



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2012-0075032
(43) 공개일자 2012년07월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G06F 19/00 (2011.01)

(21) 출원번호 10-2010-0137050

(22) 출원일자 2010년12월28일

심사청구일자 2010년12월28일

(71) 출원인

서강대학교산학협력단

서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)

(72) 발명자

최범규

서울특별시 마포구 백범로 35, 리치 과학관 617호 (신수동, 서강대학교)

박정열

서울특별시 성동구 독서당로62길 43, 대림 1차 아파트 11동 1502호 (응봉동)

김민석

부산광역시 남구 우암로154번길 18, 2동 102호 (우암동, 대진아파트)

(74) 대리인

지현조

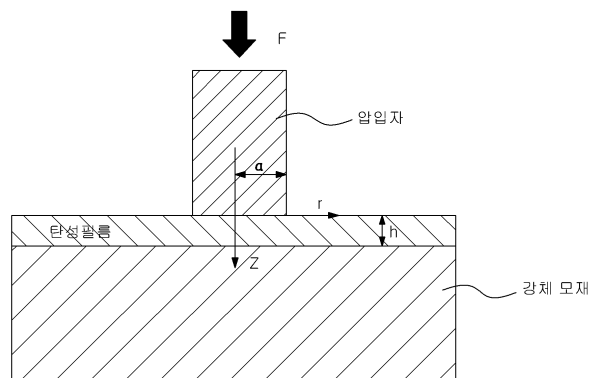
전체 청구항 수 : 총 5 항

(54) 발명의 명칭 전사 매개체의 점착조건 결정방법

(57) 요약

모재 상에 올려진 피전사체를 점착 기관 상에 전사시키기 위한 전사 매개체의 점착조건 결정방법은, 전사 매개체를 특정하는 단계, 전사 매개체를 압입(pull-in) 및 해중(pull-off)하는 압입자를 마련하는 단계, 압입자가 전사 매개체로부터 해중되는 해중속도(pull-off velocity)를 달리하여 최대 점착력을 측정하는 단계, 및 측정된 최대 점착력을 점착 에너지로 환산하는 단계를 포함하며, 환산된 점착 에너지의 변화가 가장 크게 측정되는 해중속도를 선별하고, 선별된 해중속도를 기준으로 전사 매개체의 점착조건을 결정한다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 10033274

부처명 지식경제부

연구사업명 청정제조기반 산업원천기술개발사업

연구과제명 대면적 점착 제어 공정 및 모듈화 기술 개발

주관기관 한국생산기술연구원

연구기간 2009.06.01 ~ 2014.05.31

특허청구의 범위

청구항 1

모재 상에 올려진 피전사체를 점착 기관 상에 전사시키기 위한 전사 매개체의 점착조건 결정방법에 있어서,

상기 전사 매개체를 특정하는 단계;

상기 전사 매개체를 압입(pull-in) 및 해중(pull-off)하는 압입자를 마련하는 단계;

상기 압입자가 상기 전사 매개체로부터 해중되는 해중속도(pull-off velocity)를 달리하여 최대 점착력을 측정하는 단계; 및

상기 측정된 최대 점착력을 점착 에너지(adhesion energy)로 환산하는 단계;

를 포함하며, 상기 환산된 점착 에너지의 변화가 가장 크게 측정되는 상기 해중속도를 선별하고, 상기 선별된 해중속도를 기준으로 상기 전사 매개체의 점착조건을 결정하는 것을 특징으로 하는 전사 매개체의 점착조건 결정방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 전사 매개체의 영률(Young's modulus)을 기준으로 상기 전사 매개체를 특정하는 것을 특징으로 하는 전사 매개체의 점착조건 결정방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 측정된 최대 점착력을 점착 에너지로 환산하는 단계에서,

$$\gamma = \frac{F^2(1-\nu)}{16\pi\mu a^3 [\beta(\nu, \tilde{h})]^2}$$

의 수학적식을 이용하며,

여기서, γ 는 상기 압입자 및 상기 전사 매개체 사이의 단위 면적당 점착 에너지, F 는 최대 점착력, ν 는 상기 전사 매개체의 푸아송비(Poisson's ratio), μ 는 상기 전사 매개체의 전단 탄성 계수(shear modulus), a 는 상기 압입자의 반경, h 는 상기 전사 매개체의 두께인 것을 특징으로 하는 전사 매개체의 점착조건 결정방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 수학적식에서 상기 최대 점착력은,

상기 압입자, 강성 모재, 상기 강성 모재 위에 올려진 탄성 필름을 구비하는 압입 모델에서 상기 압입자가 상기 탄성 필름에 압입된 후 해중될 때의 점착력(contact force: F_p)에 대응하고,

상기 점착력은

$$F_p = 4 \sqrt{\frac{\pi\mu a^3}{1-\nu}} \beta(\nu, \tilde{h})$$

의 수학적식으로 결정되며,

여기서, a 는 상기 압입자의 반경, μ 는 상기 탄성 필름의 전단 탄성 계수, δ 는 상기 탄성 필름의 압입

깊이, v 는 상기 탄성 필름의 푸아송비인 것을 특징으로 하는 전사 매개체의 점착조건 결정방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 전사 매개체가 폴리다이메틸실록산(PDMS)인 경우,

상기 점착력 에너지는 상기 해중속도 및 상기 전사 매개체의 영률에 비례하는 것을 특징으로 하는 전사 매개체의 점착조건 결정방법.

명세서

기술 분야

[0001] 본 발명은 피전사체를 전사하기 위한 전사 매개체의 점착조건을 결정하는 방법에 관한 것으로서, 보다 자세하게는 전사 매개체의 점착력을 조절하여 보다 용이하게 피전사체를 전사할 수 있는 전사 매개체의 점착조건 결정방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 플렉시블 디스플레이(flexible displays) 및 플렉시블 센서(flexible sensors)와 같은 유연한 전자 제품 산업이 크게 성장하고 있으며, 유연 전자 제품의 생산에서 무기 기반의 강성 기판 위에 전자 소자를 형성 후에 강성 기판을 유기 기반의 유연 기판(Flexible Substrate) 위에 실장하는 기술이나, 유연 기판 위에 전자 소자를 직접 형성하는 기술이 사용되고 있다.

[0003] 다만, 전자 소자가 탑재된 강성 기판은 취성(brittleness) 및 강성이 강하여 유연 전자 제품에 사용하는 것이 제한적이며, 유연 기판 위에 전자 소자를 직접 형성하는 기술은 고온 공정을 적용할 수 없는 제약이 있다.

[0004] 따라서, 강성 기판 위에서 전자 소자를 형성하고, 이를 유연 기판 위로 전사하는 기술이 활발히 연구되고 있다.

[0005] 이때, 강성 기판 위의 전자 소자를 전사 매개체에 붙일 때와 전사 매개체에 붙어 있는 전자 소자를 다시 유연 기판으로 전사할 때의 점착력을 조절하는 것은 효과적인 전사를 위해서 중요한 사안이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 모재 상에 올려진 피전사체를 점착 기판 상에 효과적으로 전사할 수 있는 전사 매개체의 점착조건 결정방법을 제공한다.

[0007] 본 발명은 전사 매개체의 점착 에너지의 변화를 이용하여 효과적인 전사를 구현할 수 있는 전사 매개체의 점착조건 결정방법을 제공한다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명의 예시적인 일 실시예에 따르면, 모재 상에 올려진 피전사체를 점착 기판 상에 전사시키기 위한 전사 매개체의 점착조건 결정방법은, 전사 매개체를 특정하는 단계, 전사 매개체를 압입(pull-in) 및 해중(pull-off)하는 압입자를 마련하는 단계, 압입자가 전사 매개체로부터 해중되는 해중속도(pull-off velocity)를 달리하여 최대 점착력을 측정하는 단계, 및 측정된 최대 점착력을 점착 에너지로 환산하는 단계를 포함하며, 환산된 점착 에너지의 변화가 가장 크게 측정되는 해중속도를 선별하고, 선별된 해중속도를 기준으로 전사 매개체의 점착조건을 결정한다.

[0009] 여기서, 모재라 함은 피전사체가 최초 올려져 있는 기판을 의미하며, 점착 기판은 피전사체가 모재로부터 옮겨져 안착되는 기판을 의미한다. 예를 들면, 모재는 피전사체가 형성되는 무기 기반의 강성 기판일 수 있으며, 점착 기판은 유연한 전자 제품에 실장되는 유연 기판일 수 있다. 다만, 모재 및 점착 기판은 피전사체가 옮겨 다니는 기판을 의미하는 것이지 그 재질이나 물성에 의해서 제한되는 것은 아니다.

[0010] 본 발명에서는 특정한 전사 매개체에 대한 압입자의 해중속도를 달리하면서 측정되는 최대 점착력을 점착 에

너지로 환산하고, 점착 에너지의 차이가 가장 크게 벌어지는 해중속도를 이용하여 전사 매개체의 점착조건을 결정할 수 있다.

[0011] 즉, 피전사체를 모재에서 점착 기관으로 전사할 때의 전사 매개체의 점착력의 차이를 해중속도를 조절하여 크게 벌릴 수 있으며, 이에 피전사체를 전사 매개체로부터 쉽게 붙이고 떨어뜨릴 수 있다.

