

## RESEARCH

# 진동-마찰 기반의 마이크로입자 정렬을 통한 4-INCH 스케일 신축성 비등방성 도전성 필름(S-ACF) 제조

곽현수<sup>1</sup>, 장세윤<sup>2</sup>, 이안나<sup>1\*</sup>

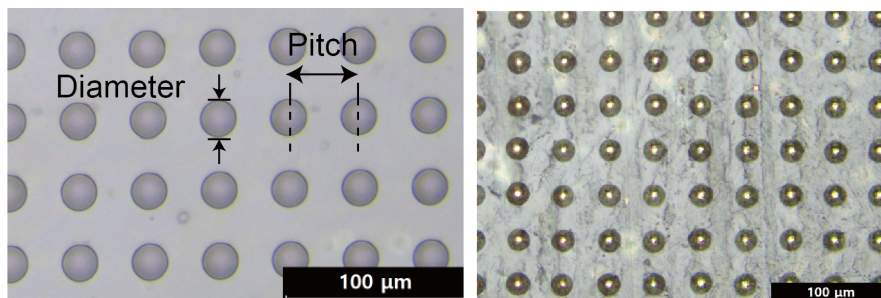
<sup>1</sup>포항공과대학교 기계공학과, <sup>2</sup>R&D Center, MiDAS H&T Inc.

## Fabrication of 4-Inch-Scale Stretchable Anisotropic Conductive Films via Oscillated-Rubbing-Induced Microparticle Arrangement

Hyunsu Kwak<sup>1</sup>, Seyun Chang<sup>2</sup>, Anna Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang, Korea

<sup>2</sup>R&D Center, MiDAS H&T Inc., Seoul, Korea



### ABSTRACT

Stretchable anisotropic conductive films (S-ACFs) provide unidirectional electrical conduction while maintaining flexibility and stretchability, making them promising for wearable electronics and soft interconnects. Their functionality relies on precise alignment of conductive microparticles (MPs) and stable electrical pathways under deformation. In this study, we demonstrate a 4-inch-scale fabrication method for S-ACF by combining hot-embossing imprinting and oscillatory rubbing-induced MPs alignment. Large-area micro-patterned templates are fabricated by hot embossing a thermoplastic elastomer (SEBS-g-MA) near its glass-transition temperature, enabling high-fidelity replication of micro-well arrays. Subsequently, a dry mechanical rubbing process was applied with controlled normal pressure and oscillatory shear force to drive randomly distributed Au-MPs into the pre-defined wells within seconds. The optimal rubbing condition-defined by the balance between sliding and rolling forces-enabled uniform particle arrangement across the entire 4-inch area without template damage or particle loss. The resulting S-ACFs exhibited stable conductivity and mechanical durability under repeated strain. This simple and scalable dry process



provides a high-throughput route for precise microparticle assembly and offers a promising platform for large-area stretchable electronic packaging.

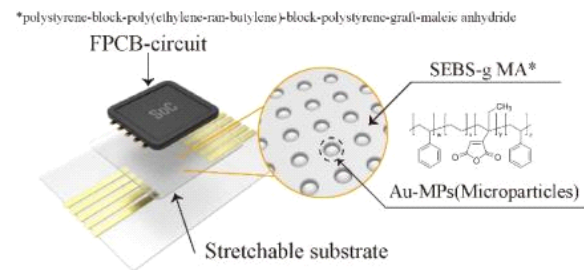
Key Words: Stretchable anisotropic conductive film, Microparticle assembly, Stretchable electronics, Hot-embossing imprinting

\*Correspondence: annalee@postech.ac.kr

## 1. 서론

반도체 패키징 기술은 고성능·고집적화된 전자소자의 요구에 따라 급속히 진화하고 있다. 리드프레임 [1] 구조에서 플립칩(FC-BGA, FC-CSP)[2, 3], 시스템-인-패키지(Sip-PoP) [4]를 거쳐, 최근에는 팬아웃 웨이퍼 레벨 패키징 (Fan-Out WLP)[5] 및 어드밴스드 패키징[6,7]까지 발전하고 있다. 이와 같은 변화는 패키지 면적의 증가와 회로 선평의 미세화를 동시에 수반하며, 결과적으로 미세 피치 및 서브-10  $\mu\text{m}$  수준의 솔더볼 연결 기술[8,9]이 동시에 요구되고 있다. 이러한 패키징 플랫폼은 주로 금속, BT 레진, FR-4, 유리와 같은 경질·취성 기판을 사용하고 있다. 이런 단단한 기판은 본질적으로 외력 및 변형에 대한 대응이 부족하고 웨어러블·소프트 일렉트로닉스 등 신축성이 요구되는 응용 분야의 확장으로는 어렵다.

