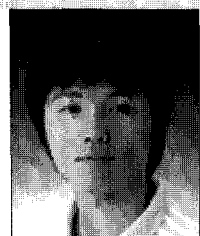
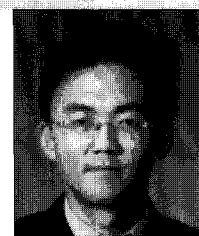


통계적 에너지 해석법을 이용한 저궤도 지구관측위성의 음향-진동 연성 해석

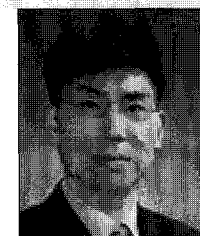
Vibro-Acoustic Analysis of Low Altitude Earth Observation Satellite using Statistical Energy Analysis



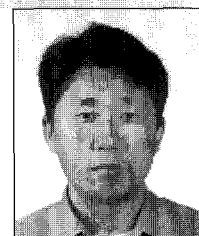
이 대 은*



장 해 원**



한 재 홍***



우 성 현****

* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원생
 ** 한국과학기술원 기계공학과 대학원생
 *** 한국과학기술원 항공우주공학과 교수
 **** 한국항공우주연구원 다목적5호체계팀 선임연구원

1. 서 론

위성체는 발사단계부터 임무완료까지 위성 구조체 및 주요 탑재체의 전체 손상 및 성능저하를 야기시킬 수 있는 각종 환경에 노출되어지므로, 이러한 위성체 운용환경의 특성은 위성체의 설계단계에서부터 심도있게 고려되어야 한다.¹⁾ 또한 위성체 시스템의 조립단계 이후에는 일련의 환경시험을 통하여 실질적인 검증작업을 진행하게 되는데 이러한 환경시험 단계는 일반적으로 정현파/랜덤 진동 시험(sine/random vibration tests), 음향진동시험(acoustic test), 충격시험(pyroshock test)과 열평형(thermal balance) 및 열진공(thermal vacuum) 시험 등으로 구성되며, 위성체의 임무 및 형상에 관계없이 대부분의 위성 개발 사업에 적용된다. 이중 음향진동시험의 목적은 발사과정에서 페어링(fairing) 내부에 형성되는 130~150dB에 이르는 고에너지 음향 환경에서 위성체가 구조적으로 안전한가를 확인하고 부품들이 요구조건 대로 동작하는지 확인하기 위한 것이다.²⁾ 최대 음압 진동환경은 이륙개시와 음속통과 시 발생하며 지속시간은 최대 10초 이내이며, 발사과정에서 발생하는 음향 진동의 변화는 기계적으로 발생하는 진동과 더불어 위성

체에 사용되는 부품에 대한 심한 랜덤진동형태로 전달된다.³⁾ 고에너지 음향장에 노출된 부품들은 기계적으로 전달되는 진동보다 더욱 심한 환경에 노출되는데, 음향환경시험의 경우 시험에 필요한 최대예측 음향진동환경은 32-10,000Hz 주파수 범위에서 1/3 옥타브 밴드(octave band)를 기준으로 규정되며 시험기간은 진폭이 최대 진폭의 6dB 이내에 유지되는 기간 동안 실시한다. 이러한 음향진동시험은 시제품을 완성한 후에 시행되므로 시험조건에만 의지해 설계를 하게 되면 많은 시행착오를 겪거나, 과도한 안전계수를 사용해 불필요한 무게증가를 가져오게 된다. 그러므로 인공위성의 본체 및 탑재물의 설계 단계부터 상기와 같은 운용환경의 레벨을 예측하고 이에 대한 내구 설계 및 최적 설계를 수행하는 것은 매우 중요한 작업이며, 이를 위해서는 위성체의 음향-연성 거동 특성을 효과적으로 분석하고 계산할 수 있는 신뢰성있는 해석 기법이 요구된다.¹⁾

일반 구조물의 정적/동적 거동해석에 주로 사용되는 기존의 유한요소(Finite Element Method, FEM)과 경계요소법(Boundary Element Method, BEM) 등은 해석대상의 크기가 크거나 해석 주파수 대역이 높은 경우, 즉 모드 밀도가 높

