

위성 발사체 페어링 내부음향 해석

Acoustic Analysis in the Payload Fairing of Launch Vehicle

서상현† · 박순홍* · 정호경* · 장영순*

Sang-Hyeon Seo, Soon-Hong Park, Ho-Kyeong Jeong and Young-Soon Jang

Key Words : Payload fairing, Acoustic protection system, Vibro-acoustic coupled analysis, Noise reduction

ABSTRACT

Acoustic load from rocket propulsion system is main source of random vibration working on the payload. To protect payload from this acoustic load, additional APS(acoustic protection system) is generally applied. Noise reduction capacity of APS can be verified through acoustic test and vibro-acoustic coupled analysis. This paper compared the results of acoustic test and vibro-acoustic coupled analysis about KSLV-I payload fairing with APS.

1. 서 론

위성 발사체의 발사 시에는 추진기관부터의 제트 발생으로 인한 매우 높은 음압레벨의 음향 하중이 위성 및 주요 전자 탑재물이 보호되고 있는 페어링(PLF: Payload Fairing) 표면으로부터 내부로 전달되게 된다. 이렇게 전달된 음향하중은 랜덤 진동의 주요 원인으로써 페어링 내부의 주요 환경규격으로 관리된다. 일반적으로 150dB 이상의 음향 하중으로부터 위성체를 보호하기 위해서는 경량화 또한 주요 설계인자인 페어링의 차음성능만으로는 부족하기 때문에 추가적인 흡차음을 위한 흡음장치를 내부에 적용하게 되는데 이를 음향하중 저감구조(APS: Acoustic Protection System)라 일컫는다.

위성 발사체에서 위성을 보호하는 역할을 하는 페어링 내부 음향하중을 예측하기 위해서는 먼저 발사 시 추진기관으로부터 발생하여 상단부 페어링으로 전달되는 외부 음향하중 레벨을 예측하여야 하고, 그리고 페어링 구조체의 차음에 의한 하중감소 및 내부에 부착되는 APS의 흡음에 의한 하중감소를

모두 고려하여야 한다. 이러한 과정은 구조-음향 연성해석으로부터 예측할 수 있는데, 복합재 샌드위치로 이루어진 페어링 스킨의 구조특성을 통하여 외부 음향하중으로부터 내부로 전달되는 음향하중 레벨을 예측할 수 있고, 음향 공명기(Acoustic Resonator) 및 흡차음 소재로 이루어진 음향 블랭킷(Acoustic Blanket)으로 구성된 APS의 표면 음향특성인 음향 임피던스를 통하여 흡음에 의한 음압레벨 저감량을 예측할 수 있다. 따라서 페어링 구조물을 통한 차음 성능에 대한 해석이 먼저 수행될 것이고, 다음으로 추가적인 APS 적용에 의한 최종 음향하중 저감성능이 평가될 것이다.

이는 Vibro-acoustic coupled analysis(Coupled BEM Indirect/FEM analysis)로서 Virtual.Lab Acoustic 음향해석 소프트웨어를 이용하여 해석을 수행하였다. 페어링 구조모드는 Patran/Nastran을 이용하여 구한 결과를 가져와서 적용하게 된다.

여기에서는 KSLV-I 모델 및 시험결과를 이용하여 해석결과를 검증하였고, 예측한 외부음향 하중 레벨을 통하여 달성해야 할 추가적인 음향하중 저감 구조의 요구조건을 도출할 수 있게 된다. 이러한 기존 모델에 대한 검증 과정을 거쳐 추후 개발할 한국형 발사체 페어링에 대한 음향하중 저감구조의 성능 예측 및 최적화에 적용되어질 것이다.

