

FSI를 고려한 고고도 무인기의 구조설계 친적함에서의 모델 축소기법

Design of Wing Structures for High Altitude, Long Endurance UAV Concerning FSI Analysis with Reduced Order Model



김 의 영*



장 성 민*



조 맹 효**



이 동 호**

* 서울대학교 기계항공공학부 박사과정
 ** 서울대학교 기계항공공학부 교수

1. 서 론

날개 구조물을 해석/설계하는 경우, 구조의 변형이 공기력을 변화시키며 다시 변화된 공기력이 구조의 변형을 불러오게 되므로 공탄성(aeroelasticity)학적 접근을 통하여 둘의 상호작용을 고려할 필요가 있다. 이에 더하여, 고고도 무인기에서 볼 수 있는 고세장비(High-Aspect-Ratio, HAR)의 유연 날개의 경우 그림 1에서와 같이 날개의 변형이 크게 발생하므로, 구조적 대변형을 고려하여 접근해야 할 필요가 있다. 즉, 기하학적 비선형 구조해석과 공력 해석간의 연계가 요구되는 것이다.¹⁾

공력/구조 연계해석 분야가 현재까지 널리 연구되어 왔음에도 불구하고, 구조의 비선형을 다루는 방법이나 연계해석 알고리즘의 효율성 측면에서는 개선이 필요한 사항들이 존재한다.²⁾⁻³⁾ 특히, 비선형 해석을 다루는 최적화 문제에서 그 중요성이 더욱 부각된다. 비선형 구조해석의 경우 반복적인 해석을 통해 결과를 도출하기에 계산량이 급속히 증가하게 된다. 그런데 여기에 최적화가 더해지면, 설계 변수를 바꾸가며 이러한 비선형 해석을 거듭하는 것이기 때문이다. 단순 비선형 구조해석이 아니라 비선형 구조/공력의 연계해석이라면 효율적인 접근법이 더욱 절실하다.

본 기사에서는 먼저 비선형 구조해석과 공력해석을 효율

적으로 연계하는 방안을 탐색한다. 첫째로, 공력/구조 해석을 번갈아 수행하는 방법에서 비선형 구조해석을 고려하는 경우이다. 비선형 구조해석과 공력해석을 연계 되는 경우 구조해석과 공력해석을 번갈아 수행하는 방법으로 여러 경우를 생각해 볼 수 있으며, 그 중 효율적인 접근법을 찾아 보도록 한다.

둘째로, 공력/구조 연계해석에 축소 모델 기법을 활용하는 것이다.²⁾ 본 기사에서는 계산량이 많은 날개 구조의 공력해석에 초점을 두어 축소 모델을 구성하는 한편, 효율적이고 안정적인 구조 최적화를 제1목표로 하였다. 축소 모델 기법 중 적합직교분해(Proper Orthogonal Decomposition, POD)를 활용하여 구조변위, 공력분포를 각각 인풋과 아웃풋으로 두어 비교적 간략한 축소 모델을 구성하였다.

또한, 연계해석은 물론 비선형 민감도 산출기법에도 POD 모델을 활용함으로써 구조적 비선형 거동을 지니는 연계해석 시스템에서의 최적화를 효율적으로 접근할 수 있도록

