

다양한 해석조건을 갖는 항공기에 대한 효율적인 플러터 해석

Efficient Flutter Analysis for Aircraft with Various Analysis Conditions

이상욱* · 김태욱** · 황인희** · 백승길***

Sang-Wook Lee, Tae-Uk Kim, In-Hee Hwang and Seung-Kil Paek

Key Words : Flutter Analysis(플러터 해석), Generalized Unsteady Aerodynamic Matrices(일반화된 비정상 공기력 행렬), Complex Eigenvalue(복소수 고유치), DMAP ALTER

ABSTRACT

Flutter analysis procedure can be divided into two steps such as the computation of generalized mass, stiffness, and unsteady aerodynamic matrices and the calculation of major vibration modes frequency and damping values at each flight speed by solving the complex eigenvalue problem. In aircraft flutter analyses, most of the time is spent in the process of computing the unsteady aerodynamic matrices at each Mach-reduced frequency pairs defined. In this study, the method has been presented for computation and extraction of unsteady aerodynamic matrix portions dependent only on aerodynamic model using DMAP ALTER in MSC/NASTRAN SOL 145. In addition, efficient flutter analysis method has been suggested by computing and utilizing the unsteady generalized aerodynamic matrices for each analysis condition using the unsteady aerodynamic matrix portions extracted above.

1. 서 론

공기 중을 고속으로 비행하는 항공기 구조물은 주위 공기 흐름과의 상호작용으로 인해 특정 비행속도에 도달하면, 자력진동(self-excited oscillation)을 하는 플러터 현상이 발생한다. 항공기 운항 중에 플러터 현상이 발생하게 되면 자력진동에 의해 진폭이 발산하게 되어 구조물의 파손이 발생하므로, 미국 연방 항공규정(FAR 23, 25)에서는 항공기 개발 시 비행영역 내에서 플러터가 발생하지 않음을 해석 및 시험을 통해 검증하도록 요구하고 있다. 플러터 해석과정은 일반화된 질량, 강성 및 비정상 공기력 행렬을 계산하는 단계의 계산된 일반화된 행렬들을 이용하여 비행 속도별로 복소수 고유치 문제를 풀어 주요 진동모드의 주파수와 감쇠값을 계산하는 단계로 구분할 수 있다. 일반적으로 항공기 플러터 해석시 사용자가 설정한 마하수-무차원 주파수 조건에 대해 일반화된 비정상 공기력 행렬을 계산하는 과정에서 대부분의 시간이 소요된다.

본 연구에서는 MSC/NASTRAN의 DMAP ALTER를 이용하여 구조모델과는 무관하게 공기력 모델에 따라 결정되는 비정상 공기력 행렬 부분만을 계산, 추출하는 방법을 제시하였다. 또한, 추출된 비정상 공기력 행렬 부분을 이용해 해석조건별로 필요한 일반화된 비정상 공기력 행렬을 계산하여 플러터 해석에 활용함으로써 다양한 해석조건에 대한 항공기 플러터 해석을 효율적으로 수행할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 비정상 공기력 행렬 계산 및 추출

일반적으로 항공기 플러터 해석은 탑재연료량, 유상하중, 구조물 강성저하, 조종면 구동부 강성, 조종면 일부 파손 등의 다양한 상황을 조합한 수많은 해석조건에 대해 수행하게 된다. 여기서 한가지 주목할 점은 대부분의 경우 공기력 모델은 동일한 모델을 사용하고, 다양한 해석조건에 따라 구조물 유한요소 모델을 변경하여 사용한다는 점이다. 본 연구에서는 이와 같은 점에 착안하여 비정상 공기력 행렬 중에서 구조모델과는 상관없이 공기력 모델에 따라 결정되는 부분을 추출/저장하고, 이를 다양한 해석조건에서 계산되는 구조물 진동모드와 결합하여 플러터 해석에 필요한 일반화된 비정상 공기력 행렬을 보다 효율적으로 구성하는 방법을 제시하였다.