† 한국항공우주연구원
E-mail : ssh@kari.re.kr
Tel : (042) 860-2541, Fax : (042) 860-2233

* 한국항공우주연구원

2. 발사체 페어링 음향시험

2.1 시험결과

외부 음향하중으로부터의 페어링 구조체 및 APS의 음향하중 저감성능을 검증하기 위하여 음향챔버 내에서 음향시험^{(1),(2)}을 수행하였다. 여기서 음향하중 저감 성능을 나타내는 NR(Noise Reduction; dB)은 외부 음향레벨과 페어링 내부 음향레벨의 차이를 나타내는 것이다.⁽³⁾

$$NR = L_{outside} - L_{inside} = 20 \log \left| \frac{P_{outside}}{P_{inside}} \right| \text{ (dB)}$$



Figure 1 KSLV-I PLF acoustic test

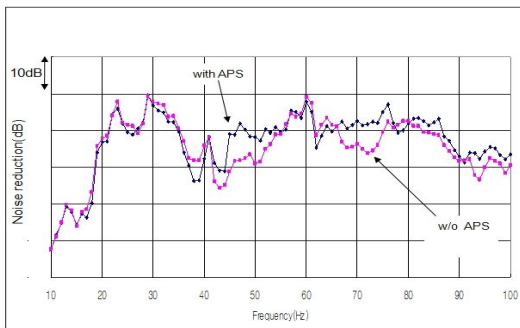


Figure 2 Noise reduction result of PLF acoustic test

3. 내부음향해석

3.1 구조-음향 연성해석

구조-음향 연성해석⁽⁴⁾을 위해서는 페어링 복합재 샌드위치에 해당하는 구조모드 해석결과인 Mode set 데이터를 페어링 내부공간에 해당하는 음향해석 메쉬로의 맵핑을 통해 외부 확산음장을 통해 가진되는 음향 에너지가 구조 동특성을 통해 내부로 전달되어지는 방법으로 해석이 수행된다. 따라서 구조물의 동특성이 잘 반영된 구조모델을 만드는 것이 가장 중요하다.

KSLV-I 페어링 구조체는 알루미늄 하나콤 코어 복합재 샌드위치로써 실제 각각 소재들의 물성치를 적층하여 만든 Laminate 모델의 경우 등방성 (isotropic) 물성을 가지지 않기 때문에 구조강성을 제대로 반영하지 못하여 고유진동수의 오차를 가지게 되기 때문에 보다 정확한 모델 및 편의를 위해 실물형 모드시험을 통해 파악된 고유진동수에 맞추어 강성을 보정한 등가물성치를 적용하기도 한다. 하지만 직교이방성(orthotropic)을 가지는 복합재의 방향에 따른 강성을 제대로 반영하기는 어렵기 때문에 장단점이 존재한다.

따라서 실제 복합재 샌드위치 Laminate 적층 모델링으로 이루어진 구조모델과 모드시험 결과로부터 얻은 고유진동수로 보정된 등가물성치로 생성된 구조모델을 이용하여 구조-음향 연성해석을 수행하여 서로 결과를 비교하였다.

실제 페어링 모드시험은 APS가 없을 경우와 있을 경우 모두 수행되었는데, 이는 페어링 전체 무게의 약 20%를 차지하는 APS가 부착되면 무게증가로 인하여 고유진동수가 낮아질 뿐만 아니라 음향하중 저감성능이 Mass law에 따라 향상되기 때문에 APS의 유무에 따른 음향하중 저감성능을 비교해보기 위해서는 두 가지 경우의 구조모델을 모두 만들어서 각각 따로 적용하여야 한다.

하지만 시험결과를 살펴보면 APS 추가에 따른 무게증가의 효과로 인한 NR 증가가 거의 나타나지 않았는데, 이는 실물형의 경우 APS가 복합재 프레임틀을 통해 부분적으로 체결이 되어 있고 완벽히 일체가 아니고 그 위에 얹혀 있는 구조이기 때문이라

고 판단되었다.

