

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.2.337>

JCCT 2022-3-43

크랙 방지를 위한 잉크젯 프린트 헤드 강건 설계

Design of thermal inkjet print head with robust and reliable structure

김상현*

Sang-Hyun Kim*

요약 최근 프린팅 기술은 디스플레이나 연료전지를 포함한 IT 분야에 폭넓게 사용되고 있지만 핵심 부품인 프린터 헤드의 박막을 적층하는 제조공정에서 발생하는 잔류응력 및 열응력으로 인해 기판이 변형되거나 노즐층이 파손되어 잉크가 새거나 원하는 영역으로 토출되지 않는 문제가 발생하고 있다. 따라서 본 논문에서는 보다 견고하고 신뢰할 수 있는 구조를 가진 열전사 잉크젯 프린트 헤드 형상을 제안하고자 한다. 기판과 노즐층의 변형을 줄이기 위해 리브, 기둥, 지지벽 및 개별 피드홀과 같은 다양한 형태의 잉크젯 프린트 헤드 구조가 설계되었으며, FEA 해석을 통해 타당성을 검증하였다. 해석 결과 헤드의 최대 응력 및 노즐층 변형이 최소 40~50%로 급격히 감소하였으며 기둥 및 지지벽 형태의 프린터 헤드를 제작하여 노즐층 변형에 의한 균열 및 잉크 누출이 없는 것을 확인하였다. 따라서 제안된 헤드 형상이 정상 방향의 잉크 토출에 기여하며 대면적 프린팅 기술에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 잉크젯 프린터 헤드, 강건 설계, 노즐 변형, 잉크 누출

Abstract Although printing technology has recently been widely used in IT fields including displays and fuel cells, residual and thermal stress are generated by a manufacturing process of stacking the layers of the print head and result in the substrate deformation and nozzle plate crack, which may cause ink leaks or not be ejected onto a desired region. Therefore, in this paper, we propose a new design of thermal inkjet print head with a robust and reliable structure. Diverse types of inkjet print head such as a rib, pillar, support wall and individual feed hole are designed to reduce the deformation of the substrate and nozzle plate, and their feasibility is numerically investigated through FEA analysis. The numerical results show that the maximum stress and deformation of proposed print head dramatically drops to at least 40~50%, and it is confirmed that there is no nozzle plate cracks and ink leakage through the fabrication of pillar and support wall typed print head. Therefore, it is expected that the proposed head shape can be applied not only to ink ejection in the normal direction, but also to large-area printing technology.

Key words : Inkjet Print Head, Robust Design, Nozzle Crack, Ink Leakage

1. 서론

일반적으로 잉크젯 프린터는 미소 잉크 액적(droplet)을 인쇄 매체 상의 원하는 위치에 토출(firing)시켜서

화상을 형성하는 장치이다. 초기 잉크젯 프린터는 잉크를 토출하는 과정에서 발생하는 높은 폭발 압력과 고온에 의해 프린트 헤드 부분이 쉽게 손상되고 인쇄품질이 좋지 못하였으나, 프린터 헤드와 카트리지를 결합하고 인쇄

*정회원, 한성대학교 기계시스템공학과 교수 (제1저자, 교신저자)
접수일: 2022년 1월 22일, 수정완료일: 2022년 3월 1일
게재확정일: 2022년 3월 8일

Received: January 22, 2022 / Revised: March 1, 2022

Accepted: March 8, 2022

*Corresponding Author: shkim@hansung.ac.kr

Dept. of Mechanical Systems Eng, Hansung Univ, Korea

후 헤드를 교체하는 방식이 채용되면서 비로소 널리 보급되기 시작하였다[1].