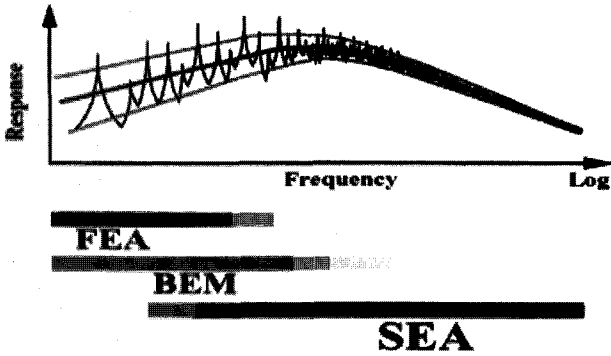


그림 1 Analysis method for different frequency bands

은 경우, 경계조건이나 구조물의 작은 변화에도 모드가 민감하게 변하기 때문에 불확실성이 증가하며, 해석을 위해 유한요소의 크기를 매우 작게 하여야 하기 때문에 많은 계산시간이 소요되며, 모드 거동 등의 결과에 의미를 부여하기 어렵게 된다.⁴⁾ 복잡한 구조물일 경우 FEM은 약 50번째 모드에 해당되는 주파수(큰 위성체일 경우 100Hz이하)를 넘어설수록 점점 더 부정확해지기 때문에 일반적으로 저주파수 대역 해석에 제한되어 활용되어 진다.³⁾ 위성의 발사체 페어링 내부의 고에너지 음장은 위성체에 약 10kHz에 이르는 고주파수 응답을 유발시키므로 이를 예측하고 분석하기 위해서는 별도의 해석 기법이 요구 되며, 일반적인 수치해석기법으로 해석하기 힘든 중/고 주파수 대역에서 복잡한 구조물에 대한 음향진동 연성해석을 위해 통계적 에너지 해석법(Statistical Energy Analysis, SEA)이 개발되었고 고주파수 영역에서 성공적인 해석법으로 인정받고 있다.⁵⁾

위성체의 경우 다수의 하부 장비가 모듈화되어 탑재되고 각 모듈은 대단히 복잡한 구조로 이루어져 있으므로 FEM이나 BEM등을 이용하여 해석하기 매우 힘든 반면 SEA는 여러 개의 연성된 하부구조(subsystem)를 각각 하나의 해석요소로 하기 때문에 향후 해석모델의 수정이 용이하고, 각 하부구조의 평균 음향, 혹은 진동 에너지를 변수로 하기 때문에 표현이 간단한 장점이 있다. 또한, 해석에 필요한 인자도 에너지와 관련된 값들로 다른 해석법에 비해 비교적 간단하다. 따라서 위성개발 초기단계에 위성체의 음향환경에서의 응답 예측 업무에 적용할 수 있는 적합한 수치해석기법이라 할 수 있으며¹⁾ SEA를 위해 개발된 VAPEPS, SEAM, AutoSEA와 같은 상용 컴퓨터 프로그램을 사용하여 위성시스템의 실질적인 SEA 모델을 구성할 수 있다.³⁾

본 기사에서는 SEA에 대한 소개와 함께 SEA를 적용하여 발사과정에서 발생하는 페어링 내부의 고에너지 음장가진에 의한 저궤도 지구관측위성의 음향-진동 연성 해석을 수행한 내용을 기술하고자 한다.

2. 통계적 에너지 해석법

2.1 기본 개념

SEA는 고주파수 대역에서 사용되는 해석 방법으로써 시간, 공간, 주파수 평균화된 구조체의 진동 혹은 음향 에너지를 주 해석변수로 설정하고 있으며, 해석 구조물을 에너지를 저장, 전달 및 손실할 수 있는 여러 개의 하부구조로 나눈 후 정상상태에서 각 하부구조에 유입 및 유출되는 파워가 같다는 에너지 평형 원리를 적용하여 각 하부 구조간의 에너지 교환 과정을 해석하므로 외부입력에 대한 응답을 예측하게 된다. 이때 에너지를 저장하는 매체는 각 하부구조의 자유공진 성분으로 가정하기 때문에 기본적으로 다수의 공진모드가 존재해야 하며, 이에 따라 주파수범위에 제한을 받게 되고, 비공진 성분에 의한 에너지 교환현상을 설명할 수 없는 이론상의 오류를 갖고 있다. 이외에 SEA의 주요 가정은 다음과 같다.⁶⁾

- 1) 각 모드 에너지의 균등성(equipartition of modal energy)
- 2) 구조물간의 약결합(weak coupling)
- 3) 각 모드간의 비관계성(modal incoherence)
- 4) 광대역 가진(broad band excitation)
- 5) 두 진동자간의 해석을 다수 모드 계로 확장함의 유효성
- 6) 양상블 평균의 존재

모든 하부구조, 가진 조건, 그리고 에너지 전달 및 경로가 정의되면 SEA 모델을 획득할 수 있다. 그림 2와 같이 두 개의 하부구조로 이루어진 시스템의 경우 에너지 평형식은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} P_1 &= \omega \eta_1 E_1 + \omega (\eta_{12} E_1 - \eta_{21} E_2) \\ P_2 &= \omega \eta_2 E_2 + \omega (\eta_{21} E_2 - \eta_{12} E_1) \end{aligned} \quad (1)$$