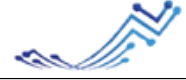
웨어러블 및 신축성 디바이스의 패키징 기술에 도전하기 위한 대안으로 신축성 기반의 비등방성 도전성 필름(stretchable anisotropic conductive film, S-ACF) [10,11]이 최근에 주목받고 있다. Fig. 1에서 S-ACF는 일반적으로 신축성 기판 위에 전도성 마이크로 입자를 일정한 간격과 균일한 패턴으로 정렬된 구조로 이루어진다. 해당 상부에는 연성 인쇄회로 혹은 반도체 칩이 접합되어, 전도성 입자 간의 수직 연결을 통해 전류가 한 방향으로만 흐르도록 설계되어 있다. 따라서 필름 전체가 늘어나거나 휘어지는 상황에서도 전도 경로가 안정적으로 유지되며 신호 간 간섭을 최소화할 수 있다. 이러한 구조적 특성 덕분에 S-ACF는 기계적 신축



**Fig. 1.** Schematic illustration of the stretchable anisotropic conductive film (S-ACF) structure.

성과 전기적인 회로 역할을 동시에 구현할 수 있어, 고해상도 신호 라우팅이 요구되는 웨어러블 전자소자, 소프트 로봇틱스, 바이오 인터페이스 등에서 유망한 인터커넥트/패키징 기술로 평가된다.

S-ACF의 상용화를 위해서는 크게 대면적의 마이크로 패터닝 기술과 미세입자의 정렬 기술이 필수적으로 확보되어야 한다. 기존의 포토리소그래피[12] 혹은 몰드 전사 기반 공정[13]을 통한 패터닝 기술은 비용과 시간이 소요가 되고 수-인치 스케일로 커지는 면적에 패턴 간 형상 편차가 누적되어 균일도를 확보하기 어렵다. 또한 미세 입자들을 일정한 간격으로 조절 및 배치하는 것 역시 기술적인 난이도를 요구한다. 기존의 모세관력[14], 전기장[15] 혹은 수작업 핸들링[16]에 의존하는 입자 정렬 방식은 공정 속도가 느리고, 입자 응집이나 오염, 재현성 저하 등의 문제가 발생하여 확장성과 생산성이 제한된다. 결과적으로 S-ACF의 상용화를 위해선 대면적의 마이크로 패터닝 제조 방법과 고속 및 고정밀의 입자 정렬 기술이 동시에 달성될 수



있는 공정 기술이 필요하다.

본 연구에서는 저온에서의 접착이 가능하고 우수한 신축 특성을 지니는 열가소성 고분자인 SEBS-g-MA를 기반으로, 핫 엠보싱 마이크로 임프린팅 공정을 이용하여 대면적 스케일로 미세 패턴링 템플릿을 제작하였다. 나아가, 건식 상태의 입자에 기계적인 진동을 통해 마찰력 및 전단력을 인가함으로써, 수십 초 이내에 입자들이 미세 패턴 내에서 빠르고 균일하게 정렬되는 새로운 개념의 기계적 구동 기반의 S-ACF 제조 공정을 제안한다.

