

## 탄성모세관 기반 3D Print구조물의 패턴 붕괴

정재익\* · 오의진\* · 최윤석\* · 하종현\*,†

### Pattern collapse of 3D-printed structures induced by elastocapillarity

Jaek Choung\*, Uijin Oh\*, Yoonseok Choi\* and Jonghyun Ha\*,†

**Abstract** The mechanical stability of 3D-printed structures is critical for their performance across various applications, where geometric design plays a pivotal role in determining their resilience. Understanding the factors that contribute to the collapse of these structures is essential for optimizing their design. In this study, we fabricated vertical repetitive pattern structures using a Formlabs 3D printer, followed by post-processing with isopropyl alcohol (IPA). The collapse behavior of the printed patterns was visualized, revealing that the extent of collapse varied depending on geometric modifications. These findings provide key insights into the structural collapse mechanisms of 3D-printed architectures, informing future design strategies aimed at improving mechanical durability and preventing collapse. This version introduces the topic with general context before transitioning to your specific experimental approach.

**Key Words** : Elastocapillary(탄성모세관), 3D printing(3D 프린팅), Structural collapse(구조적 붕괴)

### 1. 서론

3D 프린트의 발전은 복잡한 구조물을 다양한 분야에 적용할 수 있게 하고, 이는 공학<sup>(1,2)</sup>, 건축, 제품 설계<sup>(3,4)</sup>, 바이오<sup>(5,6)</sup> 등에서 중요한 역할을 하고 있다. 특히, 3D 프린팅 구조물은 기하학적 요인에 의해 나타나는 기계적 거동을 설명하기에 실용적이다. 반복적인 기하학적 패턴을 가진 구조물의 붕괴 현상 관찰은 과정과 응력 분포에 대한 귀중한 통찰을 제공할 수 있으며, 기하학적 변형이 구조물의 붕괴에 미치는

영향을 파악하는 것은 3D 프린팅 설계 및 재료 사용을 최적화하는 데 중요한 요소이다.

본 연구에서는 Formlabs 3D 프린터를 이용하여 수직 반복 패턴 구조물을 제작하였으며, 기하학적 변화에 의한 붕괴 가능성을 고려하여 설계하였다. 이 구조물은 이소프로필 알코올 (IPA)을 사용하고 후처리 과정을 거쳐 세척하였으며, 그 이후 구조물의 붕괴 거동을 시각화하였다. 이를 통해 다양한 기하학적 변형에 따라 붕괴 정도가 어떻게 달라지는지 자세히 조사할 수 있다. 3D 프린팅 구조물의 설계와 기하학적 요소는 구조물의 기계적 특성에 중요한 영향을 미칠 것으로 보이지만, 이러한 요소들이 구조적 붕괴에 어떻게 구체적으로 영향을 미치는지에 대한 연구는 아직 미흡한 상태이다.

† Department of Mechanical Engineering,  
Ajou University, Assistant Professor  
E-mail: hajh@ajou.ac.kr

\* Department of Mechanical Engineering,  
Ajou University, Undergraduate student

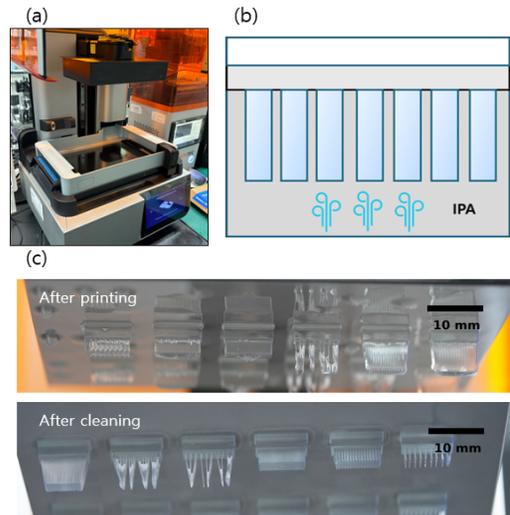
3D 프린팅 구조물의 파손 패턴을 분석함으로써, 더 강하고 내구성 있는 3D 프린팅 구조물을 설계하는 데 실질적인 통찰을 제공하는 것이 목표이다. 이 연구의 결과는 항공우주<sup>(7,8)</sup>, 의료 기기<sup>(9,10)</sup>, 산업 제조와 같이 정밀한 기계적 특성이 요구되는 다양한 분야에 적용될 수 있을 것이다. 또한, 3D 프린팅 구조물의 붕괴 거동을 이해하는 것은 성능과 재료 효율성을 최적화하는 데 필수적이며, 특히 실패가 허용되지 않는 중요한 분야에서 매우 중요한 요소이다.

