

**부품성능 극대화를 위한 작동환경 반영 단계적 구조최적설계 프로토콜 개발**송여울^{a,*}, 송병욱^b, 정민교^a, 하태호^a, 이필호^a**Development of a User-friendly Parametric and Topology Sequential Design Optimization Protocol**Yeo-Ui Song^{a,*}, Byeong Uk Song^b, Min-Kyo Jung^a, Taeho Ha^a, Pil-Ho Lee^a^a Department of 3D Printing, Korea Institute of Machinery & Materials^b Department of Mechanical Engineering, KAIST**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	5	July	2023
Revised	1	August	2023
Accepted	2	August	2023

*Keywords:*Kriging model
Topology optimization
User friendly design
Heat removal system**ABSTRACT**

This study presents a novel protocol to enhance the structural optimization design, considering the real manufacturing environment. Conventional manufacturing methods appear inadequate in meeting the high demand for reducing the product size while enhancing performance. Therefore, next-generation technologies will necessitate innovative techniques such as additive manufacturing and design optimization to improve part performance. Additive manufacturing has revived interest in structural optimization technology. However, most companies remain hesitant to adopt new and optimized designs owing to their unfamiliarity with the design process and fear of failure stemming from unforeseen variables. Hence, the protocol proposed in this study offers user selection options based on parametric optimization using machine learning models while incorporating existing validated designs. The expected feasibility function (EFF) provides a guide aligned with specified thresholds, such as design constraints. Topology optimization, utilizing the initial design selected in the previous step, can advance the optimization of engineering products familiar to users.

1. 서론

최근 다양한 첨단 산업분야에서 제품의 소형화 및 고성능화에 대한 요구가 대두되고 있다. 대표적인 예로 전기자동차의 경우 기존의 내연기관 자동차보다 운행 중 더 많은 열이 발생하기 때문에 열을 효율적으로 제거하는 시스템이 필요한 실정이다^[1]. 효율적인 열관리는 전기자동차 뿐만 아니라 반도체, 로봇 및 도심 항공 모빌리티 등 다양한 첨단 산업분야에서 요구된다. 이러한 제품의 성능과 수명은 효율적인 열제거와 직결되며, 특히 제품의 소형·경량화

에 따라 이러한 방열에 대한 요구가 더욱더 커지고 있다. 이에 혁신적인 성능 향상을 위하여 전통적인 접근방식에서 벗어나 금속 적층제조 및 위상최적설계 기술의 도입이 각광받고 있는 추세이다. 적층제조 기술은 기존의 제조 공정으로는 구현 불가능한 형상을 제작할 수 있는 특징을 갖고 있다. 금속 적층제조 기술 중 하나인 PBF(powder bed fusion)는 빌드플레이트(build plate)에 얇게 도포된 파우더에 레이저를 선택적으로 조사하여 조형하는 방법으로 현재 산업현장에서 가장 대표적으로 적용되고 있는 기술이다^[2,3]. 위상최적설계 기법은 유한요소해석을 기반으로 구조물의 경계조

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7760

E-mail address: yeoulsong@kimm.re.kr (Yeo-Ui Song).

건하에서 최적의 성능을 낼 수 있는 창의적인 구조를 제안한다. 그러나 기존의 전통적인 기계가공 및 압출 등의 공정에서는 그 형상을 구현하기 어려운 제약이 있다. 금속 적층제조 기술은 복잡형상 구현을 가능하게 함으로써 위상최적설계와의 결합으로 극적인 성능극대화를 얻을 수 있다^{4,5}. 이와 관련하여 실제 제품에 적용 가능한 간단한 방열 부품에 대해 위상최적설계를 적용한 예는 많이 보고되고 있다⁶⁻¹⁰. 그러나 실제 산업에서의 적용 측면으로 보았을 때 이러한 위상최적설계 결과는 대부분 사용자에게 친숙하지 못한, 가시가 뻗어나가는 듯한 창의적인 형상 제안으로 제조업 분야의 적용이 더딘 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실제 산업현장의 적용가능성을 고려한 최적설계 구축 프로토콜을 제안한다. 초기 도메인에 의존적인 위상최적설계 특성을 고려하여, 제안한 프로토콜을 히트싱크와 같은 규격화된 형태를 가지고 있는 제품에 적용하여 구조최적 설계안을 제시하였다. 먼저 규격화된 모델에 대해 성능에 영향을 끼치는 형상 변수를 추출하여 공정변수 최적화를 통해 설계 요구조건을 만족하는 초기 형상들을 제안한다. 제품의 실제 작동환경에 따른 제약 조건을 모두 고려하는 대신에 주요 설계 요구 조건을 만족하는 초기 디자인 선택권을 사용자에게 제공하는 것이 본 연구에서 제안한 단계적 구조최적설계 프로토콜의 특징이다. 사용자는 구조물의 추가 작동 요구 조건 반영 및 사용자 친화적인 초기 디자인을 선택하고, 이를 바탕으로 방열 성능 개선을 위한 위상최적설계를 수행하여 최종 설계안을 얻을 수 있다.

