

잉크젯프린터의 처짐량 개선을 위한 위상 최적화 기반 형상 설계

오민성¹, 홍석무^{2,3*}

¹공주대학교 기계자동차공학부, ²공주대학교 미래자동차공학과, ³그린카기술연구소

Study on the Optimal Design for Reducing Deflection in Inkjet Printer Using Topology Optimization Technique

Minseong Oh¹, Seokmoo Hong^{2,3*}

¹Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

²Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University

³Institute of Green Car Technology

요약 잉크젯프린팅(Inkjet Printing)은 OLED 발광소재를 플라스틱 기판에 분사해 디스플레이 픽셀을 재현하는 정밀 기술로 고정밀 스테이지가 적용되어 위치 정확도는 $\pm 3\mu\text{m}$ 로 예측된다. 그러나 잉크젯프린트는 구조상 후방에서 전체를 고정하는 Back plate에 다양한 부품들이 볼팅으로 고정되기 때문에 외팔보와 같은 처짐이 발생하게 된다. 이는 프린팅 과정에서 오차를 유발하고 결과물 정밀도 하락, 불량률 상승과 같은 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 잉크젯프린터의 부품들에 대한 처짐 정도를 확인하고, 변경 가능한 부품의 형상에 위상 최적화를 적용하여 기존 모델과 동일한 중량으로 처짐을 개선하는 것을 목적으로 한다. 먼저 단순화된 잉크젯프린트의 전체 모델에 대하여 부품의 처짐 정도와 원인을 확인하기 위해 유한요소해석을 진행하였다. 이후 처짐 개선을 위해 변경 가능한 Back plate와 리브 구조에 위상 최적화를 적용하여 중량은 동일하되 처짐량을 개선할 수 있는 구조로 요소(mesh)를 재구성하였다. 재구성된 잉크젯프린터 모델로 진행한 FEA 결과 기존 대비 Top plate의 처짐량이 Top plate가 -Z 축 방향으로 2.45 mm에서 1.03 mm로 약 58.07%, Base plate의 처짐량이 0.123 mm에서 0.117 mm으로 약 5.3% 감소시켰다. 본 연구를 통해 위상 최적화를 적용한 구조변경을 통해 잉크젯프린팅과 같은 정밀 기술의 안정성을 향상시킬 수 있다는 것을 증명했다.

Abstract Inkjet printing is a precise technology that reproduces display pixels by spraying OLED luminescent materials onto a plastic substrate with a fixed stage applied to achieve a positional accuracy of $\pm 3 \mu\text{m}$. However, due to the structural nature of inkjet printers, sagging can occur, causing errors during the printing process and having negative effects such as reduced precision of the final product and increased defect rate. The aim of this study is to improve sagging by applying topology optimization to changeable component shapes while maintaining the same weight as an existing model. Finite element analysis was performed to confirm the degree and cause of sagging, and topology optimization was applied to changeable back plates and rib structures. The FEA results from the reconstructed inkjet printer model showed that the deflection of the top plate decreased from 2.45 mm to 1.03 mm in the -Z direction, a reduction of approximately 58.07%. The deflection of the base plate decreased from 0.123 mm to 0.117 mm, a reduction of approximately 5.3% compared to the original. The results show that the stability of precision technology such as inkjet printing can be improved through structural changes applied with topology optimization.

Keywords : Compliance, Finite Element Analysis, Inkjet Printing, Structural Shape, Topology Optimization

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-004)

*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Kongju Univ.)

email: smhong@kongju.ac.kr

Received September 15, 2023

Accepted December 8, 2023

Revised October 24, 2023

Published December 31, 2023

1. 서론

잉크젯프린팅(inkjet printing)은 OLED 발광소재를 플라스틱 기판에 분사해 디스플레이 픽셀을 재현하는 정밀 기술이다. 노즐을 통해 미세하게 분사된 액체 상태의 OLED 발광소재는 기판 위에 일정한 막을 형성하며 제작 공정 간 위치 정확도는 $\pm 3\mu\text{m}$ 로 예측된다. Fig. 1과 같이 잉크젯프린터는 공정에 따라 잉크의 방향을 편향시켜 분출해 빠른 속도가 장점인 Continuous ink jet system과 필요한 시간에만 잉크를 토출시키는 방식으로 미세한 도트(dot)까지 구현이 가능한 Drop-On-Demand ink jet system으로 나눌 수 있다[1,2]. 이러한 잉크젯프린팅의 장점은 기존 Vacuum and photolithography process와 비교하여 재료 소모량이 적고 공정 과정 단축을 통해 비용과 시간을 절감할 수 있다. 또한, 다수의 노즐을 연결하여 대형 기판의 대량 생산이 가능하고, 정밀한 잉크 분사량 제어를 통해 재료 소모 효율 또한 100%에 가까운 잉크젯프린팅은 디스플레이 산업 속 차세대 디스플레이 개발에 있어서 중요한 역할을 하고 있다[3].