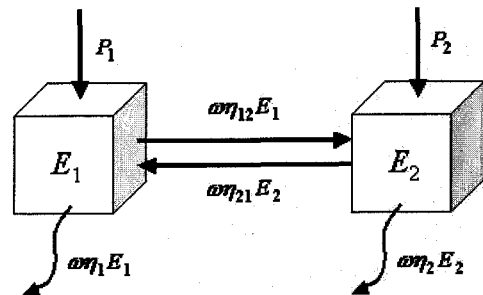


그림 2 SEA model for two subsystems

여기서 P_i 는 입력 파워(input power), ω 는 중심주파수(center frequency), η_i 는 감쇠 손실 계수(damping loss factor,

DLF), E_i 는 하부구조의 에너지, n_{ij} 는 연성 손실 계수 (coupling loss factor, CLF)이다. 식 (1)에서 $\omega n_i E_i$ 는 단일 하부구조의 내부 에너지 손실을 나타내며 $\omega(n_{ij}E_i - n_{ji}E_j)$ 는 i 번째 하부구조와 j 번째 하부구조 사이에 전달되는 에너지이다. 즉 하부구조 1에 외부로부터 입력되는 파워와 하부구조 2로부터 유입되는 파워의 합은 하부구조1에서 내부적으로 손실하는 에너지와 하부구조 2로 유출되는 파워의 합과 같다. 이를 N 개의 하부구조로 이루어진 시스템으로 확장하면 식 (2)를 얻을 수 있다.⁷⁾

$$\omega \begin{bmatrix} \left(\eta_1 + \sum_{i=1, i \neq 1}^N \eta_{1i} \right) & -\eta_{21} & \cdots & -\eta_{N1} \\ -\eta_{12} & \left(\eta_2 + \sum_{i=1, i \neq 2}^N \eta_{2i} \right) & \cdots & -\eta_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{1N} & -\eta_{2N} & \cdots & \left(\eta_N + \sum_{i=1, i \neq N}^N \eta_{Ni} \right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{1, in} \\ P_{2, in} \\ \vdots \\ P_{N, in} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

위 식은 SEA의 수학적 모델이며 각 하부구조의 손실 계수 및 입력 파워를 알고 있다면 위 식을 통해 각 하부구조의 평균 에너지를 얻을 수 있다. SEA를 적절히 적용되기 위해서는 앞서 언급한 가정들이 만족되어야 하며 무엇보다도 하부구조의 모드 밀도가 높을수록 모집단의 수가 많은 것을 의미하므로 모드 밀도가 어느 정도 높을 때(해석 주파수 밴드 당 최소 4개의 모드⁸⁾) SEA를 사용한 해석 결과의 신뢰도가 높아진다.

2.2 해석 절차

SEA의 절차는 크게 다음과 같이 3가지 단계로 나눌 수 있다.⁷⁾

- 1) 해석 모델 수립
- 2) 해석 인자 산출
- 3) 응답 예측

SEA를 수행하기 위해서는 먼저 해석 모델을 수립해야 하며, 이때 가장 중요한 요소는 해석하고자 하는 시스템의 에너지를 저장하는 매체들의 에너지 저장 및 전달 경로를 명확하게 정의하여 하부구조로 나누는 것이다. 기본적으로는 하부구조의 독립적인 형상에 근거하여 전체 구조물을 다수의 하부구조로 나누지만 예측하고자 하는 응답에 직접적으로 영향을 미치는 에너지 저장 및 교환 매체를 하나의 하부구조로 정의해야 한다. 예를 들어 동일한 구조물이지만 에너지의 저장 및 교환이 굽힘진동(flexural vibration), 비

틀진동(torsional vibration)과 횡면진동(lateral vibration)을 통해 이뤄진다면 3개의 하부구조로 나뉘야 한다. 또한 예측하고자 하는 응답을 기준으로 에너지의 교환이 이뤄지는 각 하부구조 사이의 연결상태 및 외부 가진 조건도 함께 정의되어야 한다.⁷⁾

SEA의 주 해석 인자로는 입력 파워, 모드 변수(modal parameter), 감쇠 손실 인자, 연성 손실 인자가 있다. 입력 파워는 응답을 얻기 위한 가진 조건으로 이론적인 방법이나 실험적인 방법을 통해 구할 수 있지만 실제로 이 어려운 입력 파워를 정확하게 알 수 있는 경우는 드물기 때문에 해석에 적용되는 값은 일반적으로는 추정 값이라 할 수 있다.