2. 단계적 최적설계 프로토콜 구축

2.1 위상최적설계 초기 도메인 형상 추출

본 연구의 예제가 되는 부품은 전자부품의 방열에 중요한 영향을 미치는 히트싱크로 설정하였다⁷⁻¹⁰. 히트싱크 내외부 반지름

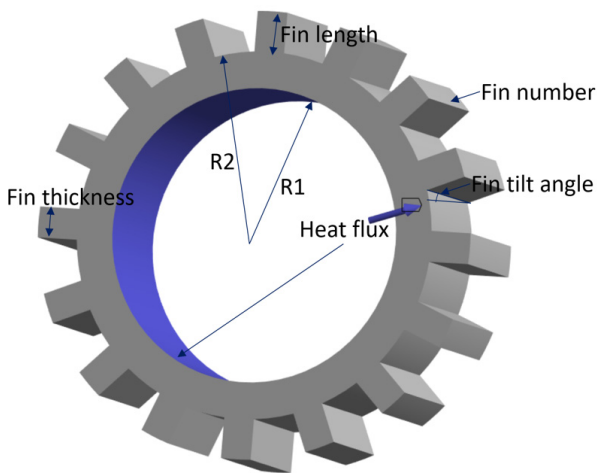


Fig. 1 Heat sink model

Table 1 Shape parameters of heat sink

Component	Min	Max	Unit
Fin number	8	16	ea
Fin length	10	20	mm
Fin tilt angle	0	20	°
Fin thickness	1	3	mm

R1, R2는 각각 40 mm, 50 mm 이며, 재료는 알루미늄 물성을 적용하였다. 경계조건으로 내부는 모터 등 전자 장치의 발생열로 인해 열유속 $2e-3 \text{ W/mm}^2$ 이 입력되며, 외부 표면에서 자연대류계수 $1e-5 \text{ W/mm}^3\text{C}$ 로 열을 방출하고 있다. 형상 변수는 히트싱크의 원통에 부착된 핀의 개수, 반경 방향 핀 길이, 원주방향 기준 비틀어진 핀 회전각도, 핀 두께로 총 4개의 변수를 가진다. 각 변수는 Fig. 1에 표기되어 있으며, 세부 범위는 Table 1에 서술되어 있다.

4개 변수에 대한 4차원 도메인을 균등영역으로 분할하여 각 영역에서 샘플링을 하는 라틴하이퍼큐브 방법을 이용하여 균일 간격으로 초기 샘플 150개를 추출하였다. 정상상태(steady-state) 열분포 해석을 수행하여 최대온도 값을 출력 값으로 설정하였다. ANSYS workbench 공정변수 형상변수-전산해석 자동화 기능을 사용하여 4개 형상입력변수 변화에 따른 히트싱크 모델 수정과 이에 따른 경계조건 수정 및 해석이 자동 수행되어 150개의 입력 형상변수 샘플에 대한 최대온도 출력 값을 수집할 수 있다.

2.2 방열 장치 최적설계 프로토콜 구축

본 연구에서 개발하고자 하는 프로토콜의 목적은 기존의 일반적인 위상최적설계와 달리 부품 형상을 단계적으로 개선시켜 산업현장의 일반적인 부품 형상에 익숙한 사용자의 최적형상에 대한 친숙함을 높이고 부품 경량화 및 열효율성 극대화를 가능하게 하는 것이다. 개발하는 프로토콜의 순서도는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 우선 최적화하고자 하는 부품에

