

# 통계적 에너지 해석 기법과 가상 모드 합성 기법을 활용한 단순 구조물의 충격 응답 해석

## Shock Response Analysis of a Simple Structure Using Statistical Energy Analysis and Virtual Mode Synthesis and Simulation

이대은\* · 장해원\*\* · 한재홍† · 우성현\*\*\*

Lee, Dae-Oen, Jang, Hae-Won, Han, Jae-Hung, Woo, Sung-Hyun

### 1. 서 론

화약을 이용한 피로테크닉 장비들은 인공위성의 임무 수행 중 일반적으로 구조적 하부시스템을 분리하며 부속물을 전개하는데 많이 사용되고 있다. 이러한 피로테크닉 장비들의 사용은 인공위성에 매우 큰 가속도의 고주파 전이 진동을 유발하며 이로 인해 많은 비행 하드웨어의 고장이 발생한다 [1]. 따라서 인공위성의 초기 설계 시 충격 환경을 정의하기 위해서는 피로테크닉 장비에 따른 가속도 레벨을 예측하는 것이 중요하지만 피로 충격의 매우 높은 주파수 특성 때문에 기존의 FEM 해석 방법은 피로 충격에 의한 구조물의 응답을 예측하는데 적합하지 않다. 통계적 에너지 해석 (SEA) 기법은 상대적으로 단순한 모델링을 활용하여 구조물의 고주파수 영역까지의 통계적이고 평균화된 응답을 제공하며 동일한 모델에 합성된 가상모드를 부과하면 같은 영역에서의 충격 응답 특성까지도 얻어 낼 수 있다 [2]. 상기 해석 기법의 활용은 단지 인공위성 개발 업무에 국한되지 않으며, 고주파수 영역의 응답 특성을 고려하여야 하는 일반 구조물의 설계 및 개발 업무에 공통적으로 적용될 수 있다.

본 논문은 SEA 와 가상 모드 합성 기법(Virtual Mode Synthesis and Simulation, VMSS)을 사용하여 저궤도 지구관측위성의 분리 충격 하중을 예측하기 위해 앞서 4 개의 하부구조로 이루어진 단순 구조물의 충격 응답 해석에 적용하여 상기 충격 응답 해석 방법의 타당성을 입증하였다.

### 2. 본 론

SEA 는 구조체를 에너지를 저장, 감쇠 및 전달 하는 하부구조로 나눈 후 각 하부구조의 시간, 공간, 주파수 평균된 에너지를 주 해석변수로 설정하고 있다. 정상상태에서 에너지 평형 원리를 적용할 경우 각 하부구조에 유입 및 유출되는 파워가 같다고 볼 수 있으며 이를 바탕으로 각 하부구조간의 에너지 교환 과정을 해석하여 외부입력에 대한 응답을 예측하게 된다. SEA 해석을 이용하기 위해서는 시스템의 에너지를 저장하는 매체들을 하부구조로 나뉘어야 하며, 각 하부구조에서 손실되는 에너지, 하부구조간 전달되는 에너지, 외부에서 입력되는 에너지를 정의하여야 한다. 모든 하부구조, 가진 조건, 그리고 에너지 전달 및 경로가 정의되면 SEA 모델을 획득할 수 있다 [3].

SEA 의 주요 해석 인자인 감쇠 손실 인자 (Damping Loss Factor, DLF)와 연성 손실 인자 (Coupling Loss Factor, CLF)는 각 하부구조에서 손실되는 에너지와 하부구조간 전달되는 에너지의 양을 나타낸다. DLF 와 CLF 는 구조체의 특성과 하부구조의 연결에 따라서 매우 다양한 형태로 존재하기 때문에 이론적인 방법 보다는 실험을 통해 산출하는 것이 일반적이다. SEA 에 필요한 해석 계수를 실험적으로 산출하여 더 정확한 예측을 시도하는 방법을 실험적 통계적 에너지 해석법 (Experimental Statistical Energy Analysis, ESEA) 이라 한다. ESEA 방법 중 파워 입력법 (Power Injection Method, PIM)은 SEA 해석을 위한 구조물의 각 하부구조에 알고 있는 파워를 차례로 인가하면서 모든 하부구조의 응답을 측정하여 손실 계수를 산출하는 방법이다. DLF 나 CLF 를 측정하는 기존의 방법들은 시스템을 분해하여 실험해야 하는 단점이 있지만 PIM 은 구조물을 분해하지 않고도 적용 가능하며 DLF 와 CLF 를 동시에 구할 수 있는 장점이 있다.

SEA 는 고주파수 대역까지의 대상물의 통계적이고 평균화된 특성을 제공하는 반면 특정 주파수의 모달 특성에 대한 정보는 제공하지 못한다. 하지만 SEA 를 통해 얻어진 주파수 평균화된 주파수 응답

† 교신저자; KAIST 항공우주공학전공  
E-mail : jaehunghan@kaist.edu  
Tel : (042) 350-3723, Fax : (042) 350-3710  
\* KAIST 항공우주공학전공  
\*\* KAIST 기계공학전공  
\*\*\* 한국항공우주연구원

함수의 크기로부터 가상모드를 가정하면, 일반적인 유한요소해석기법과 같이 천이성 가진력에 대한 응답해석(Forced Vibration Analysis)을 수행할 수 있다. 이때 모드의 특성은 임의로 정할 수 있지만 응답을 예측하고자 하는 하부구조의 특성에 따라 결정하는 것이 일반적이다 [2].

