

# 통계적 에너지 분석법의 FRF를 이용한 충격 응답 스펙트럼(SRS)의 결정

## Determination of Shock Response Spectrum Using FRF of Statistical Energy Analysis Method

김 인 성<sup>†</sup> · 구 성 완<sup>\*</sup> · 황 철 규<sup>\*</sup>

Insung Kim, Sungwan Koo and Cheolgyu Hwang

(2003년 11월 5일 접수 : 2004년 6월 15일 심사완료)

**Key Words** : Statistical Energy Analysis(통계적 에너지 분석법), FRF(주파수 응답 함수), SRS(충격 응답 스펙트럼)

### ABSTRACT

A method how to determine the shock response spectrum from the FRF of the statistical energy analysis(SEA) is presented here. The system of 3 different plates connected by bolt joints is selected, simulating missile structural sections joined together. First, the SEA model was rendered by SEA parameters which were determined from experimental SEA method. Then, the mobility power was input to the SEA model and we can verify the validity of the model in the medium to high frequency range checking the reproduction of output average velocity. And, the shock induced shock response spectrum(SRS) was obtained using SEA FRF and arbitrarily chosen experimental FRF. We have compared the thus obtained SRS with actually measured SRS and they were relatively in good agreement. In this paper, we used the measured SEA FRF and therefore we have got the SRS well agreed with actually measured SRS even in the low frequency range. If the SEA FRF of well verified SEA model is used, the good result will come out in SEA effective frequency range which is more important at SRS.

### 1. 서 론

충격은 일반 진동과는 달리 매우 짧은 시간 동안에 구조물에 가해지는 힘에 의해 발생하는 천이 응답을 일컫으며, 다양한 요인에 의해 발생된다. 특히, 방위산업의 전차, 장갑차, 군용기 등에서는 기관포나 포탄 등의 발사 혹은 피격에 의해 야기되는 충격에 대

한 구조물, 장비 혹은 탑승자의 안전성을 평가하는 것은 매우 중요한 이슈이다. 또한, 유도부기 혹은 우주항공 시스템에는 다양한 분리 메카니즘이 적용되며, 많은 경우 화약에 의한 폭발기구를 사용하게 된다. 이 경우, 화약 작동시 순간적으로 발생하는 높은 에너지는 폭발기구 주변에 연결된 구조물에 강한 충격을 주어, 전자 장비내의 약한 리드와이어 등을 파손시키거나 릴레이의 채터링을 야기시키고, 연결부품을 파괴하거나 혹은 전체 구조물의 과도한 잔여진동을 일으켜 임무 수행에 심각한 장애를 주거나, 임무 수행 실패로 귀결되기도 한다.<sup>(1)</sup> 이러한 경우들을 고려하여 시스템 개발 단계에서, 임무 수행시 예상되는 다양한 충격 현상을 정의하고 정량적으로 규정하

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, 국방과학연구소, 3체-2-3

E-mail : iskim@add.re.kr

Tel : (042) 821-4504, Fax : (042) 821-2224

<sup>\*</sup> 국방과학연구소, 3체-2-3

여 충격시험을 실시함으로써 시스템의 안전성을 보증하는 것은 매우 필수적인 개발 항목이다.

이러한 충격시험 규정에 현실적으로 쓰이는 방법은 구조물 및 장비 등을 설계한 후 실제 임무 수행 시와 가장 근접한 방법으로 충격을 주어 그 충격응답의 측정에 의해 정하는 방법이다. 그러나, 적절한 해석방법의 뒷받침이 없이는 설계 되먹임 시 많은 시행착오를 거쳐야 하므로, 타당한 해석방법의 확보가 꼭 필요하다. 이 해석 방법으로는, 일반적으로 유한요소법에 의한 천이응답 해석이 많이 활용되었다. 그러나, 충격응답의 특성상 적어도 수 kHz 대역의 고주파 응답을 분석하여야 하므로, 유한요소법은 그 주파수 한계 때문에 효율적으로 적용되기가 불가능하다. 이에 대한 대안으로서, 일반적으로 중고주파 대역의 정상 상태 소음진동 해석에 쓰이는 통계적 에너지 분석법(statistical energy analysis: SEA)<sup>(2,3)</sup>을 응용하여, 중고주파 대역에서 유효한 충격응답 해석법이 제시되었다. Dalton, E.<sup>(4,5)</sup>는 SEA기법과 VMS(virtual mode synthesis)기법을 이용하여 충격 응답 스펙트럼(shock reponse spectrum: SRS)을 예측하는 기법을 제시하였다. G. Borello는 유리 다항식 함수의 크기(magnitude)를 SEA FRF에 맞추어 충격응답 스펙트럼을 얻는 방법을 제안하였으며, 이것을 VMS의 특별한 경우로서 LMPR(local modal phase reconstruction)이라고 이름지었다.<sup>(6)</sup> 이 방법들은 공히 임의의 공진 주파수를 가지는 가상의 FRF를 이용하는 방법이다. 본 논문에서는, 이러한 가상의 FRF를 이용하는 대신, 대상 구조물 혹은 대상 구조물과 같은 종류의 구조물에서 획득한 임의의 측정된 FRF와 SEA FRF를 이용함으로써, 보다 간편하고 신뢰성 있는 SRS를 구하는 기법을 제시하였다.

## 2. 시험 시편의 선정 및 SEA 모델

### 2.1 시험시편

본 논문에서 고려한 대상 계는 중앙의 두께 3.0 mm의 스틸 판재의 양단에 두께 5.0 mm의 알루미늄 판재를 볼트-넛트로 연결한 구조물을 선택하였다. 특히, 상단과 하단의 알루미늄 판재 뒷면 중앙에는 전단형 감쇠효과를 위하여 폭 100 mm, 두께 (2.0 mm)의 방진고무 띠를 가로 방향으로 접착하고, 그 위에 같은 폭으로 두께 1.0 mm의 알루미늄 띠를 부착하였

다. 이 시험 시편은 유도무기의 기체결합을 모사하여 제작되었으며, 부착된 전단형 감쇠 기구는 충격 전달의 감쇠효과를 높이기 위해 설치되었다. 이 전단형 감쇠 기구가 부착된 상/하단 알루미늄 판재의 감쇠와 부착되지 않은 중앙의 스트레인레스 강 판재의 감쇠는 크게 대비된다. 그리고, 각 판재의 크기는 1/3 옥타브 밴드의 1 kHz 밴드에서 약 5개 이상의 모드 수를 가지도록 고려하여 결정하였다. 이 시험 시편 및 사양을 Fig. 1 및 Table 1에 제시하였다.

