

## 요 지

### 딥러닝 기반 재료표현과 비반복적 다중스케일 위상최적화

서 민 식

한양대학교 미래자동차공학과

수십 년 간 위상최적화 기법은 활발하게 연구되어 다양한 분야에 적용되어왔다. 거시적 구조 설계뿐만 아니라, 위상최적화는 최적의 미세구조를 도출하는 재료 설계에도 적용되었다. 균질화 기반 위상최적화를 통한 재료 설계는 음의 포아송비와 같은 메타재료에 대한 새로운 가능성을 열었다. 이후, 거시적 구조와 미시적 구조를 동시에 최적화하여 가볍고 강건하며 다기능의 설계라는 이점을 갖는 다중스케일 위상최적화(MSTO)를 위한 연구가 수행되었다. 단일스케일 위상최적화(SSTO)가 각 재료 점에 대해 단 하나만의 변수를 갖는 반면, MSTO는 최소 두 개 이상의 변수를 필요로 한다. 그러나 변수 및 균질화 방정식 수가 증가함에 따라 계산 수요가 증가한다. 따라서 본 논문은 새로운 딥러닝 접근법을 사용하여 MSTO에서 이러한 계산 부담을 줄이는 것을 목표로 한다. 본 연구는 MSTO를 위한 딥러닝 접근법과 실험적인 MSTO 가속방법을 제안한다.

먼저, 딥러닝 기반 MSTO방법(DL-MSTO)은 적대적 생성 신경망(GAN)과 비전 트랜스포머(ViT) 기반 예측 신경망을 사용하는 재료 표현방법이 제안된다. 생성 신경망은 미세구조 이미지의 저차원 표현을 학습하고 저차원의 잠재벡터로부터 미세구조 이미지를 제공한다. 그 후, ViT 기반 예측 신경망은 해당 균질화 된 탄성행렬을 예측하도

록 훈련된다. 보다 구체적으로, 예측 네트워크는 출레스키 분해에서 영감을 받은 방법을 기반으로 재료행렬의 양의 정부호성을 항상 보장하도록 수정된다. 생성 신경망과 예측 신경망은 MSTO과정에 통합되어 변수의 수를 줄이고 균질화 계산을 대체한다.

제안된 DL-MSTO방법은 MSTO에 대한 딥러닝 기반 가속방법을 적용할 수 있게 한다. 따라서 암시적 표현 및 그래프 신경망(GNN)을 기반으로 비반복적 MSTO 예측 방법이 추가로 도입된다. 다층 퍼셉트론(MLP)은 주어진 MSTO 문제에 대한 공간 좌표에서 잠재벡터 장으로 매핑하는 암시적 함수로 동작한다. 본 논문에서는 불규칙한 설계 영역에서 정의된 MSTO 문제를 나타내기 위해 그래프를 선택했다. GNN 기반 인코더는 주어진 MSTO 문제로부터 최적의 MLP 근사모델을 정의하는 매개변수를 제공하도록 학습된다. 훈련된 인코더 및 근사모델은 최적화 반복 없이 주어진 설계 영역에 대한 유사 최적의 잠재벡터 장을 예측한다.

종합적으로, 등방성 및 이방성 미세구조 데이터셋을 사용한 정성적, 정량적 평가로 생성 신경망과 예측 신경망의 유효성을 입증했다. 기존 MSTO와 제안된 DL-MSTO의 벤치마크 문제를 비교하여 제안 방법의 효과와 효율성을 검증하였다. 또한, 비반복적 MSTO 예측 방법은 무작위로 샘플링 된 MSTO 문제로 구성된 훈련 데이터셋을 사용하여 검증하였다. 결론적으로, 제안된 비반복적 MSTO 방법에서 예측된 MSTO 해는 엔지니어가 MSTO문제를 풀지 않고도 다중스케일 설계에 대한 직관을 얻도록 도울 수 있다.