* 한국항공우주연구원 항공구조그룹
E-mail : lsw@kari.re.kr

Tel : (042) 800-2833, Fax : (042) 800-2009

** 한국항공우주연구원 항공구조그룹

*** 한국항공우주산업

2.1 일반화된 비정상 공기력 행렬 계산과정

MSC/NASTRAN에서는 항공기 플러터 해석을 위해 다양한 비정상 공기력 행렬 계산방법을 제공하는데, 일반적으로 이음속 영역에서의 항공기 플러터 해석에는 DLM 방법이 사용된다. 플러터 해석을 위한 공기력 모델이 구성되면, 이에 따른 공기력 효과 행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$[Q_{kk}] = [S_{kj}][A_{yj}]^{-1}[D_{jk}^1 + ikD_{jk}^2] \quad (1)$$

식(1)에서 $[Q_{kk}]$, $[S_{kj}]$, $[A_{yj}]$ 는 각각 공기력 효과행렬, 적분행렬, 공기력 효과계수 행렬을 나타내며, $[D_{jk}^1]$, $[D_{jk}^2]$ 는 미분행렬의 실수부와 허수부를 나타낸다. $[Q_{kk}]$ 는 마하수와 무차원 진동수($k = \frac{u \cdot c}{2V}$)의 함수가 되며, 사용자가 지정한 마하수와 무차원 진동수 조합에 대해 계산되어 공탄성 해석시 사용하게 된다.

MSC/NASTRAN에서 플러터 해석은 반복적인 복소수 고유치 문제 해석에 소요되는 계산시간을 단축하기 위해 구조물의 모달 좌표계에서 수행된다. 이를 위해서 식(1)에서 사용자가 지정한 마하수-무차원 진동수 조합에 대해 계산된 $[Q_{kk}]$ 행렬과 구조물의 고유진동해석 결과를 이용하여 모달 좌표계로 변환된 일반화된 비정상 공기력 행렬들을 구성하게 된다. 구조물 진동모드와 관련된 일반화된 비정상 공기력 행렬은 각 마하수-무차원 진동수 조합에 대해 다음과 같이 계산된다.

$$[Q_{hh}] = [\phi_{ah}]^T [G_{ka}]^T [Q_{kk}] [G_{ka}] [\phi_{ah}] \quad (2)$$

식(2)에서 $[Q_{hh}]$, $[G_{ka}]$, $[\phi_{ah}]$ 는 각각 구조물 모드와 관련된 일반화된 공기력 행렬, 공기력 모델과 구조 모델간의 보간행렬 및 보간을 위한 구조물 절점에서의 진동모드 행렬을 나타낸다.

2.2 비정상 공기력 행렬 추출절차

2.1절의 식 (1), (2)에서 알 수 있듯이 $[Q_{kk}]$ 행렬은 구조모델과는 상관없이 공기력 모델에 따라 결정되며, $[Q_{hh}]$ 행렬은 $[Q_{kk}]$ 행렬의 전후에 공기력 모델과 구조모델 간의 보간행렬 ($[G_{ka}]$) 및 보간을 위한 구조물 절점에서의 진동모드 행렬 ($[\phi_{ah}]$)을 곱해서 계산함을 알 수 있다. 한가지 주목할 점은 공기력 모델과 구조모델 간의 보간행렬도 공기력 모델이 일정한 경우 동일하다는 사실이다. 이에 따라 $[Q_{kk}]$ 행렬로부터 $[Q_{hh}]$ 행렬을 계산하는 과정에서 중간 단계의 공기력 행렬 $[Q_{aa}]$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$[Q_{aa}] = [G_{ka}]^T [Q_{kk}] [G_{ka}] \quad (3)$$

이제, 공기력 모델에 대해 식(3)과 같은 $[Q_{aa}]$ 행렬을 지정한 마하수-무차원 진동수 조건에서 한번만 계산/추출/저장하게 되면, 다양한 해석조건에 따른 구조 모델에서 계산된 진동모