## 2. 연구방법

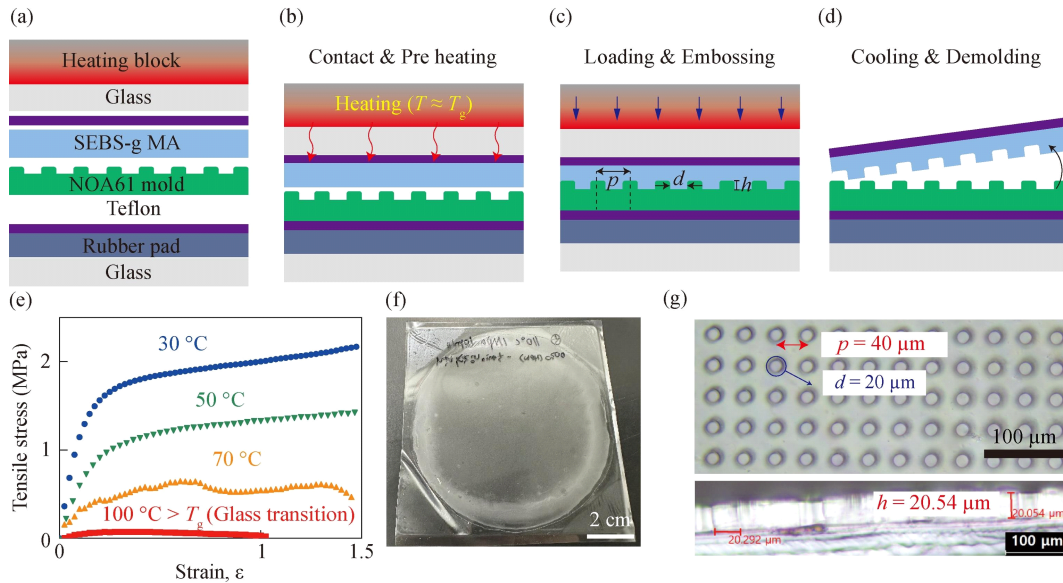
### 2.1. SEBS-g MA 필름 제조

본 연구에서 사용된 4인치 크기의 SEBS-g-MA(poly-

styrene-block-poly(ethylene-ran-butylene)-block-polystyrene-graft-maleic anhydride) 필름은 (주)가드넥에 의뢰하여 제작하였다. 전사 코팅(transcription coating) 방식을 이용하여 미점기관 위에 SEBS-g-MA 필름과 PET 이형 필름이 적층된 구조로 제작하였으며, SEBS-g-MA 필름의 두께는 약 20  $\mu\text{m}$ , PET 이형 필름은 약 40  $\mu\text{m}$ 이다.

### 2.2. 핫 엠보싱(Hot Embossing)을 통한 대면적 마이크로 임프린팅 제조 방법

대면적 마이크로 임프린팅을 구현하기 위해, 본 연구에서는 고온·고압 조건에서의 핫 엠보싱 공정을 도입하였다. 공정의 개략적인 절차는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 임프린팅을 위한 핫프레스 장비(QM-900 MA, Qumasys)와 임프린팅 적층 구조를 보



**Fig. 2.** Schematic illustration of the hot embossing process for fabricating large-area micropatterned SEBS-g-MA templates. The process involves (a) stacking of the heating block and mold assembly, (b) pre-heating near the glass transition temperature ( $T \approx T_g$ ), (c) applying uniform pressure to replicate the mold features, and (d) cooling and demolding to obtain the micropatterned surface. (e) Thermo-mechanical behavior of SEBS-g-MA measured by uniaxial tensile test for various temperatures (f) Photograph of the embossed SEBS-g-MA film over a 4-inch area. (g) Optical micrograph of the micro-patterned array with a pitch (p) of 40  $\mu\text{m}$ , diameter (d) of 20  $\mu\text{m}$ , and height (h) of 20  $\mu\text{m}$ .



여준다. 하부에서 상부로 차례대로 내열 유리(glass substrate), 탄성 러버 패드(rubber pad, PDMS; curing agent:base=1:20 v/v), 테프론 필름, NOA61 몰드, SEBS-g-MA 필름, 테프론 필름, 상부 내열 유리 및 히팅 블록으로 구성된다. 러버 패드는 가압 시 전면에 균일한 압력이 인가되도록 하여, 미세 패턴 형성 과정에서 압력 편차를 최소화하는 역할을 수행한다.

임프린팅을 위한 공정 온도는 상부 히팅 블록을 통해 제어되며, Fig. 2(b)에 나타난 것처럼 SEBS-g-MA 필름의 열에 의한 성형을 하기 위하여 유리전이온도(glass transition temperature,  $T_g$ ) 이상으로 온도를 증가시켰다.

여기서 SEBS-g-MA의  $T_g$ 를 실험적으로 관측하기 위하여 열-기계적 거동을 분석하였다. Fig. 2(e)는 해당 필름의 인장시험 결과이며 온도에 따라 그 결과를 나타낸다. 그 결과, 약 100 °C 부근에서  $T_g$  값이 관측되었고 해당 구간에서 인장응력이 급격한 감소와 함께 변형률이 급격하게 증가하면서 점성 유체와 유사한 거동을 보임을 확인하였다. 따라서, 히팅 블록의 온도는 이보다 충분히 큰 온도로 설정하였고 엠보싱 전 필름에 균일한 온도 분포를 형성하기 위해 약간의 접촉을 통하여 예열 단계를 수행하였다.

이후, Fig. 2(c)에 따르면 핫프레스 머신의 압력을 조절하여 약 8~8.5 MPa의 균일한 압력을 인가하고 약 3분간의 로딩 및 엠보싱 단계를 진행하였다. 이 과정을 통해 NOA 몰드의 미세 패턴의 형상(pitch  $p$ , diameter  $d$ , height  $h$ )이 SEBS-g-MA 표면에 정밀하게 전사되었다. Fig. 2(d) 과정은 압착이 완료된 후 상온에서 냉각(cooling)하여 충분한 시간이 지나 재경화가 완료되면 탈형(demolding)을 진행한다. 이후 최종적으로 마이크로 패터닝이 형성된 템플릿을 얻었다.