### 3. 충격 응답 실험 및 해석 결과

충격 응답 실험에 사용된 구조물은 fig. 1 과 같다. 구조물의 SEA 모델에 필요한 손실 인자를 산출하기 위해 PIM 을 활용하였다. 파워 입력을 위해 임팩트 해머를 사용하여 하부구조당 총 3 개의 가진점을 3 번씩 가진 하여 평균값을 구했고 하부구조의 응답은 3 개의 가속도계를 사용하여 측정하였다. 관심 주파수 대역은 100~5000 Hz 이며 1/3 옥타브 밴드를 사용하였다. 충격 응답 해석을 위한 충격 입력은 하부구조 3 과 4 사이의 론저론의 밑 부분에 임팩트 해머를 통해 가하였다.

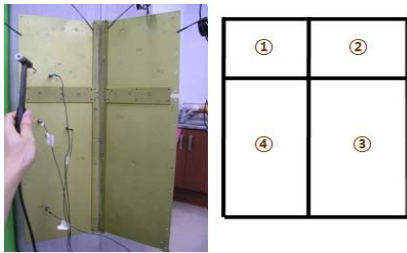


Fig. 1 Test structure and substructure numbering

시험 구조물은 SEA 상용 소프트웨어 Va One 2007 을 통해 모델링 되었으며 PIM 를 통해 측정된 손실 인자를 사용하였다. 항공우주 분야에서는 피로로테크닉 장비들의 하중을 충격 응답 스펙트럼 (Shock Response Spectrum, SRS)로 정의 하지만 현재 사용되고 있는 SEA 해석 프로그램에서는 시간영역의 하중만을 사용할 수 있기 때문에 주어진 SRS 와 비슷한 SRS 를 유발하는 시간영역의 힘을 구하는 튜닝 작업이 필요하다. 이를 위해 half sine wave 를 사용하여 파의 지속시간과 크기를 조정하였다. 또한 충격 가진점을 위해 별도의 하부구조를 SEA 모델에 포함하였으며 다른 하부구조간의 파워 흐름에 영향을 주지 않고 충격만 전달해 줄 수 있도록 손실 인자 값을 설정하여 하부구조 3 과 4 에 각각 입력되는 힘을 튜닝 하였다.

충격 응답 실험과 해석 결과의 SRS 를 비교하여 해석 결과의 정확도를 확인하였다. 실험과 해석 결과가 저주파수 대역을 제외하고는 비교적 잘 맞는 것을 확인 할 수 있다 (figs. 2-3). 저주파수 대역에서 해석과 실험 결과가 잘 맞지 않는 이유는 SEA 가 저주파수 영역에서는 부정확하기 때문이라 추측된다. 하부구조 3 과 4 의 해석 결과는 힘을 튜닝하여 실험

결과와 비슷하게 맞았기 때문에 생략되었다.

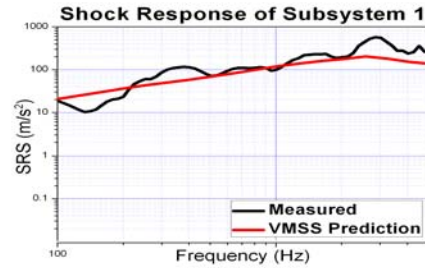


Fig. 2 Shock Response of Subsystem 1

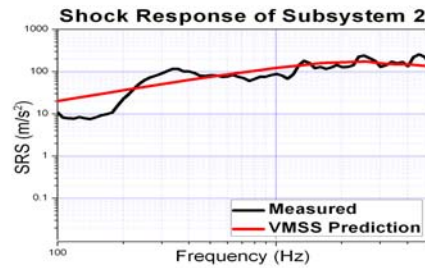


Fig. 3 Shock Response of Subsystem 2

### 4. 결론

본 논문에서는 저궤도 지구관측위성의 분리 충격 하중을 예측하기에 앞서 SEA 와 VMSS 를 사용하여 4 개의 하부구조로 이루어진 단순 구조물의 충격 응답을 해석하였다. PIM 을 적용해 단순 구조물의 손실 인자를 산출하여 SEA 모델을 구성했으며 SEA 해석에 VMSS 를 사용하여 충격 응답 해석을 수행하였다. 또한 충격하중이 SRS 로 정의 된 경우를 위해 주어진 SRS 와 비슷한 결과를 얻을 수 있는 시간 영역의 힘을 구하는 튜닝 작업을 수행하였다. SEA 와 VMSS 를 통한 해석 결과는 저주파수 대역을 제외한 나머지 주파수 대역에서 비교적 정확한 것을 확인하였다. 앞으로는 SEA 와 VMSS 를 사용하여 저궤도 지구관측위성의 분리 충격 하중을 예측할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 다목적실용위성 5 호 시스템종합개발사업 과 두뇌한국(BK)21 사업에 의해 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Mulville, D.R., 1999, Pyroshock Test Criteria, National Aeronautics and Space Administration.
- (2) VA One 2008 Shock Module User's Guide and Theory, ESI Group, 2008.
- (3) R.H. Lyon and R.G. Dejong., 1998, Theory and Application of Statistical Energy Analysis (2nd edition), RH Lyon Corp., Cambridge.