드 행렬과 결합하여 플러터 해석조건별로 일반화된 비정상 공기력 행렬을 효과적으로 계산할 수 있다. $[Q_{aa}]$ 행렬을 MSC/NASTRAN의 DMAP ALTER를 사용하여 계산/추출하기 위해서는 NASTRAN의 플러터(SOL 145) 해석과정에 대한 분석이 선행되어야 한다. NASTRAN의 플러터 해석모듈은 Fig.1과 같이 각각 여러개의 subDMAP으로 구성되어 있다[1]. 일반화된 공기력 행렬 $[Q_{hh}]$ 는 플러터 해석시 SOL 145의 FLUTTER subDMAP에서 계산되므로, FLUTTER subDMAP의 해당 부분에서 $[Q_{hh}]$ 행렬 대신에 $[Q_{aa}]$ 행렬을 계산하여 외부 파일로 추출/저장하였다.

공기력 모델에 대해 계산/추출/저장된 $[Q_{aa}]$ 행렬을 이용하면 플러터 해석조건별로 구성된 구조모델에 대한 고유진동 해석 결과를 이용하여 다음과 같이 일반화된 비정상 공기력 행렬을 계산할 수 있다.

$$[Q_{hh}] = [\phi_{ah}]^T [Q_{aa}] [\phi_{ah}] \quad (4)$$

본 연구에서는 MSC/NASTRAN의 고유진동해석 모듈 (SOL 103)에서 각각의 해석조건 별로 고유진동해석을 수행하고, 앞에서 추출/저장된 $[Q_{aa}]$ 행렬 데이터를 DMAP ALTER를 통해 불러들여 $[Q_{hh}]$ 행렬을 식(4)와 같이 해석조건별로 구성하여 외부 파일로 추출/저장하였다.

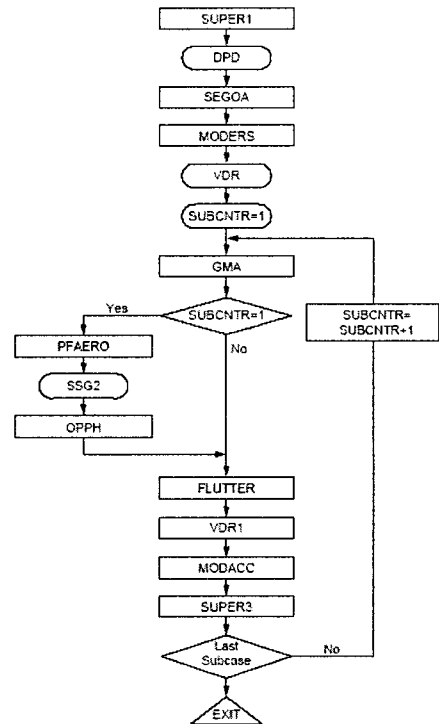


Fig.1 Flutter Analysis Procedure in MSC/NASTRAN SOL 145

3. 플러터 해석

모달 영역에서 PK 플러터 해석을 수행하는데 사용되는 기본 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & [(M_{hh})p^2 + (B_{hh} - \frac{1}{4}\rho\bar{c}V\{Q_{hh}^I\}/k)p \\ & + (K_{hh} - \frac{1}{2}\rho V^2\{Q_{hh}^R\})]u_h = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 $[M_{hh}]$, $[B_{hh}]$, $[K_{hh}]$ 는 각각 일반화된 질량, 감쇠 및 강성행렬을 나타내며, $[Q_{hh}^R]$, $[Q_{hh}^I]$ 는 일반화된 비정상 공기력 행렬 $[Q_{hh}]$ 의 실수부와 허수부를 나타낸다. 또한, $p(=w(\gamma \pm i))$ 는 PK 플러터 지배방정식의 복소수 고유치를 나타낸다. 본 연구에서는 2장에서 기술한 바와 같이 각 해석조건별로 추출/저장된 일반화된 비정상 공기력 행렬과 MSC/NASTRAN의 고유진동 해석모듈을 통해 해석조건 별로 계산/추출한 일반화된 질량, 감쇠, 강성 행렬을 활용하여 식(5)와 같은 PK 플러터 지배방정식을 통해 플러터 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과 및 분석

