요 지

가중치 갱신과 형상 기반 클러스터링 기법을 이용한 다목적 위상최적설계 문제의 파레토 최적 설계안 탐색

유 남 희

한양대학교 미래자동차공학과

치수 또는 형상 최적 실계 대비 설계 자유도가 높은 위상 최적 실계 기법은 제품 또는 구조물의 설계 초기 단계부터 개략적인 최적 형상을 탐색할 수 있는 이점을 가지고 있어 설계자가 쉽게 생각하기 어려운 혁신적인 설계안을 탐색하는 데 유용하게 사용되어왔다. 전산 해석 기법의 발달로 멀티피직스를 고려한 해석과 설계가 활발히 이루어지고 있고, 이와 더불어 여러가지 상충하는 성능들을 동시에 개선하기 위한 다목적 위상 최적 설계에 대한 관심도 증가하고 있다. 하나의 최적 설계안을 도출하는 단일목적 최적 설계와 달리, 다목적 최적 설계는 파레토 프론트 상에 존재하는 다수의 파레토 최적 설계안을 탐색한다. 따라서 설계안이 가질 수 있는 최적의 성능 범위를 파악할 수 있는 이점을 가지고 있는 한편, 다수의 설계안 탐색으로 인해 최적화에 소요되는 시간 비용이 높은 단점이 존재한다. 또한 최적 설계 방법에 따라 최종적으로 얻어지는 파레토 프론트의 개형이 다르게 나타나고 파레토 최적 설계안의 성능 또한 차이가 발생하는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 파레토 프론트를 효율적으로 탐색하기 위한 방법의 개발과 다양한 설계안들을 설계자에게 효과적으로 전달하기 위한 기법들이 연구되어왔다.

다목적 최적 설계 방법은 크게 세 가지 접근 방법으로 개발되어 왔고, 이는 가중치법(WEIGHTED-SUM METHOD), 입실론-구속 조건법(EPSILON CONSTRAINT METHOD), 휴리스틱 기법(HEURISTIC METHOD)으로 구성된다. 이 중에서도 가중치법은 다른 방법들과 달리 파레토 최적해의 탐색을 보장하는 이점이 있고, 사용의 편의성으로 인해 다양한 공학 설계 문제에 적용되어 왔다. 그러나 가중치 법의 경우

파레토 프론트의 개형에 따라 전체 파레토 최적 설계안의 탐색이 불가능한 경우가 존재한다. 비볼록(NONCONVEX) 형태의 파레토 프론트는 이론적으로 탐색이 불가능하고, 불연속(DISCONTINUOUS)/다봉(MULTI-MODAL)/선형(LINEAR) 파레토 프론트에서는 서로 다른 설계안의 탐색을 보장하지 않는다. 또한 가중치를 균일하게 분포하여 최적화를 수행하는 것이 파레토 프론트 상에 존재하는 설계안들의 균일성을 보장하지 않기 때문에, 균등히 분포하는 파레토 최적 설계안을 도출하기 위해서는 설계자가 직접 가중치를 조절해야하는 번거로움이 존재한다.