프린터 헤드는 잉크젯 프린터에서 가장 핵심이 되는 소자로서 프린터로부터 전기적 신호를 인가받아 카트리지에서 공급된 잉크 유체를 수백~수천 개의 노즐을 통해 미소방울로 원하는 위치에 일정한 속도로 토출시키는 역할을 하고 있다. 대부분의 잉크젯 프린터는 열전사(thermal)나 압전(piezo) 방식으로 잉크를 토출하며 열전사 방식은 온도변화에 의한 기포발생을 이용하여 잉크를 토출하므로 가격이 낮고 생산이 쉬운 장점이 있다. 또한 높은 인쇄 해상도 및 고속 출력이 가능해 최근에는 기존의 종이에 출력물을 인쇄하는 용도를 넘어 플렉서블 전자 소자용 디스플레이나 연료전지 및 바이오 프린팅을 포함한 3차원 형상물 제조 등 많은 분야에 활용되고 있다[2-4].

하지만 열전사 방식의 프린터 헤드는 여러 층의 박막으로 구성되어 있으며 박막을 적층하는 과정에서 발생하는 잔류응력 및 열응력에 의해 기판(substrate) 및 노즐층(nozzle plate)에 변형이 일어난다. 또한 헤드시스템의 유지보수 과정 중 노즐 중심으로 균열이 일어나고 이로 인한 노즐층 파손에 의해 잉크가 새거나 원하는 곳에 잉크가 토출되지 않는 문제가 발생하고 있다. 이러한 문제점은 헤드칩 크기를 증가하면 어느 정도 해결될 수 있다. 하지만 최근 시판되고 있는 잉크젯 헤드는 수율 향상과 소형화를 위해서 고밀도, 고집적도의 경향이 있다. 한 웨이퍼(wafer) 내의 칩의 개수는 직접적으로 생산단가와 연결되기 때문에 잉크젯 업체들은 칩 크기를 줄여서 최대한 많은 수의 칩을 하나의 웨이퍼에 넣기를 원하고 있으므로 헤드칩 크기를 증가시키는 것은 한계가 있다. 또한 출력 대상물이 점점 대형화되는 최근 IT 제품 트렌드를 부합하기 위해 노즐과 헤드 내부 형상에 대한 최적 설계 및 잉크방울의 비산현상과 같은 잉크 유동현상에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있지만 프린터 헤드 형상 그 자체에 대한 강건 설계 관련 연구는 부족한 실정이다[5-7].

따라서 본 논문에서는 보다 견고하고 신뢰할 수 있는 열전사 잉크젯 프린터 헤드 구조를 제안하고자 한다. 헤드칩 크기를 증가시키지 않으면서 기존 헤드의 구조적 취약점인 기판 및 노즐층 변형을 최소화 할 수 있도록 헤드 내부를 보강한 다양한 헤드 형상을 설계하였다. 제안된 헤드 구조의 안정성을 검증하기 위해

ANSYS 프로그램을 이용한 FEA 해석을 수행하였으며 실제 제작을 통해 노즐층 파손 및 잉크 누수 여부를 확인하였다.

II. 이론적 배경

그림 1은 일반적으로 사용되는 잉크젯 프린터 헤드의 기본 단면 구조이다. 프린터 헤드는 다수의 물질층이 형성된 기판과 기판 위에 적층되며 토출될 잉크가 채워지는 챔버(chamber)층 및 잉크가 토출되는 다수의 노즐이 형성된 노즐층으로 구성되어 있다. 또한 기판에는 챔버에 잉크를 공급하기 위한 잉크 피드홀(feed hole)이 관통되어 형성되어 있으며 챔버층에는 잉크를 가열하기 위한 히터가 적층되어 있다. 잉크는 지면 아래에서 위쪽 방향으로 공급되어 각각의 잉크 챔버로 흘러 들어가 히터에 의해 가열되어 버블을 형성한다. 이렇게 형성된 버블의 압력에 의해 잉크가 노즐 밖으로 토출되며 이 공정은 초당 수천 번 반복적으로 재연된다.