모드 변수에는 모드 밀도(modal density), 모드 수(mode count), 모드 중첩 인자(modal overlap factor)가 있다. 모드 수는 일정 주파수 대역 내에 들어있는 공진 모드의 수이고 모드 밀도는 단위 주파수당 들어있는 모드의 수, 그리고 모드 중첩 인자는 주파수 대역 내에서 모드가 중첩된 정도를 나타낸다. 일반적으로 저주파수에서의 공진주파수는 구조의 경계조건에 민감하지만 고주파수로 갈수록 경계조건에 둔감해지기 때문에 SEA에서 모드 변수를 구할 때 경계조건은 크게 중요하지 않게 된다. 모드 밀도는 이론적인 방법, 수치적인 방법, 실험적인 방법으로 구할 수 있다.

감쇠 손실 인자란 하부구조에 입력된 파워가 하부구조 고유의 감쇠로 인하여 방출되는 파워의 양을 나타내는 척도로써 SEA뿐만 아니라 모든 동적 해석에서 가장 중요한 인자이다.⁷⁾ 감쇠 손실 인자는 경우에 따라서 연결된 부분, 장착 상황, 환경등에 영향을 받기 때문에 정확히 구해내기 가장 어려운 변수중의 하나이며 실험적인 방법을 통해서만 산출될 수 있다.

SEA에서 연성 손실 인자는 감쇠 손실 인자와 비슷한 방식으로 정의되어 있다. 감쇠 손실 인자는 손실 메커니즘의 의해 하부구조에서 흘러나가는 에너지의 양을 나타내는 반면 연성 손실 인자는 다른 하부구조와의 연성을 통해 흘러나가는 에너지의 양을 나타낸다.⁷⁾ 연성이란 실제 시스템에서의 점, 선, 또는 면 등의 연결로 인하여 같은 운동을 하도록 구속된 경우에, 서로 다른 하부구조의 서로 다른 모드 혹은 모드 그룹간의 관계를 나타낸다. 이러한 연성 손실 인자는 연성 방향, 연성 경계의 크기, 연성된 지점에서의 하부구조의 임피던스(혹은 모빌리티), 하부구조의 모드들의 평균 주파수 간격에 따라 달라지기 때문에 대부분의 경우 실험을 통해 구하며 연성의 형태가 이상적인 경우에는 이론적인 접근 방법이 가능하다.

SEA 모델이 수립되고 해석 인자가 산출되면 응답을 예측할 수 있다. SEA를 통해 얻게 되는 응답은 시간, 공간 및

주파수 평균화된 진동 혹은 음향 에너지이며, 이를 통해 가속도나 음압 등의 시스템 응답을 계산할 수 있다.

2.3 실험적 통계적 에너지 해석법

저주파에서의 구조물의 동 특성을 예측하기 위한 가장 실용적인 유효요소 해석법의 경우도 정확성의 향상을 위하여 실험적 모드 해석(experimental modal analysis)이라는 실험적인 방법과 함께 발전한 것과 같이 SEA도 정확성 향상을 위하여 실험적인 통계적 에너지 해석법(experimental statistical energy analysis, ESEA)이 제안되었다. ESEA를 이용하면 SEA에 필요한 해석 인자인 모드 변수, 감쇠 손실 인자, 연성 손실 인자, 입력 파워를 실험적으로 산출할 수 있으므로 더 정확한 예측이 가능하다. 특히 이들 인자 중 SEA에 가장 큰 영향을 미치는 감쇠 손실 인자와 연성 손실 인자는 구조체의 특성과 하부구조의 연결에 따라서 매우 다양한 형태로 존재하기 때문에 이론적인 방법으로 산출하는 것은 불가능하며, 실험을 통하여 산출하는 것이 바람직하다.

파워 입력법(Power Injection Method, PIM)은 손실 계수를 구하고자 하는 구조물에 알고 있는 파워를 인가해 주는 방법이다.⁸⁾ SEA는 기본적으로 관련 계수들에 대한 지식을 이용하여 입력에 대한 진동 시스템의 동적 응답을 예측하는 것이 주개념이지만 이를 역으로 이용하면 시스템의 정보를 미지로 가정하고 입력과 응답을 이용하여 시스템의 정보를 구할 수 있다. 감쇠 손실 인자나 연성 손실 인자를 측정하는 기존의 방법들은 시스템을 분해하여 실험해야 하는 단점이 있지만 실제로 복잡한 구조물의 분해는 매우 어렵거나 불가능하므로 이와 같은 경우 구조물을 분해하지 않고도 적용 가능한 PIM을 이용하여 손실 계수를 산정하는 것이 바람직하다.⁴⁾

PIM을 적용하기 위해서는 N개의 하부구조로 나뉜 구조물의 특정한 하부구조를 가진하여 모든 하부구조의 시간, 공간 및 주파수 평균된 N개의 에너지를 측정한다. 차례대로 하부구조를 바꿔가면서 파워를 인가하며 각 하부구조의 진동 에너지를 측정하면(NXN)개의 하부구조의 에너지와 N개의 입력 파워를 얻을 수 있으며, 이를 이용하여(NXN)개의 손실 인자를 찾아낼 수 있다.⁴⁾ 그림 3은 3개의 하부구조를 가진 구조체에 PIM을 적용한 그림이며, 여기서 E_{ij}란 j번째 하부구조에 파워가 입력되었을 때 i번째 하부구조에서의 에너지 레벨을 뜻한다.

