

特輯論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.11.957>

비선형 구조 해석과 공력 해석의 효율적인 연계 알고리즘에 대한 연구

김의영*, 장성민*, 이동호*, 조맹효**

An efficient method for fluid/structure interaction analysis
considering nonlinear structural behavior

Euiyoung Kim*, Seongmin Chang*, Dongho Lee* and Maenghyo Cho**

ABSTRACT

Fluid/structure interaction (FSI) analysis is necessary to predict the response of a system in which aerodynamic pressure causes deformation of the structure, and vice versa. In dealing with a nonlinear behavior of the structure, however, a simple iterative algorithm of aerodynamic analysis with structural analysis yields no accurate results since aerodynamic pressure need to be changed in accordance with the deformation of structures. In this study, we explore an efficient and accurate method for integrating FSI analysis into structural nonlinear systems. During the course of nonlinear structural analysis, loading conditions are periodically updated by aerodynamic analysis. The accuracy and efficiency of the method is demonstrated with a high-aspect-ratio flexible wing of Global Hawk.

초 록

비행체 구조는 공기력에 의해 변형이 발생하고 이 구조의 변형은 다시 공기력의 변화를 유발하므로 비행체 구조 시스템의 고정밀 설계를 위해서는 공력/구조 연계 해석이 필요하다. 그러나 발생하는 변형이 비선형 구조 해석을 요구할 정도로 큰 경우, 선형 시스템에서와 같이 공력 해석과 구조 해석을 순차적으로 반복하는 연계 해석 기법은 바람직하지 않다. 구조적 변형에 따라 변하는 공기력을 충분히 고려하지 못하며, 소요 시간 또한 크기 때문이다. 본 연구는 공력장 내부의 비선형 구조의 거동을 보다 효율적으로 예측할 수 있는 공력/구조 연계 해석 기법을 다룬다. 즉, 비선형 구조 해석 단계 도중에 주기적으로 공력 해석을 통한 외력 업데이트를 수행하는 알고리즘을 제안한다. 또한 고세장비의 유연날개를 가지는 글로벌 호크 모델을 사용하여 여러 가지 기법의 비선형 공력/구조 연계 해석의 결과를 비교하였다.

Key Words : Fluid/Structure Interaction(공력/구조 연계 해석), Static Aeroelastic Analysis (정적 공탄성 해석), Nonlinear Structural Analysis(비선형 구조 해석)

1. 서 론

구조물의 변형이 공기력을 변화시키고 다시 변화된 공기력이 구조물의 변형을 야기하는 경우, 공탄성(aeroelasticity)학적 접근을 통하여 둘의 상호 작용을 고려해야 한다. 또한 구조의 변형이 큰 경우, 비선형 구조 문제를 포함한 공탄

† 2012년 8월 29일 접수 ~ 2012년 10월 31일 심사완료

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

교신저자, E-mail : mhcho@snu.ac.kr

서울대학교 관악구 관악로 1

성 해석이 요구된다. 예를 들어, 비행체의 공탄성 문제에서는 종종 구조물의 대변형을 고려해야 하는 경우가 있다. 특히 군사정찰, 환경탐지 등의 용도로 유용한 HALE(High-Altitude Long-Endurance) 무인기는 고세장비(High-Aspect-Ratio, HAR)의 유연날개를 가지므로, 이를 설계할 때에는 구조적 대변형을 고려하여 접근해야 한다[1]. 즉, 기하학적 비선형을 고려한 구조 해석과 공력 해석간의 연계가 필요하다.