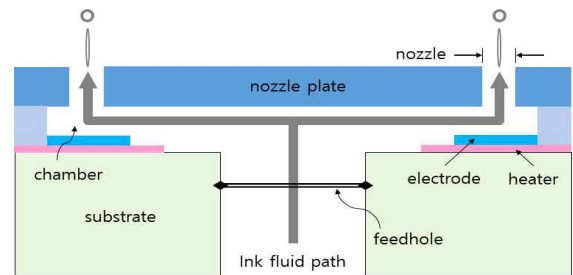


그림 1. 잉크젯 프린터 헤드 기본 단면 구조
Figure 1. Basic structure of Inkjet print head

프린터 헤드를 구성하고 있는 구조층은 반도체 공정을 통해 다수의 이중 박막을 가열과 가압하여 적층되므로 서로 다른 격자구조 및 열팽창 계수 차이에 의해 잔류응력 및 열응력이 발생한다. 또한 잉크 공급 유로를 형성하기 위해 사용되는 희생층(sacrificial layer)의 재질도 구조층과 다르므로 희생층 제거 후 상온으로 냉각하면 고온에서 발생한 변형이 증폭되어 나타나게 된다. 특히 챔버에 잉크를 공급하는 피드홀은 비어있는 공간이므로 기존 헤드칩은 변형에 취약한 구조이다. 따라서 헤드칩 제작 시 발생하는 잔류응력 및 열응력이 피드홀의 평면방향의 변형을 발생시키고 이는 노즐층의 수직 방향 변형을 유발하게 되어 그 결과 노즐 중심축이 기울어지고, 노즐을 통해 분사되는 잉크 분사각도에 영향을 미친다. 또한 인쇄 후 헤드칩 표면에 남아있는 잉크를

제거하기 위해 사용되는 블레이드나 롤러에 의한 접촉으로 인해 마모와 파괴가 발생할 수 있다.

그림 2는 현재 잉크젯 헤드칩에 발생하는 결함을 나타낸다. 노즐에 집중된 응력에 의해 노즐층 표면에 균열이 발생하며 노즐층이 파손되거나 노즐층과 챔버층 사이가 박리(delamination)되어 잉크가 새거나 원하는 곳에 잉크가 토출되지 않는 문제가 발생하고 있다.

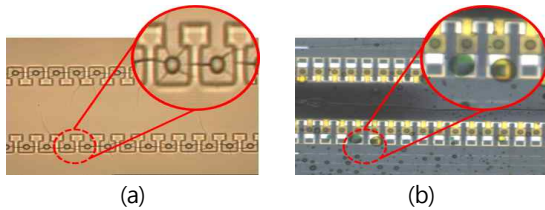


그림 2. 잉크젯 프린터 헤드 결함 (a) 노즐층 균열 (b) 잉크 누출
 Figure 2. Failures of inkjet print head (a) nozzle plate crack (b) ink leakage

최근 프린팅 기술은 높은 인쇄 해상도와 빠른 출력 속도가 요구되고 있으며 이는 보다 많은 노즐 개수와 작은 노즐 직경과 관련이 있다. 이를 위해 피드홀 간격보다 헤드 길이가 상대적으로 증가되므로 헤드칩 형상은 구조적으로 더욱 취약한 상황이 되고 있다. 따라서 헤드칩 변형을 예측할 수 있는 내구성 해석은 향후 개발 과정에 매우 필수적인 요소라고 할 수 있으므로 본 논문에서는 FEA 해석을 통해 기존 헤드칩의 변형 및 응력분포를 분석한 후 다양한 헤드 형상을 제시하여 내구성을 검증하고자 한다.

III. 연구 결과

1. 시편 제작 및 물성값 측정

FEA 해석을 통해 헤드의 안정성을 확인하기 위해서는 재료의 정확한 기계적 물성값이 필요하지만 노즐층과 같은 아주 얇은 박막은 기존 벌크(bulk) 재료의 물성값과는 다른 값을 가진다[8]. 또한 노즐층으로 사용되는 SU-8의 물성값은 제작공정이나 작업순서에 큰 영향을 받으므로 동일 재료라 하더라도 다른 환경에서 제작된 박막의 물성값을 사용할 수 없다. 따라서 그림 3과 같이 헤드의 노즐층과 동일한 제작조건으로 SU-8 시편을 제작하였으며 micro 인장시험법을 이용하여 박막의 물성값을 측정하였다. 실제 노즐층의 폭(width)과 동일한 크기로 시편을 제작할 수 없으므로 폭에 대한 물성값

영향을 확인하기 위해 3종류(50 μ m, 100 μ m, 150 μ m)의 폭을 가진 시편을 제작하여 인장시험을 실시하였다.

