

음장 상관관계에 따른 평판의 랜덤진동 특성

Random Vibrations of a Plate under Various Acoustic Spatial Correlations

전영두† · 정의승*

Young-Doo Chun and Eui-Seung Chung

1. 서론

발사체 이륙시 엔진에서 뿜어져 나오는 연소가스의 제트와류유동에 기인된 소음이나 비행 중 최대동압구간(Max-q) 통과시 발사체 표면에서 발생하는 와류에 기인된 소음은 발사체의 탑재체나 구조물에 극심한 랜덤진동을 유발시킨다. 따라서 발사체를 구성하는 탑재체나 구조물뿐만 아니라 위성체는 이러한 소음환경에서도 성능저하가 발생하지 않도록 이를 고려하여 개발단계에서 설계/제작/검증되어야 한다. 이를 위해 음향챔버 설비에서 발사체 이륙 및 비행시 발생하는 극심한 소음환경을 모사하여 발사체 탑재체나 구조체 및 위성체의 생존성능을 검증하게 된다[1]. 이때 소음으로 기인된 랜덤진동 특성은 소음의 공간적 상관관계(Spatial Correlation)에 밀접한 영향을 받기 때문에 적합한 시험상황을 구현하기 위해서는 실제 상황과 유사하도록 소음의 공간적 상관관계를 유지해야 한다. 그러나 실제 발사상황처럼 고출력 자유음장 상황을 재현하기에는 많은 비용과 재원의 제약조건으로 인해, 음향챔버를 구축하고 그 내부에서 잔향효과를 이용한 높은 음압의 음장구현하여 음향시험을 수행하게 된다. 이러한 음향시험으로 구조체에 대한 랜덤진동시험을 수행하기 위해서는 음장의 공간적 상관관계에 따른 구조체의 랜덤진동특성 변화를 분석할 필요가 있다. 현재 음향/랜덤진동해석에는 여러가지 상용 유한요소 소프트웨어가 널리 사용되고 있으나, 음장의 공간적 상관관계에 따른 랜덤진동 특성을 해석함에 있어서 구현상 많은 어려움과 제한조건이 있기 때문에, 이러한 문제를 보다 쉽게 다루기 위한 노력들이 이뤄져 왔다.[2,3]

본 연구에서는 이러한 해석방법/절차에 대해 간략히 소개하고, 음장의 상관관계에 따른 평판의 랜덤진동 특성변화를 살펴본다. 구조체의 진동특성 파악을 위해 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 구조체 모달해석을 수행하고 추출된 유한요소 정보와

모달정보를 적용하여 운동 지배방정식을 재구성한 후, 여러가지 음장 상관관계를 적용하여 구조체의 랜덤진동 특성변화를 분석해 본다.

2. 해석방법/절차 소개

2.1 모달영역 운동방정식

여기에 임의의 구조체의 운동방정식은 식(1)과 같이 물리영역(Physical Domain)에서 표현될 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad \text{Eq (1)}$$

여기서, \mathbf{x} 는 구조체의 질점을, \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} 는 각각 질량행렬, 댐핑행렬, 강성행렬을, \mathbf{F} 는 각 질점에 작용하는 외력을 나타낸다. 구조체의 모달특성인 질량행렬에 정규화된 모드행렬 Φ 와 모달계수 \mathbf{q} 를 이용하여 \mathbf{x} 를 모달영역으로 표현하면 식(2)와 같고,

$$\mathbf{x} = \Phi\mathbf{q}, \quad \dot{\mathbf{x}} = \Phi\dot{\mathbf{q}}, \quad \ddot{\mathbf{x}} = \Phi\ddot{\mathbf{q}} \quad \text{Eq (2)}$$

식 (2)를 식 (1)에 대입한 후, 양변에 Φ^T 를 곱하면 식 (3)과 같이 모달영역으로 변환된다.

$$\ddot{\mathbf{q}} + 2[\zeta_n \omega_n] \dot{\mathbf{q}} + [\omega_n^2] \mathbf{q} = \Phi^T \mathbf{F} \quad \text{Eq (3)}$$

여기서 ζ 는 댐핑계수(Damping ratio)를, ω_n 는 n 번째 모드의 고유치를, $[\]$ 는 대각선 행렬을 나타낸다.