### 2.2 시험시편의 SEA 모델 작성 및 검토

#### (1) ESEA(Experimental SEA) 기법

SEA 기법은 다음 식 (1)과 같이 에너지 평형 방정식을 이용한 기법이다.<sup>(7)</sup>

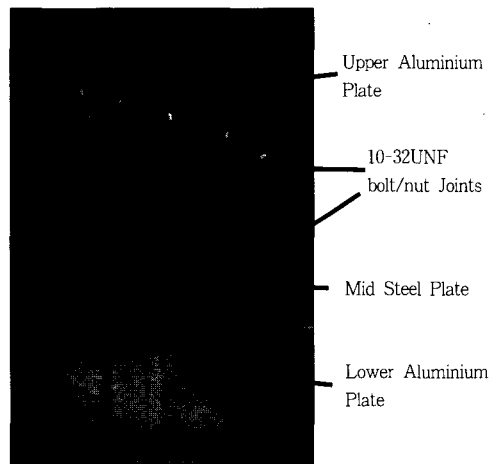


Fig. 1 Test specimen

Table 1 Specifications of test specimen

Upper plate (subsystem1)	Width : 860.0 mm. Height : 350.0 mm, Thickness : 5.0 mm. Material : aluminum
Mid plate (subsystem2)	Width : 860.0 mm. Height : 500.0 mm. Thickness : 3.0 mm. Material : steel
Lower plate (subsystem3)	Width : 860.0 mm. height : 500.0 mm. Thickness : 5.0 mm. Material : aluminum
Joints	- Bolt (AN3-4A), Washer (AN960-10L), Nut (MS21044-N3) - Joint spacing 23.9 mm, 86 joints total - Plates overlap length 39.0 mm

$$\Pi_{\in(i)} = \Pi_{diss(i)} + \left( \sum_{j \neq i} \Pi_{ij} - \sum_{j \neq i} \Pi_{ji} \right) \quad (1)$$

- $\Pi_{\in(i)}$  :  $i$ 번째 서브시스템에 대한 입력 파워
- $\Pi_{diss(i)} (= \eta_i \omega_c E_i)$  :  $i$ 번째 서브시스템에서 소산되는 에너지
- $\Pi_{ij} (= \eta_{ij} \omega_c E_i)$  :  $i$ 번째 서브시스템과 연결된  $j$ 번째 서브시스템으로 빠져 나가는 에너지
- $\Pi_{ji} (= \eta_{ji} \omega_c E_j)$  :  $i$ 번째 서브시스템과 연결된  $j$ 번째 서브시스템에서 들어 오는 에너지
- $E_i$  :  $i$ 번째 서브시스템의 내부에너지
- $\omega_c$  : 해당 주파수 밴드의 중심 주파수
- $\eta_i$  :  $i$ 번째 서브시스템의 자체감쇠계수(DLF)
- $\eta_{ij}$  : 서브시스템  $i, j$ 간의 전달감쇠계수(CLF)

위 식 (1)과 다음 식 (2)와 같은 SEA 가역성을 이용하여, 식 (3)과 같이 SEA 방정식을 얻는다.

$$\eta_{12} n_1 = \eta_{21} n_2 \quad (2)$$

$n_i$  :  $i$ 번째 서브시스템의 모달 밀도

$$\omega_c \begin{bmatrix} \left[ \begin{array}{cc} \eta_1 + \sum_{j \neq 1} \eta_{1j} & -\eta_{12} n_1 \\ \dots & \dots \end{array} \right] n_1 & -\eta_{1k} n_1 \\ \dots & \dots \\ -\eta_{k1} n_k & -\eta_{k2} n_k \left[ \begin{array}{cc} \eta_k + \sum_{j \neq 1} \eta_{kj} & \\ & n_k \end{array} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ n_1 \\ \vdots \\ E_k \\ n_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Pi_1 \\ \vdots \\ \Pi_K \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)의 SEA 방정식으로부터, 대상 계 각 서브시스템의 모달 밀도와 DLF, CLF를 알고 있을 경우, 임의의 외부 가진 파워를 주어서 각 서브시스템의 주파수 밴드별 평균 응답 에너지를 결정할 수 있다. 이것은 일반적인 해석모델의 응답해석 방법과 동일한 수순이다. 그러나 이 때, SEA 응답해석의 신뢰도는 SEA 모델의 내부 파라미터가 얼마나 정확한가에 따라 달려 있다. 모달 밀도와 CLF의 경우는 단순한 형

상에 대해서 이론적으로 계산할 수 있으나 DLF의 경우는 실험적인 측정값을 사용하며, 대표적인 재료에 대해서 그 대표값만을 일반적인 문헌에서 찾을 수 있다. 그러나, 실제 상황에서는 단순한 형상의 대표적 재료로만 이루어진 제품은 그리 흔하지 않으며, 이 경우 실험을 통한 대상 계의 SEA 모델 파라미터의 확인 혹은 도출이 요구된다. 이를 위해서는 입력되는 파워와 응답을 측정하여 거꾸로 SEA 모델 파라미터를 식 (3)을 이용하여 결정하는 것을 상정할 수 있으며, 이 방법을 실험적 SEA(experimental SEA i.e., ESEA) 기법 혹은 역 SEA(inverse SEA) 기법이라고 칭한다.