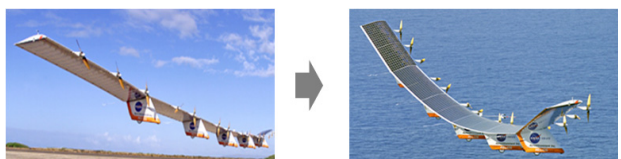


그림 1 고고도 무인기의 유연 날개

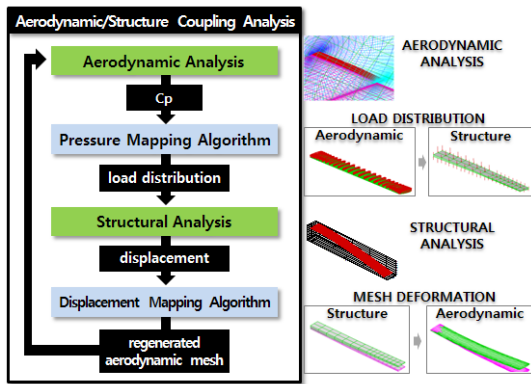


그림 2 공력/구조 연계해석 기법 : 선형 구조해석의 경우

하였다. 설계 변수의 개수에 따라 최적화 과정에서 민감도를 산출하는 과정이 계산의 대부분을 차지할 수 있기 때문에, 일반적인 유한차분방식 보다는 준해석적 민감도 산출 기법을 활용하는 것이 효율성 측면에서 유리하다.⁴⁾⁻⁵⁾ 본 연구에서는 비선형 구조/공력 연계 시스템에 준해석적 민감도 산출 기법을 적용하였고, 또한 이때 앞서 구성한 POD를 활용하였다. 제안 기법을 활용하여 글로벌 호크와 유사한 고고도 무인기 날개 모델을 기반으로 한 최적화 문제를 풀어 보았으며, 그 결과를 통해 제안 방법의 효율성을 검증하도록 한다.

2. 비선형 구조/공력 연계해석과 최적설계

2.1 비선형 공력/구조 연계해석

연계 해석에는 일반적으로 크게 두 가지의 접근 방법이 있다. 직접법(monolithic method)과 시차제법(partitioned/staggered method)이 그것이다. 전자의 경우 구조시스템과 공력시스템을 재 공식화하여 단일화된 지배방정식을 이끌어내는 것이다. 반면, 후자의 경우 공력해석과 구조해석을 따로 수행하며 두 시스템의 경계에서 이를 매개해 주는 시스템을 구성하는 것이다. 보통 후자의 방법이 더 범용적으로 사용되는데, 이는 단일화된 시스템의 구성이 쉽지 않은 점과, 해당 방법에서 각기 널리 연구되고 발달된 구조코드와 공력코드를 활용할 수 있는 까닭이다.⁶⁾

선형 구조해석과 공력해석의 연계의 경우 그림 2와 같이 단순하게 구조해석과 공력해석을 번갈아 수행하는 경우가 일반적이다. 즉, 기본적으로 연계해석은 다음과 같은 순서로 수행된다. 날개의 초기 형상으로부터 공기력을 구하고, 압력 사상 기법을 바탕으로 날개에 작용하는 외력 정보를 얻는다. 그러면 구조해석 코드에 의해 변형된 날개의 형상

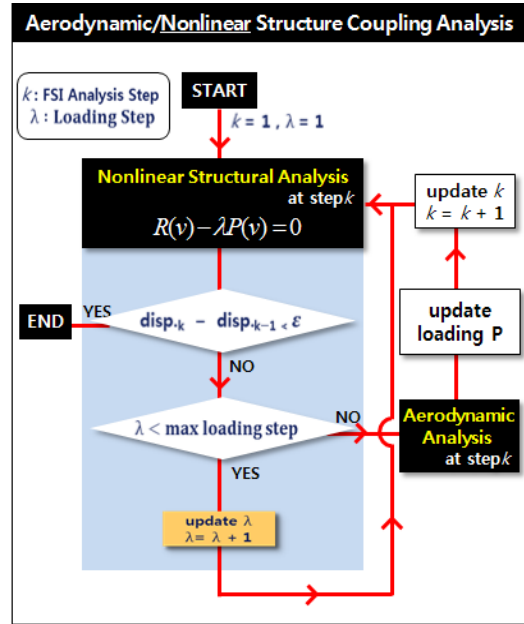


그림 3 공력/구조 연계해석 : 비선형 구조해석의 경우

을 구할 수 있으며, 변위 사상 기법에 의하여 재구성된 공력 격자를 바탕으로 공기력을 구하게 된다. 이러한 과정을 더 이상 변형이 일어나지 않을 때까지 반복하는 것이다.