그러나 잉크젯프린터는 구조적으로 탑 플레이트(Top plate), 베이스 플레이트(Base plate) 등의 Plate 부품과 리저버 유닛(Reservoir unit), 헤드 유닛(Head unit)과 같은 Unit 부품들이 백 플레이트(Back plate)에 볼트로 결합되기 때문에, 이는 흡사 외팔보와 같은 거동을 가진다. 이러한 구조는 백 플레이트의 처짐을 유발하며, 결과적으로 잉크젯프린터 사출물의 위치 정확도 하락 및 불량률 상승으로 이어진다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 처짐 정도와 원인을 파악하고, 변경 가능한 부품을 지정해 위상 최적화 기법을 적용하여 처짐 정도를 개선하고자 한다. 위상 최적화를 통한 구조 개선은 일반적으로 지정된 안전계수를 넘지 않는 조건에서 최적화를 진행해 부피를 최소화하는 방식으로 진행된다[4-8]. 그러나 본 연구에서는 초기 잉크젯프린터 모델과 같은 중량을 가지는 것을 구속 조건으로 고려하여 최적화 설계 조건을 도출하였다. 이러한 접근은 기존 설계 요소를 제거하는 것이 아닌 이동을 통해 최적화를 수행함으로써 같은 중량에서 처짐 완화가 가능할 것으로 예측된다[9].

먼저, 해석의 용이성을 위해 대상 프린터를 단순화하여 모델링 하고, 프린터 모델에서 발생하는 처짐 정도를 확인하기 위하여 구조해석을 진행하였다. 그리고 해석 결과를 토대로 설계 변경이 가능한 부품을 선정하여 위상 최적화를 적용하여 초기 모델과 최적화 모델의 해석

결과를 비교 및 검증하였다.

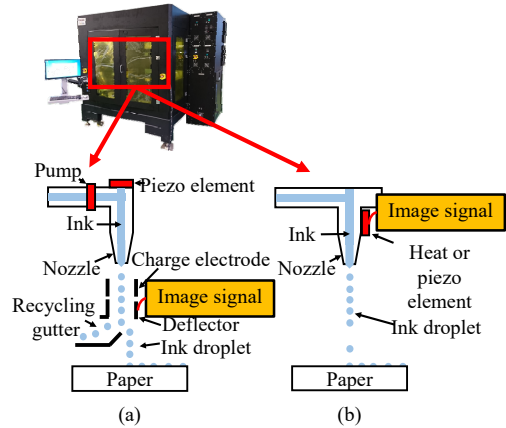


Fig. 1. Inkjet printer model and dispensing form (a) continuous ink jet system, (b) drop-on-demand ink jet system

2. 잉크젯프린터 초기 모델 퍼짐 평가

2.1 초기 모델 해석 조건

앞서 언급한 것과 같이 플레이트 부품과 유닛 부품 등 대부분의 부품들이 백 플레이트에 볼트로 결합되며, 중력에 의한 자중이 적용되면 이는 흡사 외팔보와 같은 거동을 가진다. 잉크젯프린터의 자세한 형상은 Fig. 2 (a)에 도시하였다. 그러나 Fig. 2 (a)와 같이 전체 형상은 유한요소해석을 수행하기에 형상이 복잡하고 부품 간의 부피 차이가 크기 때문에 요소 수가 증가하게 되고, 이에 비례하여 해석 시간 또한 증가하게 된다. 따라서 잉크젯프린터에 거동 특성을 해치지 않으면서 해석 결과에 영향이 적은 부품 형상에 한하여 단순화를 진행하였다. 단순화된 자세한 형상은 Fig. 2 (b)에 도시하였다.