[0012] 한편, 전사 매개체를 특정한다는 의미는 전사 매개체의 가로, 세로의 길이나 높이, 혹은 탄성과 같은 물성을 결정한다는 의미를 포함할 수 있다. 예를 들어, 전사 매개체의 영률(Young's modulus)을 기준으로 전사 매개체를 특정할 수 있다. 전사 매개체의 영률이 변경되면 동일한 해중속도에서도 전사 매개체의 점착력의 차이가 발생할 수 있다.

[0013] 전사 매개체에 접촉된 압입자가 떨어질 때 측정되는 최대 점착력은,

$$\gamma = \frac{F^2(1-\nu)}{16\pi\mu a^3 [\beta(\nu, \tilde{h})]^2}$$

[0014]

[0015] 의 수학적식 1에 의해서 점착 에너지로 환산될 수 있다.

[0016] 여기서, γ 는 압입자 및 전사 매개체 사이의 단위 면적당 점착 에너지, F 는 최대 점착력, ν 는 상기 전사 매개체의 푸아송비(Poisson's ratio), μ 는 전사 매개체의 전단 탄성 계수(shear modulus), a 는 압입자의 반경, h 는 전사 매개체의 두께이다.

[0017] 여기서, 수학적식 1은 이론적으로 계산된 압입 힘과 압입 깊이에 대한 관계식으로부터 점착력(contact force)의 계산식을 구하고, 상기 점착력에 대한 계산식으로부터 다시 최대 점착력과 점착 에너지에 대한 관계식을 도출하여 획득한 것이다.

[0018] 구체적으로, 수학적식 1의 도출 과정은 아래와 같다.

[0019] 먼저, 압입자, 강성 모재, 및 강성 모재 위에 올려진 탄성을 가지는 필름을 구비하는 압입 모델을 설정하고, 탄성 필름을 압입자로 압입할 때 얻어지는 압입 힘과 압입 깊이에 관한 이론적인 관계식으로부터 점착력의 계산식을 구하고, 다시 점착력과 점착력 에너지에 관한 관계식인 수학적식 2를 유도함으로써 도출된다.

[0020] 그리고, 상기 모델에서 시스템의 총 포텐셜 에너지(total potential energy)는 일정하다는 Kendall이 정립한 탄성체의 점착력에 대한 평형 이론(equilibrium theory of adhesion) 및 시스템의 표면 에너지는 압입자가 점착된 표면에서 떨어질 때에 발생하는 일로 모두 전환된다는 이론에 근거하여, 점착력은 사실상 최대 점착력을 의미할 수 있다.

[0021] 따라서, 이론적으로 계산된 압입 힘과 압입 깊이에 대한 관계식으로부터 최대 점착력과 탄성 에너지에 대한 관계식인 수학적식 1을 도출할 수 있다.

[0022] 상기 모델에 대한 수학적식2는 아래와 같다.

[0023] 압입 모델에서 압입자가 탄성 필름에 압입된 후 해중될 때의 점착력(contact force: F_p)은

$$F_p = 4 \sqrt{\frac{\pi\mu a^3}{1-\nu}} \beta(\nu, \tilde{h})$$

[0024]

[0025] 의 수학적식 2로 결정되며, 여기서, a 는 압입자의 반경, μ 는 탄성 필름의 전단 탄성 계수, δ 는 탄성 필름의 압입 깊이, ν 는 탄성 필름의 푸아송비이다.

[0026] 물론, 상술한 바와 같이, 이론적으로 계산되는 압입 힘과 실험적으로 계산되는 압입 힘 간의 오차가 있는지를 검증할 필요가 있다.

[0027] 그래야만, 실험 시에 해중속도나 전사 매개체의 영률과 같은 점착조건을 변경할 때, 수학적식 1을 통해서 이론적으로 계산된 탄성 에너지의 변화가 신빙성을 가질 수 있기 때문이다.

[0028] 여기서, 상기 수학적식 1의 구체적인 유도과정은 후술하기로 하며, 상기 수학적식 1에 대한 신빙성은 후에 제시되는 실험 데이터에 의해서 검증될 수 있다.

발명의 효과

- [0029] 본 발명의 전사 매개체의 점착조건 결정방법은 점착 에너지의 변화가 가장 크게 측정되는 점착조건을 결정할 수 있고, 이에 모재 상에 올려진 피전사체를 점착 기관 상에 효과적으로 전사할 수 있다.
- [0030] 본 발명의 전사 매개체의 점착조건 결정방법은 해중속도 및 전사 매개체의 영률 변화에 따른 전사 매개체의 점착 에너지의 변화를 파악함으로써, 효과적인 전사가 이루어지는 점착조건을 결정할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0031] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 압입 모델의 모식도이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 점착력 측정 장치의 개략도이다.
- 도 3은 압입 모델에서 푸아송비 및 $\bar{h} = h/a$ 에 대한 $\alpha(\nu, \bar{h})$ 의 그래프이다.
- 도 4는 압입 모델에서 푸아송비 및 $\bar{h} = h/a$ 에 대한 $\beta(\nu, \bar{h})$ 의 그래프이다.
- 도 5는 SiO₂ 및 PDMS의 변위-힘 그래프이다.
- 도 6은 100 μ m 두께의 PDMS 1:10에서 해중속도에 대한 최대 점착력 그래프이다.
- 도 7은 PDMS 각 혼합비에서 해중속도에 대한 최대 점착력 그래프이다.
- 도 8은 PDMS 각 혼합비에서 해중속도-최대 점착력 평균값의 추세선 그래프이다.
- 도 9는 압입 하중에 따른 최대 점착력 그래프이다.
- 도 10은 최대 압입 하중 100, 400, 800, 1200 μ N에서 해중속도-최대 점착력 그래프이다.
- 도 11은 각 최대 압입 하중에서 해중속도-최대 점착력 평균값의 추세선 그래프이다.
- 도 12는 각 최대 압입 하중에서 해중속도-최대 점착 에너지 평균값의 추세선 그래프이다.
- 도 13은 각각의 해중속도에 대해 압입 하중 100, 400, 800, 1200 μ N에서 구한 점착 에너지의 평균값 그래프이다.
- 도 14는 각 혼합비에 대해 해중속도 및 점착 에너지 관계 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0032] 이하 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세하게 설명하지만, 본 발명이 실시예에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 본 발명을 설명함에 있어서, 공지된 기능 혹은 구성에 대해 구체적인 설명은 본 발명의 요지를 명료하게 하기 위하여 생략될 수 있다.
- [0033] 먼저, 전사 매개체를 이용하여 모재 위에 형성된 피대상체를 효과적으로 점착 기관 위로 전사하기 위한 점착조건을 결정하기 위해서, 점착력을 직접 측정할 수 있는 장치가 필요하며, 점착력에 영향을 미칠 수 있는 인자를 찾기 위해서 해중속도와 압입 하중에 따라서 압입되는 깊이를 변화시켜 실험을 실시할 필요가 있다.
- [0034] 물론, 점착력을 측정하기 위한 장치로서 원자현미경(atomic force microscopes; AFM)이나 종래의 밀리미터(mm) 단위의 점착면적을 갖는 점착력 측정장치들이 있으나, 이는 최근 유연 전자 제품에 실장되는 마이크로(μ m) 단위의 전자 소자에 대한 점착력을 측정하기 위한 장치로는 그 점착면적이 너무 크거나 작은 문제가 있다.
- [0035] 이에 마이크로 단위의 점착 면적을 갖는 별도의 점착력 측정 장치를 구비하고 이를 이용하여 점착력을 측정한다.
- [0036] 점착력 측정 장치(100)는, 도 2에 도시된 바와 같이, 마이크로 스테이지(110), 초정밀 힘센서(120), 및 프루브(130)를 포함한다.
- [0037] 마이크로 스테이지는 0 내지 100 μ m를 움직일 수 있으며, 선형성은 0.1, 분해능은 2nm이며, 정전용량방식의 초정밀 힘센서는 맴스(micro electro mechanical systems) 공정을 이용하여 제작된 것으로 200 μ N까지 측정가능

하고, 분해능은 2μN이다. 그리고 초정밀 힘센서의 끝에 장착된 프루브의 단면의 길이는, 도 2에 도시된 대로, 50μm이다.

[0038] 마이크로 스테이지를 연결한 데이터수집장치(예를 들어, DAQ board)와 초정밀 힘센서를 제어하는 프로그램으로 랩뷰(LABVIEW)를 사용하며, 랩뷰의 프런트패널 구성은 실험을 실시하기 위해서 필요한 구성요소 및 시간에 따라 측정되는 힘 값과 변위에 따른 힘 값을 표현한 그래프 두 개를 실시간으로 볼 수 있는 화면으로 구성한다. 그리고 블록다이어그램에서는 힘센서의 출력 및 출력 값을 조정하는 부분과 초정밀 스테이지의 입력/출력 제어 및 출력 값을 조정하는 부분, 그리고 데이터를 저장하는 부분으로 크게 나누어 구성한다.

[0039] 상술한 바와 같이, 점착력 측정 장치를 구비하고 압입자, 강성 모재, 및 강성 모재 위에 올려진 탄성을 가지는 필름을 구비하는 압입 모델을 설정한다.

[0040] 이하 재료 표면에서의 압입 힘과 압입 깊이에 따른 점착력, 점착 에너지를 모델링 하는 과정을 설명한다.

[0041] 실제 초정밀 힘센서의 끝은 바닥이 평편한 정사각형이나, 원기둥이라는 가정 하에 점착 모델링을 실시한다. 점착 모델링은 먼저 압입 힘과 압입 깊이의 관계식을 먼저 계산하고, 이 관계식을 이용하여 탄성 필름에 저장되는 탄성에너지와 가해진 힘에 의해 발생한 일에 대한 관계식을 구한다. 이렇게 구해진 관계식에 다시 점착력에 대한 평형 이론을 적용시켜서 점착 일(work of adhesion)을 구할 수 있다.