PIM을 통해 얻은 식을 하나의 행렬식으로 정리하면 최종적으로 구하고자 하는 손실 계수 행렬은 에너지 행렬의 역행렬을 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 감쇠

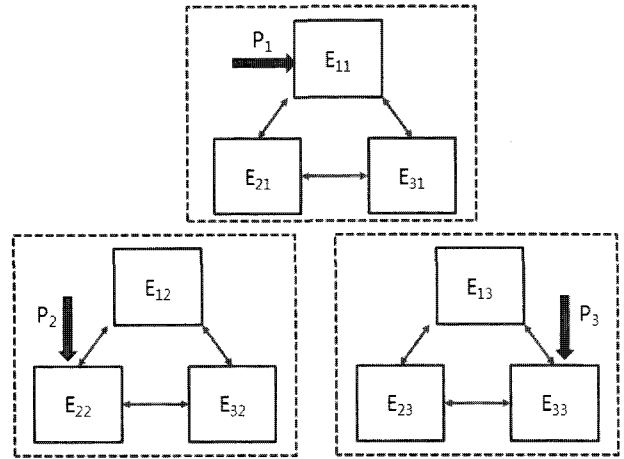


그림 3 Schematic diagram of PIM

손실 인자는 손실 인자 행렬의 대각항에 포함되고 연성 손실 인자는 대각항과 비대각항으로 나타난다. 대부분의 경우 실제 하부구조에서 손실되는 파워가 하부구조간의 파워 흐름보다 크기 때문에 감쇠 손실 인자가 연성 손실 인자보다 더 중요시되고 있지만 연성 손실 인자 또한 각 하부구조간의 파워 흐름의 양을 나타내는 인자로 구조의 수정에 의한 민감도 해석이나 모델의 진단 등에서 매우 중요한 역할을 하는 인자이다.

$$\begin{bmatrix} \eta_{1,loss} & \dots & -\eta_{1i} & \dots & -\eta_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{i1} & \eta_{i,loss} & \dots & \dots & -\eta_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{n1} & \dots & -\eta_{in} & \dots & \eta_{n,loss} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1/\omega & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & P_i/\omega & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & P_n/\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} & \dots & -E_{1i} & \dots & E_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{i1} & \dots & E_{ii} & \dots & E_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ E_{n1} & \dots & E_{ni} & \dots & E_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \text{ or } [\eta] = [P][E]^{-1} \tag{3}$$

PIM을 적용하여 손실 인자를 구하는 과정에서 에너지 행렬의 역행렬을 이용하기 때문에 다른 역 문제의 경우와 같이 일반적인 실험 과정 및 계산을 적용하여 얻어진 계수들은 큰 오차를 가질 가능성이 있고, 물리적으로 타당하지 않은 값인 음수의 손실 계수가 나올 수 있기 때문에 실험 과정에서 주의가 요구된다. PIM을 적절히 사용하여 감쇠 손실 인자와 연성 손실 인자를 추출한 후 SEA 모델링 작업에 적용하면 보다 신뢰성있는 하이브리드 타입 모델링을 구성할 수 있으며, 이와 같이 특성치의 이론값에만 의존하지 않고 보완적인 특성 시험을 통하여 얻어진 시험결과를 적극적으로 해석 모델에 활용하는 것이 현재의 추세이다.

3. SEA를 사용한 저궤도 지구관측위성 음향 - 진동 연성 해석

3.1 위성체의 SEA 모델링

본 기사에서 예제로 사용되는 저궤도 지구관측위성의 SEA 3차원 모델링 작업은 상용 소프트웨어(VA One 2007)를 이용하였다. 위성체의 각 플랫폼(platform) 및 본체 덮개 패널(closing panel)은 허니콤(honeycomb) 중심재(core)를 포함한 알루미늄 샌드위치 패널(sandwich panel)로 모델링되었다. 위성체의 음향-진동 연성 해석을 수행하는 목적은 위성체가 제작 단계부터 임무수행까지 모든 주위의 환경을 견딜 수 있는지를 예측하는 것이며, 이때 위성체 본체도 중요하지만 위성체에 부착되어 있는 탑재체인 고해상도 카메라 등의 광학장비나 제어부품과 같은 전자장비들이 안전해야 하기 때문에 위성체와 중요한 탑재체들이 마운트되어 있는 플랫폼 및 패널의 해석 결과가 가장 중요하게 된다.