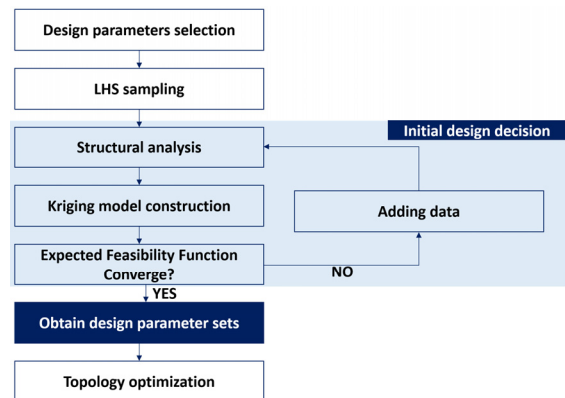


Fig. 2 Flow chart of developed protocol

대한 형상변수를 정의한다. 본 예제에서는 히트싱크 형상 파라미터로 핀의 개수, 핀의 길이, 핀의 회전각도, 핀의 두께를 형상변수로 설정하여 3차원 구조설계가 가능하도록 하였다. 라틴하이퍼큐브 샘플링을 통해 150개 형상 샘플을 추출하고 유한요소기반 열해석을 수행하여 모델별 최대온도 값을 추출하여 머신러닝 데이터를 수집한다. 이 때 수집한 유한요소 해석 결과 데이터를 이용하여 형상 입력변수에 따른 출력 최대온도 관계를 크리깅 모델(kriging model)로 구축한다. 크리깅 모델은 시간이 많이 소모되는 반복적 해석을 근사하는 대리 모델로 많이 사용되는 모델링 기법이다. 크리깅 모델의 예측값은 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)를 함께 제공하여 순차적 샘플링을 사용할 때 현재 데이터의 정보를 활용하기에 유용한 방법이다. D 차원을 가지는 입력변수 X 와 출력값 G 가 주어질 때, 크리깅 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X &= [x_1, x_2, \dots, x_N]^T, x_i \in R^D \\ G &= [g_1(x), g_2(x), \dots, g_N(x)]^T, g_i(x) \in R \\ G &= F^T \rho + Z \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 F 는 기저함수 벡터, ρ 는 기저함수 벡터의 계수, $Z = [z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_N)]^T$ 는 평균이 0이고 공분산 구조를 갖는 확률과정(stochastic process)을 나타낸다. 공분산 구조는 입력변수 사이의 상관관계를 의미하며, 두 변수 사이의 유클리디언 거리가 가까울수록 커진다는 가정하에 다음과 같이 표현된다.

$$E[cov(x_i, x_j)] = \sigma^2 R(\theta, x_i, x_j) \quad (2)$$

여기서 σ^2 은 공정분산(process variance), R 은 상관관계 함수를 나타낸다. 본 연구에서는 다음과 같은 가우시안 상관관계 함수가 사용되었다.

$$R(\theta, x_i, x_j) = \prod_{k=1}^l \exp(-\theta_k \|x_i - x_j\|^2) \quad (3)$$

여기서 ρ, σ^2, θ 는 최대우도추정법(maximum likelihood estimation, MLE)을 이용해 추정된다^[11]. 본 연구에서 크리깅 모델은 MATLAB 내부의 DACE kriging toolbox를 사용하여 모델링을 구현하였다^[12].

일반적인 전자기기의 한계 작동온도 범위는 85~100°C로 알려져 있다. 또한, 전자기기의 온도가 1°C 증가할 경우 칩의 신뢰도가 5%가 감소하며, 기기 수명이 현저히 줄어드는 것으로 보고되고 있다^[8]. 위의 열특성을 반영하여 본 프로토콜 적용 예제에서는 기기의 최대온도가 60°C 이하가 되도록 문제설정을 하였다. 작동 요