ESEA 기법에서는 실험에서 각 서브 시스템을 순차적으로 가진하여 각 경우의 입력 파워와 서브 시스템들의 응답 에너지를 측정한다. 만약,  $i$ 번째의 서브 시스템을 가진할 경우를 생각하면, 식 (1)로부터, 가진하는 서브시스템과 다른 서브 시스템의 에너지 평형을 다음과 같이 기술할 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$\frac{\Pi_{\in(j)}}{\omega_c} = \eta_j E_{jj} + \left( \sum_{i, j \neq i} \eta_{ij} E_{ii} - \sum_{i, j \neq i} \eta_{ji} E_{jj} \right) \quad (4)$$

$k \neq j$ 인 서브시스템에서,

$$0 = \eta_k E_{kk} + \left( \sum_{i, j \neq k} \eta_{kj} E_{ki} - \sum_{i, j \neq k} \eta_{jk} E_{ji} \right)$$

여기에서,  $E_{jj}$ 는  $i$ 번째 서브시스템을 가진할 때  $j$ 번째 서브 시스템의 응답에너지

전체 서브 시스템을 순차적으로 가진한 후 각각의 식 (4)를 합성하면, 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\omega_c} \bar{\Pi} = [E] \bar{\eta} \quad \text{로부터,}$$

$$\bar{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_{12} \\ \vdots \\ \eta_{1N} \\ \eta_2 \\ \eta_{21} \\ \eta_{23} \\ \vdots \\ \eta_{2N} \\ \vdots \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_c} [E]^{-1} \bar{\Pi} \quad (5)$$

여기에서,  $\bar{\Pi}$  와  $E$  는,

$$\bar{\Pi} = \begin{bmatrix} \Pi_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \Pi_2 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, [E] = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{11} - E_{12} & E_{11} - E_{13} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

위 식 (5)로부터 SEA 파라미터인 DLF와 CLF를 얻을 수 있다. 그러나, 식 (5)의 에너지 행렬의 크기는  $N^2 \times N^2$  로서, 통상적인 SEA 에너지 행렬의 크기인  $N \times N$ 에 비해 매우 커지게 되어 역행렬을 구할 때 수치적 안정성이 좋지 않으므로, DLF에 관계된 항과 CLF에 관계된 항을 구분하여 구한다. 특히 CLF를 구할 때에는 Lalor의 축약 방법을 이용하여 행렬 크기를  $N \times N$ 으로 줄일 수 있으며<sup>(6,8)</sup>,  $i$  번째 서브시스템을 가진할 때  $i$  번째 서브시스템과 연결된 서브시스템에서 되돌아 오는 에너지는 미약하다고 가정하여 더욱 단순화 시킬 수 있다. 이렇게 얻어지는 DLF, CLF는 다음 식 (6), (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{\eta_{diss}} = \frac{1}{\omega_c} [E]^{-1} \bar{\Pi} \quad (6)$$

여기에서,

$$\overline{\eta_{diss}} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_i \\ \vdots \\ \eta_{N-1} \\ \eta_N \end{bmatrix}, \bar{\Pi} = \begin{bmatrix} \Pi_1 \\ \Pi_2 \\ \vdots \\ \Pi_i \\ \vdots \\ \Pi_{N-1} \\ \Pi_N \end{bmatrix},$$

$$[E] = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{21} & E_{31} & \cdots & E_{M1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{1N} & \cdots & \cdots & \cdots & E_{NN} \end{bmatrix}$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{\omega_c} \left[ \frac{\Pi_i}{E_{ij}} \frac{E_{ji}}{E_{ii}} \right] \quad (7)$$

한편, 계산된 각 서브 시스템의 에너지를 통상적인 변위, 속도, 가속도 등으로 변환하기 위해서는 각 주파수 대역에서의 진동 상당 질량값(vibrating equivalent mass)이 필요한데, 이 값  $M(w_c)$ 는 ESEA 실험에서 다음 식 (8)과 같이 얻어질 수 있다.

$$M(w_c) = \frac{\Pi_i}{\omega_c < V_i^2 > \eta_{i, apparent}} \quad (8)$$

식 (8)에서  $< V_i^2 >$ 는  $i$  번째 서브시스템의 정상 상태 진동 속도 제곱의 시간-공간 평균을 나타내며,  $\eta_{i, apparent}$ 는  $i$  번째 서브 시스템에서 DLF, CLF가 합성된 감쇠값이며, 임팩트 해머로 충격을 가했을 때 혹은 가진기의 전원을 끌 직후의 응답으로부터 직접 얻어지는 에너지 감쇠값이다.  $\eta_{i, apparent}$ 는 일반적인 진폭의 감쇠를 나타내는 임계 감쇠비  $\xi$  및 잔향시간  $T_{60}$ 와 다음과 같은 관계에 있다.

$$\eta_{i, apparent} = 2\xi = \frac{2.2}{f_c T_{60}} \quad (9)$$

(2) 시험시편의 ESEA 기법에 의한 SEA 파라미터 계산

ESEA 기법에 의한 SEA 파라미터의 계산을 위해서는 먼저 각 서브 시스템에 대한 입력 파워를 측정하고, 그 입력 파워에 의한 각 서브시스템의 진동 응답 에너지를 측정하여야 한다. 이 두 물리량을 동시에 측정하기 위해서는 많은 수의 데이터 획득 채널과 센서가 필요하나, 대부분의 경우 제한적일 경우가 많으므로, 입력 파워의 측정과 진동 응답 에너지 측정을 구분하여 수행한다. 이 때, 입력 파워와 진동 응답이 동시에 측정되는 것이 아니므로, 입력되는 힘(구조적인 입력)에 대하여 정규화하여 구하는 것이 필요

**Table 2** ESEA test specifications for 3-plates system

Sensors	- Impedance head : PCB 288D01 (acc. 50 g, Force 50l bf) - Accelerometer : Endevco 2250A-10 (500 g, weight 0.4 grams)
Exciter	- LDS V201 (4l bf)
Data acquisition setup	- NI PXI-4472, 10 kHz sampling, Block size 4000, Hanning window
Exciting points	- 5 exciting points per subsystem
Response points	- 5 response points per subsystem