플랫폼과 플랫폼에 부착된 탑재체는 단순하게 평판에 질량이 붙어있는 것처럼 모델링할 수 있으며, 실제 전체 구조에 대한 고주파수 해석을 수행한 결과와 평판과 질량만을 고려한 결과가 비슷하다고 알려져 있다. SEA에서는 이러한 평판과 질량이 연결된 시스템을 두개의 하부구조로 모델링하는 것보다 하나의 하부구조로 모델링하는 것이 더 정확한 결과를 보이는데, 이는 두개의 하부구조로 봤을 경우 SEA의 여러 가정들을 만족시키지 못하기 때문이다. 탑

재체를 포함한 패널을 하나의 하부구조로 모델링할 경우 일반적으로 플랫폼에 부착된 탑재물은 강성에 영향을 주지 않으며 면에 추가되는 균일한 질량으로 가정하여 허니콤 코어의 밀도를 식 (4)와 같이 수정하여 적용된다.⁴⁾

$$\rho = \frac{\text{Core Mass} + \text{Payload Mass}}{\text{Core Volume}} \quad (4)$$

위성체의 주골격은 빔 요소로 모델할 수 있지만 빔의 경우 해석 주파수 범위에서 SEA를 적용하여 정확한 예측을 기대하기에 낮은 모드 밀도를 가지게 될 수 있다. PIM을 적용하여 위성체의 하부구조의 손실 인자를 산출할 경우 연성 손실 인자를 구하는 과정에서 오차가 생기는 가장 큰 원인은 가진되는 하부구조의 에너지가 가진되지 않은 하부구조의 에너지 보다 작기 때문이다. 문제론과 같은 무게가 가벼운 하부구조가 가진되었을 때 가진되지 않은 하부구조의 에너지가 더 크게 측정되는 경우가 빈번하며 이를 통해 손실 인자를 계산하게 되면 물리적으로 불가능한 음수 연성 손실 인자가 확연하게 많이 나타난다. 따라서 위성체의 주골격은 하부구조로 모델하는 것보다 질량을 가지는 junction으로 모델하는 것이 바람직하다.

위성체의 내부는 음향공간(acoustic cavity)으로 모델할 수 있으며 본체 측면 패널 및 플랫폼과 면접촉(area junction)을 통해 에너지를 주고받게 된다. 음향 하부구조의 흡수양은 알려져 있지 않지만 0.1% 가정한다. 이외에 위성체에 매우 약 결합으로 연결된 안테나, 태양전지판 등은 위성본체와 에너지 교환이 매우 작기 때문에 위성체의 플랫폼이나 패널의 응답에만 관심이 있을 경우 해석 모델에 포함하지 않아도 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않는다.

본 예제에서는 저궤도지구관측위성의 구조열해석모델(Structure and Thermal Model, STM)에 PIM을 적용하여 실험적으로 위성의 하부구조의 손실 인자를 산출하였다. 해석 주