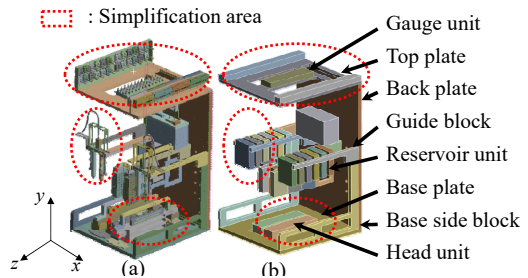


Fig. 2. Finite element model (a) basic, (b) simplified applied

잉크젯프린터의 주요 구성품의 재질은 AL6061 소재를 사용하며, 해당 재질의 물성을 포함하여 해석에 사용된 세부 물성치는 Table 1에 기재하였다. 실제 대상과 단순화 모델 간의 등가하중을 고려하기 위해 단순화된 잉크젯프린터의 부품 중량 조건을 Table 2에 명시하였다. 또한 외부 케이스와 볼트로 연결된 백 플레이트의 경계조건을 고려하여 8개의 볼트 홀에 구속 조건을 부여했으며, 경계조건은 Fig. 3에 도시하였다.

Table 1. Material properties for FEA

Material	AL6061	Poly Acetal (POM)
Density [kg/m ³]	2,700	1,390
Young's modulus [GPa]	68.9	2.6
Poisson's ratio [-]	0.33	0.39
Yield strength [MPa]	110	60
Ultimate strength [MPa]	150	67

Table 2. Material properties for FEA

Geometry	Weight [kg]	Density [kg/m ³]
Gauge unit	23.98	9,561.3
Reservoir unit	11.94	2,012.8
Back plate	16.97	2,689.1
Head unit	17	5,978.9
Base side block	2.25	2,640.7

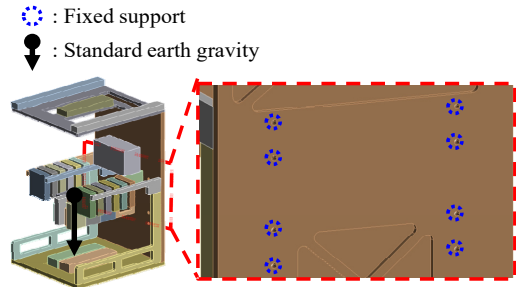


Fig. 3. Boundary conditions for FEA

2.2 초기 모델 해석 조건

주요 부품의 변위량으로 탑 플레이트가 2.45 mm, 베이스 플레이트가 0.12 mm이며, 응력의 경우 백 플레이트의 상단부에서 최대 응력 14.36 MPa이 도출되었다. 위 값은 해당 소재 AL6061의 항복강도 110 MPa를 초과하지 않기 때문에 해당 부품에 대한 구조적 안정성이 확보되었다. 그러나 탑 플레이트의 처짐량에 대하여, 백 플레이트의 최상단 고정 부위로부터 상단까지 0.06° 굽힘이 발생한 것으로 보아 백 플레이트에서 발생한 탄성

영역 내의 굽힘이 탑 플레이트의 처짐에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 베이스 플레이트의 처짐량은 직접 연결된 베이스 사이드 플레이트의 브래킷 구조에 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서 백 플레이트와 베이스 사이드 블록의 구조를 변경하여 탑 플레이트와 베이스 플레이트의 처짐량을 개선한다.