[0042] 먼저, 끝이 평편한 원통형 강체 압입자의 끝이(flat-ended cylindrical tip) 강체 모재(rigid substrate) 위에 올라간 탄성 필름(elastic film)에 압입되는 모델은 도 1과 같다. 탄성 필름의 재료는 일반적인 폴리머(polymer)일 수 있다. 따라서, 원통형 강체와 강체 모재는 탄성 필름에 비하여 상당히 높은 영률을 가지고 있다고 가정한다. 또한 강체 모재와 탄성 필름은 완전히 접합 되어있다고 가정한다. 그리고 압입자 끝과 탄성 필름이 접촉할 때에 마찰이 없다고 가정한다. 원주 좌표계(r, θ, z)를 사용하며 이때 r 은 탄성 필름의 수평 방향, θ 는 압입자가 압입되는 방향, z 는 축과 초기 탄성 필름면의 방향과 이루는 각도이다. 도 1과 같이, 수직성분의 힘 F 가 작용하면 압입자는 축대칭을 이룬다. 그리고 r 방향에 대한 각도에 독립적이면서 0이 아닌 변위 성분 $u(r, z)$ 와 z 방향에 대한 각도에 독립적이면서 0이 아닌 변위 성분 $w(r, z)$ 은 Navier's 방정식을 만족시키는데 그것은 아래와 같다.

[0043] 수식 1

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = 0$$

[0044]

[0045] 수식 2

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$$

[0046]

[0047] 여기서 ν 는 탄성 필름의 푸아송비이고 ε 은 팽창률이다.

[0048] 팽창률 ε 은 다음과 같다.

[0049] 수식 3

$$\varepsilon = \frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

[0050]

[0051] 팽창률 ε 은 다음과 같이 체적력(body force)이 무시되면 조화함수(harmonic function)가 된다.

[0052] 수식 4

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} = 0$$

[0053]

[0054] 탄성 필름의 자유표면 위의 경계조건은 다음과 같다.

[0055] 수식 5

$$r < a \text{ 에서 } w(r, 0) = \delta, r > a \text{ 에서 } \sigma_{zz}(r, 0) = 0$$

[0056]

[0057] 수식 6

[0058] $r \geq 0$ 에서 $\sigma_{rz}(r, 0) = 0$

[0059] 그리고, 앞서 설정한 가정에서 탄성 필름과 모재는 완전하게 접합되어 있으므로,

[0060] 수식 7

[0061] $r \geq 0$ 에서 $u(r, h) = w(r, h) = 0$

[0062] 이것에 대한 해를 구하면 압입 하중과 압입 깊이의 관계식을 알 수 있다. 이것의 해를 구하기 위해서는 Levedev 와 Ufliand의 이론을 적용시키게 되는데 먼저 Hankel 변환식(transform)과 그것의 역 변환식(inverse transform)의 차수(order)인 ρ 는 다음과 같이 정의 된다.

[0063] 수식 8

[0064] $G_\rho(\lambda, z) = \int_0^\infty g(r, z) r J_\rho(\lambda r) dr$

[0065] 수식 9

[0066] $g(r, z) = \int_0^\infty G_\rho(\lambda, z) \lambda J_\rho(\lambda r) d\lambda$

[0067] 여기서 사용한 함수 $J_\rho(\lambda r)$ 는 ρ 차 1종 베셀 함수(ρ th order Bessel function of the first kind)이다.

압입자의 반경 a 를 이용하여 무차원수 $\bar{r} = r/a$ 와 $\bar{z} = z/a$ 를 만들고, Hankel 변환식의 first order $\bar{u}(\bar{r}, \bar{z})$ 와 zero order인 $\bar{e}(\bar{r}, \bar{z})$ 및 $\bar{w}(\bar{r}, \bar{z})$ 를 이용하여 식을 정리하면,

[0068] 수식 10

[0069] $\left(\frac{\partial^2}{\partial \bar{z}^2} - \lambda^2 \right) U_1(\lambda, \bar{z}) = \frac{\lambda}{1 - 2\nu} E_0(\lambda, \bar{z})$

[0070] 수식 11

[0071] $\left(\frac{\partial^2}{\partial \bar{z}^2} - \lambda^2 \right) W_0(\lambda, \bar{z}) = - \frac{1}{1 - 2\nu} \frac{\partial E_0(\lambda, \bar{z})}{\partial \bar{z}}$

[0072] 수식 12

[0073] $\frac{\partial W_0(\lambda, \bar{z})}{\partial \bar{z}} + \lambda U_1(\lambda, \bar{z}) = E_0(\lambda, \bar{z})$

[0074] 수식 13

[0075] $\left(\frac{\partial^2}{\partial \bar{z}^2} - \lambda^2 \right) E_0(\lambda, \bar{z}) = 0$

[0076] 위의 2차 미분 방정식의 일반 해는 다음과 같다.

[0077] 수식 14

[0078] $U_1(\lambda, \bar{z}) = [A_2(\lambda) \lambda \bar{z} + A_1(\lambda)(3 - 4\nu) + B_2(\lambda)] \cosh(\lambda \bar{z}) + [A_1(\lambda) \lambda \bar{z} + A_2(\lambda)(3 - 4\nu) + B_1(\lambda)] \sinh(\lambda \bar{z})$

[0079] 수식 15

$$W_0(\lambda, \tilde{z}) = - \left[A_1(\lambda) \lambda \tilde{z} + B_1(\lambda) \right] \cosh(\lambda \tilde{z}) - \left[A_2(\lambda) \lambda \tilde{z} + B_2(\lambda) \right] \sinh(\lambda \tilde{z})$$

[0080]

[0081] 수식 16

$$E_0(\lambda, \tilde{z}) = 2(1-2\nu)\lambda \left[A_1(\lambda) \cosh(\lambda \tilde{z}) + A_2(\lambda) \sinh(\lambda \tilde{z}) \right]$$

[0082]

[0083] 여기서, $A_1(\lambda)$, $A_2(\lambda)$, $B_1(\lambda)$, $B_2(\lambda)$ 는 경계조건(boundary condition) 및 응력식으로 구할 수 있다. 응력 $\sigma_{rz}(\tilde{r}, \tilde{z})$ 및 $\sigma_{zz}(\tilde{r}, \tilde{z})$ 은 Hankel 변환식으로 변환된 변수 $U_1(\lambda, \tilde{z})$, $W_0(\lambda, \tilde{z})$, $E_0(\lambda, \tilde{z})$ 으로 표현할 수 있고, 그 식은 각각 수식 17 및 18과 같다.

[0084] 수식 17

$$\begin{aligned} \sigma_{rz}(\tilde{r}, \tilde{z}) &= \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{z}} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{r}} \right) \\ &= \mu \int_0^\infty \left[\frac{\partial U_1(\lambda, \tilde{z})}{\partial \tilde{z}} - \lambda W_0(\lambda, \tilde{z}) \right] \lambda J_1(\lambda \tilde{r}) d\lambda \end{aligned}$$

[0085]

[0086] 수식 18

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(\tilde{r}, \tilde{z}) &= 2\mu \left(\frac{\nu \varepsilon}{1-2\nu} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{z}} \right) \\ &= 2\mu \int_0^\infty \left[\frac{\nu}{1-2\nu} E_0(\lambda, \tilde{z}) + \frac{\partial W_0(\lambda, \tilde{z})}{\partial \tilde{z}} \right] \lambda J_0(\lambda \tilde{r}) d\lambda \end{aligned}$$

[0087]

[0088] 여기서, μ 는 상기 탄성 필름의 전단 탄성 계수이고, μ 는 수식 19와 같이 탄성 필름의 영률 E 및 푸아송비 ν 를 이용하여 구할 수 있다.

[0089] 수식 19

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

[0090]

[0091] 경계 조건식인 수식 6 및 수식 7과 응력식인 수식 17, 그리고 Hankel 변환식인 수식 14 및 15를 이용하면 다음과 같은 수식 20 내지 수식 22를 얻을 수 있다.

[0092] 수식 20

$$A_1(\lambda) = - \frac{1 + \frac{2\kappa}{1+\kappa} \sinh^2(\lambda \bar{h})}{\lambda \bar{h} - \kappa \sinh(\lambda \bar{h}) \cosh(\lambda \bar{h})} B_1(\lambda)$$

[0093]

[0094] 수식 21

$$A_2(\lambda) = - \frac{2}{1+\kappa} B_1(\lambda)$$

[0095]

[0096] 수식 22

$$B_2(\lambda) = \frac{\frac{2}{1+\kappa} (\lambda \bar{h})^2 + \kappa \cosh^2(\lambda \bar{h})}{\lambda \bar{h} - \kappa \sinh(\lambda \bar{h}) \cosh(\lambda \bar{h})} B_1(\lambda)$$

[0097]

[0098] 이때, $\kappa = 3 - 4\nu$, $\bar{h} = h/a$ 이다. 여기서, 수식 20, 21, 22와 Hankel 역 변환식인 수식 15, 경계조건 수

식 5의 첫 번째 조건을 이용하면 다음과 같은 수식 23을 얻을 수 있다.