Fig. 2(f)는 핫 엠보싱을 통해 제작된 4-inch급 대면적 SEBS-g-MA 패턴 템플릿의 실물 사진을 보여준다. 또한 Fig. 2(g)의 광학현미경 이미지를 통해 설계된

NOA 몰드의 피치( $p \approx 40 \mu\text{m}$ ), 직경( $d \approx 20 \mu\text{m}$ ), 높이( $h \approx 20 \mu\text{m}$ )와 거의 동일한 형상으로 정밀하게 복제되었음을 확인하였다. 패턴의 균질도 역시 중심부뿐 아니라 가장자리 영역에서도 균일하게 형성되었다.

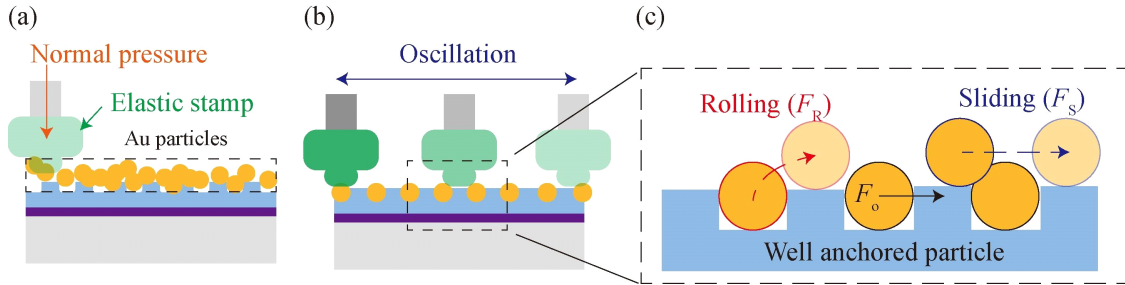
### 2.3 진동-마찰(Oscillated-Rubbing)을 이용한 입자 정렬 방법

S-ACF의 제작을 위해 마이크로 임프린팅된 미세 패턴의 홀에 폴리스타이렌 표면에 골드가 코팅된 마이크로입자(Au microparticles, Au-MPs, 직경  $\approx 20 \mu\text{m}$ , 덕산하이메탈, PGH-S20)를 정밀하게 배치하기 위하여 진동-마찰 기반의 입자 정렬 공정을 진행하였다.

마찰을 가하기 전 Fig. 3(a)에서 Au-MPs를 표면 에너지가 낮은 PDMS 블록을 사용하여 균일하게 템플릿 위에 도포하였다. 이후 요철 형상의 엘라스토머 스탬프(VinlyPolySiloxane-32, Young's modulus  $E \approx 0.9 \text{ MPa}$ )를 통하여 입자가 분포된 템플릿에 수직 하중을 가한다. Fig. 3(b)에선 수직 압력이 가해진 상황에서 좌우 방향의 진동 운동을 부여하고 이때 발생하는 주기적인 전단력과 마찰력에 의해 건식 상태의 입자들이 미세 홀 내부로 자발적으로 이동하며 자가정렬(self-assembly)된다. 본 연구에선 약 60 s 내외의 시간 동안 배열이 완료되었으며, 이후 에어 블로잉 과정을 통해 남아 있는 Au-MPs를 제거하였다.

진동-마찰의 입자 정렬의 핵심은 바로 Optimal rubbing force( $F_o$ )를 찾는 것이다. 여기서  $F_o$ 는 진동-마찰 중 발생하는 스탬프와 입자 사이의 전단력을 의미한다. 진동-마찰에 의한 마찰 및 전단 작용은 응집되어 있던 입자의 응집 및 집합(반데르발스 결합, 전자기력 등)을 효과적으로 분산시키고, 특정 입자들을 미세 패턴 홀 내부로 유도한다. 그러나 과도한 수직 압력, 빠른 속도 및 진동수로 인해 너무 과도한  $F_o$ 가 가해지면 이미 고정된 입자가 롤링(rolling)하여 홀 외부로 이탈 혹은 템플릿 표면에 박리 및 구김과 같은 손상을 유