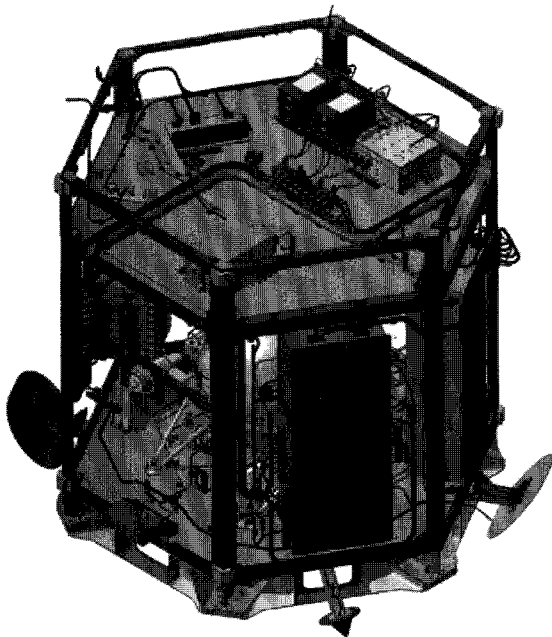


그림 4 Payloads mounted on platforms and panels of a satellite

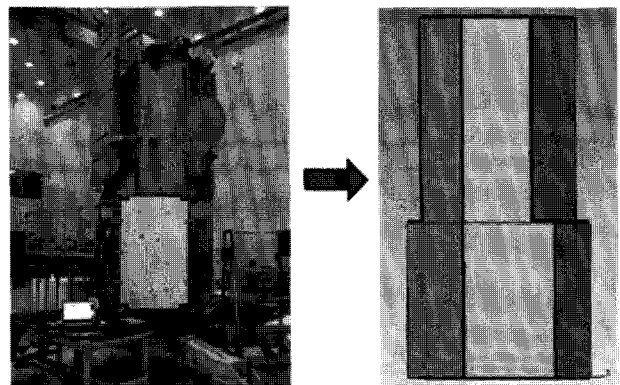


그림 5 Simplified SEA model of a satellite

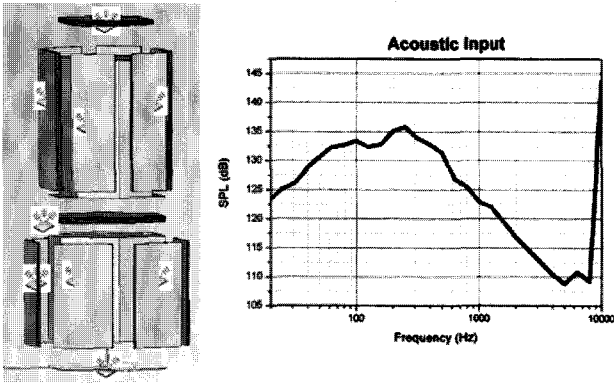


그림 6 Acoustic input to SEA model

파수 범위는 20Hz ~ 2000Hz이며, 1/3 옥타브 밴드를 사용하였다. 위에서 설명된 이유를 근거로 해석 주파수 범위에서 낮은 모드 밀도를 가지는 하부구조와 안테나 및 태양전지판은 SEA 모델에 포함하지 않았다. 최종적으로 얻은 SEA 모델은 그림 5와 같이 총 15개의 하부구조로 구성되어 있다.

위성체가 발사과정에서 경험하게 되는 발사체 페어링 내부의 고에너지 음장은 확산음장(Diffused Acoustic Field)으로 모사되어 외부에 노출된 모든 부재에 공통적으로 적용되며, 확산음장의 레벨 및 프로파일은 사용되는 발사체의 제공 사양이 활용된다.

3.2 음향-진동 연성 해석 결과

저궤도지구관측위성의 SEA를 통한 음향-진동 연성 해석 결과를 위성의 STM에 실행된 음향진동시험 결과와 비교하여 그 정확성을 검증하였다.

그림 7은 저궤도 지구관측위성의 형상 및 하부구조의 위치를 보여주고 있으며 그림 8~12에는 음향진동시험 결과와 SEA 결과를 비교하였다. 일반적으로 모드 밀도가 낮은