## 2. 실험 장치 및 관찰

본 연구에서는 수직 반복 핀 패턴 구조물을 설계하고 제작하기 위해 Solidworks 소프트웨어와 Formlabs 3D 프린터를 사용하였다. 출력된 구조물은 이소프로필 알코올(IPA)을 이용한 후처리 과정을 거치며, 이 과정에서 바람을 사용하여 표면의 잔여물을 제거한다. 수직 핀 패턴 구조물은 Fig. 1(a) 및 (b)에서 볼 수 있듯이 IPA에 담가 후처리하며, 후처리 후에는 상온에서 자연 건조시키면서 구조물의 변형 및 붕괴 과정을 관찰한다.

특히, 출력된 구조물의 기하학적 요소가 붕괴에 미치는 영향을 가시화하기 위해 다양한 두께, 폭, 거리 등의 변수를 가진 구조물을 설계하였다. 각 기하학적 요소가 구조물의 붕괴에 어떤 영향을 미치는지 분석하기 위해 두께( $t$ ), 길이( $l$ ), 거리( $d$ ) 등의 변수를 조정하며, 이러한 구조물을 반복적으로 출력하였다. 자연 건조 과정은 최소 2시간 이상 진행하며, 더 이상 구조적 변화가 발생하지 않을 때까지 관찰을 지속하였다.

구조물의 붕괴는 Fig. 1(c)에서 나타난 것처럼, 핀들이 서로 넘어져 맞닿은 구조물의 수로 기록된다. 이때 붕괴된 핀의 수를  $N$ 으로 정의하였으며, 핀 간의 거리( $d$ ) 또는 두께( $t$ )가 작을수록 붕괴된 핀의 수가 많아져  $N'$  값이 증가하는 경향이 있었다. 이러한 경향을 보완하기 위해 전체 핀의 개수를  $N'$  값에 나누어 보정된 붕괴 값을  $N$ 으로 정의하였다.



**Fig. 1.** (a) Formlabs 3D printer. (b) Schematic diagram showing the post-processing process of blowing air and drying in IPA after 3D printing. (c) Pattern configuration before and after printing.

붕괴 정도는 핀의 기하학적 요소에 의해 좌우된다. 얇고 긴 핀은 더 낮은 탄성 강성을 가지므로 붕괴에 더 취약하며, 핀 사이의 간격( $d$ )은 핀들이 얼마나 가까워질 수 있는지를 결정한다.  $d$ 가 작을수록 모세관 힘이 더욱 강하게 작용하여 붕괴 가능성이 높아진다. 반면, 두께( $t$ )가 증가하거나 길이( $l$ )가 짧아지면 구조적 강성이 증가하여 모세관 힘을 더 효과적으로 견딜 수 있게 된다. 이러한 요소들의 상호작용이 IPA 처리 후 자연 건조 과정에서 관찰된 붕괴 현상을 결정짓는다.

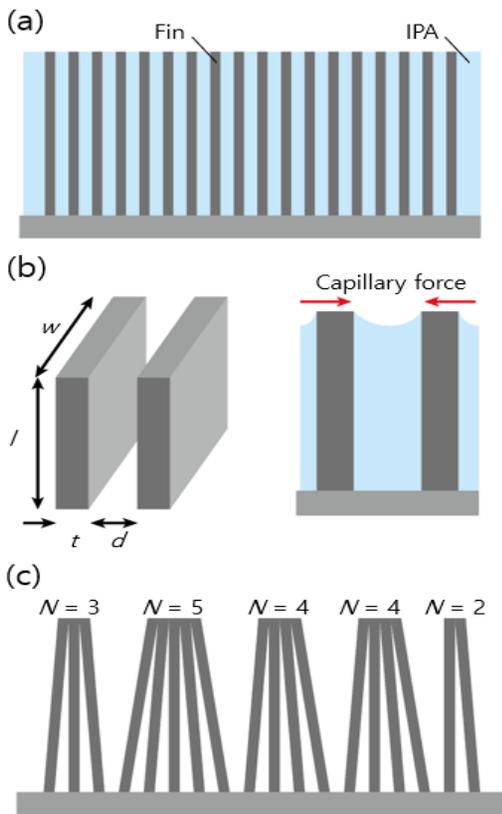
실험에서 IPA 증발 과정이 포함되었고, 이를 통해 구조물의 응집 현상을 관찰하였다. IPA가 증발하면서 구조물에 생긴 액체 계면은 구조물의 변형을 초래한다. 따라서 작동 메커니즘은 기본적으로 액체 표면 장력에 의해 지배되며, elasto-capillary 상호작용이 주요 원리로 작용한다.