그러나 대변형이 발생하는 비선형 구조해석에서 공력해석을 연계하는 것은 다른 접근 방법을 취해야 한다. 대변형이 발생하기 때문에 변형의 정도에 따라 날개에 가해지는 공기력 또한 크게 달라지게 되는데, 구조해석 자체에서 이를 반영하지 않으면 최종 결과의 정확도를 감소시키게 되는 것이다.

본 기사에서는 비선형 구조해석과 공력해석을 완전히 개별적으로 수행하고 연계하는 것이 아니라, 비선형 구조해석 알고리즘 내부의 외력 업데이트 과정에 공력해석이 개입되도록 하였다. 그러나 반복적으로 산출한 변위를 합산하여 최종 변위를 구하는 비선형 구조해석에서 매번 변위를 산출할 때마다 공력해석을 추가한다면 연계해석에 소요되는 시간이 증폭될 것이다.

$$g(x) = f(x) \tag{1}$$

$$|g(x) - f(x)| < \epsilon \tag{2}$$

공력/구조 연계해석의 수렴해를 찾는 것은 구조의 변형에 따른 내력 $g(x)$ 와 공력해석을 통해 산출한 외력 $f(x)$ 의 평형 상태인 식 (1)의 해를 구하는 문제와 같다. 즉, 연계해석은 식 (2)와 같이 구조에 작용하는 내력과 외력의 차이를 최소화하는 수렴값을 찾는 과정이라 할 수 있다. 이 때

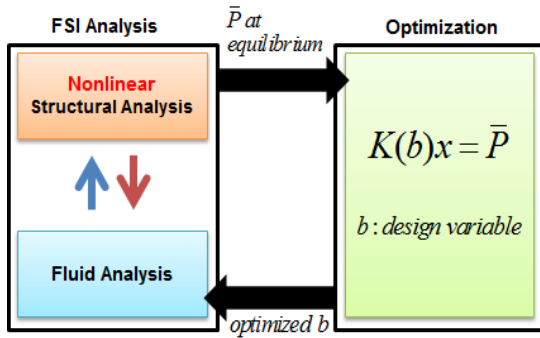


그림 4 공력/구조 연계해석 기법 : 선형 구조해석의 경우

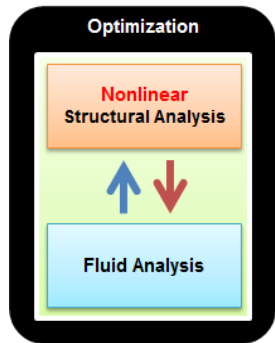


그림 5 공력/구조 연계해석 기법을 내부에 포함한 최적설계 기법

수렴값에 가까운 지점으로부터 연계해석을 시작할 수 있다면 수렴 속도 또한 빠를 것이다. 따라서 본 연구의 연계해석 알고리즘은 다음의 과정을 따른다. 우선, 초기 변위에서부터 출발하기 보다는 초기 형상의 공기력에 대한 비선형 구조해석으로 수렴된 변위로부터 연계해석을 시작한다. 그리고 그로부터 공력해석을 통한 외력과, 구조해석을 통한 내력의 차이가 감소하여 수렴할 때까지 해석을 전개하는 것이다.⁷⁾ 이러한 연계해석 기법을 도식한 것이 그림 3이다.

2.2 공력/구조 연계해석과 최적설계

시차제법을 사용하는 공력/구조 연계해석을 포함하는 최적 설계를 할 경우, 그림 4와 같이 접근하는 경우가 많다. 고정된 설계 변수 b 하에서 연계해석을 하고, 이로써 수렴된 평형상태의 하중을 고정하여 최적화 한 뒤 새로운 설계 변수 b 를 얻는다. 이 과정을 전체 과정이 수렴 상태에 도달할 때까지 반복하는 것이다.

이렇게 하면, 내부 최적설계 솔버의 수렴성은 좋은 반면, 전체 알고리즘의 수렴성은 좋지 않다. 최적설계 과정에서 설계 변수에 따른 민감도 해석에서 연계해석을 반영하지 못하기 때문에 전체 과정이 평형점을 찾지 못하고 진동, 발

산할 가능성이 크다.

