

요지

위상최적화는 설계 해상도가 증가할수록 자유도와 설계변수가 폭발적으로 늘어나, 반복적인 유한요소해석에 따른 계산 비용이 매우 커진다. 이를 줄이기 위해 확장형 다중스케일 유한요소법(Extended Multiscale Finite Element Method, EMsFEM) 기반 다중해상도 위상최적화와 국소 예측 모델을 결합하는 연구가 제안되어 왔으나, 대부분의 방법은 국소 격자 해상도가 바뀔 때마다 입력 차원이 달라져 해상도별로 새로운 데이터를 생성하고 모델을 다시 학습해야 한다.

본 연구에서는 국소 격자 내 미세 요소들의 국소 강성행렬을 하삼각 형태로 벡터화한 값을 입력으로, 해당 격자에 대한 수치 기저함수를 출력으로 하는 사전학습 모델을 구축하였다. 모델 학습은 2차원에서 2×2 , 3×3 , 5×5 , 3차원에서 $2 \times 2 \times 2$, $3 \times 3 \times 3$ 해상도에 대해서만 수행하고, 그보다 높은 해상도는 동일 모델을 재귀적·조합적으로 재사용하여 정적 응축을 수행함으로써, 추가 데이터 생성 및 재학습 없이 다양한 국소 해상도의 EMsFEM 기반 위상최적화를 가능하게 하였다.

2차원 short cantilever beam, 3차원 half MBB beam, 3차원 short cantilever beam 예제를 통해 검증한 결과, 제안 기법은 2차원에서 컴플라이언스(compliance) 오차가 약 0.2% 내외로 매우 작게 유지되었고, 3차원에서는 일부 고해상도 사례에서 하중을 받는 위치 근처 부재 연결성이 약해져 끊어진 위상이 나타나면서 오차가 최대 약 15% 수준까지 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전역 해석 해상도(성긴 격자) 감소로 인한 자유도 축소와 예측 오차가 복합적으로 작용한 결과이다. 실제로 국소 격자 해상도는 유지한 채 전역 해석 해상도를 증가시킨 결과, 하중을 받는 위치 근처에서 끊어지던 위상이 잘 연결되어 도출되는 것을 확인하였다. 따라서 전역 해석 해상도를 과도하게 축소하면 안 된다는 한계점이 있으며, 최적 설계를 수행할 때 해당 부분을 고려해야 하지만, 해석 시간은 기준 해석에 비해 수십 배 수준까지 단축되었다.

한편 제안된 프레임워크에서는 재귀적 정적 응축이 각 수준에서 반복 수행되므로 응축 단계에서 계산 시간이 누적될 수 있다. 향후 연구에서는 응축 단계의 수치적 효율을 개선하고, 3차원 대규모 문제에서 하중 작용 부 주변의 예측 안정성을 높이기 위한 모델 구조 및 학습 전략을 보완할 필요가 있다.

