요 약 문

신뢰성 최적 설계 기법은 제품의 운용 조건이나 작은 형상 변화에 따른 제품의 불량률을 최소화하는 설계 기법으로, 여러 불확실한 조건 변화에 대해 적어도 제품의 기본 성능은 만족하도록 제약조건에 대한 여분을 주고 설계한다. 이 때, 제약조건의 불확실성을 고려하기 위해 제약 조건을 손상함수(function of failure)에서 손상확률(probability of failure)로 변환하는 과정을 통해 운용 조건이나 형상 오차 등의 다양한 불확실성 요소들이 미치는 영향을 고려하게 된다. 하지만 손상확률을 정확히 예측하는 것은 또 하나의 최적화 문제를 푸는 것과 동일한 정도의 계산 시간을 필요하므로 이를 최적화에 적용하기 위해서는 매우 많은 추가적인 계산 시간이 필요하다. 특히, 공력 형상 최적화와 같이 한 번의 공력 해석에 많은 시간이 소요되는 문제의 경우 시간적 제약에 의해 신뢰성 최적 설계는 거의 불가능하였다. 본 연구에서는 이러한 신뢰성을 고려한 공력 형상 최적화를 효율적으로 수행하기 위한 다양한 기법들에 대하여 연구하고자 한다.

이점 근사화 기법

공력 신뢰성 해석을 효율적으로 수행하기 위해 근사면을 이용한 신뢰성 해석을 수행하였다. 최적 설계에 사용하는 근사화 기법으로는 크게 함수 기반 근사화(function based approximation)와 기울기 기반 근사화(gradient based approximation)로 나뉜다. 함수 기반 근사화 기법으로는 반응표면기법(response surface modeling)이 있으며, 기울기 기반 근사화 기법으로는 2점 근사화 기법(two point approximation : TPA)이 있다. 일반적으로 함수 기반 근사화는 설계 공간 전체를 근사화하여 설계 목적에 따른 각 설계 변수의 경향성 파악이 용이하며, 전역 최적해(global optimum)를 찾을 수 있는 장점이 있는 반면, 설계 변수의 수가 많아지면 함수를 근사화하기 위한 필요 계산량이 늘어나는 단점이 있다. 이에 반해 기울기 기반 근사화는 비교적 적은 계산을 통해 국부적인 함수 근사화가 가능한 장점이 있는 반면 전역 최적해를 구하기는 어렵다. 본 연구에서는 신뢰성 해석 과정 중의 국부 최적해를 찾기 위해 기울기 기반 근사화 기법 중 이점 근사화 기법을 사용하였다.

기존에 많이 알려진 이점 근사화 기법으로는 TANA와 TDQA 등이 있다. TANA는 2차의 Taylor 급수 전개를 통해 간단한 함수 형태를 구성하는 방법으로 쉽고 간단하게 근사화가 가능한 장점이 있다. TANA는 선형 함수나 선형에 가까운 함수의 경우 매우 좋은 근사화를 보여 주지만 함수 내의 각 변수들 간의 2차 미분항의 계수의 부호가 다르거나 기준이 되는 두 점에서의 함수의 방향성이 서로 다른 경우 함수의 근사 오차가 크게 증가한다. TDQA 기법은 TANA의 단점을 해결하기 위해 제안된 기법으로 함수의 방향성이 다른 경우나 다차원 곡면이 변수에 따라 서로 다른 부호의 곡률을 가지는 경우에도 좋은 근사화를 보여준다. 하지만, 특정한 문제에 대해 두 점 중 한 점에서의 정확도가 급격히

낮아지거나 함수의 근사가 불안정해지는 단점이 존재하였다. 이와 같은 단점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 보다 안정적이고 정확도가 높은 근사화 기법인 쌍방향 이점 근사화 기법(Bi-directional two-point approximation : BTPA)을 제안하였다. 기존 TDQA 방법은 두 점 중 첫 번째 점에서의 함수값과 기울기를 만족하고 두 번째 점에서는 함수값만을 만족하므로 두 번째 점에서 원래 기울기와는 전혀 다른 기울기를 가지는 경우가 발생하고 이 때문에 TDQA 방법의 불안정성이 발생하였다. BTPA는 이러한 문제점을 해결하기 위해 두 점 모두에서의 함수값과 기울기를 만족하는 근사식의 생성을 통해 함수의 불안정성을 극복할 수 있었으며, 정확도도 높아지는 결과를 얻을 수 있었다.