그림 5와 같이 연계해석 과정이 최적화 솔버 내부에 삽입되는 경우를 생각해 볼 수도 있다. 이 경우 민감도의 계산이 공력/구조 연계해석을 고려하여 이루어지나, 그 대신 연계해석의 호출 횟수가 급증하여 효율성 및 실용성이 떨어지게 된다. 즉, 그림 5의 알고리즘의 실제적 활용을 위해서는 축소 모델 기법의 적용이 필수적이다.

3. POD를 활용한 공력/구조 연계 시스템의 최적설계

연계해석에 축소 모델을 활용하는 방법은 다양하다.^{2),8)-9)} 시차제법에서의 축소 모델은 공력시스템을 대신할 수도 있고, 구조시스템을 대신할 수도, 여기에 경계시스템을 포함할 수도 있다. 상대적으로 시간 소모가 큰 공력해석에서 근사모델을 구성하여 연계해석을 진행하는 것이 효율적이기에, 이 중에서 공력시스템을 중심으로 근사모델을 활용하는 것에 중점을 두고 여러 연구가 진행되었다.

그림 5와 같은 최적설계 알고리즘의 활용을 위해서는 효율적으로 공력/구조 연계해석을 수행하는 것이 중요하며, 축소 모델 기법을 이용하여 연계해석 모델을 구축하는 것이 그 방안이 된다. 축소 모델 구성에는 여러 방법이 있는데 본 기사에서는 POD 기법에 주목하였다.

3.1 POD 모델 구축

적합직교분해(Proper Orthogonal Decomposition, POD)는 복잡한 현상을 담고 있는 데이터에서 바탕이 되는 고유치 모드를 추출하는 분석 기법이다. POD 기법을 활용하면 적은 수의 모드만으로도 해당 시스템의 응답을 비교적 정확히 재구성할 수 있기 때문에, 축소 모델 방법으로 이용되고 있다.

관심시스템에서 특정 변수 x 에 의해 영향을 받는 결과 벡터장 s 가 N 개의 지점에서 M 번 측정 혹은 계산되면 다음과 같이 $M \times N$ 의 데이터 행렬 s 를 구성할 수 있다. \bar{s} 는 M 번의 평균값이다.

$$S = \begin{bmatrix} s_1^{(1)} - \bar{s}_1 & s_1^{(2)} - \bar{s}_1 & \cdots & s_1^{(n_s)} - \bar{s}_1 \\ s_2^{(1)} - \bar{s}_2 & s_2^{(2)} - \bar{s}_2 & \cdots & s_2^{(n_s)} - \bar{s}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{n_a}^{(1)} - \bar{s}_{n_a} & s_{n_a}^{(2)} - \bar{s}_{n_a} & \cdots & s_{n_a}^{(n_s)} - \bar{s}_{n_a} \end{bmatrix} \quad (3)$$

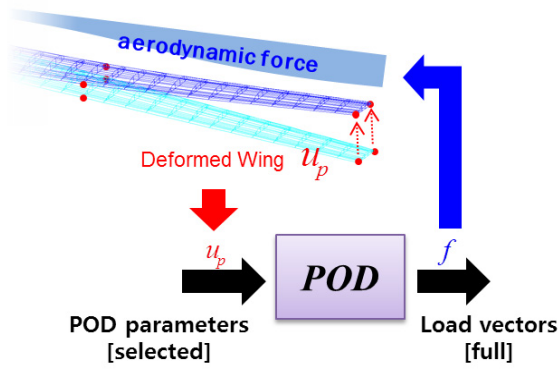


그림 6 공력/구조 연계해석을 위한 POD 구성

이제 식 (4)와 같이 $M \times N$ 의 공간 상관 행렬 C 를 구성한다. 그러면 C 의 고유 벡터들로부터 직교 모드 U 를 산출할 수 있고, 식 (5)와 같이 n_s 개의 모드만을 이용하여 벡터장 s 를 S_{POD} 로 근사화하는 식을 구성할 수 있다.