하다. 즉, 입력 파워는 가진점에서의 가속도 모빌리티 (acceleration mobility)로부터 구하고, 진동 응답 에너지는 가진점에서의 입력 힘에 대한 응답지점에서의 가속도 FRF로부터 구하며, 진동 속도의 제곱으로 나타낸다. 입력 파워와 진동 응답의 획득점은 각 서브 시스템 당 5개소로 하였으며, 5개의 FRF로부터 1/3 옥타브 밴드 평균과 공간 평균을 하여 각 서브 시스템의 평균 입력 파워와 평균 진동 응답 속도를 구하였다. 이 때의 진동 응답 속도의 제곱은 가속도 FRF로부터 주파수 밴드 및 공간 평균하여 구한 것으로서, 이를 SEA FRF로 부르기로 한다. 여기에서, 입력파워와 진동 응답 속도의 제곱은 모두 에너지 물리량을 나타내는 것으로서, 원래의 모빌리티, FRF의 위상정보가 제거되었다는 것에 유의할 필요가 있다.

Table 2에 시험 시편의 ESEA 시험 사양을 정리하였다.

다음 Fig. 2, 3에 각 서브시스템의 입력 파워 및 대표적인 예로 서브시스템 2(중앙 스틸 판) 가진에 의한 각 서브 시스템의 진동응답 속도의 제곱을 보였다. 각 측정값의 분산값(dB)도 동시에 보였다.

Fig. 2, 3에 보인 입력파워와 진동 응답 에너지로부터 (1)항에서 설명된 방법에 의해 각 서브 시스템의 DLF, CLF와 그 분산 및 진동 상당 질량(vibrating equivalent mass)을 Fig. 4, 5, 6에 보였다. 여기서, 진동 상당 질량은 식 (8)로부터 얻어지며, 대개 고주파에서 커지는 주파수 증속 함수이다.

(3) 작성된 SEA 모델의 검토

(2)항의 ESEA기법에 의해 구한 시험 시편의 SEA 파라미터로 구성된 SEA 모델을 이용하여, 시

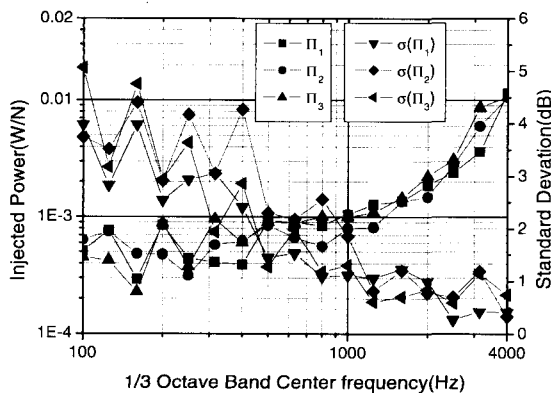


Fig. 2 Power injected on each subsystem with standard deviations

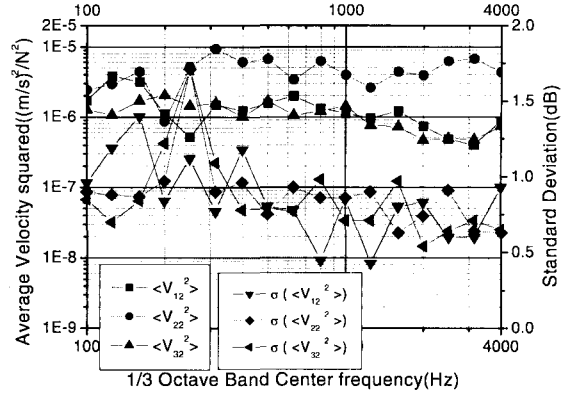


Fig. 3 Response velocity squared of each subsystems when exciting subsystem 2(mid steel plate) with standard deviations