공탄성 문제에서 공력과 구조를 연계시키는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 직접법(monolithic method)과 시차제법(staggered method)이 그것이다. 직접법은 구조 및 공력 지배 방정식을 재 공식화하여 통일된 공식을 이끌어내는 방법이다. 이 방법은 단일화된 공탄성 해석을 통해 정보 교환 없이 한번에 결과를 도출할 수 있기에 비교적 정확하나, 기존의 구조 및 공력 코드를 벗어나 완전히 새로운 프로그램을 정립해야 하는 등 그 구현이 복잡하고 범용적이지 못하다. 반면 시차제법은 구조 해석과 공력 해석을 각각 개별적으로 접근한다. 관련 변수들을 주고 받아 개별 시스템의 해석을 통한 업데이트를 반복하면서 수렴된 결과를 도출한다. 후자가 전자의 방법보다 보편적으로 사용되는데, 이는 후자의 경우 구조와 공력 시스템 각각의 절점 사이의 정보교환 수단만 추가한다면 기존에 개발된 구조 및 공력 코드를 그대로 활용할 수 있다는 장점을 지니기 때문이다[2].

공력/구조 연계 해석 분야에서는 현재까지 많은 연구가 수행되어 왔다[3,4]. 그러나 구조의 비선형성을 다루는 방법이나 연계 해석 알고리즘의 효율성 측면에서는 개선이 필요한 사항들이 존재한다. 연계 해석의 수렴을 가속화하기 위한 연구들의 경우 대부분 비선형 구조해석과의 연계 과정을 고려하지 않거나[5,6], 연계 해석 결과에 가중치를 설정하는 방식이다[7,8]. 공탄성 해석에 비선형 구조 해석이 포함될 경우에는 연산에 필요한 시간이 크게 증가하므로 효율적인 공력/구조 연계 알고리즘의 필요성이 더욱 증대되는데, 비선형 유한요소 해석 모델을 이용하여 공력/구조 연계해석의 효율성을 증진하고자 하는 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 구조 비선형을 고려하는 한편, 공력/구조 해석 간의 정보 교환을 효율적으로 수행할 수 있는 연계 해석 알고리즘을 제안한다. 기하학적 비선형을 고려한 구조 해석 코드와 공력 해석 코드를 개별적으로 사용하면서(staggered method), 구조 해석 과정 중 공력 해석을 통한 외

력 업데이트가 연계되도록 한다. 또한 고세장비의 유연날개를 가지는 실제 글로벌 호크 모델의 정적 공탄성 해석을 통하여 제안 방법의 효율성 및 필요성을 검증하도록 한다.

II. 비선형 구조/공력 연계 해석 알고리즘

공학 문제의 실제 적용에 있어서 구조 비선형 해석이 필요한 경우는 상당히 많다. 구조의 변위나 변형률이 크게 발생하는 경우, 물성의 비선형성이 큰 문제 등을 접근함에 있어서 선형성을 가정하는 것은 올바른 결과를 이끌어내지 못한다. 특히 공기력의 작용으로 구조 비선형성이 발생하는 공탄성 문제의 경우 연계 해석 사이클마다 구조 해석이 반복되어 누적되기 때문에, 정확한 결과의 도출을 위해서는 반드시 비선형성을 고려한 구조 해석이 필요하게 된다. 그러나 기존의 선형 구조와 공력의 연계 해석 알고리즘에 비선형 구조 해석을 그대로 대입하는 것은 효율적이지 못하며 새로운 접근이 필요하게 된다.

2.1 연계 해석 알고리즘 : 기존 기법

고고도 비행체 날개와 같이 유연한 특성을 가지며 공기력에 의한 큰 변형이 발생하는 구조물을 해석하는 경우, 공기력과 더불어 날개 구조의 탄성 및 관성력의 작용에 의해 발생하는 공탄성이 고려되어야 한다. 이러한 구조물에 대하여 변형이 선형이라 가정하여 선형 연계 해석을 진행하거나 연계 해석을 하지 않고 비선형 구조 해석을 진행한다면 그 거동을 정확히 예측할 수 없다. 따라서, 비선형 구조 해석을 포함하는 공탄성 해석이 필요하게 된다.

일반적으로 적용되는 공력/구조 연계 해석 절차를 Fig. 1에 도식하였다. 기본적으로 연계 해석은 날개의 초기 형상에서 먼저 출발한다. 초기 형상으로부터 공기력을 구하고, 압력 사상 기법을 바탕으로 날개에 작용하는 외력 정보를 얻는다. 그러면 구조 해석 코드에 의해 변형된 날개의 형상을 구할 수 있으며, 변위 사상 기법에 의하여 재구성된 공력 격자를 바탕으로 공기력을 구하게 된다. 이러한 과정을 더 이상 변형이 일어나지 않을 때까지 반복하는 것이다[9].