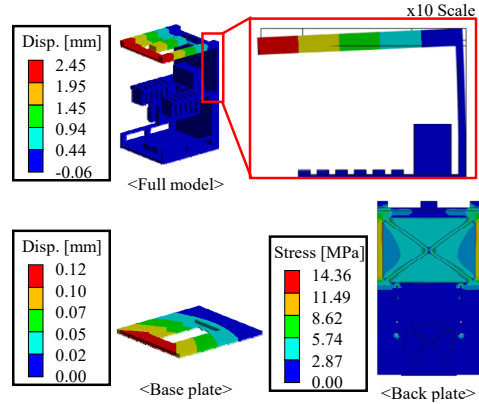


Fig. 4. Analysis results for the original model

3. 잉크젯프린터 최적화 진행 과정

3.1 위상 최적화

위상최적화는 본 논문에서는 탑 플레이트와 베이스 플레이트의 처짐량을 개선하기 위해 두 부품과 직접적으로 연결되어 있는 백 플레이트와 베이스 사이드 플레이트에 위상 최적화를 적용한다. 위상 최적화 문제에서 밀도법이란, 재료가 배치되지 말아야 할 지역의 요소들을 0 또는 0에 가까운 값으로 설정하고, 그와 반대로 재료가 배치되어야 할 지역은 1로 설정하여 전체적인 레이아웃을 결정하는 최적화 기법이다. 구조 모델에 하중과 구속 조건을 정의하고, 설계 영역과 비설계 영역을 설정한 다음 해석을 실행하면 각 위치의 Von-mises stress를 확인할 수 있으며, 이 값을 0에서 1 사이의 정규화된 값으로 변환하는 것이 밀도법의 중심 원리이다. 밀도법을 통해서 형상의 밀도가 위상 최적화에서 유일한 설계 변수로써 활용된다. 본 논문에서 최적화 문제에 대해서 내부 가상 밀도를 초기 모델의 밀도까지 최소화하는 최적 설계 문제로서 식 (1)과 같이 정의했다[10,11].

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && n_i, i = 1, \dots, N \\
 & \text{to minimize} && U_c \equiv U^T K U \quad (1)
 \end{aligned}$$

subject to $0 < n_i \leq 1$
 $V \leq V_0 - V^*$

각 변수에 대하여 설계 변수 n_i 는 N 개의 유한 요소에 할당된 내부 가상 밀도를, 목적함수 U_c 는 컴플라이언스 함수, U는 각 절점에서의 변위 벡터를, K는 강성을 나타낸다. 식 (1)의 제약조건에서 V는 부피, V_0 는 부피의 초기값, V^* 는 위상 최적화로 제거될 부피를 나타낸다. 이와 같이 정의된 위상 최적화 문제에서는 V를 V^* 만큼 감소시킬 때 최소의 컴플라이언스를 갖는 가상 밀도 분포를 계산하게 된다.

위상최적화는 개념설계의 단계에 적용되는 최적화 기법으로, 본 연구에서 잉크젯 프린트는 설계상에서 기준 두께, 총 길이와 같은 설계 변수를 고정하고 있다.

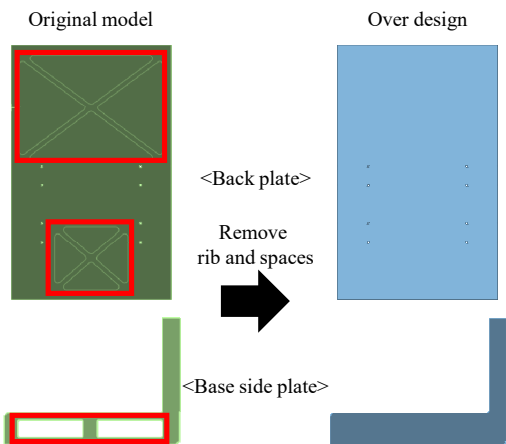


Fig. 5. Topology optimization applied area

따라서 본 연구에서는 과 설계(Over design)모델을 제작하여 해당 모델에 대한 위상최적화를 진행한다. 과 설계 모델에 대한 자세한 형상은 Fig. 5에 도시되어 있다.

3.2 최적화 적용 과정

과 설계 모델에서 최적화를 통해 부피가 감소할 경우 초기 모델의 동일한 부피일 때를 최적의 가상 밀도 분포로 가정하고 이를 특정하기 위해 과 설계 모델 대비 10%부터 순차적으로 위상 최적화 문제를 해석하였다. 위상 최적화 문제의 해석에는 ANSYS의 Topology Optimization 기능을 사용하였으며, 이때 최대 변형량이 관측된 탑 플레이트의 변형량 개선을 우선으로 하기 위하여 백 플레이트, 베이스 사이드 플레이트 순서로 최적화를 진행하였다.