수식 23

$$\int_0^{\infty} D(\lambda) J_0(\lambda \bar{r}) d\lambda = \bar{\delta} \quad (\bar{r} < 1)$$

여기서, $D(\lambda) = \lambda B_1(\lambda)$ 이다. 그리고, 수식 18, 20, 21, 22 및 경계조건 수식 5의 두 번째 조건을 이용하면 다음과 같은 수식 24를 얻을 수 있다.

수식 24

$$\int_0^{\infty} \frac{D(\lambda) \lambda}{1 - G(\lambda)} J_0(\lambda \bar{r}) d\lambda = 0 \quad (\bar{r} > 1)$$

이때,

수식 25

$$G(\lambda) = \frac{(2\lambda \bar{h} - 1)^2 + \kappa^2 + 2\kappa e^{-2\lambda \bar{h}}}{4(\lambda \bar{h})^2 + 1 + \kappa^2 + 2\kappa \cosh(2\lambda \bar{h})}$$

이다. 수식 23 및 수식 24는 $D(\lambda)$ 를 가지는 이중적 분식이다. $D(\lambda)$ 의 관계식은 다음과 같은 수식 26의 형태를 지니게 되는데,

수식 26

$$D(\lambda) = \frac{2\bar{\delta}}{\pi} [1 - G(\lambda)] \int_0^1 \varphi(s) \cos \lambda s ds$$

여기서, $\varphi(s)$ 는 닫혀있는 적분구간 $[0, 1]$ 에서 연속적이며, 도함수를 가지는 함수이다. 수식 24는 $\varphi(s)$ 에 대해 독립적으로 만족하고, 수식 23은 다음과 같은 2종 Fredholm 적분식(Fredholm integral equation of the second kind)을 이용하여 정리할 수 있다.

수식 27

$$\varphi(s) - \frac{1}{\pi} \int_0^1 \varphi(x) [G_F(x+s) + G_F(x-s)] dx = 1$$

여기서, $G_F(s)$ 는 푸리에 코사인 변환식(Fourier cosine transform) $G(\lambda)$ 에 의해서 수식 28과 같이 정의된다.

수식 28

$$G_F(s) = \int_0^{\infty} G(\lambda) \cos(\lambda s) d\lambda$$

$\varphi(s)$ 에 대한 적분식 수식 27은 상술한 바와 같이 수치적으로 풀 수 있다. 상술한 과정을 통해서 압입자의 수직응력을 구하면,

수식 29

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(\tilde{r}, 0) &= \frac{\mu}{1-\nu} \int_0^{\infty} \frac{D(\lambda) \lambda}{1 - G(\lambda)} J_0(\lambda \tilde{r}) d\lambda \\ &= \frac{2\mu \bar{\delta}}{\pi(1-\nu)} \left[\frac{\varphi(1)}{\sqrt{1-\tilde{r}^2}} - \int_{\tilde{r}}^1 \frac{d\varphi(s)}{ds} \frac{ds}{\sqrt{s^2 - \tilde{r}^2}} \right] \end{aligned} \quad \text{이며,}$$

[0119] 여기서 2종 Fredholm 적분식의 해 $\varphi(s)$ 에 의해서 점착면에서 발생하는 점착력을 구하면 수식 30과 같다.

[0120] 수식 30

$$F = -2\pi a^2 \int_0^1 \bar{r} \sigma_{zz}(\bar{r}, 0) d\bar{r} = \frac{4a\mu\delta}{1-\nu} \alpha(\nu, \bar{h})$$

[0121]

[0122] 여기서, $\bar{h} = h/a$, 무차원 변수 $\alpha(\nu, \bar{h})$ 는 다음과 같은 수식 31로 정의된다.

[0123] 수식 31

$$\alpha(\nu, \bar{h}) = \int_0^1 \varphi(s) ds$$

[0124]

[0125] 수식 30에서 이미 아는 Sneddon's solution을 이용하면 무차원 요소 $\alpha(\nu, \bar{h})$ 만 남게 된다. $\varphi(s)$ 는 푸아송 비와 $\bar{h} = h/a$ 에 의존하는 함수이고, 수식 27을 통해서 수치적으로 구할 수 있다. 그리고, Lebedev와 Ufliand는 몇 가지의 푸아송비에 대한 $\alpha(\nu, \bar{h})$ 를 그래프를 그려 놓았는데 그 결과는 도 3에 도시된 바와 같다. 상술한 바와 같이, 점착력과 압입 깊이에 대한 관계식인 수식 20에서 실험적으로 구할 수 있는 압입자의 반경(a), 탄성 필름의 높이(h), 탄성 필름의 푸아송비(ν), 탄성 필름의 압입 깊이(δ), 탄성 필름의 전단 탄성 계수(μ)를 통해서 점착력을 구할 수 있다.

[0126] 이하, 상기 압입 모델에서 점착력과 최대 점착력간의 관계를 상세하게 설명한다.

[0127] Kendall은 시스템의 총 포텐셜 에너지는 일정하다는 탄성체 사이의 점착력에 대한 평형 이론을 정립하였다. 여기서는 평편한 강체와 탄성 필름 사이의 점착력 문제로 이끌어간다. 도 1의 압입 모델에서 총 포텐셜 에너지 Π 는 탄성 필름에 저장된 탄성에너지(elastic energy) U_e 와 가해지는 힘 F 에 의해서 발생하는 일 W , 표면 에너지(surface energy)는 $U_s = \pi a^2 \gamma$ 로 표현할 수 있다. 여기서 γ 는 압입자와 탄성 필름 사이의 점착 에너지(adhesion energy)이다. 압입 힘과 압입 깊이의 관계식에서 시스템의 총 포텐셜 에너지를 다음과 같은 수식 32로 표현할 수 있다.

[0128] 수식 32

$$\Pi = -\frac{F^2(1-\nu)}{8\mu a \alpha(\nu, \bar{h})} - \pi a^2 \gamma$$

[0129]

[0130] 에너지 상태로 접근하면 압입자가 탄성 필름에서 떨어질 때는(debonding) 재료의 저항을 이겨내는 것과 같다. 재료 저항은 표면에너지와 압입자가 탄성 필름에서 떨어지는 과정에서 관련되어 소실되는 다른 형태의 에너지를 포함한다. Kendall은 시스템의 표면에너지가 점착된 표면이 떨어질 때에 발생하는 일로 모두 전환된다고 주장한다. 그 이론에 따라서 임계조건(critical condition) $\partial \Pi / \partial a = 0$ 을 적용시켜 수식 32를 a 에 대하여 미분하여 정리하면,

[0131] 수식 33

$$2\pi a \gamma = \frac{F^2(1-\nu)}{8\mu a^2 \alpha(\nu, \bar{h})} \left[1 - \frac{\bar{h}}{\alpha(\nu, \bar{h})} \frac{\partial \alpha(\nu, \bar{h})}{\partial \bar{h}} \right] \text{이며,}$$

[0132]

[0133] 수식 33에서 점착력 F 는 최대 점착력을 의미하게 되고 식을 다시 정리하면 수식 34가 된다. 즉, 점착력 F 가 사실상 최대 점착력을 의미하는바, 이하 최대 점착력을 pull-off force로 기재한다.

[0134] 수식 34

$$F_P = 4 \sqrt{\frac{\pi \mu \gamma a^3}{1 - \nu}} \beta(\nu, \bar{h})$$

[0135]

[0136] 여기서 무차원 변수 $\beta(\nu, \bar{h})$ 는 다음과 같은 수식 35로 표현된다.

[0137] 수식 35

$$\beta(\nu, \bar{h}) = \frac{\alpha(\nu, \bar{h})}{\sqrt{\alpha(\nu, \bar{h}) - \bar{h} \frac{\partial \alpha(\nu, \bar{h})}{\partial \bar{h}}}}$$

[0138]

[0139] $\beta(\nu, \bar{h})$ 는 $\alpha(\nu, \bar{h})$ 에 관한 함수이고, $\alpha(\nu, \bar{h})$ 는 수치적으로 해를 구할 수 있으므로, $\alpha(\nu, \bar{h})$ 를 구하면 $\beta(\nu, \bar{h})$ 도 구할 수 있다. $\alpha(\nu, \bar{h})$ 와 마찬가지로 $\beta(\nu, \bar{h})$ 를 구한 그래프는 도 4에 도시된다.

[0140] 이하, 최대 점착력과 점착 에너지와의 관계를 밝힌 수식 34를 이용하여 전사 매개체의 영률 혹은 해중속도를 변경하면서, 전사 매개체의 영률 혹은 해중속도와 점착 에너지와의 관계를 밝혀본다.

[0141] 이하 실험에서는 전사 매개체를 폴리다이메틸실록산(PDMS)로 설정하여 실험한다.

[0142] 먼저, 실험을 진행하기 전에 측정할 재료를 준비하는데, 본 실험에서는 실리콘웨이퍼 위에 PDMS를 스핀코팅하여 PDMS의 점착력을 측정한다. PDMS 폴리머와 경화제 비율 1:10인 PDMS를 이용하여 100um를 실리콘웨이퍼 위에 올리고, 압입 하중에 대한 점착력 측정을 실험한다. 그리고, PDMS 폴리머와 경화제 비율을 1:5, 1:7.5, 1:10, 1:15로 섞은 PDMS(PDMS 혼합비는 PDMS 폴리머:경화제로 표기함)를 이용하여 5um를 실리콘웨이퍼 위에 올리고 PDMS 혼합비에 대하여 압입 하중 및 해중속도에 대한 점착력을 측정한다.