그러나 대변형이 발생하는 비선형 구조 해석과 공력 해석의 연계는 선형에서의 공력/구조 연계 해석과 접근 방법을 달리해야 한다. 선형 연계 해석과 동일한 방식으로 단순히 공력 해석

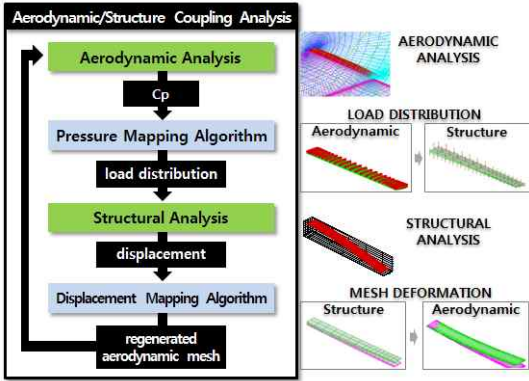


Fig. 1. Aeroelastic analysis : linear structure

과 비선형 해석을 거듭하여 수렴 상태에 도달할 때까지 반복하는 것은 바람직하지 않다. 대변형이 발생하기 때문에 변형의 정도에 따라 날개에 가해지는 공기력이 크게 달라지게 되는데, 구조 해석 자체에서 이를 반영하지 않으면 최종 결과의 정확도를 감소시키게 되는 것이다.

2.2 연계 해석 알고리즘 : 제안 기법

본 연구에서는 비선형 구조 해석과 공력 해석을 완전히 개별적으로 수행하고 연계하는 것이 아니라, 비선형 구조 해석 알고리즘 내부의 외력 업데이트 과정에 공력 해석이 개입되도록 하였다. 그러나 비선형 구조 해석은 매 단계 로딩을 점차 늘려가며 반복적으로 구한 변위를 합산하여 최종 변위를 구하기 때문에, 변위를 산출할 때마다 공력 해석을 추가한다면 연계 해석에 소요되는 시간이 증폭될 것이다.

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

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

공력/구조 연계 해석의 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, 연계 해석은 식 (2)와 같이 구조에 작용하는 내력과 외력의 차이를 최소화하는 수렴값을 찾는 과정이라 할 수 있다. 이 때 수렴값에 가까운 지점으로부터 연계 해석을 시작할 수 있다면 수렴 속도 또한 빠를 것이다. 따라서 본 연구의 연계 해석 알고리즘은 다음의 과정을 따른다. 우선, 초기 변위에서부터 출발하기 보다는, 초기 형상의 공기력에 대한 비선형 구조 해석으로 수렴된 변위로부터 연계 해석

을 시작한다. 그리고 그로부터 공력 해석을 통한 외력과, 구조 해석을 통한 내력의 차이가 감소하여 수렴할 때까지 해석을 전개하는 것이다.

이러한 연계 해석 기법을 도식한 것이 Fig. 2이며, 다음과 같은 순서로 정리할 수 있다.

- 1) 날개의 초기 형상에서의 공력 해석을 통해 산출한 외력 정보를 바탕으로 비선형 구조 해석을 수행한다.
- 2) 수렴된 변위에 대한 공력 해석을 수행하여 변형된 공기력을 얻는다.
- 3) 새로 산출된 공기력을 종전의 비선형 구조 해석의 마지막 단계에서의 변화된 외력으로 가하여 새로운 평형점을 얻는다. 이 변위를 바탕으로 다시 공력 해석을 한다.
- 4) 3)에서의 공력 및 구조 해석을 한 세트로서 하여 결과 변위가 수렴할 때까지 반복한다.