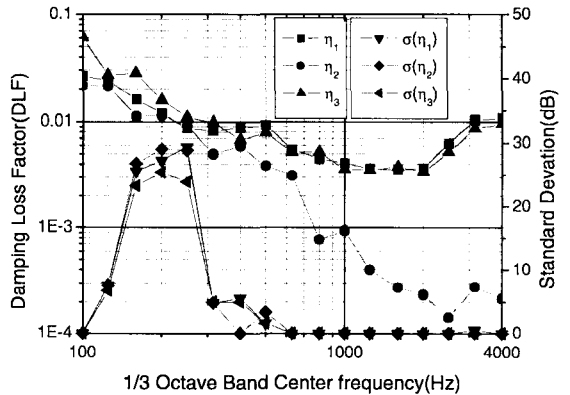


Fig. 4 DLF of each subsystem with standard deviations

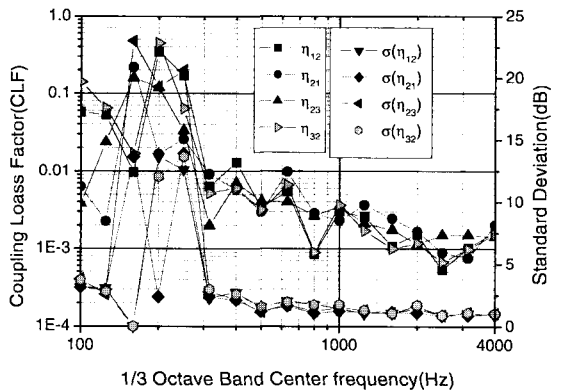


Fig. 5 CLF between subsystems with standard deviations

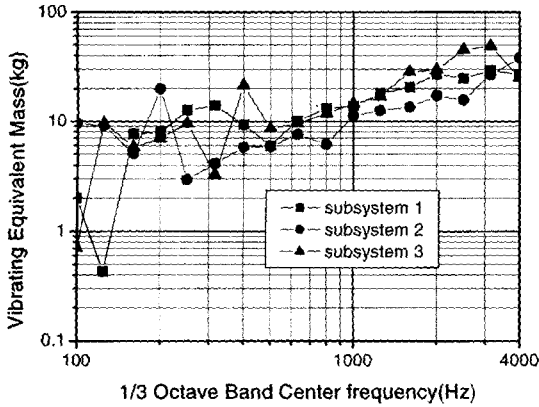


Fig. 6 Vibrating equivalent mass of each subsystem

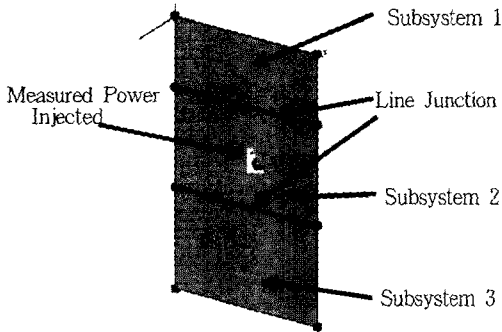


Fig. 7 AutoSEA2 graphical representation of the specimen

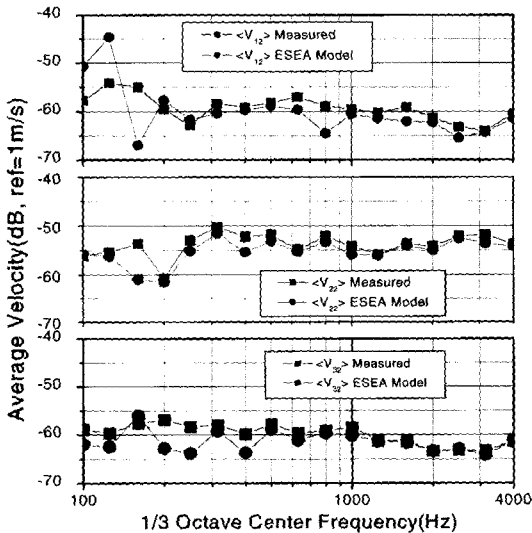


Fig. 8 Comparison of response velocities of experimentally determined SEA model with measured values in dB when subsystem2 excited

험에서 측정된 입력 파워를 주었을 경우 시험에서 측정된 진동 응답을 그대로 재현하는지를 검토하였다. 진동 응답의 계산은 ESEA 기법에 의해 결정된

SEA 파라미터를 이용하여 상용 SEA 프로그램인 AutoSEA2로써 계산하였으며, Fig. 7에 AutoSEA2의 그래픽 모델을 보였다. 대표적인 경우로 서브시스템 2에 측정된 입력 파워를 주었을 때, 각 서브시스템의 진동응답을 비교하여 Fig. 8에 보였다.

Fig. 8의 결과로 볼 때, 대체적으로 1 kHz 이하의 주파수 대역에서는 모델의 응답이 측정값에 비해 분산이 큰 반면, 그 이상의 주파수 대역에서는 측정값을 잘 재현함을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 5에서 보인 바와 같이 ESEA 기법으로부터 구한 DLF, CLF의 분산이 저주파 대역에서 큰 사실과 일치한다. 이 결과로부터, SEA 모델의 유효 주파수 대역을 확인할 수 있다.

### 3. SEA FRF와 임의의 측정 FRF를 이용한 SRS의 계산

#### 3.1 계산기법

만약, SRS를 구하려는 지점에서의 충격입력에 대한 응답의 FRF를 알고 있다면, 임의의 충격입력 가해졌을 때 그 지점에서의 SRS는 임의의 충격입력의 FFT 스펙트럼과 FRF를 곱한 함수의 역 FFT (inverse FFT)를 계산하여 과도 충격응답 시계열 데이터를 구할 수 있으며, 이 과도 충격응답 시계열 데이터를 이용하여 해당 SRS를 얻을 수 있다. 그러나, SEA FRF를 이용할 경우에는 2.2절 (2)항에서 언급한 바와 같이 SEA FRF가 위상정보가 제거된 평균 양인 관계로, 직접 과도 충격응답 시계열 데이터를 얻을 수는 없다. 그러므로, SEA FRF를 이용하여 과도 충격응답 시계열 데이터를 얻기 위해서는 인위적으로 SEA FRF에 위상정보를 부여해야 하는데, 이를 위해 Dalton, E.<sup>(4,5)</sup> 가상의 모드들을 합성하였으며 G. Gerald는<sup>(6)</sup> 유사한 방법으로 복소 유리 다항식 함수를 이용하였다. 그러나, 본 논문에서는 이러한 방법 대신, 실험에서 구한 유사 구조물의 임의의 FRF를 이용하였으며, 가상의 모드들을 고려할 때 생기는 모호함을 제거하였다. 이 방법은 유사 구조물의 FRF를 사용함으로써, 감쇠를 제외한 모드 개수

(mode count) 혹은 모달 밀도(modal density)가 엄밀한 FRF와 같은 수준으로 먼저 결정된다는 것을 의미한다. 특히, ESEA 기법을 이용해 SEA 모델을 작성할 경우에는 임의의 FRF를 구하는 별도의 노력을 필요로 하지 않는다.

본 논문에서 제시되는 방법의 핵심은, 임의의 실험 FRF와 충격입력의 FFT 스펙트럼의 곱을 역 FFT해서 구한 과도 충격응답 시계열 데이터를 SEA FRF와 임의의 실험 FRF를 이용하여, 엄밀한 과도 충격응답 시계열 데이터와 유사하게 재현하는 과정이다.