이때 조화운동(ω)을 가정하면 모달가속도는

$$\ddot{\mathbf{Q}} = \mathbf{H}\Phi^T \mathbf{F}$$

$$\text{where } \mathbf{H} = \left[\frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_n^2 - j2\zeta_n \omega_n \omega} \right] \quad \text{Eq (4)}$$

으로 표현된다. 식 (4)를 식 (2)에 대입하면 식 (5)와 같이 가속도스펙트럼을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{G}_{\ddot{\mathbf{x}}\ddot{\mathbf{x}}} = \mathbf{E} \langle \ddot{\mathbf{X}} \cdot \ddot{\mathbf{X}}^* \rangle = \mathbf{E} \langle (\Phi \mathbf{H} \Phi^T \mathbf{F}) (\mathbf{F}^* \Phi \mathbf{H}^* \Phi^T) \rangle \quad \text{Eq (5)}$$

$$= \mathbf{A} \cdot \mathbf{G}_{\mathbf{FF}} \cdot \mathbf{A}^*$$

여기서 $\mathbf{E} \langle \rangle$ 는 기대함수를, \mathbf{A} 는 구조체 고유 반응함수 $\Phi \mathbf{H} \Phi^T$ 를, $\mathbf{G}_{\mathbf{FF}}$ 는 외부 가진력 스펙트럼 $\mathbf{E} \langle \mathbf{F} \mathbf{F}^* \rangle$ 를 나타낸다. 따라서 식 (5)를 이용하면 외부 가진력으로부터 가속도스펙트럼을 예측할 수 있다. 이때 외부 가진력은 외부 음향하중(압력)의 공간적 상관관계를 이용하여 구할 수 있다.

† 전영두; 한국항공우주연구원

E-mail : ydchun@kari.re.kr

Tel : (042) 860-2906, Fax : (042) 860-2233

* 한국항공우주연구원

2.2 음장 상관관계 및 음향하중

음향하중분포와 가진력의 관계는 다음과 같다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{P} \quad \text{Eq (6)}$$

\mathbf{P} 는 공간상 음압분포를, $\mathbf{\Gamma}$ 는 구조체 표면의 유한요소 크기(면적), 방향, 질점 정보를 포함하는 “표면압력→질점외력” 변환행렬로서 유한요소모델에 의존하며, 단위 압력에 따른 질점력으로 해석될 수 있다. 가진력 스펙트럼을 구하면 다음과 같다.

$$\mathbf{G}_{\mathbf{FF}} = \mathbf{E} \langle \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^* \rangle = \mathbf{\Gamma} \cdot \mathbf{E} \langle \mathbf{P} \cdot \mathbf{P}^* \rangle \cdot \mathbf{\Gamma}^T \quad \text{Eq (7)}$$

식 (7)을 식 (5)에 대입하면 다음과 같이 음압스펙트럼 분포로부터 가속도분포를 구할 수 있다.

$$\mathbf{G}_{\mathbf{XX}} = (\mathbf{A}\mathbf{\Gamma}) \cdot \mathbf{G}_{\mathbf{PP}} \cdot (\mathbf{A}\mathbf{\Gamma})^* \quad \text{Eq (8)}$$

여기서 $\mathbf{G}_{\mathbf{PP}}$ 는 공간상 음압분포를 포함하므로 임의의 음장 상관관계를 표현할 수 있는데, 대표적인 3 가지 음장 상관관계를 고려해보면 다음과 같다.

Case 1: 비상관관계 음장 (Uncorrelated Field)

$$\mathbf{G}_{\mathbf{PP}} = [\mathbf{I}] S_{PP} \quad \text{Eq(9)}$$

$[\mathbf{I}]$ 는 단위행렬을, S_{PP} 는 음압 스펙트럼을 나타낸다.

Case 2: 상관관계 음장 (Correlated Field)

$$\mathbf{G}_{\mathbf{PP}} = [\mathbf{Ones}] S_{PP} \quad \text{Eq(10)}$$

$[\mathbf{Ones}]$ 는 모든 항이 1 인 행렬을 나타낸다.