$$C = S \cdot S^T \quad (4)$$

$$S_{POD} = \sum_{i=1}^{n_s} U_i \alpha_i + \bar{s} \quad (5)$$

여기서, 계수 α 는 직교 모드 U 를 결과 변위 데이터에 투영하여 구할 수 있다.

$$\alpha_i^{(j)} = \langle s^{(j)} - \bar{s}, U_i \rangle \quad (6)$$

POD 계수 α 는 벡터장 s 에 영향을 주는 파라미터 x 가 결과 변위장을 근사화 하도록 산출되어야 하며, 다음에 나타내었다. 이동최소사승법(Moving Least Square, MLS) 등의 기법을 이용하여 근사화의 정확도를 높일 수 있다.

$$\alpha_i(x) = \beta(x)^T c_i(x) \quad (7)$$

$$c_i(x) = [\sum_{j=1}^{n_s} \theta_j(x_j, x) \beta(x_j) \beta^T(x_j)]^{-1} \sum_{j=1}^{n_s} \theta_j(x_j, x) \beta(x_j) \alpha_i^{(j)}$$

$$\theta(x, x_j) = 1 / \text{distance}(x, x_j)^p \quad (9)$$

위에서 $\beta(x)$ 는 다항식 기저(polynomial basis) 벡터이며, θ 는 가중치이다.¹⁰⁻¹²⁾

3.2 연계해석 모델의 최적설계를 위한 POD 구축

공력/구조 연계 해석의 POD 모델을 구축하는 데에는 여

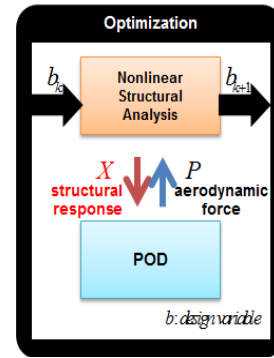


그림 7 공력/구조 연계해석 기법을 내부에 포함한 최적설계 기법 : POD 활용

러 접근 방법이 있으나, 본 기사에서는 효율적인 구조 최적화를 목표로, POD 모델을 활용하여 공력/구조 연계해석을 압축적으로 담아낼 수 있도록 하는데 초점을 두었다.

즉, 그림 6에서와 같이 구조해석의 변위 결과를 인풋 변수로 하여 공력분포를 산출할 수 있도록 POD를 구성하였다. 구조해석 결과로 변형된 날개에서 소수의 선택된 노드에서의 변위 정보를 인풋으로 두며, 해당 변위에서 공력해석을 통해 얻을 수 있는 공력 분포를 아웃풋으로 두었다. 구성된 POD 모델은 최적화 과정에서 그림 7과 같이 연동된다.

3.3 비선형 구조/공력 연계해석에서의 준해석적 민감도 해석기법과 POD 모델의 활용

최적설계 과정은 설계변수의 민감도를 산출하여 최적값에 가까운 방향으로 나아가는 것이기에, 민감도의 산출이 중요한 부분을 차지한다. 보통 민감도는 유한차분법을 사용하여 계산하기에, 기준 설계변수에 해당하는 해석값에 더하여 섭동된 설계변수에 해당하는 해석이 한 차례 더 필요하게 된다. 본 연구에서 다루는 비선형 구조/공력 연계 시스템의 경우 해석을 한차례 수행하는 데에도 상당 시간이 소요되기 때문에, 그 효율성을 높이기 위해 앞서 2.1절, 3.2절과 같은 방식을 도입하였다. 민감도 해석에서도 효율성을 높이기 위해 준해석적 민감도 해석기법을 적용하도록 한다.