[0143] 실험은 먼저 수동스테이지를 이용하여 힘센서의 끝과 측정 시료간의 간격을 약 20~70um정도의 간격을 가지도록 조절한다. 그리고 마이크로 스테이지와 힘센서를 제어할 수 있도록 만든 LBAVIEW 프로그램을 이용하여 마이크로 스테이지를 조작한다. 마이크로 스테이지는 균일한 속도(40nm/s)로 움직여서 힘센서의 끝에 배치된 프루브(probe)를 PDMS에 접근시키며, 이를 압입(pull-in)이라고 명명하고, 제한시킨 압입 힘까지 압입을 시키고, 지정한 균일한 속도로 힘센서의 프루브를 PDMS에 떨어뜨리는데, 이를 해중(pull-off)라고 명명하여 사용한다. 실험 진행은 실리콘웨이퍼 위에 올라간 PDMS의 서로 다른 부분에 대한 점착력 측정을 하고, 각 조건에서 5회의 반복 실험을 실시한다. 그리고 PDMS는 PDMS 폴리머와 경화제의 혼합비에 따라서 영률이 변하는 특성을 가지고 있다. 여기에 대한 자료는 [표 1]에 나타난다. 본 실험에서는 100um 두께의 PDMS 1:10에 대해 점착력 측정을 시행하고, 5um 두께의 PDMS 각 혼합비에 대하여 점착력을 측정하는 방식으로 실험을 진행한다.

[0144] [표 1] PDMS 폴리머 및 경화제의 혼합비에 따른 영률의 변화

	밀도 (kg/m ³)	영률
PDMS 1:5	9.52*10 ²	8.68*10 ⁵
PDMS 1:7.5	9.18*10 ²	8.26*10 ⁵
PDMS 1:10	9.20*10 ²	7.50*10 ⁵
PDMS 1:15	9.87*10 ²	3.60*10 ⁵

[0145]

[0146] 먼저, PDMS의 점착력 측정 실험 전에 점착력 유무에 따른 점착력 실험을 실시한다. 점착력이 존재하는 PDMS 1:10과 점착력이 존재하지 않는 실리콘의 자연산화막(SiO₂)을 이용하여 측정한다. 그 결과는 도 5와 같이 실리콘의 자연산화막의 경우 PDMS의 경우와는 달리 압입 힘(pull-in force)와 해중 힘(pull-off force)이 측정

되지 않는다. 일반적으로 점착력이 있는 물질은 압입 시 인력이 측정되며 해중 시 최대 점착력이 측정되는데, PDMS의 측정결과 그러한 경향성이 잘 나타나는 그래프를 얻을 수 있다. 실험에서 진행된 PDMS에 대한 힘-변위 그래프는 각 실험당 도 5의 PDMS의 그래프와 유사한 형태로 나타난다.

[0147] 이하 해중속도에 따른 점착력을 측정한다.

[0148] 40~2000nm/s로 해중속도(pull-off velocity)를 증가시키며 측정한 최대 점착력(pull-off force)에 대한 결과는 도 6과 같다. 이때, 혼합비 1:10인 PDMS 100um만큼 올린 시료에 대한 측정한 결과이다. 실험은 각각의 해중속도에 대해 5회의 점착력을 측정하고, 그 평균값을 가지고 그래프를 그렸다. 도 6에서와 같이 해중속도가 증가할수록 최대 점착력이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 해중속도의 증가에 따라 최대 점착력은 58~110uN으로 측정된다. PDMS의 혼합비를 변화시켜가면서 해중속도에 대한 최대 점착력을 측정한 그래프는 도 7과 같다. 혼합비 1:5, 1:7.5, 1:10, 1:15 모두 해중속도가 커질수록 최대 점착력이 커지는 것을 알 수 있다. 혼합비가 커지면 전반적인 해중속도에 대해서 최대 점착력의 크기가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 해중속도에 대한 최대 점착력 변화량은 PDMS를 이용한 전자 소자 전사 공정에서 중요한 인자이다. 따라서, 도 8과 같이 PDMS 혼합비 1:5, 1:7.5, 1:10, 1:15의 해중속도-최대 점착력 그래프의 평균값을 가지고 각 그래프에서 1차 함수로 추세선을 그린 후, 그 기울기를 알아보았다. 해중속도-최대 점착력 그래프의 기울기는 PDMS 1:5에서 0.0175uN(nm/s), PDMS 1:7.5에서 0.0320uN(nm/s), PDMS 1:10에서 0.0358uN (nm/s), PDMS 1:15에서 0.0249uN(nm/s)임을 알 수 있다. 이러한 결과에서 혼합비 1:10일 경우에는 해중속도 40nm/s 일 때와 1000nm/s 일 때의 최대 점착력의 크기 차이(해중속도-최대 점착력 기울기)가 컸기 때문에 PDMS를 이용하여 전자 소자 전사 공정을 함에 있어서 혼합비 1:10인 PDMS가 가장 유리할 것으로 생각될 수 있으나, 단위 면적당 점착 에너지에 관련하여 서술하는 것이 보다 바람직할 것이다.

[0149] 이하 압입 하중 및 점착력의 관계를 실험적으로 파악한다.

[0150] 압입 하중을 100~1200uN 으로 증가시키며 측정한 최대 점착력에 대한 결과는 도 9와 같다. 이때, 혼합비 1:10인 PDMS 100um만큼 올린 시료에 대한 측정한 결과이다. 실험 진행 시 각 압입 하중에 대한 해중속도는 40um/s를 사용한다. 실험은 각각의 압입 하중에 대해 5회의 점착력을 측정하고, 그 평균값을 가지고 그래프를 그렸다. 도 9에서와 같이 압입 하중이 증가할수록 최대 점착력이 약간 증가하는 것을 알 수 있지만, 압입 하중이 최대 점착력 크기에 미치는 영향이 거의 없다고 판단된다. 여기서 압입 하중의 증가에 따라 최대 점착력은 62~72uN으로 측정되었다. 압입 하중에 따른 압입 깊이는 아래의 [표 2]와 같다. 압입 하중이 증가함에 따라서 압입 깊이가 선형적으로 증가하는 경향성이 있는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이, 점착 모델링에서 언급한 내용과 일치함을 알 수 있다. 그리고, 압입 하중에 대한 압입 깊이의 결과를 가지고 점착 모델링에 적용시킨 것은 추후에 다시 설명한다.

[0151] [표 2] 압입 하중에 따른 압입 깊이

압입하중 (un)	100	200	300	400	500	600
압입깊이 (um)	1.28	2.142	2.786	3.526	4.296	5.57
압입하중 (un)	700	800	900	1000	1100	1200
압입깊이 (um)	6.36	7.3	8.18	8.96	9.66	10.2

[0152] 도 9에서와 같이 압입 하중에 따른 PDMS의 최대 점착력의 크기가 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 하지만, 각각의 압입 하중에 대하여 해중속도가 변하는 모습이 다를 수 있기 때문에 압입 하중 100uN, 400uN, 800uN, 1200uN에 대하여 해중속도에 대한 최대 점착력을 측정하는 실험을 실시하였다. 압입 하중100uN, 400uN, 800uN, 1200uN에 대하여 해중속도에 대한 최대 점착력을 측정하는 실험결과는 도 10과 같다. 해중속도에 대한 최대 점착력 변화는 해중속도가 증가하면 최대 점착력이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 압입 하중 100uN, 400uN, 800uN, 1200uN의 각각의 해중속도에서 압입 하중이 커지면 최대 점착력의 크기도 증가하지만, 최대 점착력 증가량은 상당히 작다는 사실을 알 수 있다. 이러한 사실을 더욱더 잘 확인시켜주는 그래프는 도 11과 같다. 도 11은 압입 하중 100uN, 400uN, 800uN, 1200uN의 각각의 압입 하중에서 해중속도에 대한 최대 점착력의 평균값에 대한 추세선 그래프이다. 그래프에서와 같이 각각의 압입 하중에서 해중속도에 대한 최대 점착력의 평균값의 기울기는 압입 하중 100uN일 때 0.0271uN/(nm/s), 400uN일

때 0.0301uN/(nm/s), 800uN일 때 0.0258uN/(nm/s), 1200uN일 때 0.0264uN/(nm/s)이다. 이러한 결과는 각각의 압입 하중에서 해중속도에 대한 최대 점착력의 평균값의 기울기의 변화가 거의 없다는 것을 확인시켜준다. 따라서 압입 하중은 최대 점착력 변화 및 최대 점착력의 크기에 독립적인 인자라고 할 수 있다. 그리고 이 결과는 추후에 설명할 압입 힘과 압입 깊이의 관계식으로도 파악할 수 있다.

[0154] 이하 상술한 실험 결과와 점착 에너지와의 관계를 파악한다.

[0155] 먼저, 점착력에 대한 수식 30에서 $\alpha(\nu, \bar{h})$ 값을 푸아송비 ν 와 탄성 필름의 두께 h , 그리고 압입자의 반경 a 로 계산되는 $\bar{h} = h/a$ 를 가지고 도 3에서 찾는다. 본 실험에서 a 는 [표 3]에서와 같이 압입 깊이에 따라 압입면적이 변화하기 때문에 각각의 경우에 대한 a 를 사용한다. 다만, a 는 크게 변하지 않기 때문에 평균값을 이용하여 $\alpha(\nu, \bar{h})$ 를 찾았는데, 도 3에서 찾은 값은 $\alpha(\nu, \bar{h}) \approx 1.1$ 이다. 여기서, 수식 30을 이용하여 $\alpha(\nu, \bar{h}) \approx 1.1$ 를 대입하고 식을 정리하면 수식 36과 같다.