이 실험을 통해 구조물의 두께와 패턴 반복 수가 붕괴 과정에 실질적인 영향을 미치며, 기하학적 요소들이 붕괴 메커니즘에 중요한 역할을 한다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 3D 프린팅된 구조물의 설계 시, 기하학적

특성의 변화가 구조적 안정성에 미치는 영향을 고려해야 함을 시사한다.

### 3. 탄성모세관 메커니즘

탄성모세관 현상은 얇고 긴 구조물들이 액체 표면 장력에 의해 변형되거나 붕괴되는 메커니즘<sup>(11-13)</sup>으로, 특히 3D 프린팅된 구조물에서 중요한 역할을 한다. 이는 주로 액체의 모세관 힘이 구조물의 탄성 복원력을 능가할 때 발생한다. 본 연구에서는 수직 반복 핀 패턴 구조물이 후처리 과정에서 이소프로필 알코올(IPA)에 담기는 동안 이러한 탄성모세관 효과가 두드러지게 나타났다. Fig. 2(a)는 IPA에 적셔진 핀 구조물을 보여준다.



**Fig. 2.** (a) The appearance of the structure contained in IPA. (b) The geometry of the structure. (c) A schematic representation of the appearance when collapse occurs.

기하학적 요소들은 Fig. 2(b)의 형상과 같다. 폭( $w$ ), 길이( $l$ ), 두께( $t$ ), 거리( $d$ )로 총 4개의 요소를 가진다. 이 중  $l$ ,  $t$ ,  $d$ 로 3개의 변수를  $t$ 는 0.05, 0.07, 0.15, 0.5, 1일 때와  $l$ 은 5, 10일 때,  $d$ 는 0.5, 1, 2일 때로 나누어 핀 구조물을 제작한다. 총 경우의 수는 30가지이다. IPA가 증발하는 과정에서 액체-공기 경계면에서 발생하는 모세관 힘은 인접한 핀 구조물들을 서로 끌어당기며(Fig. 2(b) 참고), 이 힘이 구조물의 탄성 복원력을 초과하면 핀들이 굽거나 붕괴하게 된다(Fig. 2(c) 참고). 구조물의 두께나 길이, 핀 간의 간격 등 다양한 기하학적 요소들이 이러한 탄성모세관 붕괴에 중요한 영향을 미친다. 얇고 긴 핀일수록 탄성 복원력이 낮아 모세관 힘에 의해 더 쉽게 변형되거나 붕괴되며, 핀 간의 간격이 좁을수록 모세관 힘의 작용이 더 강해져 붕괴가 촉진된다.

### 4. 결과

실험 결과, 두께( $t$ ), 길이( $l$ ), 거리( $d$ )와 같은 기하학적 요소가 구조물의 붕괴 메커니즘에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 각 요소에 따른 붕괴 양상을 종합하여 분석한 결과는 다음과 같다.

