

## 통계적 에너지 해석 모델을이용한 건설 장비 설계에 관한 연구

○채 장범<sup>\*</sup>, Jerome E. Manning<sup>\*\*</sup>, Brian H. Tracey<sup>\*\*</sup>

### Design Sensitivity Studies for Statistical Energy Analysis Modeling of Construction Vehicles

○Jangbom Chai<sup>\*</sup>, Jerome E. Manning<sup>\*\*</sup>, Brian H. Tracey<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

In recent years there has been an increasing emphasis on shortening design cycles for bringing products to market. This requires the development of computer aided engineering tools which allow analysts to quickly evaluate the effect of design changes on noise, vibration, and harshness. Statistical Energy Analysis (SEA) modeling is a valuable tool for predicting noise and vibration as SEA models are inherently simpler and more robust than deterministic models. SEA modeling can be combined with design sensitivity analysis (DSA) to identify design changes which give the largest performance benefit. This paper describes SEA modeling of an equipment cab. SEA predictions are compared to test data, showing good agreement. The use of design sensitivity analysis in improving cab design is then demonstrated.

#### 1. 서론

통계적 에너지 해석 방법(Statistical Energy Analysis, SEA)은 여러 장비 제작 회사에서 제품을 설계할 때 소음과 진동을 예측하기 위하여 사용되어져 왔다. 이러한 용도로 사용되어지는 소음/진동 해석 방법은 소음과 진동의 영향이 설계를 결정할 단계에서 고려될 수 있도록 소음/진동의 예측 결과를 충분히 일찍 제공해 주어야 한다. SEA는 보통 1/3 옥타브나 1/6 옥타브 밴드 등 주파수 밴드내의 평균 응답을 예측하는 것이기 때문에 초기 설계의 과정 중에 제공되기 어려운 상세치수에 비교적 둔감하다. 설계가 진행되어 감에 따라 상세한 설계치가 결정되고 실험 데이터도 보강

될 것이다. 그러면 이런 정보는 SEA 모델을 더욱 정교하게 만드는데 사용돼서 SEA 모델은 최종 제품에 대하여 정확한 소음/진동의 해석 결과를 예측할 수 있다.

설계 민감도 해석(Design Sensitivity Analysis, DSA)은 엔지니어가 설계시 제품의 성능을 향상시키는데 중요한 역할을 하는 설계 변수가 무엇이며 설계 변수를 바꿔주었을 때 그로 인하여 얼마나 성능이 향상되는 지를 이해하는데 도움을 준다. DSA의 중요한 장점중의 하나는 대부분의 설계 변수의 영향이 해석적으로 구해지기 때문에 실험의 수를 대폭 줄일 수 있다는 것이다. 더욱이 DSA로 소음과 진동에 큰 영향을 주지 않은 구조 요소가 판별되면 이 요소를 구조물 형성에 영향을 미치지 않는 범위에서 재 설계하여 전체 제품의 무게를 낮추는 등의 경제적인 설계를 할 수도 있다.

★ 아주대학교 기계 및 산업공학부

★★ Cambridge Collaborative, Inc.

본 논문에서는 먼저 통계적 에너지 해석 방법이 일반적으로 설명되고 SEA를 이용한 설계 민감도 해석이 논의될 것이다. 건설 장비 차실 설계를 위한 SEA모델이 개발되고 실험으로 검증된 후 몇 가지 설계 변수를 대상으로 설계 민감도 해석이 수행된다. 이 해석의 결과로 설계 변수의 범위를 좁혀갈 수 있다. 그러므로 설계 변수를 찾고 영향을 살펴보기 위해 제작되는 시제품과 실험의 수를 줄여서 시간적 그리고 경제적 향상에 도움이 된다.