따라서 앞서 언급한 한계점들을 극복하기 위해 본 연구에서는 사용자의 간섭 없이 다양한 형태의 파레토 프론트 탐색이 가능한 가중치법 기반의 다목적 최적 설계 기법을 개발하였다. 먼저 가중합으로 표현되는 목적 함수가 목적 함수 공간에서 가지는 기하학적인 의미를 고려하여 적응적 가중치 갱신법을 개발하였다. 파레토 프론트 상에 균등히 분포하는 최적 설계안을 순차적으로 탐색하기 위해 이미 알고 있는 다른 설계안들의 위치 정보를 참고하여 가중치를 체계적으로 갱신할 수 있는 알고리즘을 개발하였고, 이는 사용자의 개입을 최소화할 뿐만 아니라 파레토 프론트의 전반적인 개형을 탐색하기 위한 시간 비용을 낮추는 데 큰 효과를 가져올 수 있다. 비볼록 또는 선형 형태의 파레토 프론트를 탐색해야하는 문제의 경우 기준점 기반의 절충 계획법(COMPROMISE PROGRAMMING METHOD)을 도입하여 목적 함수의 형태를 비선형으로 변경하였다. 다른 파레토 최적 설계안들의 위치 정보를 고려하여 기준점을 결정하였고, 절충 계획법에 필요한 가중치를 적응적으로 갱신할 수 있도록 알고리즘을 개발하였다. 그리고 불연속/다봉 형태의 파레토 프론트 탐색을 위해 순차적으로 탐색 영역을 축소함으로써 파레토 프론트 전 영역에서의 설계안 도출이 가능하도록 다목적 최적화 방법을 개발하였다. 제 안한 기법의 효용성을 확인하기 위해 벤치마크 수학문제를 포함하여, 구조/자기 기계/차량 시스템 등의 성능 개선을 위한 다목적 설계 문제에 적용하였고, 기존 전통적인 설계 기법 대비 정량적으로 우수한 성능을 가지는 파레토 프론트 탐색이 가능한 것을 확인하였다.

파레토 프론트 상에 놓여있는 다수의 최적 설계안을 설계자에게 효과적으로 제공하기 위해서는 설계안들을 분류하고 대표 설계안을 도출하는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 다목적 위상 최적 설계를 통해 도출한 설계안의 형상 정보를 바탕으로 유사한 설계안을 분류하는 클러스터링 기법을 제안하였다. 밀도법을 이용한 위상 최적 설계의 경우 재료의 유무를 나타내는 설계 변수에 의해

설계안의 형상 정보가 표현된다. 따라서 유사한 설계안을 클러스터링 하여 구분하는 작업은 목적 함수 공간에 존재하는 파레토 프론트 상에서의 거리뿐만 아니라, 형상 정보를 내포하고 있는 설계 변수 공간에서의 거리도 함께 고려하여 수행해야한다. 본 연구에서는 설계안 간의 유사성을 판별하기 위해, 부재의 길이, 무게 중심, 관성 모멘트, 닫힌 공간의 개수, 조인트 개수 등 물리적인 의미를 가지는 인자들을 설계 변수를 참고하여 계산하였고, 해당 인자들을 이용하여 설계안 간의 거리를 측정하였다. 측정한 거리를 이용할 경우 목적 함수 공간에서는 상대적으로 거리가 멀어도, 설계 변수 공간에서 가까운 위치에 존재한다면 하나의 클러스터로 분류할 수 있고, 전체 파레토 프론트에 존재하는 대표 설계안들을 분류한 클러스터로부터 도출할 수 있다.

최종적으로 앞서 언급한 적응형 가중치 기반의 다목적 최적설계 기법 내에 클러스터링 기법을 포함하여 파레토 최적 설계안 탐색과 클러스터링이 동시에 수행 가능하도록 기법을 발전시켰다. 다목적 최적 설계의 궁극적인 목표는 파레토 프론트의 전반적인 개형을 파악하고, 대표 설계안을 요약하여 설계자에게 제공하는 것이다. 따라서 파레토 프론트에 놓여있는 설계안을 모두 탐색한 뒤 클러스터링을 수행하는 것이 아니라, 파레토 프론트를 탐색하는 과정에서 클러스터링을 병행할 경우 조기에 대표 설계안을 탐색할 수 있고, 설계안의 과도한 도출을 방지함으로써 시간 비용을 절감할 수 있다. 제안한 기법을 2차원, 3차원 구조물의 다목적 위상 최적 설계 문제에 적용하였고, 기존 대비 최적화 시간은 최대 40%가량 낮추면서 전반적인 파레토 프론트와 대표 설계안을 탐색할 수 있는 것을 확인하였다. 제안한 기법은 향후 멀티피직스를 고려한 다목적 위상 최적 설계 문제에 적용 가능할 것으로 판단되고, 문제 유형에 맞게 클러스터링 기법을 발전시켜 사용할 경우 활용 가능 범위는 더욱 넓어질 것으로 예상된다.