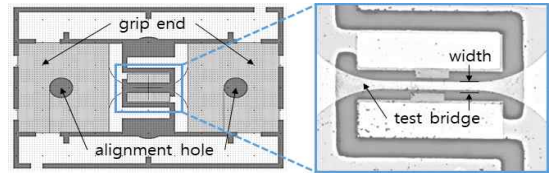


그림 3. SU-8 시편 형상
 Figure 3. Structure of SU-8 specimen

먼저 인장시험기의 지그에 시편의 그립 부분을 정렬(alignment) 축에 맞게 연결한 후 하중을 가해 브릿지(bridge)의 변위를 측정하였다. 그림 4(a)는 100 μ m 폭을 가진 시편의 하중-변위 선도를 나타낸다. 시편은 탄성-소성 영역을 지나 다시 비선형 탄성거동을 보이며 추가 하중 시 파단에 이르렀다. 하지만 인장시험을 통해 측정된 박막의 거동은 시편의 크기에 따라 달라지므로 그림 4(b)와 같이 하중과 변위를 시편의 단면적과 길이로 나눈 비율값인 응력-변형률 선도를 이용하여 기계적 물성값을 도출하였다. 재료의 탄성계수(E)와 항복강도(σ_y)는 0.2% offset법을 적용하여 구하며 인장강도(σ_{TS})는 첫 번째로 나타나는 안정된 한계응력으로 정의하였다.

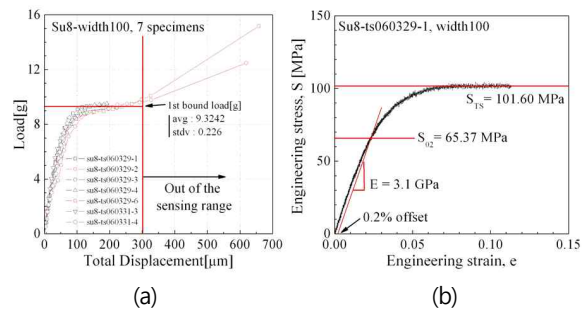


그림 4. 인장시험 결과 (a) 하중-변위 선도 (b) 응력-변형률 선도
 Figure 4. Experiment of tensile test (a) load-displacement diagram (b) stress-strain diagram

동일한 방법으로 폭이 50 μ m와 150 μ m 시편의 인장 시험을 시행하였으며 결과를 표 1에 나타내었다. 측정 결과 시편의 폭에 따라 큰 차이가 나지 않았으며 탄성계수 3.25GPa, 항복응력 63.74MPa, 인장강도 97.52MPa를 가지는 것을 알 수 있었다.

표 1. SU-8 물성값 실험 결과

Table 1. Experiment result of material properties of SU-8

width [μm]	# of specimen	Elastic Modulus, E [GPa]	Yield Stress, σ_y [MPa]	Tensile Strength, σ_{TS} [MPa]
50	8	3.30 (0.24)	65.69 (1.43)	94.88 (1.51)
100	7	3.29 (0.29)	60.47 (4.74)	99.60 (3.04)
150	4	3.10 (0.28)	64.44 (2.09)	98.65 (2.35)
Ave. (Stdv.)		3.25 (0.26)	63.74 (3.67)	97.52 (3.16)