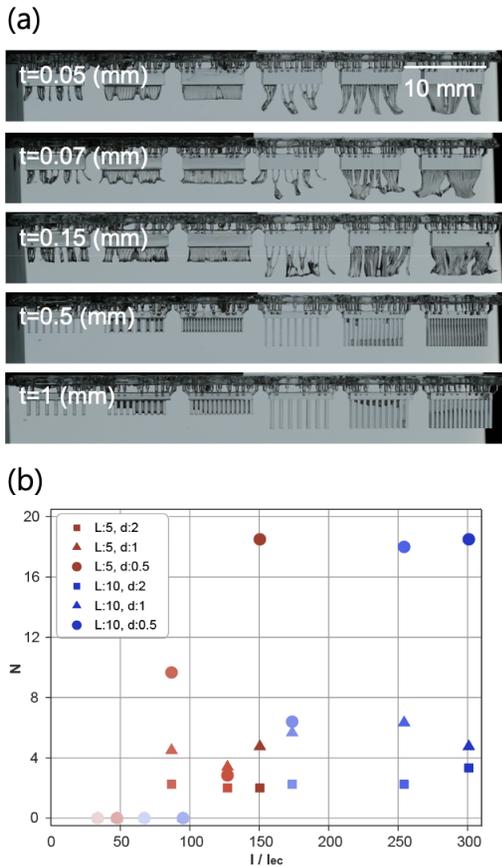
먼저, 두께( $t$ )가 얇을수록 구조물의 붕괴가 많이 진행되었으며, 붕괴된 구조물들이 서로 맞는 경향이 강하게 나타났다. 두께가 0.05mm 일 때 가장 큰 붕괴 현상이 발생하였고, 두께가 0.07mm, 0.15mm로 증가할수록 붕괴 속도가 느려지고 구조물의 안정성이 향상되는 경향을 보였다. 두께가 0.5mm 이상일 때는 구조물이 붕괴하지 않고 그대로 유지되었다. 이는 두께가 증가할수록 기계적 강도가 높아져 붕괴에 저항하는 능력이 커지는 것을 의미한다.

길이( $l$ )의 경우, 길이가 길수록 붕괴가 많이 진행되었다. 길이가 10mm일 때가 5mm보다 붕괴가 많이 진행되어 구조물들이 서로 맞닿았고 복잡한 형상을 보였다. 길이가 5mm일 때는 붕괴가 줄어들었다. 이는 길이가 길수록 구조물의 기계적 안정성이 떨어져 붕괴가 더 쉽게 발생

한다는 것을 보여준다.

마지막으로, 거리( $d$ )가 짧을수록 붕괴가 더욱 빠르게 진행되었고, 구조물들이 붕괴 후 서로 가까이 맞닿아 상호작용이 활발하게 일어났다. 거리가 0.5mm일 때 가장 큰 상호작용이 나타났으며, 거리가 1mm, 2mm로 증가할수록 구조물 간의 상호작용이 줄어들면서 붕괴 패턴이 더 줄어들었다. 이는 거리( $d$ )가 짧을수록 구조물 간의 상호작용이 강해져 붕괴 시 복잡한 패턴이 형성된다는 것을 의미한다.

Fig. 3(a)에서 붕괴 양상을 확인할 수 있고, Fig. 3(b)에서 그래프를 통한 변화 양상을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)에서는 두께, 길이, 거리



**Fig. 3.** (a) Collapsed patterns in various thickness. (b)  $N$  versus  $l/l_{ec}$ . Fin thickness increases from 0.05 to 1 mm, with the symbol colors becoming darker.

등 기하학적 변수에 따라 구조물의 붕괴 양상이 어떻게 달라지는지를 무차원화된 변수  $l/l_{ec}$ 로 나타내었으며, 여기서  $l_{ec} = [EI/(\gamma w)]^{1/2}$ 는 elastocapillary length를 의미한다. 무차원 변수  $l/l_{ec}$ 는 길이와 모세관 길이 간의 비율로, 길이가 elastocapillary length에 비해 상대적으로 길수록 모세관력이 구조물 붕괴에 더 큰 영향을 미치게 된다. 실험 결과, 두께가 얇을수록, 길이가 길어질수록, 그리고 구조물 간의 간격이 좁아질수록 붕괴가 증가하고 상호작용이 복잡해지는 경향이 확인되었다. 반면, 두께가 두껍고, 길이가 짧으며, 거리 간격이 넓을수록 붕괴가 적게 진행되어 안정성이 높아졌다.