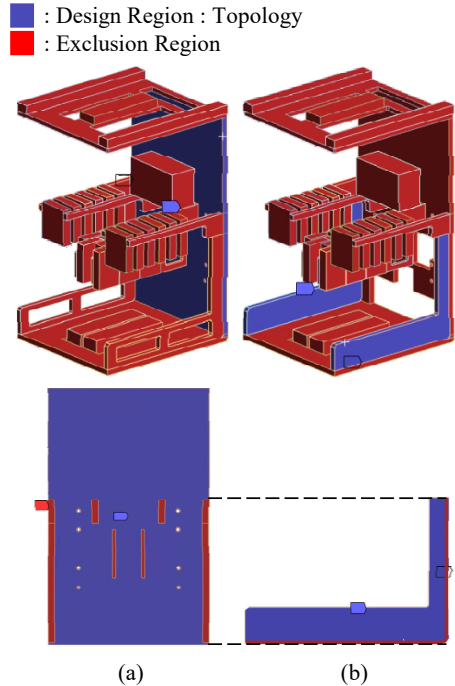


Fig. 6. Optimization area (a) back plate, (b) base side plate

위상 최적화를 실시하기 위한 선행 조건으로 최적화 영역과 비 최적화 영역을 명확히 구분해야 한다. 따라서 Fig. 6와 같이 백 플레이트와 베이스 사이드 플레이트의 표면을 최적화 영역으로 설정하고, 중량을 특정 수준까지 줄이는 조건을 고려하여 최적화를 진행하였다.

3.3 백 플레이트 최적형상

백 플레이트의 경우, 외부와의 연결을 위한 볼트 홀 및 부품 간 연결을 고려하여 Fig. 6. (a)와 같이 최적화 영역을 설정하였다. 이에 따라 제약조건을 준수하면서도 Fig. 5 Original model의 백 플레이트와 같은 중량으로 구조해석 결과를 비교하기 위해 Fig. 5 Over design의 부피에 대한 목표 감소치를 30%로 설정하여 위상 최적화를 진행하였다.

최적화 결과 백 플레이트 하단부의 밀도는 부피 목표치에 대한 민감도가 낮은 영역(0.0 ~ 0.4)으로 판단된다. 그 결과는 Fig. 7 (a)에 도시한 것과 같다. 따라서 이를 기반으로 Ansys Space Claim을 사용하여 재설계 하였다. 두께는 초기와 같은 20 mm로 지정하였다.

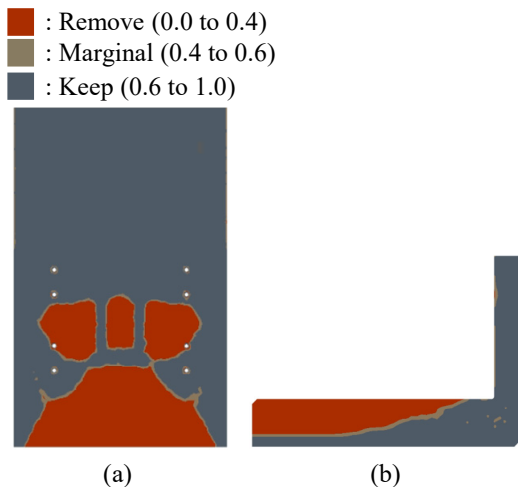


Fig. 7. The area that determines whether to remove or preserve based on sensitivity (a) back plate, (b) base side plate

3.4 베이스 사이드 플레이트 최적형상

베이스 사이드 플레이트의 경우, 베이스 플레이트와 백 플레이트의 연결부를 고려하여 Fig. 6 (b)와 같이 최적화 영역을 설정하였다. 이에 따라 제약조건을 준수하면서도 Fig. 5 Original model의 베이스 사이드 플레이트와 같은 중량으로 구조해석 결과를 비교하기 위해 Fig. 5 Over design의 부피에 대한 목표 감소치를 34%로 설정하여 위상 최적화를 진행하였다.

최적화 결과 베이스 사이드 플레이트 상단부의 밀도는 부피 목표치에 대한 민감도가 낮은 영역(0.0 ~ 0.4)으로 판단된다. 그 결과는 Fig. 7 (b)에 도시한 것과 같다. 따라서 이를 기반으로 Ansys Space Claim을 사용하여 재설계 하였다. 두께는 초기와 같은 20 mm로 지정하였다.

4. 최적화 모델 퍼짐 평가

4.1 최적화 진행 및 결과

초기 형상에서 백 플레이트, 베이스 사이드 블록의 굽힘으로 인한 처짐이 탑 플레이트, 베이스 플레이트에서 확인되었으며 이를 해결하기 위해 위상최적화를 적용하였다. 최적화 결과에 따른 모델 형상 변화과정은 Fig. 8, 9에 도시되어 있다. 이후, 해당 모델에 대한 처짐량 개선 검증을 위해, 초기 모델과 동일한 조건으로 해석을 진행하였다.

