

요지

최근 고성능 구조설계와 적층제조(additive manufacturing) 기술의 발전으로 복잡한 구조 형상의 제작 가능성이 높아지면서, 제한된 재료량으로 우수한 구조 성능을 갖는 고해상도 구조 형상을 도출하기 위한 위상최적설계(topology optimization)의 필요성이 증가하고 있다. 특히 밀도법 기반 위상최적설계(density-based topology optimization)는 설계 영역을 유한요소로 이산화하고 각 요소의 재료 밀도를 설계변수로 사용함으로써 기존 형상에 의존하지 않는 새로운 구조 형상을 도출할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 고해상도 설계를 수행하기 위해서는 많은 수의 설계변수와 해석 자유도(degrees of freedom)가 필요하며, 최적화 반복 과정에서 매 반복마다 수행되는 유한요소해석(finite element analysis)의 계산비용이 급격히 증가한다. 이러한 문제는 대규모 구조 문제나 세밀한 부재 표현이 필요한 문제에서 위상최적설계의 실제 적용을 제한하는 주요 원인이 된다.

본 논문에서는 고해상도 밀도분포를 유지하면서 해석 비용을 줄이기 위하여, 전이요소(transition element)와 계층형 형상함수(hierarchical shape function) 기반 정적응축(static condensation) 해석을 이용한 학습 기반 다중해상도 위상최적설계 방법을 제안한다. 제안하는 방법에서는 해석 셀(analysis cell)의 경계변위를 계층형 형상함수로 표현하고, 해석 셀 내부의 미세 자유도를 정적응축을 통해 제거함으로써 해석 자유도에 대한 수치형상함수(numerical shape function)와 축약강성행렬(reduced stiffness matrix)을 구성한다. 이때 전이요소는 해석 셀 경계에서 계층형 해석 자유도와 내부 미세 격자 자유도를 연결하는

역할을 하며, 이를 통해 고차 경계 변위 표현과 미세 격자 기반 내부응답을 하나의 해석 셀 정식화 안에서 결합한다. 또한 해석 셀 내부의 밀도분포에 따라 달라지는 내부응답 성분은 매 반복 직접 계산하지 않고, 오프라인 학습을 통해 구성된 기계학습 모델을 이용하여 예측한다.

제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 컴플라이언스 최소화 문제와 컴플라이언트 메커니즘(**compliant mechanism**) 설계 문제에 적용하였다. 해석 차수 증가에 따른 결과를 비교한 결과, 고차 계층형 경계 표현을 사용할 경우 저차 해석에서 나타나는 인공적인 패턴이 완화되는 경향을 확인하였으며, 고해상도 밀도분포에 대해 보다 일관된 최적화 결과를 얻을 수 있었다. 또한 높은 필터 반경을 사용하는 경우, 낮은 변위 분할수에서 예측한 내부응답을 보간하여도 직접 계산한 내부응답과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 최종적으로 약 432만 개의 요소와 약 4,323만 개의 자유도를 갖는 대규모 Half MBB 보 문제에 제안 방법을 적용함으로써, 고해상도 다중해상도 위상최적설계에서 반복 해석 비용을 줄일 수 있는 가능성을 확인하였다.