2. 잔류응력 측정

프린터 헤드를 제작하는 반도체 공정에서 박막은 대부분 1000°C 이상의 고온에서 적층되므로 기판과 박막의 열팽창계수 및 격자구조 차이에 의해 그림 5와 같이 상온에서 휨(warping) 현상이 발생한다. 이 때 박막에 발생하는 잔류응력(σ)은 박막 증착 전후 기판의 곡률 변화를 이용한 식 (1)의 Stoney's equation을 통해 구할 수 있다[9]. 여기서 E_s는 기판의 탄성계수, R은 곡률반경, ν는 기판의 푸와송비, h_s와 h_f는 각각 기판과 박막의 두께를 나타낸다[9].

$$\sigma = \frac{E_s h_s^2}{(1 - \nu) 6 h_f R} \quad (1)$$

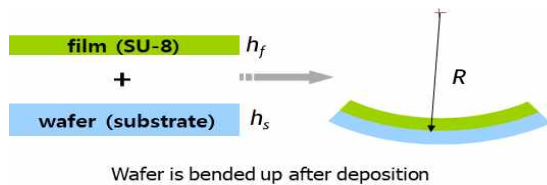


그림 5. 박막 적층 시 휨 현상
Figure 5. Wafer warpage after thin film deposition

먼저 두께가 525μm이고 초기 bow 값이 ±10μm 미만인 웨이퍼만 기판으로 사용하였으며 실제 헤드 노즐층과 동일한 두께(11±0.2μm)의 SU-8 박막을 적층하였다. 적층 후의 웨이퍼 휨은 S-line 측정기(FLX2320)를 이용해서 x 및 y 방향으로 각 웨이퍼 당 2회씩 측정하였으며 박막 증착 전후에 발생하는 기판의 곡률 변화 측정 결과를 표 2에 나타내었다. 측정된 bow값을 이용하여 박막의 잔류응력을 평가하였으며 기판의 휨 현상에 의해 SU-8 내부에 22.03MPa의 잔류응력이 발생하는 것을 확인하였다.

표 2. 잔류응력을 위한 휨 측정 결과

Table 2. Bow measurement result for residual stress

substrate ID	radius [m]	bow [μm]		stress [MPa]
		before	after	
1	65.45	3.80	-27.76	21.8
2	71.17	8.06	-25.05	22.4
3	50.14	-3.84	-34.61	21.9
Ave.				22.03

3. FEA 설계 및 제작

일반적으로 잉크젯 프린터는 그림 6(a)와 같이 4가지 색상의 잉크를 사용하며 헤드의 노즐은 잉크 피드홀 양쪽으로 2개씩 길이방향(z축)으로 380개가 배치되므로 총 3040(4x2x380)개의 단위 노즐(unit nozzle)이 반복적으로 위치하고 있다. 따라서 단위 노즐마다 동일한 변형이 발생하며 단위 노즐 역시 xy평면을 기준으로 대칭 형상이므로 해석 시간을 줄이기 위해 그림 6(b)와 같이 1/2 단위노즐에 적절한 대칭 경계조건을 부여하였다. 또한 실험에서 구한 22.03MPa의 잔류응력을 초기 하중조건으로 헤드 내부에 부과하였으며 유지보수 단계의 와이핑(wiping)에 의한 변형을 고려하기 위해 노즐층 표면에 블레이드 동적 접촉조건(속도: 25.4mm/s, 마찰계수: 0.2)을 인가하여 FEA 해석을 수행하였다.

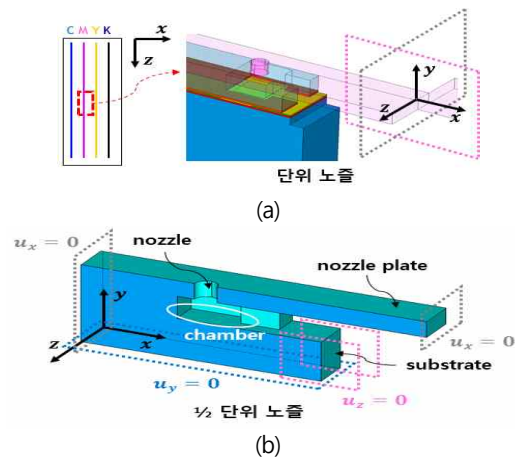


그림 6. 해석을 위한 헤드 형상 (a) 단위 노즐 (b) 경계조건
Figure 6. Configuration of print head (a) unit nozzle (b) geometric boundary conditions