과도 충격응답 시계열 데이터는 최대값과 감쇠율로 대표될 수 있다. 같은 고유진동수를 가지는 1자유도 진동계에서, 기준 과도 충격응답 시계열 데이터와 다른 최대값과 감쇠율을 가진 임의의 과도 충격응답 시계열 데이터를 기준 과도 충격응답 데이터와 동일하게 하는 것을 Fig. 9와 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$AR = \frac{A_R}{A} = \frac{Y_{R,rms}}{Y_{rms}} \sqrt{\frac{\xi}{\xi_R}} \quad (10)$$

$$Y_T = AR e^{-(\xi_n - \xi)t} \times Y (= Y_R)$$

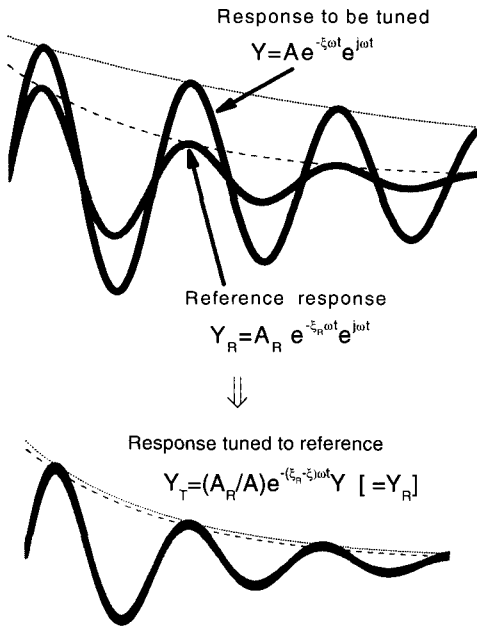


Fig. 9 Tuning of arbitrary shock response time data to reference data

식 (10)에서  $AR$ 은 교정 진폭비이며, 특히  $\frac{Y_{R,rms}}{Y_{rms}}$ 를 교정 평균 진폭비  $AR_{rms}$ ,  $\sqrt{\frac{\xi}{\xi_R}}$ 을 교정 감쇠 진폭비  $DR$ 이라고 부르기로 한다. Fig. 9와 식 (10)을 SEA의 일반적인 분석 주파수 밴드인 1/3 옥타브 밴드에 적용하였다. 식 (10)의 교정 최대 진폭비  $AR_{rms}$ 와 교정 감쇠 진폭비  $DR$ 는 SEA에서 다음 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$AR_{s,SEA} = \sqrt{\frac{\langle V_{ji}^2 \rangle}{V^2}} \quad (11)$$

$$DR_{SEA} = \sqrt{\frac{2\xi_{SEA}}{\eta_{j, apparent}}} \quad (12)$$

여기에서,

$\langle V_{ji}^2 \rangle$ : 서브시스템  $i$ 가진, 서브시스템  $j$  응답속도  
제공의 밴드, 공간평균

$V^2$ : 임의의 FRF로부터 얻어진 속도 제공의 밴드  
평균

$\xi_{SEA}$ : 임의의 FRF로부터 얻어진 SEA 밴드 진폭  
감쇠율

그 다음에 임의의 실험 FRF와 충격입력의 FFT 스펙트럼의 곱을 역 FFT해서 구한 시계열 데이터를 각 1/3 옥타브 밴드 주파수로 밴드 통과 필터(band pass filter)를 적용하여 각 밴드별 시계열 데이터들을 만든다. 그리고, 식 (11),(12)에서 구한 진폭비들을 각각의 밴드별 시계열 데이터에 곱한 다음, 이 시계열 데이터들을 모두 더하여 엄밀한 과도 충격응답 데이터를 재현한다. 이 과정을 다음 식 (13),(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{T,l} = (AR_{s,SEA})_l (DR_{SEA})_l \times BPF_l [FFT^{-1}(F(\omega)G(\omega))] \quad (13)$$

$$Y_T = \sum_{l=1}^L Y_{T,l} \quad (14)$$

여기에서,

$l$ :  $l$  번째 주파수 밴드

$BPF_l [ ]$ :  $l$  번째 주파수 밴드 band pass filter

$FFT^{-1} ( )$ : 역FFT

$F(\omega)$ : 입력 충격 힘의 FFT 스펙트럼

$G(\omega)$  : 임의의 FRF

$Y_{T,i}$  :  $i$ 번째 주파수 밴드의 복원된 과도 충격 응답

$Y_T$  : 복원된 과도 충격 응답

식 (14)로부터 얻어진 과도 충격응답 시계열 데이터를 이용함으로써, SEA 모델(SEA FRF 및 응답 서브시스템의  $\eta_{j, apparent}$ ), 실험 측정으로부터 구한 유사 구조물의 FRF 및 임의의 충격입력으로부터 구하고자 하는 SRS를 얻을 수 있게 된다.

### 3.2 계산기법의 시험 시편에 대한 적용

3.1절에서 제시된 계산기법을 시험시편에 적용하였다. 먼저, 서브 시스템 2(중앙 스틸 판)에 충격을 가

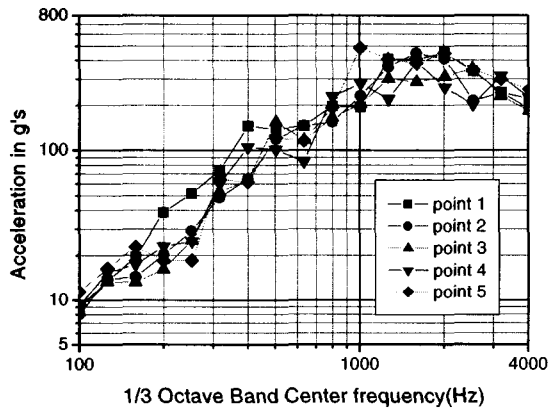


Fig. 10 SRS's of subsystem1's shock induced subsystem2 responses

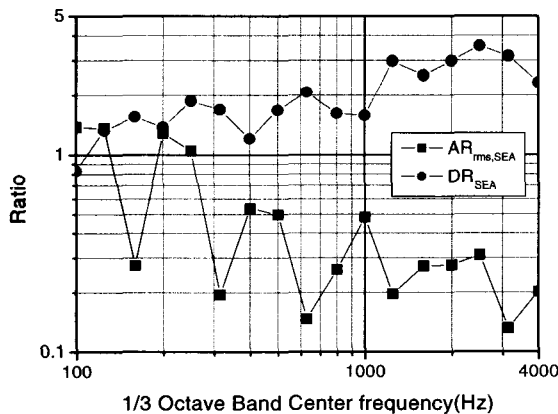


Fig. 11 Tuning average amplitude ratio and decay amplitude ratio

하여 서브 시스템 1(상단 알루미늄 판)에서 발생하는 진동 가속도 응답을 측정하여 각 진동 가속도 응답의 SRS를 구하였다. 단, SRS의 주파수 밴드는 SEA 기법의 분석 주파수 밴드와 동일하게 1/3 옥타브 밴드로 하였으며, 감쇠는 일반적으로 쓰는 값인 5%로 설정하였다.<sup>(9)</sup> 그리고, 서브 시스템 1에서의 응답 측정점은 임의로 5군데를 선정하였다. 서브 시스템 2에 대한 충격 가진은 임팩트 해머를 이용하였으며, 일단 플라스틱 팁을 적용하였다. 이 SRS들을 Fig. 10에 보였다.

