

국문요지

다중 재료 위상 최적화(MMTO: Multi-Material Topology Optimization)는 특정 영역에 맞춤형 특성을 가진 재료를 배치하여 성능을 향상시킬 수 있기 때문에 엔지니어링 설계 분야에서 점점 더 많은 관심을 받고 있다. 다중 재료 위상 최적화 내에서 재료 분포를 결정하기 위해 다양한 보간 방법이 개발되었다. 그 중에서도 이산 재료 최적화(DMO: Discrete Material Optimization)는 독립적인 설계 변수를 통해 여러 후보 재료를 제어할 수 있다는 장점 때문에 널리 사용되고 있다. 그러나 기존의 DMO 기반 보간 방법은 변형 불일치 및 접착(Adhesive) 결합 효과와 같은 이종 재료 사이의 계면에서의 기계적 거동을 정확하게 나타낼 수 없다. 이러한 한계는 기존의 보간 방법이 계면(Interface)에서 발생하는 물리적인 전이 영역을 고려하지 못하고, 수치적으로 완전 결합 상태를 가정하여 계면 경계 조건의 급격한 불연속성 및 수치적 특이점을 유발하기 때문에 발생한다.

구조 해석을 통합한 모터 위상 최적화에서 일부 연구자들은 영구 자석(PM: Permanent Magnet)의 영률(Young's modulus)을 공기 수준으로 낮춰 모델을 단순화했다. 이는 철만이 힘을 견뎌내는 최악의 경우를 가정한 보수적인 모델링이다. 그러나 이 방법은 영구 자석의 응력을 검증할 수 없고 접착제의 영향을 무시하여 과잉 설계(Overdesign)로 이어질 수 있다는 한계가 있다.

본 연구에서는 영구 자석의 영률을 조정하는 대신, 철과 영구 자석 사이의 계면 영역을 명시적으로 정의하고, 이 영역에 에폭시 재료의 특성을 할당하여 실제적인 접착 계면을 모델링한다. 계면 영역은 투영 함수의 특성을 활용하는 2단계 필터링 접근법을 적용하여 정의한다. 첫 번째 필터링 과정에서는 기존의 3-필드 위상 최적화 프레임워크와 동일하게 설계 변수를 필터링하

고 투영한다. 두 번째 필터링 과정에서는 첫 번째 과정의 결과를 조정된 필터 반경(filter radius)과 임계값 매개변수(threshold parameter)를 사용하여 필터링하고 투영함으로써 계면 영역의 크기를 제어한다.

제안된 방법의 효과를 평가하기 위해, 기존의 DMO 기반 보간 방법으로 위상을 도출한 후 후처리(Post-processing)를 통해 계면을 생성한 결과와 비교 분석을 수행하였다. 기존의 방식은 최적화 과정에서 활성화되었던 응력 제약 조건이 계면 생성 후 위반되는 한계를 보였다. 반면, 본 연구에서 제안한 프레임워크는 2단계 필터링 기반의 접착 계면 인식 및 생성 작업을 최적화 루프 내에 실시간으로 통합함으로써, 이종 재료 간 계면의 특성을 고려할 수 있음을 확인하였다. 수치 검증 결과, 제안된 기법은 허용 응력 제약 조건을 만족함과 동시에, 참조 모델 대비 효과적인 경량화를 달성하면서도 평균 토크 성능을 향상시키는 우수한 위상 최적설계 결과를 도출하였다.