따라서 기본적으로 APS가 장착되지 않은 페어링 구조체의 구조해석 모델을 등가물성치를 적용한 경우와 복합재 적층 Laminate 모델 경우의 두 가지 케이스로 NR(Noise Reduction) 해석을 수행하였고, 이 두 가지 모델에 APS가 장착된 케이스를 적용하여 NR해석을 수행하였다. 이 두 가지 케이스 모두 앞서 언급했듯이 중량증가 영향은 고려하지 않은 채 APS의 흡음 특성만을 추가하여 해석을 수행하였다. 이는 시험결과를 고려한 면도 있으면서 동시에 보수적인 해석을 통해 여유 마진을 가지기 위한 것이라고 할 수 있다.

먼저 등가물성치의 경우 밀도는 그대로 적용하고 강성의 경우 모드시험 결과를 바탕으로 $E=2.2\text{GPa}$ 를 적용하였고, 실제 복합재 물성치를 그대로 사용하여 적층한 스킨 모델로는 KSLV-I 페어링 복합재 샌드위치는 Aluminum honeycomb core를 중심으로 Carbon/Epoxy face sheet를 양면으로 적층한 구성으로 Table 1의 물성치를 적용하였다.

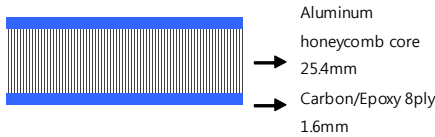


Figure 3 Aluminum honeycomb core sandwich composition

Table 1 Sandwich material property

	property
Carbon/Epoxy	$E_1=62\text{GPa}, E_2=62\text{GPa}, E_3=10\text{GPa}$ $G_1=4.25\text{GPa}, G_2=3\text{GPa}, G_3=3\text{GPa}$ $\nu_{12}=0.045, \nu_{23}=0.045, \nu_{13}=0.045$ $\rho=1600\text{kg/m}^3$
Aluminum honeycomb core	$E_1=8.27\text{MPa}, E_2=1.31\text{MPa}, E_3=1276\text{MPa}$ $G_1=0.0001\text{MPa}, G_2=117\text{MPa}, G_3=296\text{MPa}$ $\nu_{12}=0.75, \nu_{23}=0.0001, \nu_{13}=0.0001$ $\rho=64.6\text{kg/m}^3$

Figure 4는 KSLV-I 페어링 구조 모드해석

(Normal mode analysis) 및 음향해석(Coupled BEM Indirect)을 위한 유한요소 모델이 되겠다. 크기는 직경 2m, 높이가 약 5.4m이며 모두 쉘 요소로 정의되었다. Figure5, 6은 페어링 구조모드 형상 및 페어링 내부 공간에 대한 음향모드 결과를 나타내고 있다.

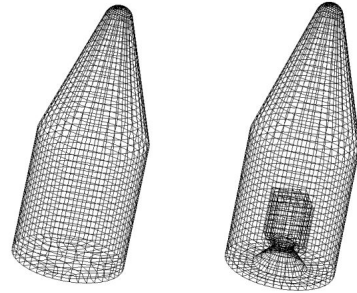


Figure 4 Structure mesh and acoustic mesh(2572element)

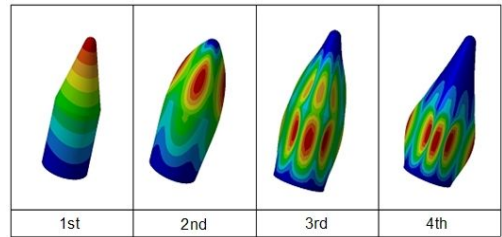


Figure 5 PLF structure mode shape

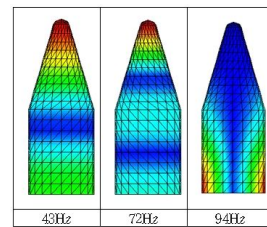


Figure 6 PLF acoustic mode shape

Figure 7과 같이 KSLV-I 실물형 페어링 음향시험과 같은 위성더미 탑재 및 마이크로폰 측정위치를 적용하였다. 측정위치는 Field point mesh를 이용하여 위성체 주변을 포함해서 페어링 콘 윗부분까지 90도 간격으로 배치되었고, 해석결과에서도 이 위치

를 기준으로 한 평균값을 구해서 비교하였다.