그림 7(a)는 안정성 검증 해석을 위한 초기 프린터 헤드의 FEA 모델링 형상을 나타낸다. 챔버층과 노즐층에 사용되는 SU-8의 물성값은 인장시험을 통해 측정된 결과값을 이용하였으며 웨이퍼 제작사에서 제공한 실리콘의 물성값을 기판에 적용하였다. 초기 헤드 형상에

대한 FEA 해석 결과를 그림 7(b)~(d)에 나타내었다. 잔류응력에 의한 피드홀 변형이 노즐층의 수평방향 변형을 야기하며 이 때 노즐 내부 벽면의 최대응력은 34.36MPa이다. 또한 와이핑 시 블레이드와 접촉에 의해 노즐층 표면에 57.52MPa의 최대응력과 $-3.033\mu\text{m}$ 의 수직방향 최대변위가 발생하였다. 초기 형상에 발생하는 최대응력이 SU-8의 항복응력(63.74MPa)보다는 낮지만 와이핑은 유지보수를 위해 매 잉크 토출 후 반복되는 과정이므로 실제 노즐층에는 더 큰 응력과 변형이 발생하며 노즐층 균열이나 박리와 같은 추가적인 파손을 유발한다.

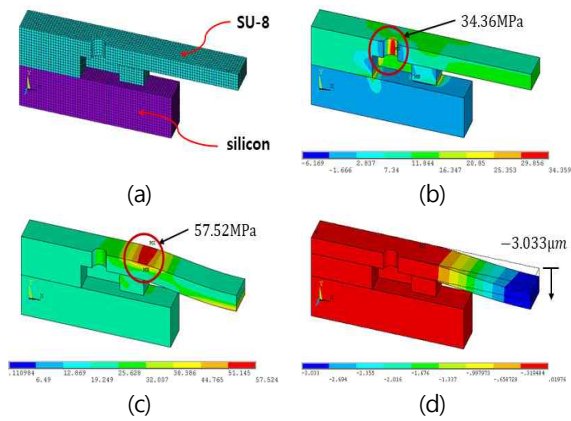


그림 7. 초기 헤드 FEA 해석 (a) FEA 모델링 (b) 잔류응력에 의한 응력 분포 (c) 와이핑에 의한 응력 분포 (d) 노즐층 변형
 Figure 7. FEA analysis of initial print head (a) FEA modeling (b) stress distribution induced residual stress (c) stress distribution induced wiping (d) deflection of nozzle plate

그림 7의 초기 헤드 형상에 대한 해석 결과를 토대로 헤드 내부를 보강한 4가지 형상을 그림 8(a)에 나타내었다. 노즐층의 강성을 증가시키기 위해 두께 보강구조(rib)를 추가하였으며 챔버층에 기둥(pillar)이나 지지벽(support wall)을 도입하여 피드홀과 노즐층의 변형을 방지할 수 있는 구조를 제안하였다. 또한 개별 피드홀(individual feed hole)을 통해 각각의 챔버에 잉크가 공급되도록 하여 유로 공간 확보를 위한 구조적 취약점을 최소화하였다. 그림 8(b)의 FEA 해석 결과와 같이 제안된 4가지 헤드 형상 모두 초기 형상에 비해 최소 40% 이상 최대응력이 감소하였다.