구조건 온도 이하로 되는 형상변수 영역을 대리모델을 사용하여 정확하게 추출하기 위해서는 충분한 수의 해석 데이터가 필요하다. 많은 수의 해석 데이터를 확보하는 것은 많은 컴퓨팅 시간을 요구하기 때문에 본 연구에서는 순차적 샘플링을 통한 모델 업데이트 과정을 사용하였다. EFF(expected feasibility function) 함수는 샘플링 기반 신뢰성 해석 분야에서 한계상태함수(limit state function)를 정확하게 찾을 때 사용하는 학습함수(learning function)이다. EFF는 베이지안 최적화(Bayesian optimization)의 활성함수(acquisition function) 중 하나인 EI(expected improvement)를 특정 컨투어를 찾아가도록 수정한 함수이다^[13]. EFF를 현재 크리깅 모델에 도입하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} EFF(x) &= \\ &(\mu_{\hat{G}}(x) - a) \\ &\left[2\phi\left(\frac{a - \mu_{\hat{G}}(x)}{\sigma_{\hat{G}}(x)}\right) - \Phi\left(\frac{(a-e) - \mu_{\hat{G}}(x)}{\sigma_{\hat{G}}(x)}\right) - \Phi\left(\frac{(a+e) - \mu_{\hat{G}}(x)}{\sigma_{\hat{G}}(x)}\right) \right] \\ &- \sigma_{\hat{G}}(x) \\ &\left[2\phi\left(\frac{a - \mu_{\hat{G}}(x)}{\sigma_{\hat{G}}(x)}\right) - \Phi\left(\frac{(a-e) - \mu_{\hat{G}}(x)}{\sigma_{\hat{G}}(x)}\right) - \Phi\left(\frac{(a+e) - \mu_{\hat{G}}(x)}{\sigma_{\hat{G}}(x)}\right) \right] \\ &+ \left[\Phi\left(\frac{(a+e) - \mu_{\hat{G}}(x)}{\sigma_{\hat{G}}(x)}\right) - \Phi\left(\frac{(a-e) - \mu_{\hat{G}}(x)}{\sigma_{\hat{G}}(x)}\right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

$$e = 2\sigma_{\hat{G}}(x)$$

여기서 a 는 목표 컨투어값, Φ 는 정규분포의 누적분포함수, ϕ 는 정규분포의 확률밀도함수, $\mu_{\hat{G}}(x)$ 는 크리깅 모델의 예측 평균값, $\sigma_{\hat{G}}(x)$ 는 크리깅 모델의 예측 표준편차 값을 나타낸다. 순차적 샘플링을 위한 다음 학습 위치는 $\arg \max_x EFF(x)$ 로 결정된다.

EFF 함수를 기반으로 순차적 대리모델링 과정이 완료되면, 최적설계 요구조건을 만족하는 입력 형상변수 값을 추출할 수 있다. 이러한 설계가능 영역에서 산업계 사용자의 추가 환경변수를 반영하여 최적의 형상변수 값을 선택할 수 있다. 이를 위상최적설계의 초기 형상으로 설정하여 위상최적화를 통한 추가 형상 설계 고도화를 할 수 있다. 추출한 초기 형상에 대한 위상최적설계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } \Theta(\rho) &= \frac{1}{2} T^T K(\rho) T \\ \text{Subject to } \int_{\Omega} \rho d\Omega &\leq V_f \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 Θ 는 열 컴플라이언스, T 는 온도, K 는 열전도도, ρ 는 밀도, V 는 구조물 부피를 나타낸다. 본 예제의 경우 ANSYS workbench의 SIMP(solide isotropic material with penalisation)

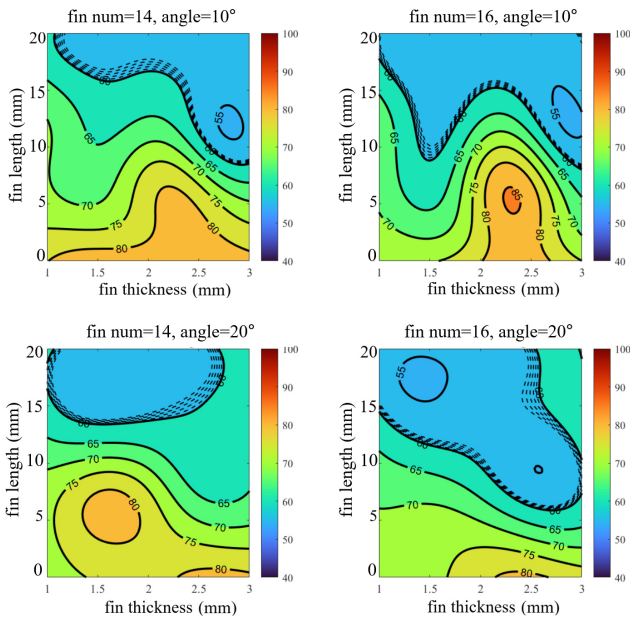


Fig. 3 Kriging model with 150 initial samples

기법을 기반으로 위상최적화를 수행하였다^[14]. 볼륨을 50% 감소 하면서 ($V_f = 0.5 V$) 목적함수인 컴플라이언스를 최소화하는 조건으로 위상최적설계를 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 설계요구조건 만족 입력변수 영역 추출