준해석적 민감도 해석기법은 식 (10)의 평형방정식으로부터 식 (11)~(13)의 과정에서와 같이 설계변수에 대해 미분하여 얻는다.

$$g(u, s) = f(s) \quad (10)$$

$$\frac{\partial g}{\partial u} \frac{du}{ds} + \frac{\partial g}{\partial s} = \frac{df}{ds}, \quad \frac{\partial g}{\partial u} = K \quad (11)$$

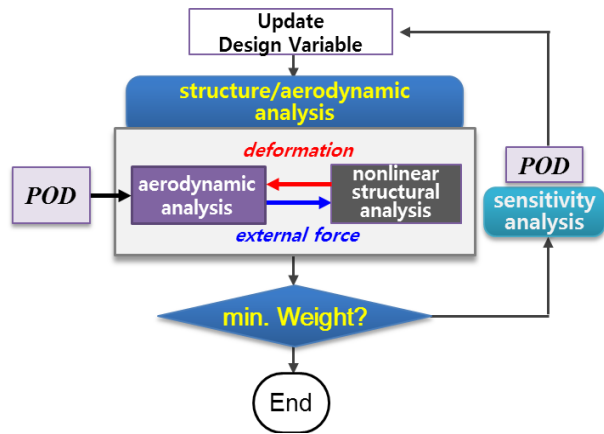


그림 8 모델축소기법(POD)를 활용한 FSI 연성 해석 시스템에서의 최적설계 기법

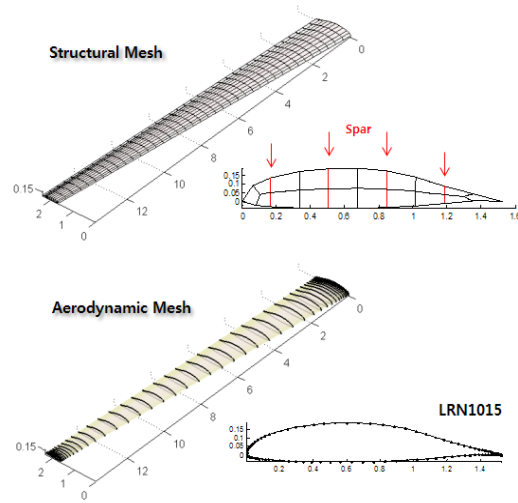


그림 9 고세장비를 가지는 글로벌호크 날개의 구조 및 공력 모델

$$K \frac{du}{ds} + \frac{\partial g}{\partial s} = \frac{\partial f}{\partial u} \frac{du}{ds} \quad (12)$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta s} = - \left[K - \frac{\Delta f}{\Delta u} \right]^{-1} \frac{\Delta g}{\Delta s} \Big|_{u=u^*} \quad (13)$$

여기서, 앞서 구축한 POD 모델을 활용하여 준해석적 민감도 해석을 더욱 효율적으로 수행한다.

$$\frac{\Delta f}{\Delta u} = \frac{\Delta POD}{\Delta u} \quad (14)$$

4. 예 제

2절과 3절에서 제안한 기법들을 바탕으로 그림 8과 같은 최적화 알고리즘을 구성할 수 있다. 공력/구조 연성해석은 2.1절에 따르며, POD 기법을 활용하여 효율성을 높인다. 민감도 해석 또한 POD를 활용한 연계해석을 고려하여 준해석적 기법으로 수행한다.

본 알고리즘에 따라 글로벌호크 형상의 날개 모델의 최적 설계를 수행하였다.

4.1 해석모델

그림 9와 그림 10에 각각 해석모델과 해석조건을 나타내었다.

최적설계 문제는 다음과 같이 구성된다. 날개 구조 요소의 두께들로 구성된 설계 변수 s 에 대하여 날개의 총 무게를 최소화하는 것이다. 공력/구조 연성해석 $K(s)x = P(x)$

Flight condition			
Mach number	0.6		
Re	2.38e7		
Wing shape			
Root	5.0 ft	Sweepback	5.9
Taper	0.47	Semi-Span	45 ft
Material properties			
Young's modulus of skin / spar / rib		174.6 GPa	

그림 10 공력 및 구조해석 조건

을 수행하며, 변위 및 응력 제한조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find } s \\
 &\text{Min } Weight(s) \\
 &\text{s.t. } K(s)x = P(x) \\
 &x \leq displacement_{\max} \\
 &\sigma(x) \leq \sigma_{\max} \\
 &s_l \leq s \leq s_u
 \end{aligned} \quad (15)$$

설계변수는 총 8개로, 위 아래 스킨, 리브, 스파 각각의 기울기와 날개 끝에서의 두께로 설정하여, 날개 길이 방향을 따라 선형적으로 두께를 표현할 수 있도록 하였다. 그림 11에 이를 도식하였다.