[0156] 수식 36

$$F = \frac{4.4a\mu\delta}{1-\nu}$$

[0157]

[0158] 수식 36에 a 를 대입하고, 수식 19를 이용하여 푸아송비는 0.499를 넣어서 전단 탄성 계수 μ 를 계산하고 수식 36에 대입한다. 이렇게 압입 힘-압입 깊이 모델링에서 이론적으로 구한 값을 계산하여 실험값과 비교하면 [표 4]와 같다. 여기서 오차율은 다음과 같이 정의하였다. 아래 수식 37에서 이론적 압입 힘은 실험 시 측정된 압입 깊이를 가지고 압입 모델에 대입하여 구한 압입 힘을 의미한다.

[0159] 수식 37

$$\frac{\text{실험시 가한 압입힘} - \text{이론적 압입힘}}{\text{실험시 가한 압입힘}} \times 100$$

[0160]

[0161] [표 3] 압입 힘에 대한 압입 깊이, 압입면적, 및 압입자 반경 a

압입 힘 (uN)	100	200	300	400	500	600
압입깊이 (um)	1.28	2.14	2.79	3.53	4.30	5.57
압입면적 (um ²)	2564	2607	2639	2676	2715	2779
압입자 반경 (a)	35.81	36.10	36.33	36.58	36.84	37.27
압입 힘 (uN)	700	800	900	1000	1100	1200
압입깊이 (um)	6.36	7.30	8.18	8.96	9.66	10.20
압입면적 (um ²)	2818	2865	2909	2948	2983	3010
압입자 반경 (a)	37.54	37.85	38.14	38.39	38.62	38.80

[0162]

[0163] [표 4] 실험 시 가한 압입 힘 및 압입 깊이를 이용하여 이론적으로 계산된 압입 힘의 비교

실험 시 가한 압입 힘(un)	압입깊이를 가지고 이론을 통해 계산된 압입 힘(un)	오차율(%)
100	-100.80	-0.8
200	-170.14	14.9
300	-222.66	25.8
400	-283.76	29.1
500	-348.21	30.4
600	-456.74	23.9
700	-525.56	24.9
800	-607.85	24.0
900	-685.97	23.8
1000	-757.16	24.3
1100	-820.75	25.4

[0164]

[0165] 100uN~1200uN까지 오차율의 평균은 22.7%이다. 이는 마찰에 의한 손실이 존재하고, 정사각형 모델을 원기둥 모델로 변환하면서 발생한 오차라고 판단된다. 하지만, 전체적인 경향성과 상대적으로 큰 오차를 보이지 않았으므로 성공적인 모델링을 했다고 판단된다.

[0166]

앞서 살펴본 바와 같이, 압입 힘과 압입 깊이에 대한 실험값을 토대로 점착 모델링의 타당성을 검증하였다. 이하, 압입 힘과 압입 깊이에 대한 관계식을 통해 점착력 평형 이론을 근거로 한 점착 에너지 모델을 이용하여 실험결과를 적용시켜 점착 에너지를 계산하고, 이에 대한 경향성을 파악한다.

[0167]

먼저 수식 30에서 평형조건이면, $G=\gamma$ 이며, 식을 정리하면,

[0168]

수식 38

$$\gamma = \frac{F^2(1-\nu)}{16\pi\mu a^3 [\beta(\nu, \bar{h})]^2}$$

[0169]

[0170]

수식 38에서 평형조건이므로 점착력은 최대 점착력이다. 그리고, $\beta(\nu, \bar{h})$ 는 도 4를 통해 구할 수 있는데 본 실험에서 $\beta(\nu, \bar{h}) \approx 1.1$ 으로 두고 계산을 수행할 수 있다. 나머지 항들인 ν , μ , 및 a 의 경우에도 측정시료가 결정되면 바로 구할 수 있는 값들이며 점착 시스템의 기본 조건에서 알 수 있는 값이다. 따라서 본 실험에서는 측정된 결과를 가지고 서로 다른 압입 힘에 대해서 해중속도와 점착 에너지의 관계 구하고, 서로 다른 혼합비의 PDMS에 대해서 해중속도와 점착 에너지의 관계를 구하여 그 결과를 분석한다.

[0171]

먼저, 서로 다른 압입 힘에 대해서 해중속도와 점착 에너지의 관계는 도 12과 같다. 도 10 및 도 11에서 분석한 것을 따르면, 압입 힘은 점착력에 독립적인 인자이다. 따라서, 해중속도와 점착 에너지의 관계 역시 서로 다른 압입 힘에 대해서 같은 결과가 나와야 한다. 수식 38을 통해 서로 다른 압입 힘에 대해서 해중속도와 점착 에너지의 관계는 압입 힘에 무관하게 해중속도의 영향만 받는 것을 확인할 수 있다. 도 12에서처럼 각 해중속도에 대해 거의 비슷한 점착 에너지가 도출되어 각각의 압입 하중에 대해 측정된 점착 에너지의 평균값을 가지고 도 13에서와 같이 그래프를 그렸다. 이것을 통해 점착 에너지는 해중속도에 대하여 선형적으로 증가하는 사실을 도출하였다. 도 7 및 도 8을 통해서 PDMS의 각각의 혼합비에 대해서 해중속도와 점착력의 관계를 알아보았는데, 이 경우에는 PDMS 1:10 일 때 해중속도-최대 점착력 기울기가 가장 컸지만, 점착 에너지 변화와 혼합비 변화의 관계를 파악하기 위해서 PDMS의 각각의 혼합비에 대해서 해중속도와 점착 에너지의 관계를 알아보았다. 그 결과는 도 14와 같다. 혼합비가 증가할수록 점착 에너지가 커지는 것을 알 수 있다. 해중속도 증가에 대한 점착 에너지 변화량이 가장 큰 것은 혼합비가 가장 높은 1:15일 경우이다. 그

런데 PDMS를 이용한 전자 소자 전사 공정에 있어서 단위 면적당 점착 에너지 변화량이 클수록 점착력 크기가 변화되는 폭이 크다. 이는 수식 38에서 유추할 수 있는 내용이다. 게다가, 본 실험에서는 약 수십 마이크로미터 면적에 대해서 점착력을 측정하였으므로, 다른 크기의 전자 소자에 있어서 본 연구를 적용시키기에 점착 에너지를 기준으로 결론을 제시하는 것이 합당하다. 게다가, 해중속도-최대 점착력 측정에서 PDMS 1:10의 해중속도-최대 점착력의 기울기는 0.0358, PDMS 1:15에서는 0.0249였는데, PDMS 1:10의 해중속도-점착 에너지의 기울기는 0.000001이고, PDMS 1:15에서는 0.000002로 2배 차이가 났다. 이렇게 PDMS의 서로 다른 혼합비에 대한 해중속도-최대 점착력의 기울기의 차이는 해중속도-점착 에너지의 기울기의 차이보다 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 PDMS의 혼합비가 높을수록, 다시 말해서 PDMS의 영률이 작아질수록 PDMS를 이용한 전자 소자 전사 공정에 유리하다.

[0172] 실험결과를 정리하면, 점착 에너지(adhesion energy)에 대한 해중속도(pull-off velocity), 압입하중, 재료의 영률(Young's modulus)의 관계를 파악하고 대면적 점착 시스템에서 가장 효과적인 조건을 찾기 위해 연구를 진행하였다. 따라서 효과적으로 해중속도, 압입하중을 측정하기 위해서 기존의 점착력 측정 장비의 한계를 인지하여 새로운 점착력 측정 시스템 제작하고, 이를 이용하여 최대 압입 하중의 증가 및 해중속도의 증가에 대한 점착력 측정을 하였다. 또한 PDMS가 혼합비에 따라 재료특성이 달라지는 점을 착안하여 경화제의 혼합비를 달리하여 해중속도의 증가에 대한 점착력을 측정하였다. 그리고 실험결과를 통해서 점착에너지에 관계된 인자를 파악하고 효과적으로 점착력을 예측하기 위해서 수치적 점착 시스템을 모델링을 하여 점착에너지를 구하였다.

[0173] 점착 시스템의 수치적 모델링을 통해서 점착에너지와 해중속도, 압입 깊이, 영률에 대한 관계 파악하였다. 결과적으로 점착 시스템의 수치적 모델링으로 계산된 압입 힘은 실제 제어된 압입 힘과 유사하였고, 이를 통해 점착 모델링의 신빙성을 확인할 수 있었다. 또한 점착에너지와 해중속도와 선형적 비례 관계가 있음을 알 수 있었다. 그리고 압입 깊이와 최대점착력은 상호 무관하며 PDMS의 혼합비가 증가할수록 최대 점착력은 커지며 또한 점착 에너지도 증가하는 것을 파악하였다. 또한 깊이와 최대 점착력 에너지의 크기와 기울기는 혼합비가 증가할수록 커지는 관계를 파악하였다. 이러한 결과를 토대로 PDMS를 이용한 전자 소자 전사에 혼합비가 높은, 다시 말해서 낮은 영률을 갖는 PDMS가 점착력 제어에 유리하다라는 결과를 도출할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 유연 모재에 전자 소자를 전사하는 공정을 보다 효과적으로 제어할 수 있을 것이다.