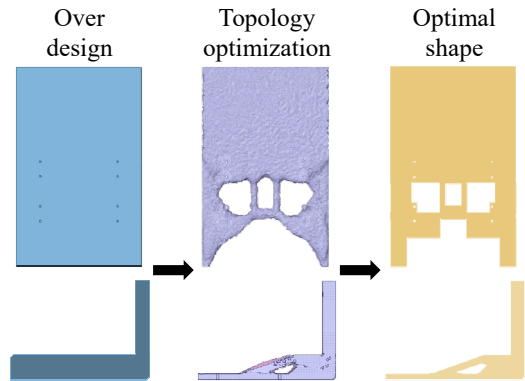


Fig. 8. Optimization process

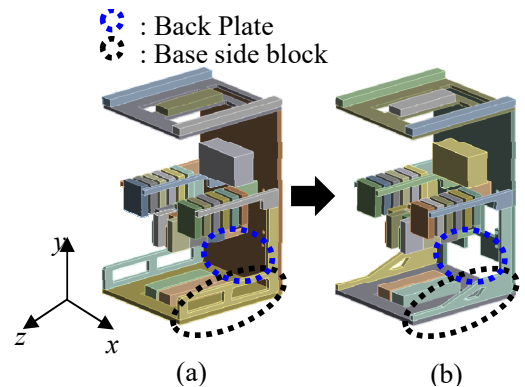


Fig. 9. Finite element model (a) optimization not applied, (b) optimization applied

4.2 최적화 결과

Fig. 9와 같이 탑 플레이트의 이동량은 2.45 mm에서 1.03 mm으로 58.07% 감소, 베이스 플레이트는 0.1232 mm에서 0.1167 mm으로 5.28% 감소되었으며 이를 Table 3에 도시하였다. 특히 백 플레이트의 경우 0.06°에서 0.02°으로 1/3배 감소하여 탑 플레이트 처짐이 크게 개선되었다. 응력 결과는 Fig. 9와 같이 백 플레이트가 외부 환경과 연결, 즉 고정된 원형 hole에서 최대 응력 값 17.51 MPa이 도출되었다.

응력의 경우, 최대 응력 부위와 응력 값이 기존 모델과 차이가 발생하였다. 최대응력 발생 부위의 변화는 기존 모델대비 최적화 모델의 하단 부가 감소한 부피변화로 부터 발생한 것으로 판단된다. 최대 응력 값은 기존 모델 대비 3.15 MPa증가하였다. 그럼에도 기존 해설 결과와 동일하게 백 플레이트의 소재인 AL6061의 항복강도 110 MPa를 초과하지 않기 때문에 구조적 안정성이 확보되었음을 확인할 수 있다.

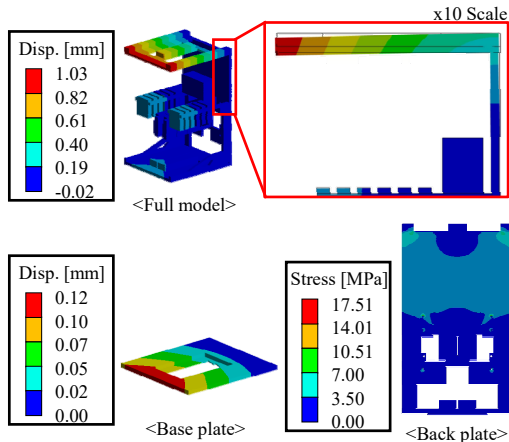


Fig. 10. Analysis results for the Optimized model

Table 3. Comparison of analysis result after optimization

Part	Initial shape [mm]	Optimal shape [mm]	Rate of decrease [%]
Top plate	2.4507	1.0277	58.07
Base plate	0.1232	0.1167	5.28

5. 결론

본 연구는 잉크젯프린트의 전체적인 처짐량을 개선하기 위해 백 플레이트와 베이스 사이드 블록에 위상 최적화 기법을 적용하고 유한요소해석을 통해 제안된 최적 설계의 유효성을 검증하였다. 그 결과, 같은 중량일 때 -Z 방향 기준으로 각각 탑 플레이트 처짐량 58%, 베이스 플레이트 처짐량 5.3%를 개선하여 잉크젯프린트의 구조적 안정성 향상이 가능함을 확인하였으며, 내용은 다음과 같다.