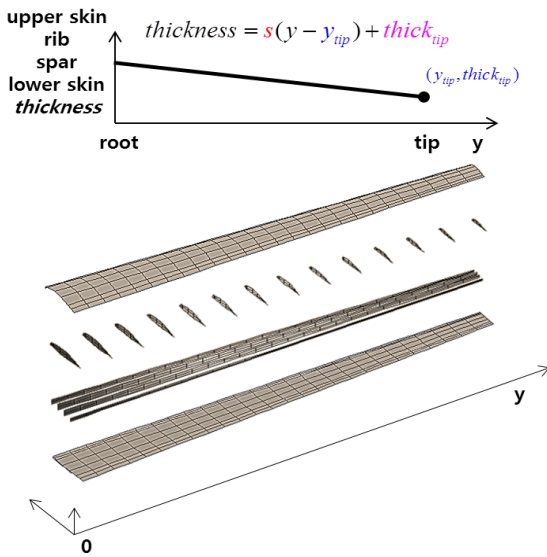


그림 11 설계변수 설정

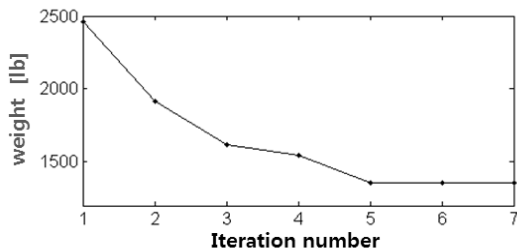


그림 12 최적화 결과 : 무게 최소화

4.2 해석 결과

최적화 결과, 그림 12에서 볼 수 있듯이 날개 무게가 초기값 2463lb에서부터 1357lb로 감소하였다. 날개 요소들의 두께변화는 그림 13에 나타내었다. 총 소요시간은 약 20시간이다. 만약 본 최적화 알고리즘에서 사용한 효율성을 위한 여러 방법들을 적용하지 않는다면 소요시간은 10배 이상 증가할 것이다. POD를 사용하는 연계해석이 사용하지 않는 연계해석보다 약 5배 빠르며, 준해석적 민감도 해석은 유한차분법에 비해 약 2배 빠르기 때문이다. 여기에 비선형 구조해석과 공력해석의 연계 알고리즘까지 더해지면, 본 알고리즘의 계산속도가 전형적인 최적화 알고리즘에 비하여 적어도 10배 이상 빠르다는 것이 된다.

5. 결 론

본 기사를 통하여, 기하학적 대변형이 발생하는 공력/구조 연계시스템에서의 구조 최적설계의 효율적 접근법을 탐

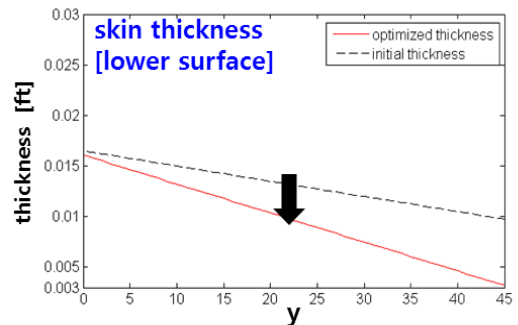
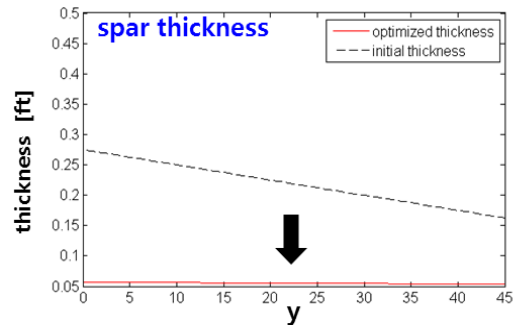
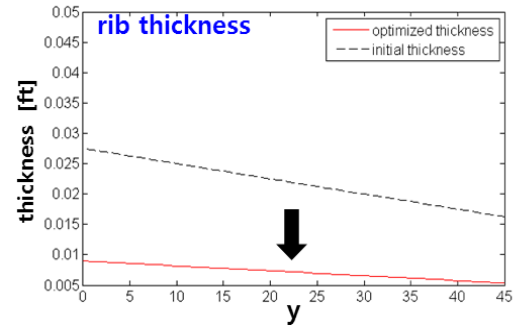
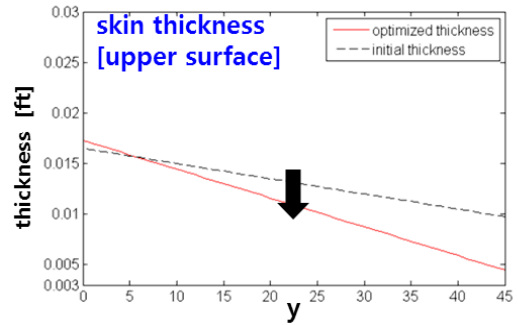