그리고, SEA FRF의 위상정보 복원을 위한 임의의 FRF는 서브시스템 2 내에서 임의의 가진에 대한

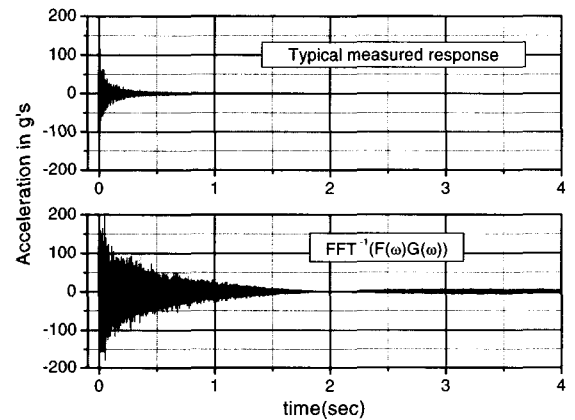


Fig. 12 Comparison between typical measured response of subsystem1 and inverse FFT of  $F(w)G(w)$

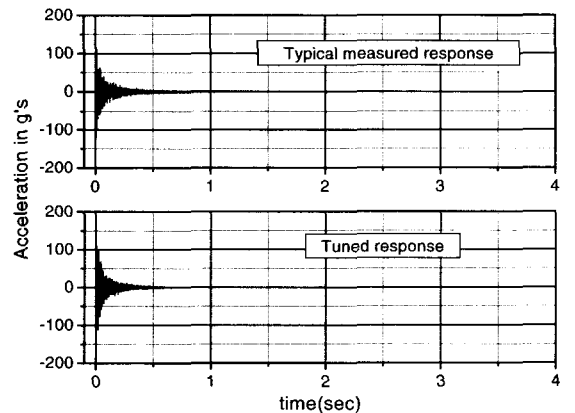


Fig. 13 Comparison between typical measured response of subsystem1 and reconstructed response



임의의 가속도 응답 FRF 중 1개를 선정하였다. 이 임의의 FRF 및 SEA 모델의 SEA FRF와 응답 서브시스템  $\eta_{j,apparent}$ 를 이용하여 식 (11),(12)로부터 구한 교정 평균 진폭비  $AR_{rms,SEA}$ 와 교정 감쇠 진폭비  $DR_{SEA}$ 를 Fig. 11에 보였다.

다음에, 서브 시스템 2에 충격을 가하여 서브 시스템 1의 진동 가속도 응답을 측정할 때 동시에 측정된 충격 힘의 FFT 스펙트럼을 임의의 FRF에 곱하여 역 FFT를 취하였다. 이것을 측정된 가속도 응답 중 하나와 같은 스케일로 비교하면 Fig. 12와 같다.

Fig. 12의 하단 데이터, 식 (13)과 같이 1/3 옥타브와 교정 감쇠 진폭비를 곱하고, 식 (14)와 같이 다

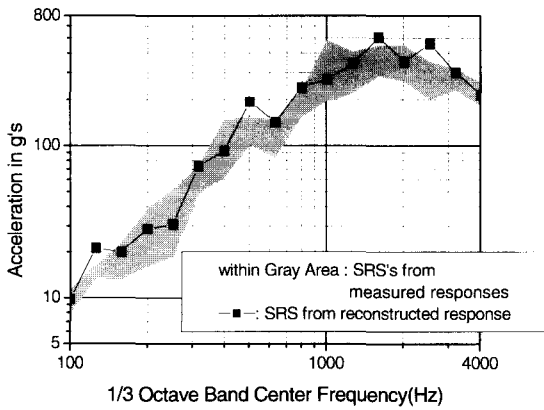


Fig. 14 Comparison between SRS of reconstructed response and max/min boundaries of SRS's of measured responses when using plastic tip

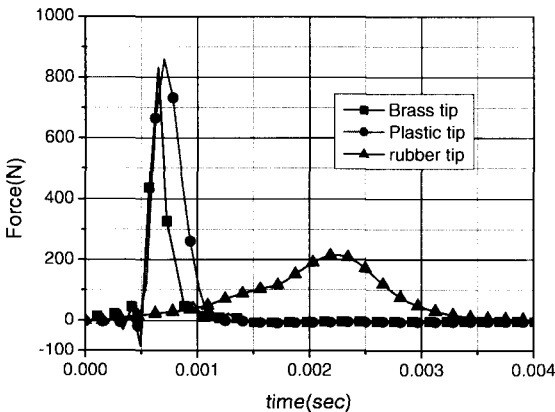


Fig. 15 Measured shock force using various impact hammer tips

타브 밴드별로 밴드 패스 필터링한 밴드 별 시계열 데이터에 Fig. 11에 나타난 각 밴드의 교정 최대 진폭 시 모두 합하여 실제의 진동 가속도 응답을 복원하였다. 이것을 Fig. 13에 측정된 가속도 응답중 하나와 비교하여 나타내었다.

Fig. 13에서 보는 바와 같이 복원된 가속도 응답 데이터는 실제 측정된 응답 데이터와 거의 동일한 수준으로 복원되었음을 확인할 수 있다.