하지만 rib 구조는 잔류응력에 의한 노즐층의 수평방향 강성은 증가하였으나 와이핑에 의한 수직방향 변형에는 여전히 취약하다. 또한 개별 피드홀 구조는 변형이

집중되는 노즐층 중앙부를 기관과 직접 연결하여 최대응력이 가장 큰 폭으로 감소하였지만 챔버마다 개별적으로 잉크를 공급하기 위한 전자 제어장치를 설치해야 하며 잉크가 유입되는 유로의 단면적이 변경되므로 추가적인 잉크 유동해석이 요구된다. 따라서 제안된 형상 중에는 기둥이나 지지벽으로 내부가 보강된 형상이 잉크의 유동 흐름을 방해하지 않으면서 헤드의 강성을 향상시킬 수 있는 최적의 구조인 것을 알 수 있다. 특히 그림 9의 FEA 해석 결과와 같이 두 구조의 수직방향 최대변위는 각각 $-1.415\mu\text{m}$ 와 $-1.375\mu\text{m}$ 이므로 초기 모델에 비해 노즐층 변형이 50% 이상 감소한 것을 확인하였다.

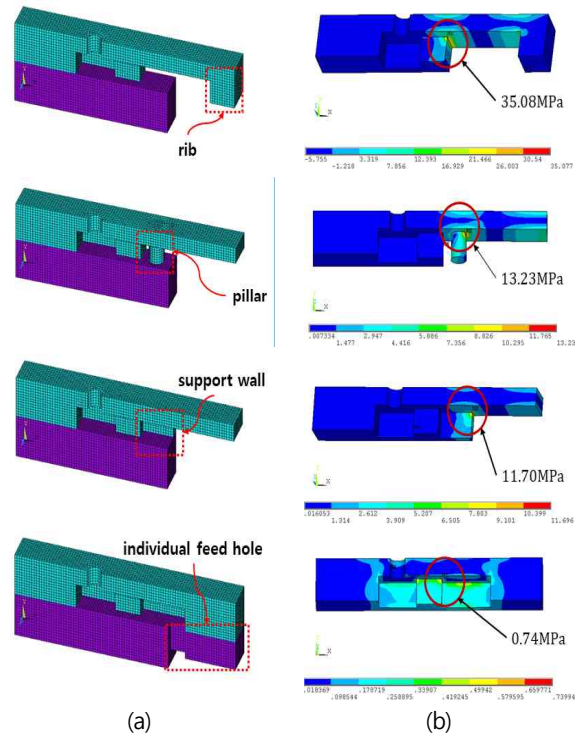


그림 8. FEA 해석 (a) 제안된 헤드 형상 (b) 해석 결과
 Figure 8. FEA analysis (a) configuration of proposed print head (b) analysis results

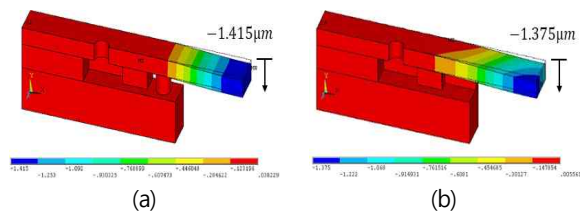


그림 9. 노즐층 변형 해석 결과 (a) 기둥 (b) 지지벽
 Figure 9. FEA analysis result of nozzle plate deflection (a) pillar (b) support wall

그림 10은 위 해석결과를 바탕으로 제작된 기둥과 지지벽 구조의 실제 형상을 나타낸다. 두 구조 모두 노즐층 표면에 균열이나 잉크 누출과 같은 결함이 없음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시된 헤드 보강 형상이 노즐층 파손 및 변형에 의한 층과 층 사이의 박리를 최소화 하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

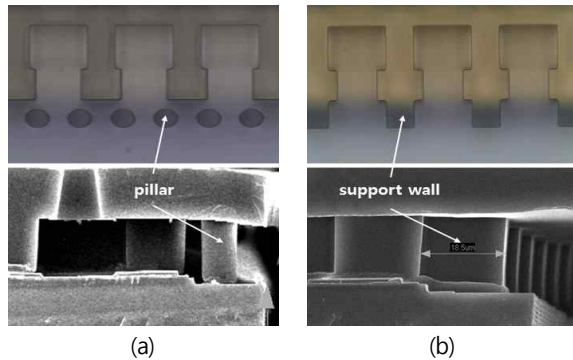


그림 10. 제안된 프린터 헤드 제작 형상 (a) 기둥 (b) 지지벽
Figure 10. SEM pictures of fabricated print head (a) pillar (b) support