신뢰성 해석 기법

일반적으로 단일 손상함수에 대한 정적 신뢰성 해석 기법에는 크게 정밀(exact) 신뢰성 해석 기법과 근사(approximate) 신뢰성 해석 기법으로 나눌 수 있다. 정밀 신뢰성 해석기법은 손상함수에 대한 직접 적분이나 통계적 접근에 의해 신뢰성을 예측하는 기법으로 일반적으로 간단한 문제에 대하여 정확한 신뢰성 해석이 가능한 장점이 있지만 설계 변수가 많아지거나 문제가 복잡해질 경우 신뢰성 해석이 불가능하거나 해석이 가능한 경우에는 너무 많은 시간이 걸리는 단점이 있다. 그러므로 손상함수를 선형 혹은 2차 정확도의 곡면으로 근사화한 뒤 신뢰성 해석을 수행하는 근사 신뢰성 해석 기법이 일반적으로 사용된다. 근사 신뢰성 해석 기법으로는 크게 손상함수를 선형으로 근사화하는 1차 정확도의 신뢰성 해석 기법(first order reliability method : FORM)과 손상함수를 2차로 근사화하여 신뢰성을 예측하는 2차 정확도의 신뢰성 해석 기법(second order reliability method : SORM)이 있다. FORM과 SORM 기법들은 정밀 신뢰성 해석 기법에 비해 매우 효과적인 신뢰성 해석이 가능한 장점이 있지만 공력 해석과 같이 한 번의 해석에 오랜 시간이 걸리는 문제에 직접 적용하기에는 너무 많은 계산 시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 단점을 해결하기 위하여 BTPA와 FORM, SORM을 결합한 효율적인 신뢰성 해석 전략을 제안하고자 한다. 특히, FORM에 비해 더욱 많은 계산 시간을 필요로 하는 SORM을 추가적인 함수 계산 없이 FORM과 동시에 SORM을 해석하기 위한 전략을 제안하고자 한다.

신뢰성 설계 기법

일반적인 신뢰성 최적 설계를 수행하기 위해서는 최대위반가능점을 구하기 위한 부최적화 단계와 목적함수를 최적화하기 위한 주최적화 문제의 두 단계로 이루어진다. 부최적화 단계는 주최적화 단계 내에서 설계변수가 이동하게 되면 새로운 설계변수에 대한 최대위반가능점이 변하기 때문에 매번 새로운 부최적화를 수행하여야 한다. 일반적인 신뢰성 최적 설계는 이와 같은 이중 구조(double loop)를 가지고 있다. 이중 구조를 이용한 최적화를 수행할 경우 전체적인 계산 시간이 일반 최적 설계에 비해 수 배에서 수십 배정

도로 증가하므로 계산 효율 상의 단점을 극복하기 위해 단일 구조 기법들이 제안되었다.

단일 구조 기법들은 신뢰성 해석의 부최적화 단계를 주최적화 단계에 결합하여 반복적인 부최적화 단계의 수행을 막음으로서 전체 계산시간을 단축시키는 방법으로 대표적으로 Single Loop Single Vector(SLSV), Sequential Optimization and Reliability Assessment(SORA) 등이 있다. 이러한 기법들은 주최적화 내의 부최적화를 수행하는 대신 근사화된 최대손상가능점을 이용함으로서 계산시간의 큰 감소를 얻어낼 수 있었지만 근사화된 최대손상가능점을 사용하기 때문에 비선형성이 큰 문제인 경우 최적점에서의 최대손상가능점이 큰 오차를 포함할 가능성을 안고 있다.

본 연구에서는 신뢰성 최적 설계를 수행하기 위해 SORA 기법을 기본으로 하였다. SORA는 반복적인 신뢰성 해석을 통해 정확한 최대위반가능점을 찾은 뒤, 설계점과 최대위반가능점의 관계를 주최적화 단계에 전달하게 된다. 이러한 기법은 SLSV와는 달리 신뢰성 해석에 많은 반복계산이 필요하므로 한 최적화 단계에서 한 번의 민감도를 계산하는 SLSV와는 달리 효율성면에서 떨어지는 단점을 앉고 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 이점 근사화를 통해 별도의 추가 계산 없이 근사화된 함수를 이용하여 근사 최대위반가능점을 찾은 뒤, 설계점과 근사 최대위반가능점을 주최적화 단계에 전달하였다. 이러한 과정을 통할 경우 계산 효율에 있어서는 SLSV와 동일한 효율을 얻을 수 있으며, 정확도에 있어서는 SLSV보다 우수한 결과를 얻을 수 있다.

