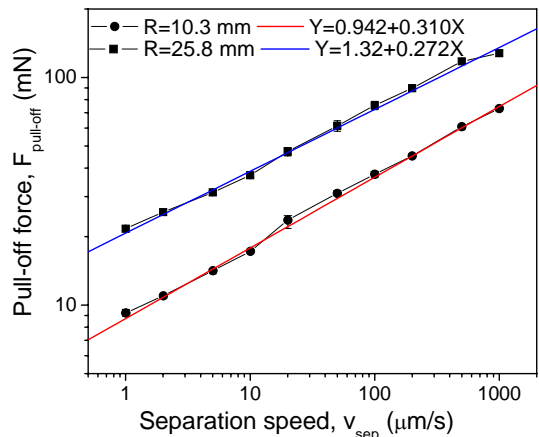


Fig. 3 Pull-off force as a function of separation velocity

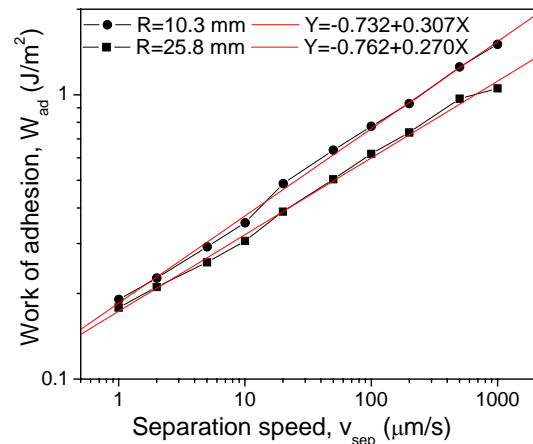


Fig. 4 Work of adhesion as a function of separation velocity