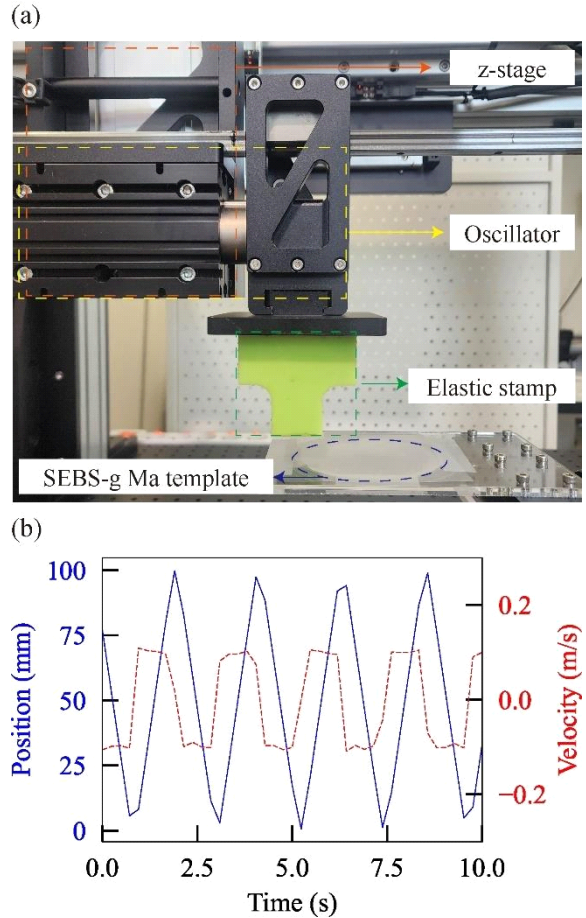
**Fig. 3.** (a) Schematic of the mechanical rubbing process showing the application of normal pressure using a flexible elastomeric stamp on randomly distributed Au-MPs placed over the SEBS-g-MA template. (b) Oscillatory rubbing induces particle movement through (c) rolling and sliding motions, allowing selective anchoring of particles within the wells.

발할 수 있다. 반대로,  $F_o$ 의 크기가 약할 경우 응집된 입자를 충분히 분리하지 못하거나 미끄러짐(sliding)을 유도하지 못한다. 이러한 조건 하에 입자의 정렬이 발생하는 최적 조건은 다음의 범위로 정의된다.

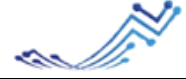
$$F_s < F_o < F_r \quad (1)$$

여기서  $F_s$ 는 슬라이딩을 개시하는 최소 마찰력,  $F_r$  롤링이 시작되는 한계 마찰력을 의미한다. 해당 과정은 Fig. 3(c)에 시각적으로 설명되어 있다.

진동-마찰의 실험 셋업은 Fig. 4(a)와 같다. 스탬프는 정밀 제어가 가능한 z-축 스테이지(z-axis stage, science town)를 통해 z축 방향의 변위를 해상도 5  $\mu\text{m}$  미만으로 미세하게 조절할 수 있다. z방향의 변위를 조절하면서 템플릿에 가하는 수직 압력에 변화를 주었다. 또한, 주기적인 진동 모션을 주기 위한 Oscillator (P01-37 $\times$ 120F/160 $\times$ 240-HP, LinMot)를 이용해 스탬프에 수평 방향으로의 주기 운동을 부여하였다. Fig. 4(b)는 본 연구에서 사용된 진동의 운동 조건을 보여준다. 4인치 템플릿을 커버하기 위하여 범위는 약 0-100 mm로 설정하였다. 진동 중 스탬프의 속도는  $\approx \pm 0.11$  m/s 이고 템플릿 이송 간에는 속도를 최대한 일정하게 컨트롤하였다. 해당 진동 주기는 3.33s ( $\approx 3$  Hz)였다.



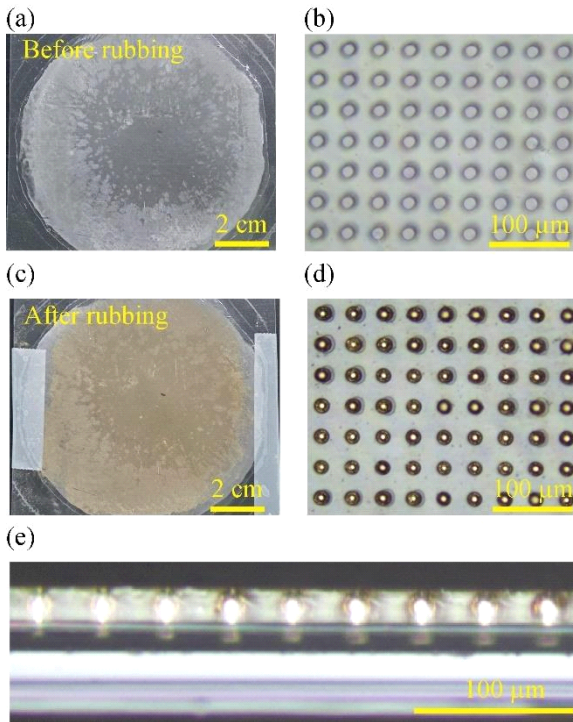
**Fig. 4.** (a) Experimental setup for the mechanical rubbing process consisting of a z-stage, oscillator for horizontal motion, and an elastic stamp placed above the SEBS-g-MA template. (b) Time-dependent position and velocity profiles of the oscillation stage.



### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 핫 엠보싱 기반의 미세 패터닝 공정과 진동 기반 입자 정렬 기술을 결합하여 4-inch 크기의 대면적 S-ACF를 성공적으로 제작하였다.

Fig. 5(a) Fig. 5(b)는 진동-마찰 이전의 SEBS-g-MA 템플릿의 미세 패터닝의 초기 상태를 보여주며, 이들의 기하학적 형상은 Fig. 2(g)와 같다. 이후, Fig. 4(b)에서 제시된 진동 조건을 통하여 건식 입자 배열을 진행한 결과, Fig. 5(c) Fig. 5(d)에 나타난 바와 같이 Au-MPs들이 패터닝된 홀 내부로 균일하게 배열되었다. Fig. 5(e)는 배열된 상태에서 측면에 대한 OM image



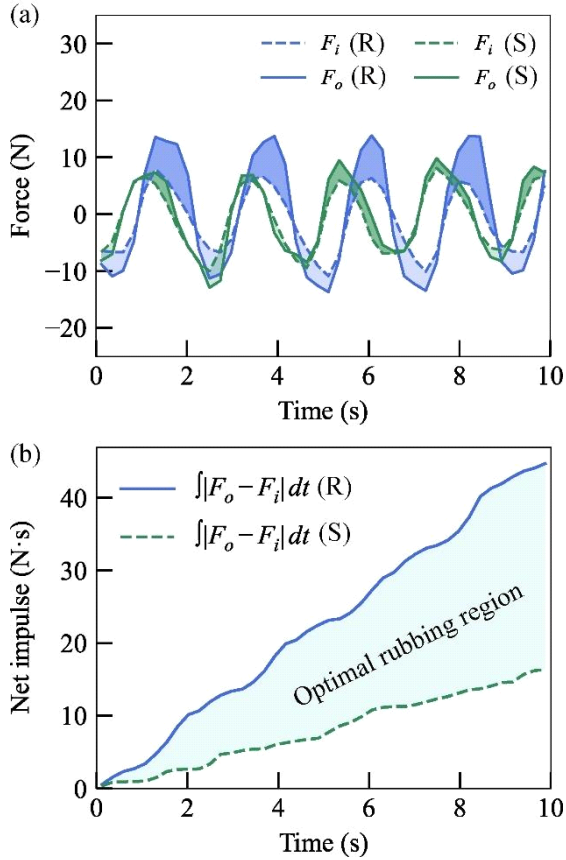
**Fig. 5.** OM images of the SEBS-g-MA template surface before and after the mechanical rubbing process. (a,b) Before rubbing. (c,d) After oscillatory rubbing, Au-MPs are uniformly arranged within the micron patterning across the entire 4-inch template. (e) OM images of side view.

를 보여주는데, 사전에 정의한 패턴에 Au-MPs가 손상 없이 균일하게 배열되어 있음을 확인할 수 있다. 해당 결과는 패턴의 중심부뿐만 아니라 가장자리 영역에서도 균일한 입자 정렬이 유지되었으며, 이는 제한된 입자 배열 공정이 대면적 스케일에서도 높은 정렬 재현성과 공정 안정성을 확보함을 보여준다.

정밀하고 균일한 입자 배열 상태를 얻기 위한 필수 조건은 Eq. (1)에서 제시한 바와 같이,  $F_0$ 의 조건을 찾는 것이다. 이를 정량적으로 규명하기 위하여 오실레이터(oscillator)에 내장된 로드셀을 이용해 진동-마찰 과정 중 엘라스토머 스탬프에 작용하는 힘을 실시간으로 측정하였다. 해당 결과는 Fig. 6(a)와 같다. Fig. 6(a)의 중앙 점선 곡선은 스탬프가 템플릿과 접촉하지 않은 상태에서 단순한 진자 운동을 할 때의 초기의 힘  $F_i$ 를 나타낸다. 반면, 실선 곡선은 템플릿과 접촉 후 마찰이 발생할 때의 실측 힘  $F_0$ 로서, 러빙 과정에서 실제로 발생하는 전단 작용을 반영한다. 여기서, 입자-템플릿 계면에 실질적으로 전달되는 유효 힘( $F_{\text{eff}}$ )은 초기의 진동력을 제외한 순수 마찰 성분으로 정의되며, 이는  $(F_{\text{eff}} = F_0 - F_i)$ 로 표현된다.