III. 해석 예제

3.1 해석 모델

공기력의 영향 하에서 비선형 거동을 보이는 구조에 대한 연계 해석 기법의 적용을 위하여, 고세장비의 글로벌 호크 날개 모델을 이용하였다. 해석 조건과 모델의 상세 정보는 각각 Fig. 3

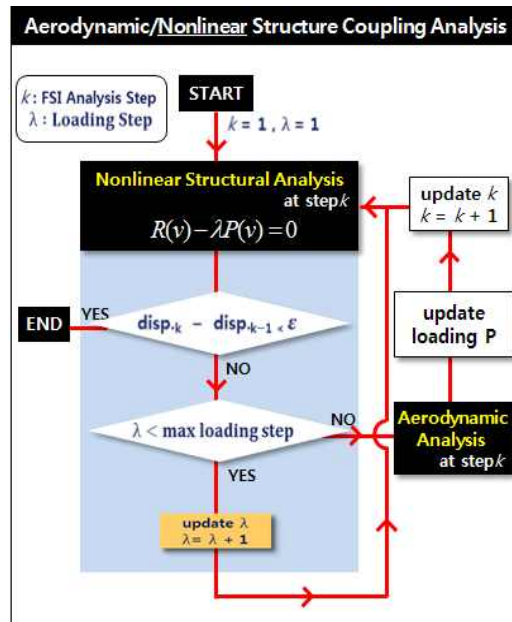


Fig. 2. Aeroelastic analysis : nonlinear structure

Flight condition			
Mach number	0.6		
Re	2.38e7		
Wing shape			
Root	1.52m	Sweepback	5.92
Taper	0.4667	Span	35.4m
Material properties			
Young's modulus of skin / spar / rib	72.4GPa		

Fig. 3. Flight condition and material properties

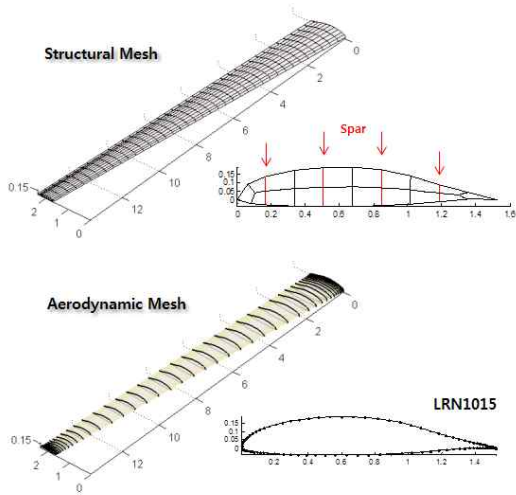


Fig. 4. Structural and aerodynamic model of high-aspect-ratio wing of Global Hawk

과 Fig. 4에 나타내었다.

공력 해석 기법으로는 삼차원 비정상 압축성 오일러 방정식을 사용하였다. 여기에 Roe의 FDS(Flux Difference Scheme) 를 통한 이산화 과정, Implicit Residual Smoothing 기법 등을 적용하여 해의 안정적인 수렴 가속화를 가능하게 하였다[10]. 사용한 격자의 절점은 35,002 개이다.

구조 모델은 6절점 비선형 쉘 요소를 이용하여 4,682개의 절점과 1,344개의 요소로 구성하였다.

또한 선형 연계 해석에서와 마찬가지로 연계 해석 과정 중 공력 해석과 구조 해석 간의 정보를 교환할 때에는 공력 격자와 구조 격자 간의 불일치가 존재하는데, 본 예제에서는 이 때 각각

의 격자에 해당하는 절점으로의 변위 및 압력 정보의 사상으로 델로네 삼각 분할(Delaunay triangulation) 을 이용하였다. 발생한 변위에 대한 공력 격자의 재구성을 위해서는 비틀림 스프링을 고려하는 동적 격자 방법을 사용함으로써 음의 면적이거나 음의 체적의 발생 없이 격자를 이동하도록 하였다[11].

위 모델을 이용하여 Fig. 2의 과정을 따르는 비선형 구조의 공력/구조 연계 해석을 수행하고 다른 방법들과 비교하였다. 비교 방법으로는 다음의 두 가지를 설정하였다.