이렇게 복원된 가속도 응답의 SRS를 구하고, 이것을 실제 측정된 5군데 진동 응답 SRS의 최대/최소 경계선과 비교하면 Fig. 15와 같다.

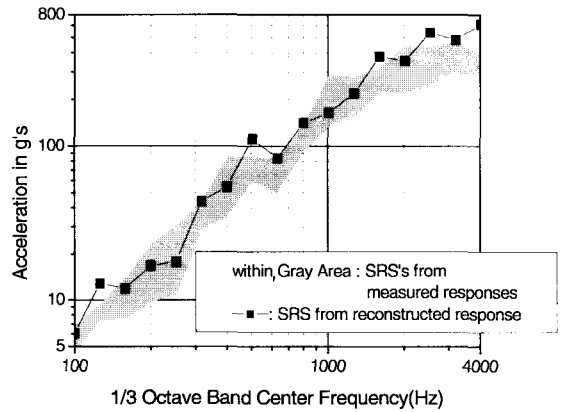


Fig. 16 Comparison between SRS of reconstructed response and max/min boundaries of SRS's of measured responses when using brass tip

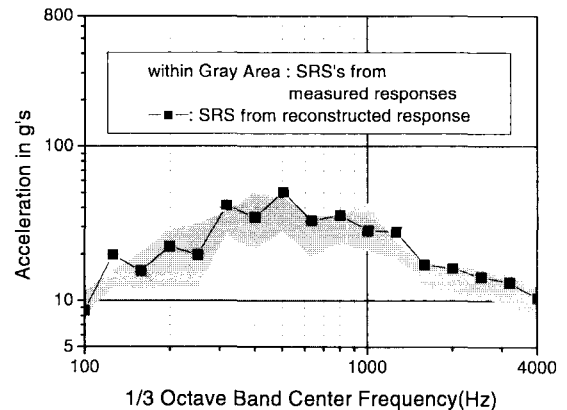


Fig. 17 Comparison between SRS of reconstructed response and max/min boundaries of SRS's of measured responses when using rubber tip

### 3.3 다른 충격이 가해졌을 경우의 SRS 계산 및 측정값과의 비교

3.2절에서는 임팩트 해머의 팁을 플라스틱 해머로 사용했을 때 측정된 응답과 복원된 응답의 SRS를 비교한 것이다. 이 절에서는, 입력 충격을 고무 팁과 황동 팁을 사용했을 때 측정된 충격 힘을 사용하여 복원된 응답의 SRS와 충격 힘 측정과 동시에 측정된 응답의 SRS를 비교하였다. Fig. 15에 고무 팁, 황동 팁 사용시 및 3.2절의 플라스틱 팁 사용 시 측정된 충격 힘의 비교를 나타내었다.

Fig. 15에서 보는 바와 같이 황동 팁을 사용하였을 때는, 플라스틱 팁을 사용하는 경우에 비해 SRS의 고주파 성분이 크게 나옴, 고무 팁을 사용했을 때는 반대로 고주파 성분이 줄어들 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 16, 17에 황동 팁을 사용했을 시 및 고무 팁을 사용했을 시의 측정된 진동 응답 SRS의 최대/최소 경계선과 각각의 복원된 가속도 응답의 SRS를 비교하였다.

## 4. 결론

SEA 모델의 SEA FRF와  $\eta_{j, apparent}$  그리고 유사 구조물에서 측정된 임의의 FRF를 이용하여, 임의의 충격 힘이 가해졌을 때의 SRS를 구하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 가상의 FRF를 이용하는 기존의 방법들에서, 가상 모드들을 가정해야 하는 모호함을 제거하였다. 실제 시험측정에 의한 검증에서, 이 방법은 여러 가지 다른 충격 힘이 가해졌을 경우에도 측정된 응답의 SRS를 거의 동일하게 재현함으로써 그 타당성을 증명하였다. 더욱이 본 논문의 SEA FRF는 ESEA 시험에서 얻어진 것을 직접 이용함으로써, 고주파 대역은 물론 저주파 대역에서도 측정된 SRS와 계산된 SRS가 잘 일치하는 결과를 얻었다.

본 논문에서 보여진 바와 같이, 제시된 방법을 이용할 때 잘 검증된 SEA 모델을 사용한다면, 사용되는 SEA 모델의 SEA 유효 주파수 대역에서 신뢰성 있는 SRS를 예측할 수 있음을 보였다.

## 참 고 문 헌

- (1) The Shock and Vibration Information Center, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., August 1886, The Shock and Vibration Bulletin, Part 3 Invited Papers, Pyrotechnic Shock, Pyrotechnic Shock Workshop, pp. 8~28.
- (2) 채장범, 1998, "통계적 에너지 해석 모델을 이용한 건설 장비 차실 설계에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 8 권, 제 4 호, pp. 609~615.
- (3) 이장명, 이준, 김대곤, 2003, "자동차용 흡·차음재의 성능분석을 위한 통계적 에너지 기법의 적용", 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 1 호, pp. 33~39.
- (4) Dalton, E., 1992, Ballistic Shock Response Prediction by an Extension of Statistical Energy Analysis", 63rd Shock and Vibration Symposium, Vol. 1.
- (5) Dalton, E., and Chambers, B., 1995, Analysis and Validation Testing of Impulsive load Response in Complex, Multi-Compartmented Structures", Proceedings of the 36th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.
- (6) Borello, G., Prediction of Aerospace Equipment Response to Pyrotechnical Shock using SEA, Proceedings of VETOMAC-1, Oct. 25~27, 2000, Bangalore, India.
- (7) Richard H. Lyon, Richard G. Dejong, 1995, Theory and Application of Statistical Energy Analysis, Butterworth-Heinemann.
- (8) Lalor, N., 1989, The Experimental Determination of Vibrational Energy Balance in Complex Structures, Paper 108429 Proc. SIRA Conference on Stress & Vibration, London.
- (9) 서순우, 2000, 폭발충격 계측 및 분석, 국방과학연구소 연구보고서, MADC-S416-000170, 국방과학연구소.