히트싱크 설계요구조건인, 경계조건 하에서 히트싱크의 최대온

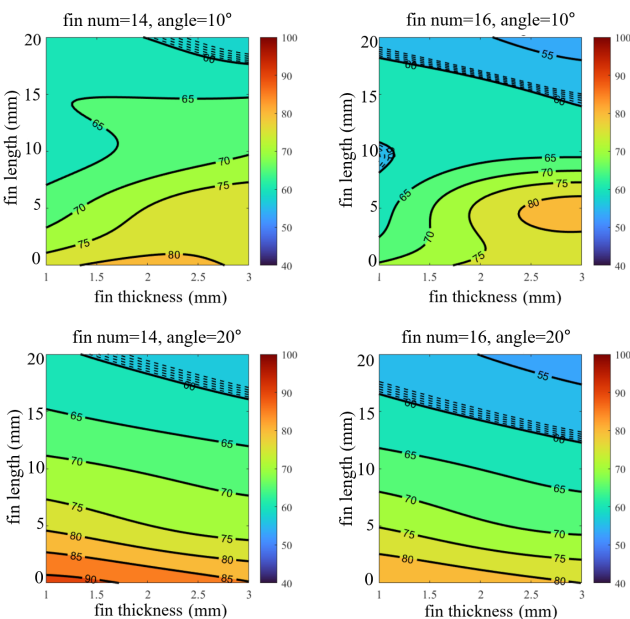


Fig. 4 Kriging model with additional 200 samples

도가 60°C 이하 인 영역을 MCS(Monte Carlo simulation)를 이용하여 추출하였다^[15]. Fig. 3은 초기 150개의 입력변수에 대한 최대 온도 출력 관계를 이용한 크리깅 모델링 및 EFF적용 설계요구조건 만족 영역을 나타낸다. 4차원 변수를 가지기 때문에 일부 변수 영역에서 그래프를 추출하여 가시화하였다. 그래프에서 점선 영역이 히트싱크 최대온도 60°C 경계를 나타낸다.

위의 150개 초기 샘플에 대한 크리깅 모델은 변수 4개인 4차원 함수 영역을 표현 하는데는 데이터가 부족하다. 모델링 정확도 향상을 위해 EFF 함수를 이용한 순차적 샘플링 과정을 통해 모델을 개선할 수 있다. 본 예제에서는 사용 가능한 컴퓨터 제한을 고려하여 200개의 추가 데이터를 확보하였다. 순차적 샘플링 과정을 거친 총 350개에 대한 크리깅 모델 및 설계 요구조건 경계는 Fig. 4와 같다. Fig. 3과 비교하였을 때 각 최고온도 등고선 그래프의 형상이 완만하게 변화하여 디자인 설계 변수 영역이 수정된 것을 확인할 수 있다.

3.2 설계요구조건 만족 초기형상 반영 위상최적설계 결과

설계 요구조건을 만족하는 영역에서 제시된 히트싱크 디자인은 무수히 많으며 본 예제에서는 형상변수 최적화 결과를 바탕으로 핀 개수 16개, 핀 길이 17.31 mm, 핀 회전각도 19.8° , 핀 두께 1 mm를 위상최적설계를 위한 도메인으로 선택하였다. Fig. 5는