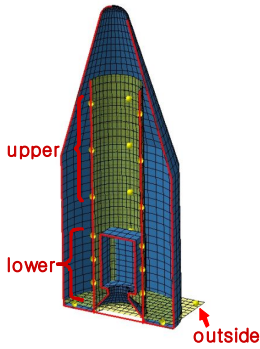


Figure 7 Field point mesh(microphone position)

Figure 8은 외부 가진으로 확산음장(Distributed acoustic plane wave)을 모사하여 단위입력 가진을 적용한 모델을 나타내고 있다.

음향해석에 있어서 내부 매질은 공기를 적용하였다. 내부 매질인 유체 자체의 댐핑 효과가 존재하는데 이는 해석프로그램에서 Complex sound speed(m/sec)로 정의되는데 이 해석에서는 공통적으로 2m/sec를 적용하였다. 이 값은 실험을 통한 경험값으로 음압 스펙트럼의 댐핑 특성을 고려하여 선정하였다. c 는 sound speed, η 는 loss factor, m 은 air absorption coefficient⁽⁵⁾를 나타낸다.

$$c = c_r + jc_i$$

$$c_r = c_0$$

$$c_i = c_0\eta/2 = mc_0^2/2\omega$$

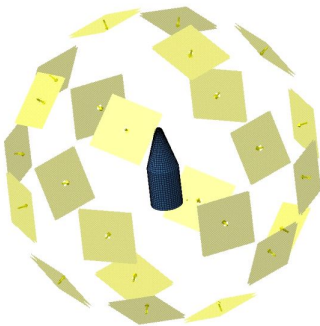


Figure 8 Distributed acoustic plane wave source model

구조모드 해석결과를 가져올 때 각 모드에서의 댐핑값을 지정해 줄 수 있는데 이 해석에서는 20~100Hz까지는 1%, 100Hz 이상부터는 모두 5%를 적용하였다. 이는 실제 시험결과를 고려하여 적용하였다. 해석은 20~100Hz($\Delta 2\text{Hz}$), 90~300Hz($\Delta 10\text{Hz}$)과 같은 구간으로 나누어 계산하였다.

Figure 9, 10은 실제 APS 적용형상 및 음향 공명기와 음향 블랭킷의 실물형 시편의 덕트시험을 통한 수직입사 흡음률 특성이다. 해석에서는 임피던스의 역수인 어드미턴스($m^2 \cdot \text{sec}/kg$)로 입력되기 때문에 이를 환산하여 적용하게 된다.

$$Y = \frac{1}{Z}$$

여기서 Y 는 어드미턴스(admittance)를 나타내고 Z 는 비 음향 임피던스(specific acoustic impedance)를 나타낸다.

Figure 11은 APS가 적용된 형상이며, 음향 공명기 및 음향 블랭킷의 시편시험을 통하여 측정된 음향 임피던스 특성을 실제모델과 동일한 위치의 내부 표면에 적용시킨 모델이다.