## 2. 통계적 에너지 해석법

SEA가 처음 개발된 이래로 SEA는 구조물의 진동과 음향 응답에 많은 구조 모드가 관여하는 고주파 영역에서의 해석에 유용하다고 알려져 왔다 [1]. 모드 해석법이나 유한 요소 해석법이 고주파 영역에서 해석을 수행할 때 상당히 많은 수의 자유도를 필요로 하는 것과는 달리 SEA 모델은 구조물의 모드들을 유사한 모드들의 집합인 SEA 섭시시스템(subsystem)으로 그룹화하여 자유도 수를 대폭 줄여준다. 이로 인해 SEA는 모델을 개발하고 검증하며 정교하게 만드는데 필요한 시간과 그리고 개발된 모델을 이용하여 연구를 수행할 때 소요되는 계산 시간 모두에서 상당한 이점이 있다.

SEA의 근본적 전제는 연결된 섭시시스템간의 에너지 흐름은 그 두 섭시시스템의 모달 에너지(modal energy) 차이에 비례한다는 것이다. 이 전제는 광대역 불규칙 가진이 섭시시스템에 분포하고 그래서 섭시시스템내의 각각의 모드가 시간 평균적으로 같은 에너지를 가질 때 정확히 성립한다. 그런데 다행히도 이 전제는 위에서 언급한 조건이 엄격히 만족되지 않는 많은 문제에서 상당히 잘 근사된다. 그래서 위의 전제를 이용하여 시스템의 동적 응답을 구하기 위한 SEA 파워 관계식을 유도할 수 있다. Figure 1에 두 개의 연결된 섭시시스템으로 구성된 시스템을 보여주고 있다. 각 섭시시스템은 외부로부터 에너지를 공급받고 또한 자기 외부로 내부 댐핑에 의한 에너지를 방출한다. 그리고 섭시시스템 상호간에 에너지를 주고받는다. 이 때 파워 관계식은 외부의 가진이나 연결된 다른 섭시시스템으로부터 들어오는 입력 파워와 고려되는 섭시시스템 자체의 감쇠와 연결된 다른 섭시시스템으로의 에너

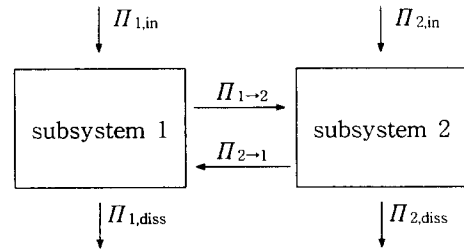


Figure 1. Power transfer between coupled two SEA subsystems.

지 전달에 의한 출력 파워를 일치시킴으로써 얻을 수 있다. 이를 식으로 표현하면 섭시시스템 1과 섭시시스템 2에 대하여 자기 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Pi_{1,in} &= \Pi_{1,diss} + (\Pi_{1 \rightarrow 2} - \Pi_{2 \rightarrow 1}) \\ &= \omega \eta_1 E_1 + (\omega \eta_{12} E_1 - \omega \eta_{21} E_2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2,in} &= \Pi_{2,diss} + (\Pi_{2 \rightarrow 1} - \Pi_{1 \rightarrow 2}) \\ &= \omega \eta_2 E_2 + (\omega \eta_{21} E_2 - \omega \eta_{12} E_1) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$\Pi_{i,in}$  : 외부로부터 섭시시스템  $i$ 로 입력되는 파워

$\Pi_{i,diss}$  : 섭시시스템  $i$ 에서 외부로 방출되는 파워

$\Pi_{i \rightarrow j}$  : 섭시시스템  $i$ 에서 섭시시스템  $j$ 로 전달되는 파워

$E_i$  : 섭시시스템  $i$ 의 에너지

$\eta_i$  : 섭시시스템  $i$ 의 내부 손실 계수

$\eta_{ij}$  : 섭시시스템  $i$ 에서 섭시시스템  $j$ 로의 연결 손실 계수

위의 식으로부터 에너지와 모달 에너지가 구해지면 이로부터 거리, 속도 그리고 가속도와 같은 진동 응답 그리고 음압과 같은 음향 응답을 쉽게 계산할 수 있다.