그림 13 최적화 결과 : 설계변수 변화


색하였다. 대변형이 발생하는 구조의 해석에는 비선형 구조해석으로 접근해야 하며, 이를 공력해석과 효율적으로 연계하는 방법에 대해 알아보았다. 연계해석과 최적설계의 효율성을 더 높이기 위하여 POD로 대표되는 축소 모델을 도입하였고, 그것을 이용하여 준해석적 민감도 해석과 결부하여 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안된 최적화 알

고리즘을 글로벌호크 날개 모델의 무게 최적화 문제에 적용하였고, POD를 이용한 축소모델이 효율적으로 최적화 결과를 도출하는 것을 보였다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호UD100048JD)

참고 문헌

1. Tang, D. and Dowell, E. H. (2001), "Experimental and theoretical study on aeroelastic response of high-aspect-ratio wings", AIAA Journal, Vol. 39, No. 8.
2. Dowell, E. H. and Hall, K. C. (2001), "Modeling of Fluid-Structure Interaction", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 33, pp.445-490.
3. Kamakoti, R. and Shyy, W. (2004), "Fluid-structure interaction for aeroelastic applications", Progress in Aerospace Sciences, Vol. 40, pp.535-558.
4. Boer, H. D. and Keulen, F. V. (2000), "Refined semi-analytical design sensitivities", Int. Journal of Solids and Structures, Vol. 37, pp. 6961~6980.
5. Parente Jr. E. and Vaz, L. E. (2001), "Improvement of semi-analytical design sensitivities of non-linear structures using equilibrium relations", Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 50, pp.2127~2142.
6. Lohner, R., Yang, C., Cebal, J., Baum, J. D., Luo, H., Pelessone, D. and Charman, C. (1998), "Fluid-structure-thermal interaction using a loose coupling algorithm and adaptive unstructured grids", AIAA1998-2419.
7. 김의영, 장성민, 이동호, 조맹효(2012), "비선형 구조 해석과 공력 해석의 효율적인 연계 알고리즘에 대한 연구" 한국항공우주학회지, Vol. 40. No. 11.
8. Coelho, R. F., Breitkopf, P. and Knopf-Lenoir, C. (2008), "Model reduction for multidisciplinary optimization - application to a 2D wing", Struct Multidisc Optim, Vol. 37, pp. 29-48,
9. Coelho, R. F., Breitkopf, P., Knopf-Lenoir, C., and Villon, P. (2009), "Bi-level model reduction for coupled problems", Struct Multidisc Optim, Vol.39, pp. 401-418,
10. Sirovich, L. (1987), "Turbulence and the dynamics of coherent structures. Part 1 : coherent structures", Quarterly of Applied Mathematics, Vol.45, pp. 561-571,
11. Ko, J. H., Jung, K., Kim, S., Kim, W. and Cho, M. (2011), "A proper orthogonal decomposition for parametric study of the mechanical behavior of nanowires", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.25, pp. 157-162. 

[담당 : 윤길호 편집위원]