2장과 3장에서 제시한 일반화된 비정상 공기력 행렬 계산, 추출을 통한 플러터 해석방법을 검증하기 위해 참고문헌 [1]의 예제 HA145E에서 사용된 15°의 제침각을 갖는 단순화된 항공기 모델에 대한 해석을 수행하였다. Fig.2는 해석에 사용된 구조물 및 공기력 모델을 나타낸다. 플러터 해석을 위해 구조물의 고유진동 모드 4개를 사용하였으며, 이를 이용하여 일반화된 공기력 행렬도 계산하였다. 비정상 공기력은 마하수 0.45에서 12개의 무차원 진동수 조건에서 계산하였으며, 플러터 해석은 표준 해수면 고도조건에서 수행하였다. Table 1은 HA145E 예제 모델에 대한 플러터 해석을 MSC/NASTRAN 플러터 모듈(SOL 145)의 PK 방법을 통해 수행한 결과와 본 연구에서 제시된 방법을 통해 수행한 결과를 비교한 것이다. Table 1에서 알 수 있듯이 두가지 방법이 거의 동일한 플러터 속도와 플러터 진동수 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. Fig.3은 NASTRAN과 본 연구에서 제시된 방법을 통해 수행한 플러터 해석결과를 V-g & V-f 선도에 비교하여 나타낸 것으로, 두가지 방법이 거의 동일한 V-g & V-f 선도를 보여주고 있다.



Fig.2 FEM & Aerodynamic Model (HA145E)

Table 1 Comparison of Flutter Analysis Results (HA145E)

Flutter Speed(KEAS)/Flutter Frequency(Hz)	
MSC/NASTRAN	Current Approach
283.97 / 116.60	283.97 / 116.67

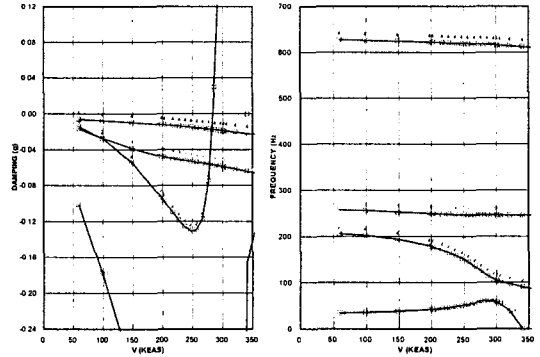


Fig.3 V-g & V-f Plot (HA145E)

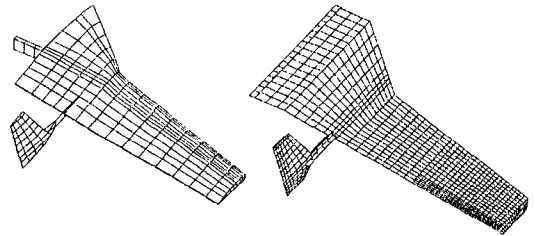


Fig.4 FEM & Aerodynamic Model (Small Aircraft Wing)

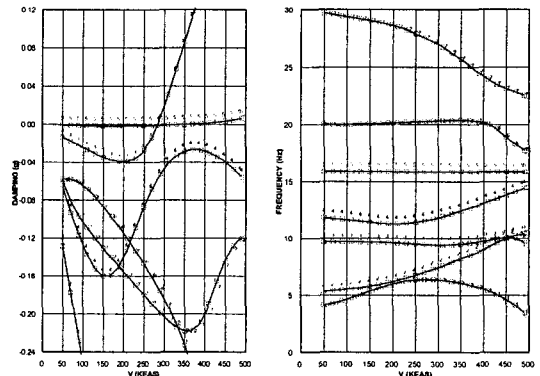


Fig.5 V-g & V-f Plot (Small Aircraft Wing)

본 연구에서 제시된 플러터 해석방법의 효율성을 평가하기 위해 Fig.4에 나타난 것과 같은 소형항공기 날개 모델에 대한 플러터 해석을 NASTRAN과 본 연구에서 제시된 방법으로 각각 수행하여 해석결과와 해석에 소요된 시간을 비교, 분석하였다. 플러터 해석을 위해 10개의 저차 진동모드를 사용하였으며, 마하수 0.4에서 16개의 무차원 진동수 조건에서 비정상 공기력을 계산하였으며, 구조 감쇠는 고려하