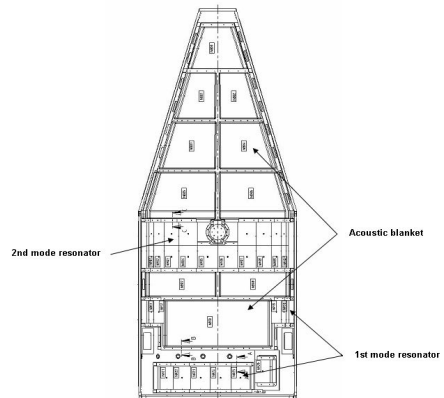


Figure 9 KSLV-I APS arrangement

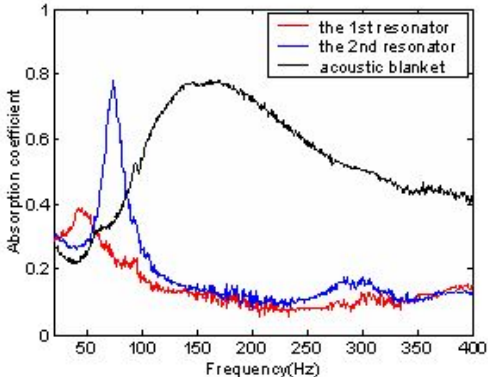


Figure 10 Absorption coefficient of APS

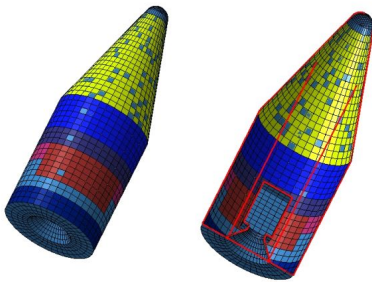


Figure 11 Admittance boundary condition application

3.2 해석 결과

결과는 KSLV-I 페어링 음향시험 결과와 등가물성치 및 복합재 적층 모델의 해석결과를 100Hz 이하 Narrow band 및 300Hz 이하 1/3 octave band에서 서로 비교하였다. 동일하게 모든 내부 측정점에서의 평균값을 사용하였다.

해석 결과를 비교해보면 복합재 적층 모델의 경우 등가물성치를 적용한 해석과 비교했을 때 구조모드의 공진주파수가 시험결과와 차이가 나기 때문에 공진현상으로 인한 NR 성능이 떨어지는 주파수가 달라졌고, 전반적으로 NR 성능이 낮게 나타났음을 확인할 수 있었다. 하지만 Overall NR관점으로 봤을 때 시험결과와 더욱 근사한 결과를 나타내었고, APS에 의한 음향하중 저감치인 IL(Insertion Loss: dB)도 비교해봤을 때도 시험결과와 유사한 결과를 나타내었다. 여기서 IL은 APS 적용 전의 내부 음향

레벨과 적용 후의 내부 음향레벨의 차이를 나타낸다.

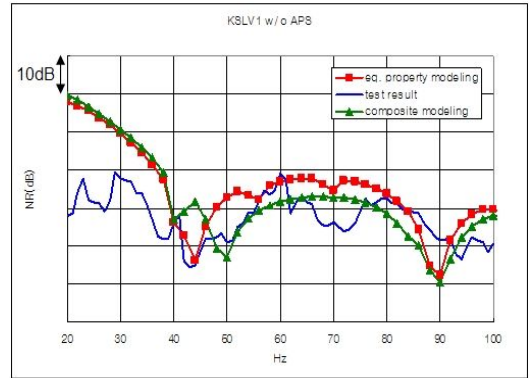


Figure 12 NR results comparison w/o APS(Narrow band)

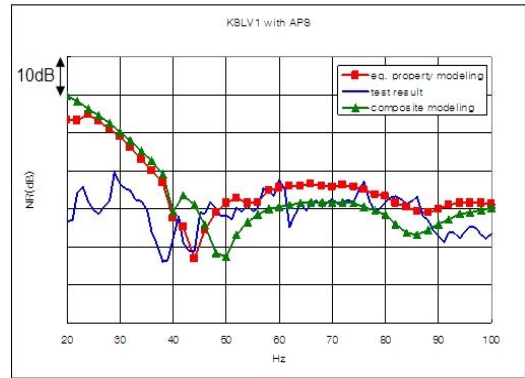


Figure 13 NR results comparison with APS(Narrow band)

전체적인 결과를 살펴보면 APS의 1차, 2차 음향공명기에 의하여 해당 주파수 영역에서 NR 증가효과가 있었고, 약 85Hz 이상부터는 음향 블랭킷의 영향으로 전반적으로 NR 증가가 이루어졌다. 덧붙여 앞서 언급했듯이 시험결과와 해석결과를 비교해보면 APS 추가로 인한 무게증가에 따른 NR 증가효과가 거의 나타나지 않았다.