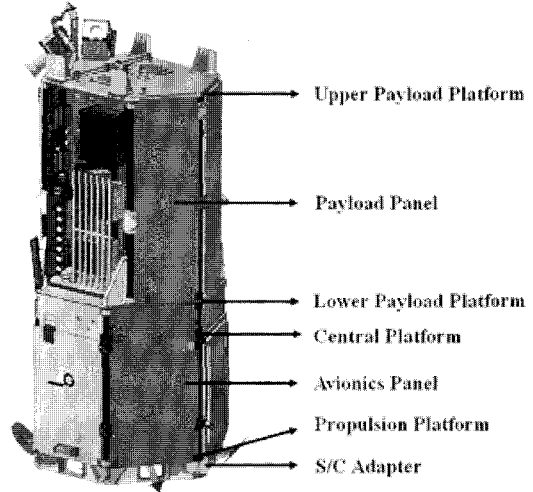


그림 7 Configuration of the satellite

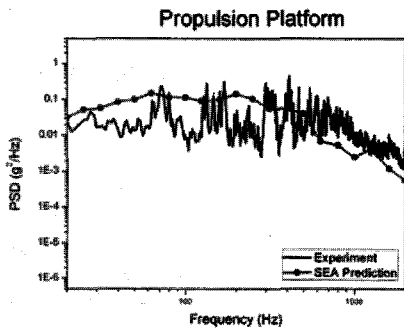


그림 8 Experiment and SEA prediction result at propulsion platform

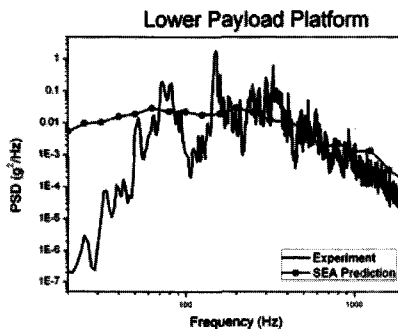


그림 9 Experiment and SEA prediction result at lower payload platform

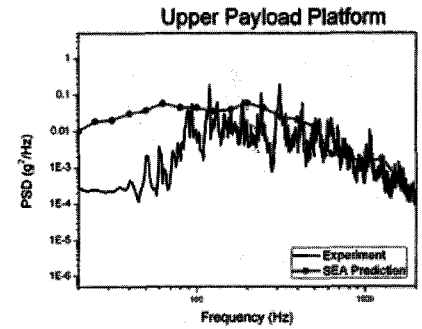


그림 10 Experiment and SEA prediction result at upper payload platform

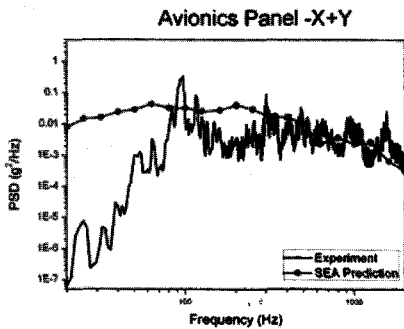


그림 11 Experiment and SEA prediction result at avionics panel -X+Y

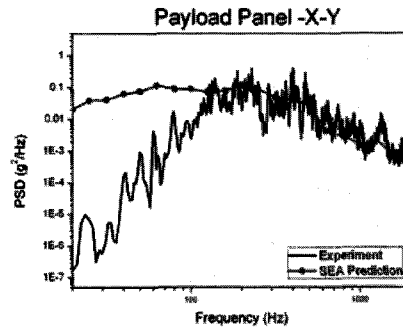


그림 12 Experiment and SEA prediction result at payload panel -X-Y

저주파수 대역(100Hz미만)에서는 실제 구조물의 모달 에너지를 과도 예측함으로 시험 결과보다 큰 해석 결과를 볼 수 있는데 이는 SEA의 전형적인 결과이다. 대부분의 하부구조의 경우 300Hz이상의 주파수 대역에서는 해석 결과와 시험 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 관찰할 수 있는데 이는 약 300Hz이상의 주파수 영역에서는 각 부재의 모드 밀도가 SEA를 사용하기에 충분히 높기 때문이다. 전체적으로 300Hz이상의 주파수 대역에서의 SEA 예측 결과는 시험 결과에 10dB이내 오차로 정확한 결과를 보여주고 있다.

4. 결 론

본 기사에서는 기존의 FEM/BEM과 같은 결정론적 방법(deterministic method)을 효과적으로 적용할 수 없는 고주파수 대역의 음향-진동 연성 해석에 용이하게 사용되는 통계적 에너지 해석법을 살펴보았다. 또한 통계적 에너지 해석법을 적용하여 위성체의 발사과정에서 페어링 내부에 형성되는 고에너지 음장에 대한 위성체의 음향-진동 연성 해석을 수행하여 해석 결과와 음향진동시험 결과를 비교하였으며, 이를 통해 통계적 에너지 해석법의 기본 가정들이 만족되는 고주파수 영역에서는 비교적 정확한 예측을 제공하는 것을 확인하였다. 통계적 에너지 해석법을 위성 개발의 초기 단계부터 적용할 경우 구조물과 탑재체의 설계시 유용한 가이드라인을 제공할 수 있으며, 요구되는 데이터 획득을 위한 환경시험에 소요되는 시간 및 비용을 절감할 수

있을 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

1. 정철호 등, "KOMPSAT-1 위성구조체에 대한 SEA 적용사례," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, pp.211-214, 2004
2. 우성현 등, "저궤도 지구관측 위성의 통계적 에너지 해석," 한국소음진동학회 2006년 춘계학술대회논문집, pp.197-202
3. Himelblau H, et al., *Dynamic Environmental Criteria*, National Aeronautics and Space Administration, 2001
4. 이대은 등, "통계적 에너지 해석 기법을 활용한 다목적 실용 위성 5호의 음향-진동 연성 해석," 한국항공우주공학회 2009 춘계 학술발표회 논문집, pp.819-822, 2009
5. 임종윤, "통계적 에너지 해석법을 이용한 소음진동 해석 프로그램:AutoSEA2," 한국소음진동공학회논문집, pp.14-21, 2005
6. 정철호 등, "단순화된 위성체의 통계적 에너지 해석법을 이용한 음향-진동 연성 해석," 기계의 날 선포 및 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄(한국소음진동공학회 편)
7. Lyon, R.H. and Dejong, R.G., *Theory and Application of Statistical Energy Analysis*, RH Lyon Corp(2nd edition), 1998
8. Bies, D.A. and Hamid, S., "In Situ Determination of Loss and Coupling Loss Factors by the Power Injection Method," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 70(2), pp.187-204, 1980

[담당 : 이주훈, 편집위원]