또한, 해당 그래프에서 조건(R)과(S)는 각각 롤링(rolling)에 의한 입자 탈락이 시작되는 시점, 그리고 슬라이딩(sliding)에 의한 입자의 이송이 개시되는 시점을 의미한다. 각 조건은 수직 압력을 점진적으로 증가시키면서 정량적으로 규명하였다. 그러므로, 입자 정렬이 가장 효율적으로 이루어지는 구간은 조건(R)보다 작으면서(S)보다 큰 영역인  $F_s < F_0 < F_r$ 에 해당한다. 여기서 시간에 대한 변수와 가해진 마찰력을 동시에 고려할 수 있는 물리량인 충격량(impulse,  $I$ )를 도입하였다.

$$I = \int_0^t |F_0 - F_i| \cdot dt = \int_0^t |F_{\text{eff}}| \cdot dt \quad (2)$$



**Fig. 6.** (a) Time-dependent rubbing force during the oscillatory mechanical rubbing process, compared with the initial applied force. (b) The net impulse ( $\int |F_o - F_i| dt$ ) accumulated over time, indicating continuous frictional energy transfer that drives particle movement and alignment within the patterned wells.

Eq.(2)에서  $t$ 는 총 소요된 진동 시간이고 진동-마찰에 의하여 분포된 입자들에 가해지는 충격량을 의미한다. 이를 기반으로 S-ACF 제작에 필요한 최적의 러빙 조건을 충격량 기준으로 정의한 결과를 Fig. 6(b)에서 보여준다. 해당 그래프에서 Optimal rubbing region은 충분한 슬라이딩이 발생하면서 동시에 롤링으로 인한 별도의 입자 탈락이나 템플릿 손상이 없는 최적의 구간을 의미하고 Au-MPs 입자들이 안정적으로 배열되는 조건을 제시한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 진동-마찰 기반의 건식 입자 정렬 기술과 핫 엠보싱 패턴링 기술을 결합하여 4-inch 규모의 신축성 비등방성 도전성 필름을 제작하였다. 마이크로 임프린팅 기술은 열가소성의 신축성 템플릿에 미세 홀 패턴을 균일한 피치( $40 \mu\text{m}$ ) 간격과 홀 직경( $20 \mu\text{m}$ ) 및 깊이( $20 \mu\text{m}$ )로 대면적 형성에 성공하였다. 또한, 형성된 템플릿 위에 진동-마찰력을 정밀하게 제어할 수 있는 시스템을 구축하여 금 마이크로 입자들이 수십 초 내로 균일하게 자가 정렬시키는 기술을 개발하였다. 더 나아가, 러빙 과정 중 측정된 힘-시간 데이터를 분석하여 최적의 입자 정렬에 필요한 러빙 힘을 슬라이딩과 롤링 사이의 균형 범위에서 찾았고, 시간적 마찰 에너지 전달을 표현하는 물리량인 충격량을 도입함으로써 최적의 러빙 진동 조건 구간을 규명하였다.

본 연구에서 제안된 S-ACF 공정은 별도의 화학적 또는 복잡한 액상 공정이나 후열처리 과정이 불필요한 완전 건식 방식으로 수-인치급 대면적에서도 빠르고 재현성 높은 입자 정렬을 구현할 수 있다. 또한 템플릿 제조 방식부터 입자 정렬까지 순수한 기계적인 메커니즘으로 작동되기 때문에 자동화 및 대량 생산의 기반 기술로서 활용될 수 있다. 향후 신축성 패키징, 고밀도 인터커넥트, 연성 전자소자 등에서 적용 가능한 대면적 마이크로 구조 조립 기술로 확장될 수 있으며, 기계적 구동 기반 정렬 메커니즘의 새로운 설계 지침을 제공한다.

## 기호설명

S-ACF: stretchable anisotropic conductive film

SEBS-g MA: polystyrene-block-poly(ethylene-ran-butylene)-block-polystyrene-graft-maleic anhydride

Au-MPs: Au microparticles



## ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to acknowledge the financial support from MiDAS H&T, Inc. The staff provided various supports of optical devices and system modifications, which were used to simulate the experimental process.

### Author Contributions

H. K. was involved in experiments, analysis, and discussion. H. K., S. C., and A. L. drafted the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

### Funding

Not applicable.

### Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

## REFERENCES

- [1] Toyozawa, K.; Fujita, K.; Minamide, S.; Maeda, T. Development of Copper Wire Bonding Application Technology. *IEEE Trans. Components Hybrids Manuf. Technol.* 2002, 13 (4), 667-672.
- [2] Singh, A.; Horsley, D. A.; Cohn, M. B.; Pisano, A. P.; Howe, R. T. Batch Transfer of Microstructures Using Flip-chip Solder Bonding. *J. Microelectromech. Syst.* 2002, 8 (1), 27-33.
- [3] Tanaka, S.; Jeong, S. H.; Sekiguchi, S.; Kurahashi, T.; Tanaka, Y.; Morito, K. High-output-power, Single-Wavelength Silicon Hybrid Laser Using Precise Flip-Chip Bonding Technology. *Opt. Express* 2012, 20 (27), 28057-28069.
- [4] Kripesh, V.; Yoon, S. W.; Ganesh, V. P.; Khan, N.; Rotaru, M. D.; Fang, W. et al. Three-Dimensional System-in-Package Using Stacked Silicon Platform Technology. *IEEE Trans. Adv. Packag.* 2005, 28 (3), 377-386.
- [5] Liu, C. C.; Chen, S. M.; Kuo, F. W.; Chen, H. N.; Yeh, E. H.; Hsieh, C. C. et al. High-performance Integrated Fan-out Wafer Level Packaging (InFO-WLP): Technology and System Integration. *Proceedings of the 2012 International Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE, 2012*, pp 1-4.
- [6] Lau, J. H. Recent Advances and Trends in Fan-out Wafer/Panel-Level Packaging. *J. Electron. Packag.* 2019, 141 (4), 040801.
- [7] Bhangaonkar, K.; Sankarasubramanian, S. Design and Architecture Definition for Advanced 3D Fan-out Wafer-Level Packaging. *J. Microelectron. Electron. Packag.* 2024, 21 (3), 59-66.
- [8] Li, Z.; Tomita, Y.; Elsherbini, A. A.; Liu, P.; Sawyer, H. A.; Swan, J. M. et al. Scaling Solder Micro-Bump Interconnect Down to 10  $\mu\text{m}$  Pitch for Advanced 3D IC Packages. *Proceedings of the 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, 2021*, pp 451-456.
- [9] Wu, X.; Zhu, X.; Wang, S.; Tang, X.; Lang, T.; Belyaev, V. et al. Bump-Fabrication Technologies for Micro-LED Display: A Review. *Materials* 2025, 18 (8), 1783.
- [10] Hwang, H.; Kong, M.; Kim, K.; Park, D.; Lee, S.; Park, S. et al. Stretchable Anisotropic Conductive Film (S-ACF) for Electrical Interfacing in High-resolution Stretchable Circuits. *Sci. Adv.* 2021, 7 (32), eabh0171.





- [11] Park, D.; Kwak, H.; Kim, S.; Choi, H.; Lim, I.; Kwak, M. et al. Stretchable Anisotropic Conductive Film with Position-Registered Conductive Micro-particles used for Strain-Insensitive Ionic Interfacing in Stretchable Ionic Sensors. *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34 (49), 2408902.
- [12] Kang, H.; Lee, D.; Yang, Y.; Oh, D. K.; Seong, J.; Kim, J. et al. Emerging Low-cost, Large-scale Photonic Platforms with Soft Lithography and Self-assembly. *Photonics Insights* 2023, 2 (2), R04-R04.
- [13] Ryu, W.; Min, S. W.; Hammerick, K. E.; Vyakarnam, M.; Greco, R. S.; Prinz, F. B.; et al. The Construction of Three-Dimensional Micro-Fluidic Scaffolds of Biodegradable Polymers by Solvent Vapor Based Bonding of Micro-Molded Layers. *Biomaterials* 2007, 28 (6), 1174-1184.
- [14] Ni, S.; Leemann, J.; Buttinoni, I.; Isa, L.; Wolf, H. Programmable Colloidal Molecules from Sequential Capillarity-Assisted Particle Assembly. *Sci. Adv.* 2016, 2 (4), e1501779.
- [15] Demirörs, A. F.; Pillai, P. P.; Kowalczyk, B.; Grzybowski, B. A. Colloidal Assembly Directed by Virtual Magnetic Moulds. *Nature*. 2013, 503 (7474), 99-103.
- [16] Sotthewes, K.; Jimidar, I. S. Navigating the Landscape of Dry Assembling Ordered Particle Structures: Can Solvents Become Obsolete? *Small*. 2024, 20 (49), 2405410.