식(1) 과 (2) 에서 보듯이 SEA 모델을 개발하는데 중요한 작업은 에너지의 흐름을 연관시켜주는 연결 손실 계수(coupling loss factor)와 손실 계수

(loss factor)를 정확히 구하는 일이다. 손실 계수는 다른 유사한 구조물에 대하여 구해놓은 자료를 이용하거나 실험적으로 구할 수 있다. 구조물에 감쇠 물질을 덧붙이거나 음향 공간에 흡음재를 처리하면 감쇠 계수가 높아지는데 이는 측정에 의하여 결정될 수 있고 제한된 경우에 해석적으로도 계산된다. 연결 손실 계수도 측정 자료를 이용하여 결정될 수 있다. 그러나 어떤 한 구조물에서 측정된 연결 손실 계수를 이용하여 다른 구조물에 적용시키기 위하여 추정하기는 어렵고 추정한 손실 계수를 사용하기 위해서는 두 구조물간에 상당한 유사성을 요구한다. 그러므로 연결 손실 계수는 해석적으로 계산하여 사용하는 방법이 선호된다. 이렇게 함으로써 실험 결과를 기다리지 않고 SEA 모델을 완성할 수 있다. 차후에 측정을 통하여 SEA 모델은 측정 자료와 비교되고 해석적으로 구해진 연결 손실 계수는 더욱 정확한 모델을 완성하기 위하여 보완된다. 이렇게 보완된 모델은 여러 진동원이나 소음원에 대하여 진동과 소음을 예측하는데 그리고 진동과 소음을 줄이는 방법연구에 사용될 수 있다.

### 3. 건설 장비 차실의 SEA 모델

건설 장비 차실을 모델링하기 위해서는 각 부분을 SEA 섭시시스템으로 나누는 일부터 시작한다. 건설 장비 차실의 형상을 Figure 2에 보여주었다. SEA 섭시시스템의 예로 차실 천장의 굽힘(bending) 모드의 집합을 들 수 있다. 천장의 평면(inplane) 모드는 다른 SEA 섭시시스템인데 이는 굽힘 모드와

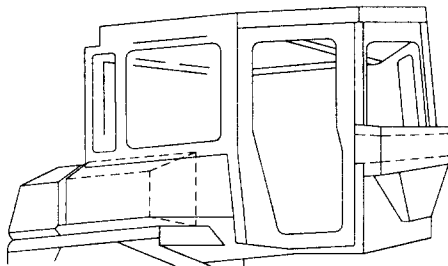


Figure 2. Schematic drawing of a construction vehicle cab.

평면 모드는 유사한 특징을 갖고 있지 않기 때문이다. 차실내의 음향 모드는 또 다른 에너지 저장할 수 있는 SEA 섭시시스템이다. 구조물을 천장과 같은 구조 요소로 나누고 각 구조 요소를 굽힘이나 평면 모드와 같이 다시 섭시시스템으로 나누는 과정을 전 구조물을 모델화할 때까지 계속한다. 건설 장비 차실 구조는 약 100-200 개의 섭시시스템으로 완전히 모델화할 수 있다. 그러나 이보다 적은 약 30개의 섭시시스템을 갖는 작은 모델로도 기초적인 예측을 할 수도 있다. 본 연구에서는 차실 주위의 음향 공간은 위, 아래, 옆, 공기 흡입구, 엔진 공간, 그리고 바닥 밑 공간 등으로 나누었다. 그리고 차실 공간은 운전자의 귀위치, 차실 바닥과 천장에 근접한 공간 등으로 세분하여 차실내의 에너지 분포를 평가하였다. 차실 창과 문 그리고 차실 앞과 뒷 부분은 골격 구조와 패널 구조를 구분하여 특성에 맞는 섭시시스템으로 모델되었다. 차실 바닥과 운전자 자석주위는 특성을 좀더 자세히 살피기 위하여 좀더 자세한 모델링을 수행하였다.

다음은 섭시시스템간의 파워 전달을 가능케 해주는 섭시시스템간의 연결을 정의하여 주는 일이다. 예를 들어 차실 천장의 굽힘 모드는 차실 공간의 음향 모드와 면으로 연결된다. 이러한 연결로 차실 천장의 굽힘 모드에서 실내 공간 음향 모드로의 에너지가 전달되고 반대로 실내 공간 음향 모드로부터 차실 천장 굽힘 모드로 에너지가 전달되게 한다. 전체 차실의 연결에 있어서 구조물의 섭시시스템은 점과 선으로 연결되었고 구조물과 음향 섭시시스템은 면으로 연결부의 특성에 따라 적절히 연결되었다[2].