민감도 해석 기법

공력 최적 설계에 있어서 민감도는 설계 변수에 대하여 비선형이 되고 이들의 관계는 유동장 지배방정식과 연계되어 있어 대개의 경우 적절한 수치기법을 도입하여 민감도를 계산한다. 현재 많이 사용되는 방법에는 유한차분법을 이용한 민감도 계산법, 자동미분(automatic-differentiation)을 이용한 민감도 계산법, 그리고 adjoint 방법을 이용한 민감도 계산법 등이 있다. 초기의 공력 최적 설계 방법들은 민감도 계산을 위하여 유한차분법을 사용하였다. 이 방법은 특정한 두 설계점에서 유동장을 계산하여 두 설계점의 형상변화에 대한 유동장의 변화를 유한차분으로 계산, 민감도 정보를 얻는 방법으로, 쉽게 민감도를 해석 가능한 장점이 있지만 설계 변수의 수에 비례하여 계산량이 급격히 단점이 있다. 자동 미분을 이용한 민감도 계산법은 목적함수를 계산하는 수치해석 코드로부터 자동 미분을 수행하는 코드를 이용하여 민감도를 계산하는 부프로그램을 생성하는 방법으로 목적함수가 매우 복잡한 경우에도 정확한 민감도를 계산할 수 있는 있지만 자동미분 코드가 있어야만 사용할 수 있고, 유동 해석 코드가 정확히 자동 미분되기 위해서는 코드의 구조가 특정한 조건들을 만족해야만 하는 제한이 있다. adjoint 방정식을 이용한 민감도 해석 기법은 설계 변수의 수와 무관하게 adjoint 방정식을 해석함으로써 전체 민감도를 한꺼번에 얻을 수 있는 방법으로 설계 변수의 수가 많은 3차원 공력 형상 최적화의 경우 유한차분을 이용한 민감도 계산이나, 자동 미분을 이용한 민감도 계산에 비하여 수 배에서 수십 배 이상 빠른 결과를 보여 준다. 하지만 adjoint 기법은 adjoint 방정식의

구현과 경계 조건의 설정이 어려워 앞의 방법에 비해 복잡한 단점이 있다. 하지만 본 연구에서는 Navier-Stokes 방정식에 대한 adjoint 방정식의 해석을 통해 민감도를 효율적으로 구할 수 있었다.

신뢰성 기반 형상 최적 설계

본 연구에서 제안한 다양한 신뢰성 최적 설계 기법을 검증하기 위하여 3차원 날개에 대한 공력 형상 최적 설계와 구조-공력을 고려한 형상 최적 설계의 두 가지 문제에 적용하였다. 3차원 날개 형상 최적 설계를 통해 항력의 약 16% 감소와 양력과 모멘트의 경우 약 -2.31%와 -4.40% 감소한 날개 형상을 얻을 수 있었다. MPP에서의 양력 계수 및 모멘트 계수는 초기 제약 조건으로 제시한 양력 조건과 일치함을 볼 수 있었으며, 이와 같은 결과를 통해 현재의 최적점의 값이 모멘트 제약 조건과 양력 제약 조건을 동시에 만족하는 영역에 존재하며, MPP의 양력 및 모멘트 계수와 최적점에서의 양력 및 모멘트 계수의 차이만큼의 여유분을 두고 수렴한 것을 알 수 있었다.

구조와 공력을 동시에 고려한 유연 날개의 기본 형상에 대한 신뢰성 최적 설계를 위하여 항공기 날개에 관한 설계 변수뿐만 아니라 항공기의 운용조건에 해당하는 받음각을 설계 변수로 설정하여, 공정 오차 뿐만 아니라 운용조건에 대한 불확실성을 고려한 신뢰성 최적 설계를 수행하였다. 정적 공탄성의 결과를 통해 초기에 비해 약 5% 이상 나은 성능의 형상을 얻을 수 있었으며, 전체 결과 분석을 통해 정적 공탄성을 이용한 최적 설계에서는 각 설계 조건들이 선형이 아니라 비선형성이 강하므로 FORM을 이용한 최적 설계보다는 SORM을 이용한 최적 설계가 바람한 것을 알 수 있었다.