- 1) 선형 구조/공력 연계 해석 (Fig. 1)
- 2) 제안 기법인 비선형 연계 해석 기법(Fig. 2) 으로 수렴된 형상에서의 공기력에 대한 선형 구조 해석

3.2 해석 결과

Fig. 5에 해석 결과를 나타내었다. 기동 하중 조건은 3G로 가정하였다. 1) 선형 연계 해석을 하는 경우 비선형 구조/공력 연계 해석 결과에 비해 각각 39.7% 큰 변위를 도출하였다. 2) 비선형 연계 해석으로 수렴된 결과의 공기력을 외력으로 하여 선형 구조 해석을 수행한 것은 제안 기법에 비하여 18.0% 큰 변위를 얻을 수 있었다.

날개의 변형이 큰 경우에서의 연계 해석을 수행하기 위해 기동 하중 조건을 4G로 가정하여 해석하였고, 그 결과는 Fig. 6에 도식하였다.

비선형 구조/공력 연계 해석 결과와 비교하여

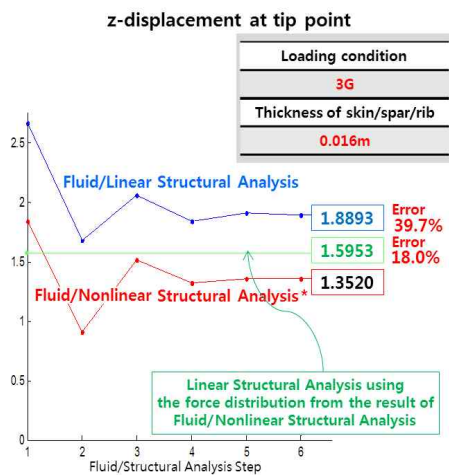


Fig. 5. Comparison of displacements of 3G loading condition

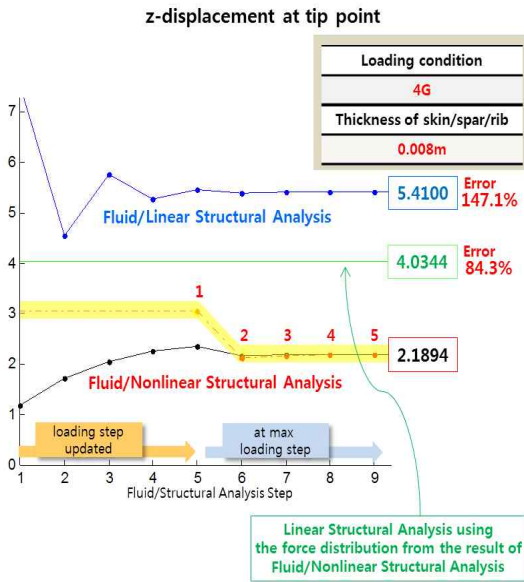


Fig. 6. Comparison of displacements at 4G loading condition

1) 선형 연계 해석, 2) 비선형 연계 해석 결과의 공기력에 대한 선형 구조 해석의 결과가 각각 147.1%, 84.3% 크게 계산되었다. 기동 하중 조건을 변경해가며 해석해보면 날개의 변형이 커질수록 비선형 구조/공력 연계 해석과 다른 해석 방법을 이용한 결과의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 대변형의 정도가 커질수록 구조의 비선형성을 고려한 공탄성 연계 해석의 필요성이 증대되는 것이다.

비선형 구조 해석의 수렴된 결과로부터 연계 해석을 시작하지 않고, 비선형 구조 해석 과정 중의 하중 스텝 마다 공력 해석을 수행하여 외력을 업데이트하며 연계 해석을 수행한 결과 또한 Fig. 6에 담았다. 전자는 노란색 굵은 선으로 표시하였다. 이 경우의 연계 해석의 사이클 횟수는 따로 옆에 기재하였다. 후자는 검은 실선으로 나타내었다. 비선형 구조 해석의 로딩 스텝을 5개로 설정하고, 로딩 스텝을 증가할 때마다 수행한 공력 해석 결과인 공기력을 반영하여 외력을 업데이트 하였다.