이처럼, 두께  $t$ , 길이  $l$ , 거리  $d$ 와 같은 기하학적 요소들이 구조물의 붕괴 메커니즘에 결정적인 영향을 미치며, 특히  $l/l_{ec}$ 와 같은 무차원화된 지표를 통해 이러한 변수들이 붕괴에 미치는 영향을 체계적으로 비교할 수 있음을 확인하였다. 각각의 기하학적 요소가 구조물의 기계적 강도와 상호작용 패턴을 좌우하는 중요한 요인임을 Fig. 3(b)의 플롯을 통해 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 3D 프린팅된 수직 반복 핀 패턴 구조물의 붕괴 메커니즘을 두께( $t$ ), 길이( $l$ ), 거리( $d$ )와 같은 기하학적 요소에 따라 분석하였다. 실험 결과, 두께가 얇을수록, 길이가 짧을수록, 구조물 간 거리가 가까울수록 붕괴가 더 빠르고 복잡한 상호작용이 발생하는 경향이 나타났다. 반면, 두께가 두껍고, 길이가 길며, 거리 간격이 넓을수록 구조물의 붕괴는 더 느리게 진행되었고, 상호작용이 적어 안정성을 보였다. 기하학적 요소 외에 재료의 물리적 특성(예: 탄성계수, 점성, 표면 에너지 등)도 구조물의 붕괴에 중요한 영향을 미친다. Clear Resin V5보다 높은 탄성계수를 가진 재료를 사용할 경우 응집 및 붕괴가 감소할 가능성이 크다. 본 연구는 특정 재료 하나만으로 실험을 진행했으나, 후속 연구에서는 다양한 재료 특성을 고려한 분석이 필요하다.

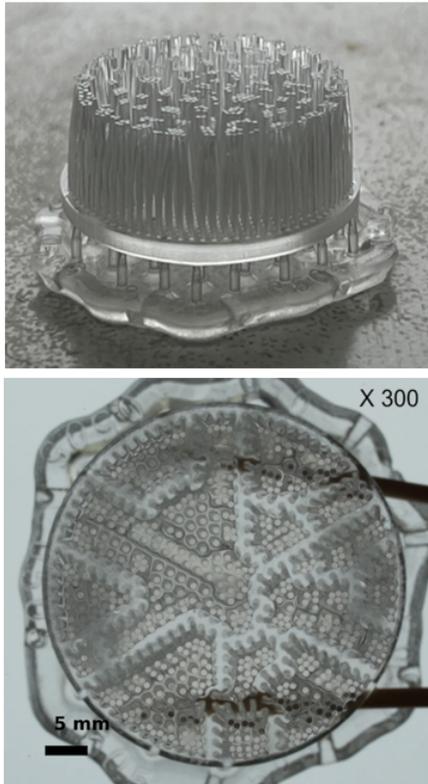


Fig. 4. The collapse pattern in a circular pattern.

이를 통해, 기하학적 요소들은 구조물의 기계적 강도와 붕괴 저항성을 결정하는 중요한 요인임을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 3D 프린팅 구조물의 설계에서 기하학적 변수를 조절함으로써 구조적 안정성을 최적화할 수 있는 설계 지침을 제공한다.

이 실험의 진행은 단순한 수직 핀 반복 구조 이기에 차후 Fig. 4와 같은 원형 모양의 실험 혹은 더 다양한 양상의 구조물을 이용하여 진행할 수 있다. 2D 응집은 평면적 패턴에서 주로 표면장력의 영향을 받는다. 반면 3D 응집에서는 모세관력과 함께 탄성 복원력이 중요한 역할을 한다. 2D 패턴은 비교적 단순한 구조를 가지지만, 3D에서는 복잡한 상호작용이 존재한다. 다만 두 메커니즘의 기본적인 물리적 상호작용은 유사하다. 본 연구에서는 분석을 단순화하기 위해 2D 응집만을 다루었다. 이러한 연구는 3D printer로 제작하는 구조물의 기하학

적 변형에 따른 붕괴 양상을 정리하는 데 도움을 줄 것으로 전망된다[14-18]. 또한 그러한 연구 결과는 기하학적 변수를 조절함으로써 구조적 안정성을 최적화할 수 있는 설계를 제공할 것으로 기대된다.