지 않았다. 모든 해석은 Intel Xeon CPU 3.06GHz와 2GB의 RAM이 장착되고, Windows XP를 O/S로 사용하는 IBM Intellistation Z Pro에서 수행하였다. Fig.5는 NASTRAN과 본 연구에서 제시된 방법을 통해 수행한 플러터 해석결과를 V-g & V-f 선도에 비교하여 나타낸 것으로, HA145E 예제 모델보다 훨씬 복잡하고 실제에 가까운 소형항공기 날개 모델에 대해서도 두가지 방법이 거의 동일한 V-g & V-f 선도를 보여주고 있음을 알 수 있다. Table 2는 플러터 해석 방법에 따른 해석 소요시간을 단계별로 비교하여 나타낸 것이다. Table 2에서 소형항공기 날개 플러터 해석시에도 대부분의 해석시간이 일반화된 공기력 행렬 $[Q_{hh}]$ 를 계산하는데 소요됨을 알 수 있으며, 한가지 조건에 대한 플러터 해석 시에는 NASTRAN을 활용하는 것이 본 연구에서 제시된 방법보다 효율적임을 알 수 있다. 하지만, 앞에서도 언급했듯이 항공기 플러터 해석은 탑재연료량, 유상하중, 구조물 강성저하, 조종면 구동부 강성, 조종면 일부 파손 등의 수많은 상황을 고려한 수백~수천가지 해석조건에 대해 수행하는 것이 일반적이다. 이 경우 각기 다른 공기력 모델에 대해서만 비정상 공기력 행렬 $[Q_{aa}]$ 를 계산/추출/저장하여 다양한 해석조건에 따라 $[Q_{hh}]$ 를 계산하여 플러터 해석에 활용하는 본 연구에서 제시된 방법이 훨씬 효율적임을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of Analysis Time

MSC/NASTRAN Flutter Module (SOL 145)	
Computation of $[Q_{hh}]$	150 sec
Normal Mode & Flutter Analysis	3 sec
Current Module	
Computation & Extraction of $[Q_{aa}]$	240 sec
Normal Mode Analysis & Computation and Extraction of $[Q_{hh}]$	2 sec
Flutter Analysis	2 sec

5. 결론

본 연구에서는 다양한 해석조건에 대한 항공기 플러터 해석을 보다 효율적으로 수행할 수 있도록 MSC/NASTRAN의 플러터 해석모듈과 DMAP ALTER를 이용해 일반화된 비정상 공기력 행렬들을 계산, 추출하고 이를 활용하여 외부에서 PK방법을 통해 플러터 해석을 수행하는 방법을 제시하였다. 또한, 이를 단순화된 항공기 날개 예제 모델과 소형항공기 날개 모델에 적용하여 플러터 해석을 수행하고, 그 결과를 MSC/NASTRAN의 플러터 모듈을 통해 수행한 해석결과와 비교/분석함으로써 제시한 방법의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 제시된 방법은 탑재연료량, 유상하중, 구조물 강성저하, 조종면 구동부 강성, 조종면 일부 파손 등의 다양한 해석조건에 대한 플러터 해석을 보다 효율적으로 수행하는데 활용할 수 있다.

참고 문헌

- (1) Rodden, W. P. and Johnson, E. H., 1994, MSC/NASTRAN Aeroelastic Analysis User's Guide, V68, MSC, Los Angeles
- (2) Reymond M., 2000, MSC/NASTRAN 2001 DMAP Programmer's Guide, MSC, Los Angeles
- (3) Sitton, G., 1997, MSC/NASTRAN Basic Dynamic Analysis User's Guide V68, MSC, Los Angeles
- (4) 조창민, 변관화, 1999, "MSC/NASTRAN을 이용한 아음속 항공기 플러터 해석," 한국항공우주학회지, 제27권 제2호, pp.122-133