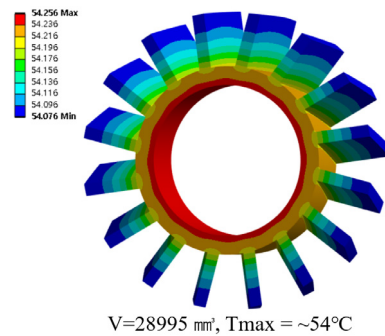


Fig. 5 Option 1 : Optimized design from parametric optimization

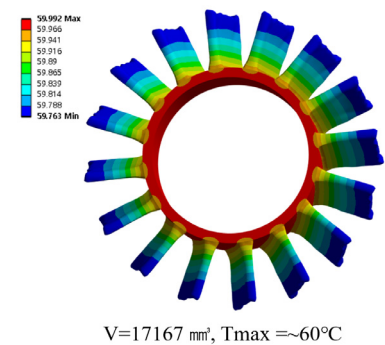


Fig. 6 Option 1 : Topology optimization result

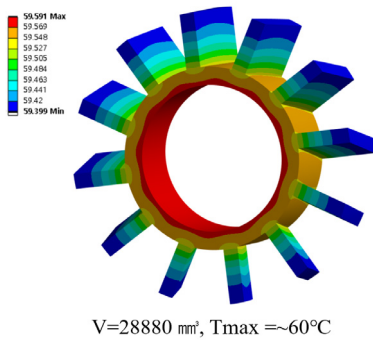


Fig. 7 Option 2 : Optimized design from parametric optimization

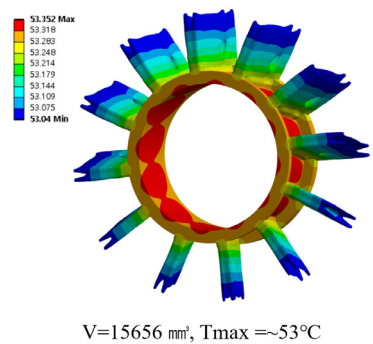


Fig. 8 Option 2 : Topology optimization result

해당 도메인의 정상 열해석 수행 결과를 나타내며, 최대온도가 약 54°C 수준으로 형상변수 최적화 설계요구조건을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5를 초기 형상으로 수행한 위상최적설계 형상을 나타낸다. 이때 조건은 초기 형상의 볼륨 50% 수준으로 제한조건을 부가하였으며, 컴플라이언스 최소화를 목적함수로 설정하였다. 그 결과 설계요구조건인 최대온도 60°C를 만족하면서 경량화시킨 디자인 Fig. 6을 얻었다. 위상최적화 결과를 바탕으로 경계단순화 후처리 과정을 통해 기존 위상최적화 결과 28,995 mm³ 서 17,167 mm³으로 초기 부피의 40% 수준으로 감소시켰다. 본 연구에서 제안한 프로토콜을 기반으로 사용자의 추가 설계 변수를 고려할 수 있도록, 초기 형상에 옵션을 제공하고, 이를 기반으로 2차적으로 위상최적화하여 최종 최적설계안을 얻을 수 있다. 마찬가지로 앞서 설계 요구조건을 만족하는 영역에서 사용자는 두 번째 초기 형상 옵션을 선택할 수 있다. 두 번째 옵션으로 Fig. 7과 같이 핀 개수 12개, 핀 길이 20 mm, 핀 회전각도 12°, 핀 두께 2 mm를 입력형상변수로 결정하였다. 이를 이용하여 위상최적설계를 수행한 결과는 Fig. 8과 같으며, 경계 단순화 후공정을 거치면서 부피를 초기 대비 46%감소하며 최대온도를 53°C 수준으로 감소시킨 최적 형상을 도출하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 산업현장 적용 가능한 부품의 방열 성능의 향상을 위한 구조최적설계안 프로토콜 도출을 수행하였다. 제품의 성능극대화에 따른 혁신적 제조기술인 금속적층제조와 위상최적설계 기술의 적극적 도입을 위하여, 최적화 프로토콜 중 현산업 사용자의 의견을 반영하는 과정을 포함한다. 본 연구에서는 주요 품목 중 하나로 전자기기의 방열 시스템인 히트싱크를 적용 예로 선택하였다. 고전적인 히트싱크 형상 변수 추출하여 열해석을 수행하고, 해석 결과 데이터를 이용하여 머신러닝 기반 크리깅 모델을 구축하였다. 크리깅 모델을 바탕으로 설계 요구조건을 만족하는 형상 도메인 영역을 추출하여 사용자에게 제공함으로써 추가 작동환경을 고려한 위상최적설계 초기 도메인을 사용자가 선택할 수 있다. 본 과정에서 방열 성능에 주요 요인이 되는 구조물의 표면적을 증가하는 방향으로 초기 도메인이 제안된다. 이를 바탕으로 위상최적설계를 통해서 모델의 경량화 및 성능극대화를 얻을 수 있음을 예제를 통해 확인하였다. 이러한 최종 형상은 사용자의 선택을 반영함으로써 금속적층제조를 통한 실제품 적용 활용도 향상이 가능하여 제조 기술 혁신 구현을 기대할 수 있다.

후 기

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국기계연구원 기관 기본사업 (NK242J) 및 한국연구재단 나노 및 소재기술개발사업(2021M3D1A2047721)의 지원을 받아 수행한 연구의 결과입니다.