Case 3: 확산음장 (Diffuse Field)

$$\mathbf{G}_{\mathbf{PP}} = [\mathbf{Sinc}] S_{PP} \quad \text{Eq(11)}$$

$[\mathbf{Sinc}]$ 는 각 항이 $\sin(kd)/kd$ 값을 가지며, k 는 파수이고, d 는 상대거리를 나타낸다. 음향챔버 같은 잔향실 내부에서의 음장이 이에 해당된다.

식 (9)~(11)에 있는 음압 스펙트럼 S_{PP} 는 주어진 음압레벨(SPL)로부터 다음 같이 구해질 수 있다.

$$S_{PP} = P_{ref}^2 / f_b \times 10^{\left(\frac{SPL}{10}\right)} \quad \text{Eq(12)}$$

여기서 f_b 는 해당 주파수 밴드를, P_{ref} 는 기준음압으로서 2.0×10^{-5} Pa 값을 가진다.

2.3 해석절차

임의의 공간적 상관관계를 갖는 음장에 대한 구조체의 랜덤진동특성을 원활히 예측하기 위해서는 상용 해석툴을 적절히 이용해야 한다. 선형진동해석에 널리 사용되는 유한요소 해석툴인 MSC/NATRAN 은 Case2 와 같은 상관관계를 갖는 음장에 대한 랜덤진동해석에 대해서는 기본적으로 지원하지만, Case1 의 비상관관계 음장이나 Case3 의 확산음장에 대해서는 복잡한 전문가적 DMAP 프로그래밍 수정작업이 필요하다.[4]. 그러나 모달데이터를 추출한 뒤 Matlab 을 이용한 간편한 코드작업을 통해 이를

해결할 수 있다. 그림 1 은 해석절차를 나타낸다.

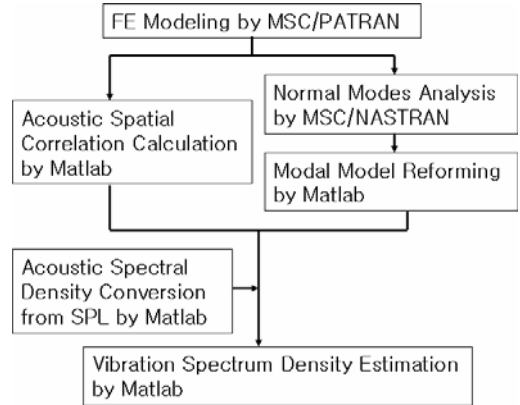


Fig. 1 Schematic diagram for analysis procedure

3. 해석결과

각 모서리가 고정된 직사각형(가로 1m, 세로 0.6m, 두께 2mm) 알루미늄 평판에 대해 다른 상관관계를 갖는 음장으로 기인된 랜덤진동을 예측해보았다. 음장특성에 따라 랜덤진동특성이 크게 달라짐을 알 수 있고, 확산음장과 완전 상관관계음장은 주파수가 증가함에 따라 그 차이가 뚜렷히 나타남을 알 수 있다.

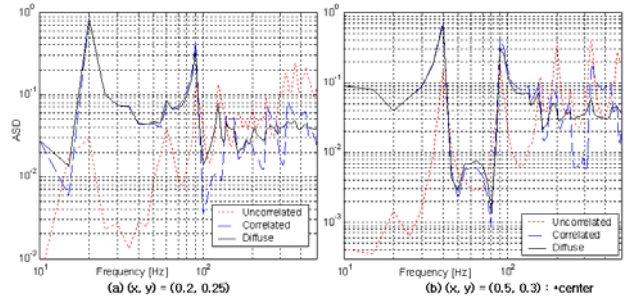


Fig. 2 ASD examples under different acoustic fields

4. 결론

음장의 상관관계에 따른 평판의 랜덤진동 분석절차를 소개하였으며, 여러가지 음장 상관관계를 가정하여 평판의 랜덤진동 특성변화를 분석해보았고, 이를 통해 해석방식의 타당성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 전영두, 박종찬, 정의승, 박정주, 조광래, “KSLV-I 상단부 조립체 음향하중 시험”, 한국항공우주학회 2007 추계학술대회
- [2] Solving Dynamic Problems Outside of NASTRAN, Scott Gordon, FEMCI Workshop, 2002
- [3] Acoustic Test and Analysis, Gordon Maahs, SC/LV Dynamic Environments Workshop, 2007
- [4] MSC/NASTRAN 2004 Quick Reference Guide