## REFERENCE

- 1) T. P. Mpofu, C. Mawere, and M. Mukosera, "The impact and application of 3D printing technology," *Int. J. Sci. Res. (IJSR)\**, vol. 3, no. 6, pp. 2148-2152, June 2014.
- 2) J.-Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials," *Appl. Mater. Today\**, vol. 7, pp. 120-133, 2017. DOI: 10.1016/j.apmt.2017.02.004.
- 3) C. M. Thakar, S. S. Parkhe, A. Jain, K. Phasinam, G. Murugesan, and R. J. M. Ventayen, "3D printing: Basic principles and applications," *Mater. Today: Proc.\**, vol. 51, pp. 842-849, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.06.272.
- 4) D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, and V. Mercuri, "3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach," *Constr. Build. Mater.\**, vol. 165, pp. 218-231, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018.
- 5) A. Pfister, R. Landers, A. Laib, U. Hübner, R. Schmelzeisen, and R. Mülhaupt, "Biofunctional rapid prototyping for tissue-engineering applications: 3D bioplotting versus 3D printing," *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.\**, vol. 42, no. 3, pp. 624-638, 2004. DOI: 10.1002/pola.10807.
- 6) Y. Bozkurt and E. Karayel, "3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends," *J. Mater. Res. Technol.\**, vol. 14, pp. 1430-1450, 2021. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.050.
- 7) Sunil C. Joshi and Abdullah A. Sheikh, "3D printing in aerospace and its long-term sustainability," *Virtual and Physical Prototyping\**, vol. 10, no. 4, pp. 175-185, 2015.

- DOI: 10.1080/17452759.2015.1111519.
- 8) Y. Tadjdeh, "3D printing promises to revolutionize defense, aerospace industries," *\*Natl. Def.\**, vol. 98, no. 724, pp. 20-23, Mar. 2014. Available: <https://www.jstor.org/stable/10.2307/27020306>.
- 9) Z. Wang and Y. Yang, "Application of 3D printing in implantable medical devices," *\*BioMed Res. Int.\**, vol. 2021, Article ID 6653967, pp. 1-13, Jan. 2021.  
DOI: 10.1155/2021/6653967.
- 10) Y. Bao, N. Paunović, and J.-C. Leroux, "Challenges and opportunities in 3D printing of biodegradable medical devices by emerging photopolymerization techniques," *\*Adv. Funct. Mater.\**, vol. 32, no. 1, pp. 1-10, 2022. DOI: 10.1002/adfm.202109864.
- 11) J. Bico, E. Reyssat, and B. Roman, "Elastocapillarity: When surface tension deforms elastic solids," *\*Annu. Rev. Fluid Mech.\**, vol. 50, no. 1, pp. 629-659, 2018.  
DOI: 10.1146/annurev-fluid-122316-050130.
- 12) R. W. Style, A. Jagota, C.-Y. Hui, and E. R. Dufresne, "Elastocapillarity: Surface tension and the mechanics of soft solids," *\*arXiv\**, vol. 1604, Apr. 2016.  
Available: <https://arxiv.org/abs/1604.02052>.
- 13) B. Roman and J. Bico, "Elasto-capillarity: Deforming an elastic structure with a liquid droplet," *\*J. Phys.: Condens. Matter\**, vol. 22, no. 49, pp. 1-16, 2010.  
DOI: 10.1088/0953-8984/22/49/493101.
- 14) M. Bodaghi, A. R. Damanpack, G. F. Hu, and W. H. Liao, "Large deformations of soft metamaterials fabricated by 3D printing," *\*Mater. Des.\**, vol. 131, pp. 81-91, 2017.  
DOI: 10.1016/j.matdes.2017.06.002.
- 15) T. W. Kerekes, H. Lim, W. Y. Joe, and G. J. Yun, "Characterization of process-deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (FDM) 3D-printed specimens," *\*Addit. Manuf.\**, vol. 30, pp. 100845, 2019.  
DOI: 10.1016/j.addma.2019.100845.
- 16) P. Jindal, M. Juneja, F. L. Siena, D. Bajaj, and P. Breedon, "Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners," *\*Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.\**, vol. 156, no. 5, pp. 694-701, Nov. 2019.  
DOI: 10.1016/j.ajodo.2019.05.012.
- 17) Z. Zhu, H. S. Park, and M. C. McAlpine, "3D printed deformable sensors," *\*Sci. Adv.\**, vol. 6, no. 25, pp. eaba5575, 2020.  
DOI: 10.1126/sciadv.aba5575.
- 18) M. Bodaghi, A. R. Damanpack, G. F. Hu, and W. H. Liao, "Large deformations of soft metamaterials fabricated by 3D printing," *\*Mater. Des.\**, vol. 131, pp. 81-91, 2017.  
DOI: 10.1016/j.matdes.2017.06.002.