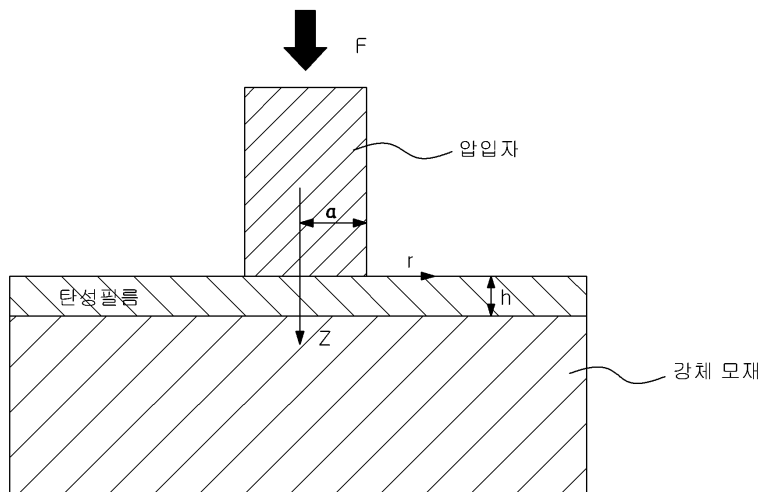
[0174] 상술한 바와 같이, 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만 해당 기술분야의 숙련된 당업자라면 하기의 청구범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

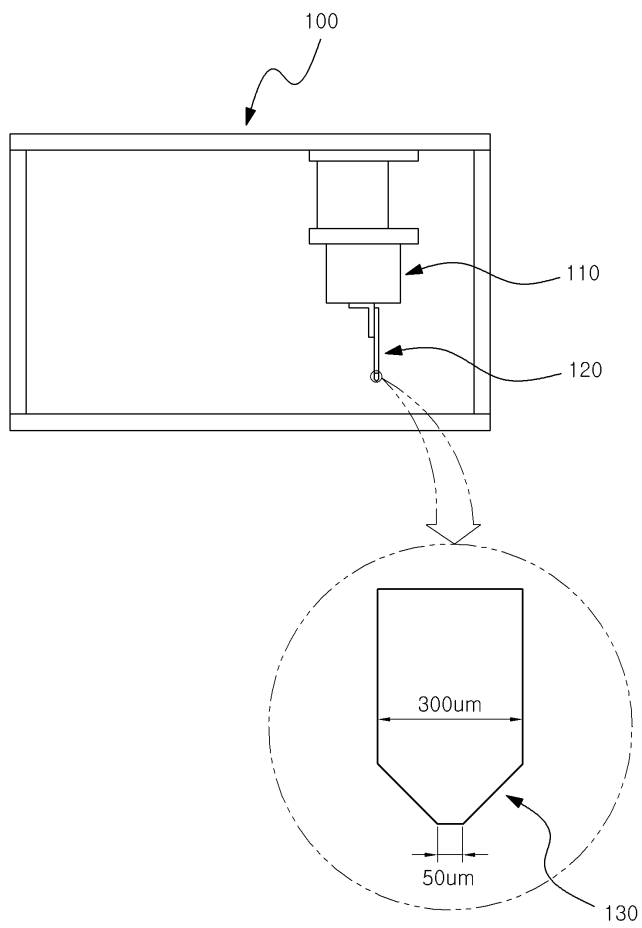
[0175] 100 : 점착력 측정 장치 r : 탄성 필름의 수평 방향(um)
 Θ : 압입자가 압입되는 방향(um) z : 축 및 탄성 필름면 방향의 각도(rad)
F : 압입 하중(uN) v : 푸아송비
 ϵ : 팽창률 α : 압입자의 반경(um)
 μ : 전단 탄성 계수(Pa) h : 탄성 필름의 두께(um)
 δ : 압입 깊이(um) Π : 시스템의 총 포텐셜 에너지(J)
UE : 탄성 필름에 저장된 탄성 에너지(J)
W : 압입 하중에 의해서 발생하는 일(J)
US : 표면 에너지(J)
 γ : 압입자 및 탄성 필름 사이의 단위 면적당 점착 에너지(J/m^2)