References

- [1] Wang, X., Li, B., Gerada, D., Huang, K., Stone, I., Worrall, S., Yan, Y., 2022, A Critical Review on Thermal Management Technologies for Motors in Electric Cars, Appl. Therm. Eng., 201 117758, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117758>.
- [2] Michelin, n.d., viewed 01 July 2022, <<https://www.michelin.com/en/activities/high-tech-materials/3d-printing/>>.
- [3] Bandyopadhyay, A., Traxel, K. D., 2018, Invited Review Article: Metal-additive Manufacturing—Modeling Strategies for Application-optimized Designs, Addit. Manuf., 22 758-774, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.024>.
- [4] Prathyusha, A. L. R., Babu, G. R., 2022, A Review on Additive Manufacturing and Topology Optimization Process for Weight

- Reduction Studies in Various Industrial Applications, *Materials Today: Proceedings*, 62 109-117, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.604>.
- [5] Han, Z., Wei, K., 2022, Multi-material Topology Optimization and Additive Manufacturing for Metamaterials Incorporating Double Negative Indexes of Poisson's Ratio and Thermal Expansion, *Addit. Manuf.*, 54 102742, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102742>.
- [6] Lei, T., Alexandersen, J., Lazarov, B. S., Wang, F., Haertel, J. H. K., Angelis, S. D., Sanna, S., Sigmund, O., Engelbrecht, K., 2018, Investment Casting and Experimental Testing of Heat Sinks Designed by Topology Optimization, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 127 396-412, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.060>.
- [7] Chen, F., Wang, J., Yang, X., 2022, Topology Optimization Design and Numerical Analysis on Cold Plates for Lithium-ion Battery Thermal Management, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 183 122087, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122087>.
- [8] Ahmed, H. E., Salman, B. H., Kherbeet, A. Sh., Ahmed, M. I., 2018, Optimization of Thermal Design of Heat Sinks: A Review, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 118 129-153, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.099>.
- [9] Bruns, T. E., 2007, Topology Optimization of Convection-dominated, Steady-state Heat Transfer Problems, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 50:15-16 2859-2873, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.039>.
- [10] Tadayoshi, M., Atsushi, K., Tsuguo, K., 2019, Topology Optimization for Thermal Stress Reduction in Power Semiconductor Module, *Struct. Multidiscipl. Optim.*, 60 2615-2620, <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02341-4>.
- [11] Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J., Wynn, H. P., 1989, Design and Analysis of Computer Experiments, *Statist. Sci.*, 4:4 409-423, <https://doi.org/10.1214/ss/1177012413>.
- [12] Lophaven, S. N., Nielsen, H. B., Søndergaard, J., 2002, DACE-A Matlab Kriging Toolbox, version 2.0, Technical University of Denmark, DTU, <<http://www2.imm.dtu.dk/pubdb/pubs/3213-full.html>>.
- [13] Bichon, B. J., Eldred, M. S., Swiler, L. P., Mahadevan, S., McFarland, J. M., 2008, Efficient Global Reliability Analysis for Nonlinear Implicit Performance Functions, *AIAA journal*, 46:10 2459-2468, <https://doi.org/10.2514/1.34321>.
- [14] Lee, J. B., Kim, H. J., Kim, D. K., 2017, Thermal Optimization of Horizontal Tubes with Tilted Rectangular Fins under Free Convection for the Cooling of Electronic Devices, *Appl. Sci.*, 7:4 352, <https://doi.org/10.3390/app7040352>.
- [15] Bendsoe, M., Sigmund, O., 1999, Material Interpolation Schemes in Topology Optimization, *Arch. Appl. Mech.*, 69 635-654, <https://doi.org/10.1007/s004190050248>.
- [16] Fawaz, A., Hua, Y., Corre, S. L., Fan, Y., Luo, L., 2022, Topology Optimization of Heat Exchangers: A Review, *Energy*, 252 124053, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124053>.



Yeo-UI Song

Senior Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. Her research interests are Computer-aided Engineering and Structural Optimization.

E-mail: yeoulsong@kimm.re.kr



Byeong Uk Song

Ph. D. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology. His research interest is Optimization with Additive Manufacturing.

E-mail: busong@kaist.ac.kr



Min-Kyo Jung

Senior Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Design for Additive Manufacturing by using FEM.

E-mail: mkjung@kimm.re.kr



Taeho Ha

Principal Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Additive Manufacturing Process and Equipment Development.

E-mail: taehoha@kimm.re.kr



Pil-Ho Lee

Senior Researcher in Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is Process and System Development of Additive Manufacturing System.

E-mail: pilho_lee@kimm.re.kr