IV. 결론

높은 인쇄 해상도와 빠른 출력 속도로 인해 다양한 IT 분야에서 사용되고 있는 프린팅 기술은 잉크 공급 유로를 확보해야 하는 프린터 헤드의 구조적 취약점 및 제작 과정에서 발생하는 잔류응력에 의한 변형으로 인해 노즐층 파손이나 잉크 누출과 같은 결함이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 기존 헤드의 문제점을 극복할 수 있는 보다 견고하고 신뢰할 수 있는 헤드 형상을 제안하였으며 FEA 해석을 통해 안정성을 검증하였다.

먼저 시편 인장시험 및 웨이퍼 휨 실험을 통해 노즐층 재료인 SU-8의 물성값(탄성계수 3.25GPa, 항복응력 63.74MPa)과 발생하는 잔류응력(22.03MPa)을 구하였다. 또한 초기 헤드 형상에 대한 해석 결과를 토대로 피드홀의 수평 변형과 노즐층의 수직 변형을 최소화 할 수 있도록 헤드 내부 강성을 보강한 4가지 형상을 설계하였으며 발생하는 최대 응력 및 노즐층 변형이 각각 최소 40% 및 50%로 감소하였다. 제안된 구조의 견고성을 검증하기 위해 기둥 및 지지벽 형태의 헤드를 제작하였으며 노즐층 균열 및 잉크 누출이 없는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 내부 강성을 보강한 헤드 형상이 기존 잉크젯 프린터의 정상 방향의 잉크

토출에 기여할 뿐만 아니라 line printing과 같은 대면적 프린팅 기술에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] H.P. Le, "Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology," J. Imaging Science and Technology, Vol. 42, No. 1, pp. 49-62, 1998.
- [2] M.J. Lee, "Inkjet Printing Technology Still in Progress," J. of the Korean Ceramic Society, Vol. 48, No. 6, pp. 543-548, 2011. doi: 10.4191/kcers.2011.48.6.543
- [3] Y.K. Kim, S.J. Yoon, J.A. Park and S.J. Jung, "Inkjet-Based Bioprinting," Polymer Science and Technology, Vol. 26, No. 5, pp. 416-422, 2015.
- [4] G.Y. Park and H/W. Lee, "Design of an Automatic Height Adjustable Pillow using 3D Printing and CAE," J. of the Convergence on Culture Technology (JCCT), Vol. 4, No. 1, pp. 331-335, 2018. doi: 10.17703/JCCT.2018.4.1.331
- [5] A.K. Sen and J. Darabi, "Droplet ejection performance of a monolithic thermal inkjet print head," J. of Micromechanics & Microengineering, Vol. 17, No. 8, pp. 1420-1427, 2007. doi: 10.1088/0960-1317/17/8/002
- [6] H. Tan, E. Tornaiainen, D.P. Markeln and R.N. Browning, "Numerical simulation of droplet ejection of thermal inkjet printheads," International J. for Numerical Methods in Fluids, Vol. 77, pp. 544-570, 2015. doi: 10.1002/flid.3997
- [7] T. Tofan, H. Kruggel-Emden, V. Turla and R. Jasevicius, "Numerical Modeling of the Motion and Interaction of a Droplet of an Inkjet Printing Process with a Flat Surface," Applied Sciences, Vol. 11, pp. 527-541, 2021. doi: 10.3390/app11020527
- [8] W.N. Sharpe, MEMS Handbook: Chapter 3 - Mechanical Properties of MEMS Material, CRC Press, BocaRaton, 2002.
- [9] G.G. Stoney, "The tension of metallic films deposited by electrolysis," Proceedings of the Royal Society of London, Vol. A82, pp. 172-175, 1909.

※ 이 논문은 한성대학교 교내학술연구비 지원 과제임.

This research was financially supported by Hansung University.