노란 선으로 나타낸 본 연구의 알고리즘의 5차 연계 해석 결과가 검은 실선으로 나타낸 경우의 9차 연계 해석 결과와 비슷하다. 따라서 본 연구의 비선형 구조/공력 해석 기법은 시간 소요가 큰 공력 해석 횟수를 단축함으로써 전체 알고리즘의 효율성을 높인다고 할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서 사용한 연계 해석 기법은 비선형 구조 해석과 공력 해석 기법을 효율적으로 결합한 것이다. 6 자유도 비선형 쉘 요소의 구조 코드와 삼차원 오일러 공력 코드 그리고 효율적인 사상기법이 바탕이 되며, 비선형 구조 해석 과정과 연달아 공력 해석을 결합하여 효과적인 비선형 구조/공력 연계 해석 알고리즘을 구성하였다.

글로벌 호크의 날개 모델을 이용한 해석에 해당 알고리즘을 적용하고 다른 해석 기법들과 비교하였다. 비선형성을 고려하지 않거나 연계 해석을 수행하지 않는다면 비선형 구조 해석을 고려한 공탄성 해석 결과와의 격차가 크게 나타나게 되며, 이는 변형의 크기가 클수록 두드러진다. 또한, 비선형 구조 해석의 수렴 형상으로부터 연계 해석을 시작하여 수렴을 가속화할 수 있었다.

연계 해석 기법으로부터 더 나아가 여러 근사화 기법을 도입함으로써 본 알고리즘을 최적화 기법에 효율적으로 적용하기 위한 연구가 현재 진행 중이다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호UD100048JD)

참고문헌

- 1) Tang, D. and Dowell, E. H., "Experimental and theoretical study on aeroelastic response of high-aspect-ratio wings", *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 8. 2001.
- 2) Lohner, R., Yang, C., Cebral, J, Baum, J. D., Luo, H., Pelessone, D. and Charman, C., "Fluid-structure-thermal interaction using a loose coupling algorithm and adaptive unstructured grids", *AIAA1998-2419*.
- 3) Dowell, E. H. and Hall, K. C., "Modeling of Fluid-Structure Interaction", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 33, 2001, pp.445-490.
- 4) Kamakoti, R. and Shyy, W., "Fluid-structure interaction for aeroelastic applications", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 40, 2004, pp.535-558.
- 5) Vierendeels, J., Lanoye, L., Degroote, J. and

Verdonck, P., "Implicit coupling of partitioned fluid-structure interaction problems with reduced order models", *Computers and Structures*, Vol. 85, 2007, pp.970-976.

6) Degroote, J., Bathe, K. and Vierendeels, J., "Performance of a new partitioned procedure versus a monolithic procedure in fluid-structure interaction", *Computers and Structures*, Vol. 87, 2009, pp.793-801.

7) Cai, J., Liu, F., Tsai, H. M. and Wong, A. S. F., "Static aero-elastic computation with a coupled CFD and CSD method", AIAA 2000-0717.

8) Huixue, D., Zhichun, Y. and Yi, Li., "Accelerated loosely-coupled CFD/CSD method for nonlinear static aeroelasticity analysis", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 14, 2010, pp.250-258.

9) Choi, D., Jun, S., Kim, B. K., Park, S., Cho, M., Lee, D. H., Lee, K. T. and Jun, S. M., "Static Aeroelastic Analysis for Aircraft Wings using CFD/CST Coupling Methodology", *Journal of Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 35, No. 4, 2007, pp.287-294.

10) Jun, S., Park, K. H., Kang, H. M., Lee, D. H. and Cho, M., "Reduced order model of three-dimensional Euler equations using proper orthogonal decomposition basis", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 2, 2010, pp. 601~608.

11) Kim, B. K., Jun, S., Jeon, Y. H, Kim, J. H. and Lee, D. H., "Efficiency of dynamic mesh in static aeroelastic analysis and design optimization problem", *Journal of the Korea Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 32, No. 2, 2007, pp.87-93.