도면

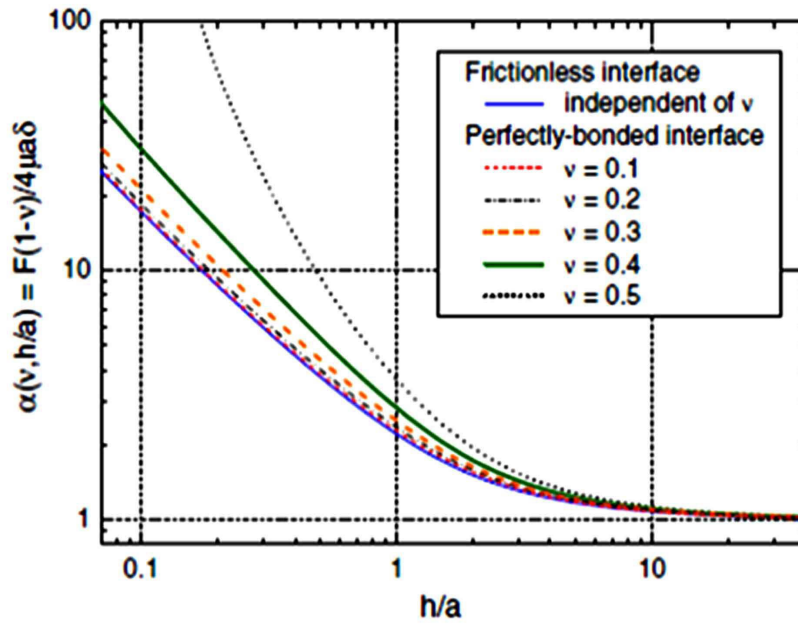
도면1



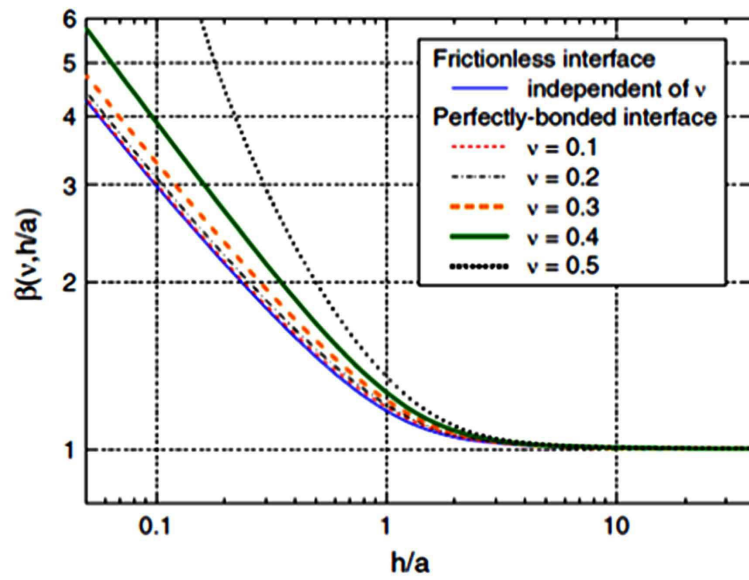
도면2



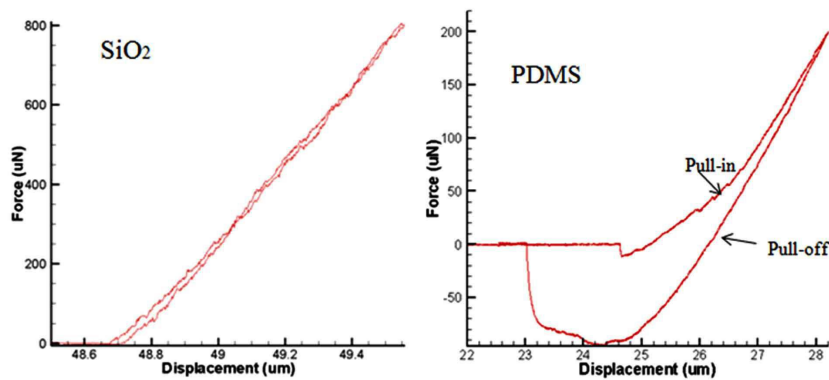
도면3



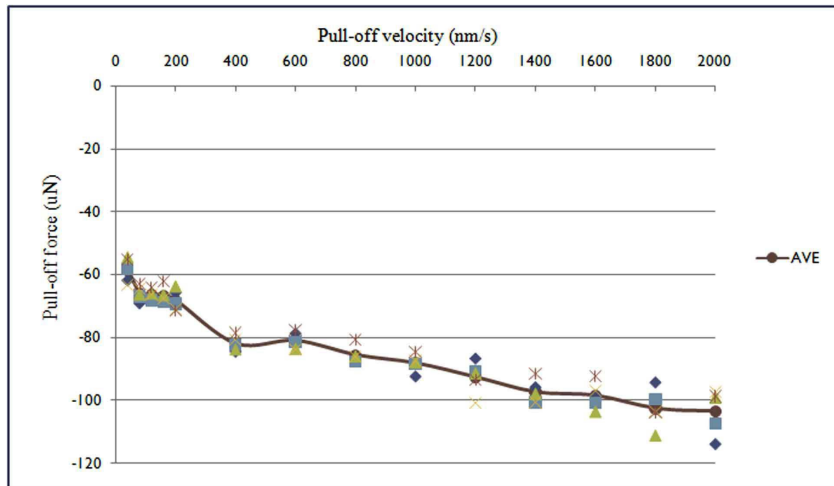
도면4



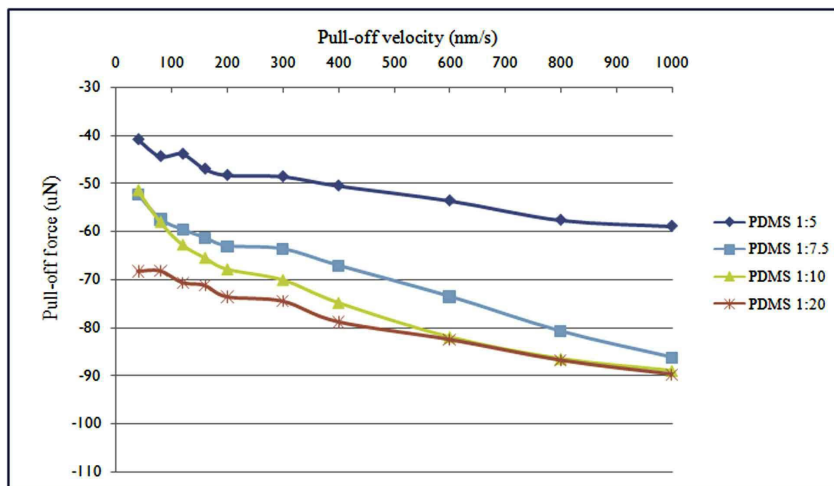
도면5



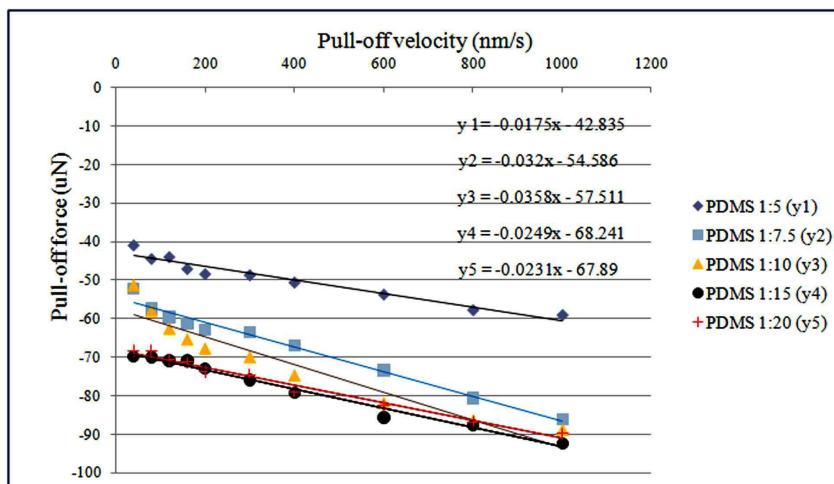
도면6



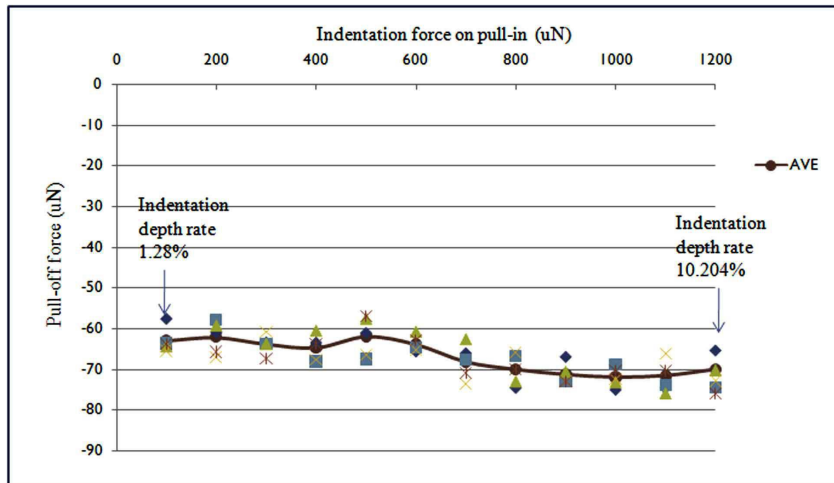
도면7



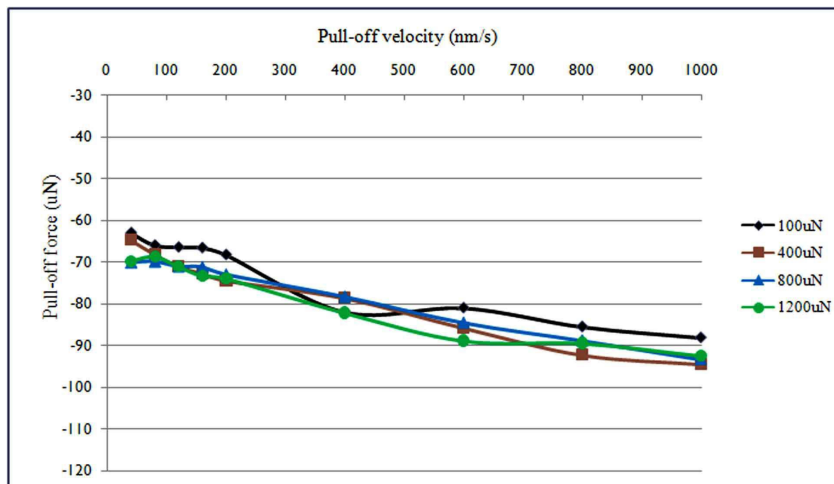
도면8



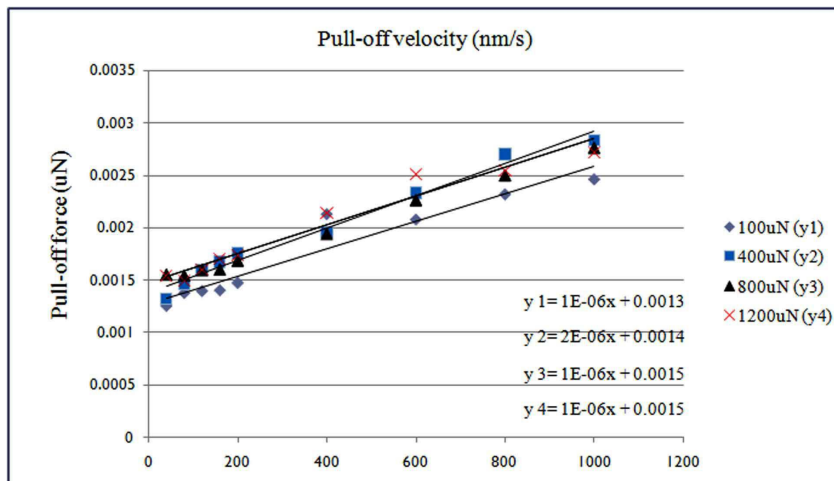
도면9



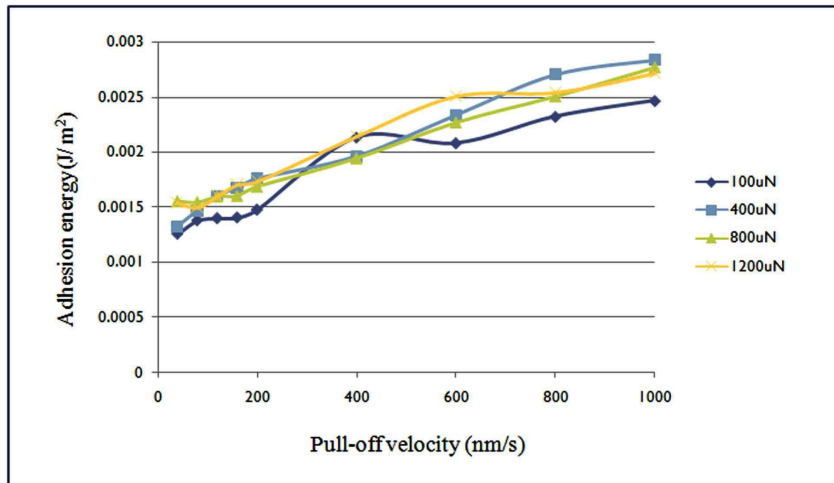
도면10



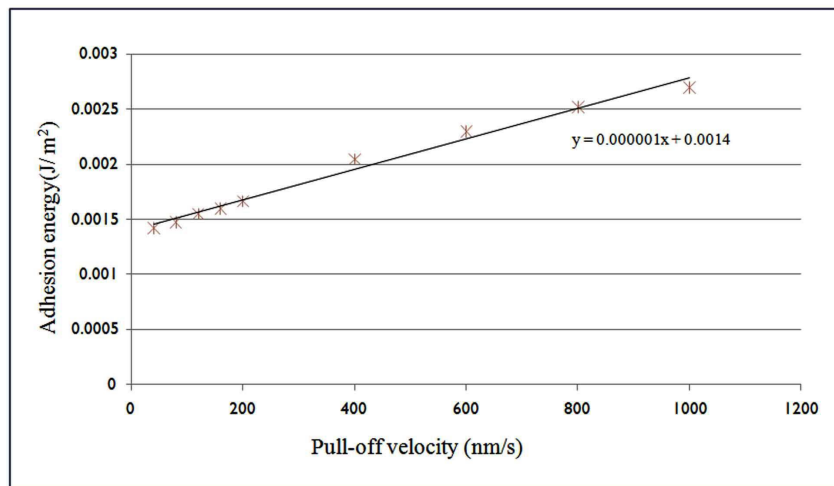
도면11



도면12



도면13



도면14