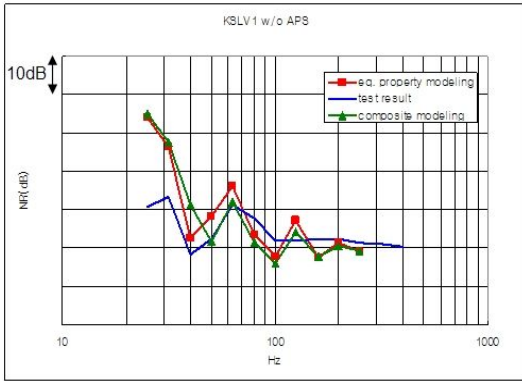


Figure 14 NR results comparison w/o APS(1/3 octave band)

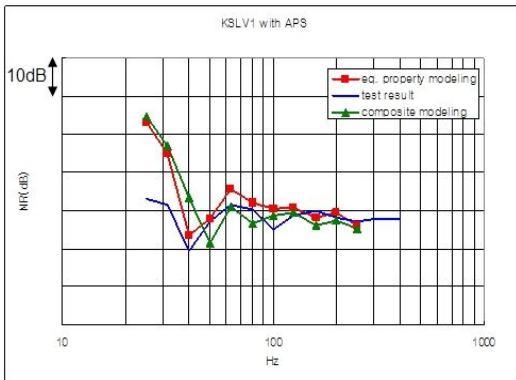


Figure 15 NR results comparison with APS(1/3 octave band)

Table 2 Analysis results comparison

1/3 octave band Overall (25~250Hz)	NR w/o APS	NR with APS	IL by APS
Analysis result (Equivalent property)	12.9 dB	19.2 dB	6.3 dB
Analysis result (Composite laminate)	12 dB	16.8 dB	4.8 dB
Test result	12.6 dB	17.3 dB	4.7 dB

지금까지의 결과를 Overall(dB) 값으로 표현하면 Table 2와 같다. 결과를 비교해보면 전체적으로 복합재 적층 모델을 적용했을 때가 더욱 시험결과와 유사하고 보수적인 해석이었음을 확인할 수 있었다. 이러한 해석을 통해서 외부 음향레벨 및 내부 음

향규격으로부터 요구되는 전체적인 NR로부터 차음을 위한 페어링 구조체의 설계 및 APS의 추가적인 흡음 성능 요구치를 예측할 수 있게 된다. 뿐만 아니라 다양한 흡차음 기구의 적용을 통한 해석으로 경량화 및 최적의 배치 등으로 페어링 및 APS에 대한 음향하중 관점에서의 설계기준을 제시할 수 있다.

4. 결 론

위성 발사체 페어링 내부의 흡차음을 통한 음향 하중저감성능을 구조-음향 연성해석을 통해 예측하였고, 시험결과와 비교하였다.

근사한 해석결과를 보여주었고 향후 진행될 한국형 발사체 페어링 및 APS 설계에 활용될 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Seo. S. H., Jeong. H. K., Park. S. H., Jang. Y. S. and Yi. Y. M., 2007, Acoustic load reduction in the payload of small launch vehicle, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 93.
- (2) Park. S. H. Seo. S. H., 2007, Acoustic test of the payload fairing of Korea satellite launch vehicle, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 91.
- (3) Leo. L. Beranek, 1992, Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications, John Wiley & Sons, inc., New York.
- (4) B. Ritchie., 1991, Ariane 4 internal acoustic environment: Interpretation of flight data with a vibroacoustic model of the upper part of the launcher, Proc. Int. Conf. Spacecraft Structures and Mechanical Testing.
- (5) C. M. Harris, 1966, Absorption of sound in air versus humidity and temperature, J. Acoust. Soc. Am., vol.40, pp. 148-159.