1. 상용화 잉크젯프린트 모델에 대하여 단순화 및 유한요소해석을 진행하였다. 해석 결과로 최대 처짐량은 탑 플레이트에서 -Z 방향 2.45 mm이며 기타 처짐량으로 베이스 플레이트에서 -Z 방향 0.12 mm으로 확인되었다.
2. 잉크젯프린트의 전체적인 처짐량을 개선하기 위해 기존 보강대로 설치되어 있는 백 플레이트, 베이스 사이드 블록의 구조를 변경했다. 이때 변경하는 구조에 대해서는 최적화 방법 중 위상 최적화를 적용하여 모델을 제작하였다. 최적화 진행 시 비교 대상은 같은 중량 기준의 초기 모델로 지정하였다.

3. 백 플레이트, 베이스 사이드 블록에 최적화를 적용하여 같은 중량에서 변경된 형상 구조를 도출하였으며 해당 부품을 교체 후 이전에 실시한 해석과 같은 조건에서 유한요소해석을 진행하였다.
4. 기존 모델보다 처짐량에 대하여 약 58%, 5.3% 더 향상된 모델을 제작하였고 이를 통해 위상 최적화를 통한 구조 변경을 통해 잉크젯프린트의 처짐량을 보완하여 안정성을 향상시킬 수 있음을 증명하였다.

References

- [1] P. T. Huy., Continuous inkjet printing method for patterning of electronic materials, Doctor's thesis, Soonchunhyang University, Seoul, Korea, pp. 129-134, 2020.
- [2] J. Y. Choi., Y. J. Kim., S. W. Sohn., Y. M. Kim., S. H. Lee., "The Analysis of Drop-On Demand Characteristic of Electrostatic Field Induced Inkjet Head System with Carbon Nano Tube (CNT) Ink", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 21, No. 5, pp. 1,445-1,449, Aug. 2007.
- [3] B. H. Kwon., C. W. Joo., "Trends in Display Technology Development Applying Inkjet Printing Principles", Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 38, No. 1, pp. 26-35, Feb. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.22648/ETRI.2023.J.380104>
- [4] B. H. Kwon., C. W. Joo., "Study on the Optimal Design of Column Rib Structure of Horizontal Machine Tool Using Topology Optimization Technique", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 32, No. 1, pp. 1-7, Feb. 2023. DOI: <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.32.1.1>
- [5] M. J. Kim., J. H. Choi., G. Y. Baek., "A Study on Injection Mold Design Using Topology Optimization", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineer, Vol. 21, No. 4, pp. 100-106, Apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.04.100>
- [6] T. W. Yun., S. S. Lee., "Topology Optimization Design of Machine Tools Head Frame Structures for the Machining of Aircraft Parts", Topology Optimization Design of Machine Tools Head Frame Structures for the Machining of Aircraft Parts, Vol. 12, No. 4, pp. 18-25, Aug. 2018. DOI: <https://doi.org/10.20910/JASE.2018.12.4.18>
- [7] T. H. Kim., "Shape Design based on Topology Optimization for Manufacturing of Lightweight Valve Disc by 3-D Printing", Journal of Energy Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 13-19, Dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2018.27.4.013>
- [8] W. C. Kim., T. J. Chung., "Topology Optimization of Offshore Wind-Power Turbine Substructure Using 3D Solid-Element Model", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 38, No. 3, pp.

309-314, Mar. 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.3.309>

- [9] J. H. Pack., S. T. Jeon., T. J. Lee., J. D. Kang., M. C. Kang., "Effect on Drive Point Dynamic Stiffness and Lightweight Chassis Component by using Topology and Topography Optimization", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 3, pp. 141-147, Jun. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.3.141>
- [10] H. S. Kim., Y. S. Park., M. K. Yang., M. H. Lee., J. Y. Kim., "Initial Shape Design of Space Truss Structure using Density Method", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 10, No. 4, pp. 59-66, Dec. 2010.
- [11] ANSYS Theory Reference Release 5.6 [Internet]. SAS IP, Inc. c1999 [cited 1999 Nov], Available From: https://www.cae.utexas.edu/prof/kallivokas/teaching/ANSYS_examples/ansys56theory.pdf (accessed Sep. 06, 2023)
-

오 민 성(Minseong Oh)

[준회원]



• 2018년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 기계자동차공학부

<관심분야>

유한요소해석, 최적 설계

홍 석 무(Seokmoo Hong)

[중신회원]



• 1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학 학사)
• 2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학 석사)
• 2007년 3월 : Technical University of Munich, Germany, Department of Mechanical Engineering (기계공학박사)

- 2007년 4월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자 GTC, 수석연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 미래자동차공학과 교수

<관심분야>

금속 판재성형 및 단조, 유한요소해석, 최적 설계