### 4. 측정 실험 및 결과

SEA 모델에 입력할 진동과 소음이 측정되었다. 측정은 건설 장비가 작동되는 상태의 전 영역에 걸쳐 측정이 되어야 한다. 외부의 소음 크기와 차실 구조가 올려져 있는 마운팅 부의 진동 신호를 이용하여 전 운전 상태에 대한 내부 소음을 예측할 수 있다. 모델의 입력은 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼으로 측정된 수치를 이용하였다. 음향과 진동의 실험을 수행하는 동안 건설 장비의 구동부와 차실 구조에 특별한 주의를 요한다. 에어컨의 팬은

## 5. 설계 민감도 해석 및 결과

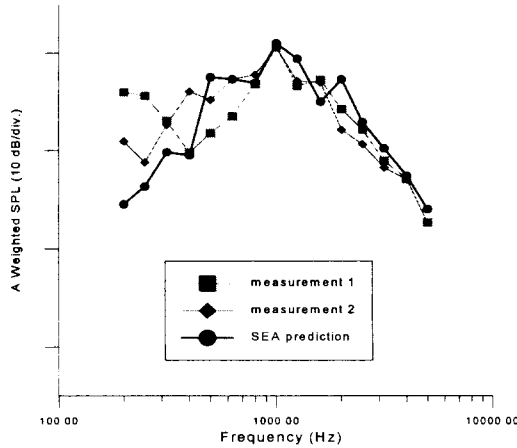


Figure 3. Comparison between the measured and estimated interior noise.

독립된 소음원으로 다뤄져야 하며 대부분의 실험을 수행하는 동안 꺼져 있어야 한다. 그리고 아무리 작은 틈이라도 음향 에너지의 통로가 되기 때문에 모든 개스킷, 문과 창문의 잠김 상태를 세심히 확인하여야 한다. 마지막으로 느슨한 모든 부품은 떨림에 의한 소음원이 되지 않도록 견고히 조여주어야 한다.

소음원의 특징을 구하기 위하여 에어컨이나 다른 통로를 포함한 차실 주위의 모든 영역이 마이크로폰을 이용하여 측정되었다. 그리고 차실내의 음향 응답을 정량화 하기 위하여 운전자의 귀의 위치와 다른 몇 위치에서 측정되었다. 진동 입력을 구하기 위해서는 모든 마운팅 점 그리고 유압선이 연결된 곳 등에서 가속도계를 이용하여 진동이 측정되었다. 차실 구조 SEA 모델에 진동의 전달을 차단하는 부품의 모델도 포함시켜 이의 역할도 살피기 위하여 진동은 건설 장비 구동부 쪽, 다시 말해 마운트의 아래쪽에서 측정되었다. 차실에서의 진동 측정은 차실 바닥, 창문 그리고 마운트의 차실 쪽에서 측정되었다. 이 측정이 모델의 결과와 비교되었다. 모델의 정확성을 검증하기 위하여 차실 내 운전자 귀위치에서 예측된 응답치와 직접 측정된 측정치가 비교되었다. 결과를 Figure 3에 나타냈는데 모델로 예측된 응답치가 대부분의 주파수 영역에서 측정치와 상당히 잘 일치함을 보여준다.

위에서 언급된 바와 같이 SEA 모델을 개발하고 검증한 뒤에 설계 변수에 대한 민감도 해석이 수행되었다. 이 과정을 수행하기 위하여 SEAM-DSA™ 프로그램을 사용하였다. SEA 모델을 이용한 설계 민감도 해석을 수행하기 위하여는 먼저 어떤 응답 변수를 향상시킬 것인가 하는 목표 변수를 정해야 한다. 그리고 그 목표 변수를 향상시킬 가능성이 있는 설계 변수를 검토한다. 여기에는 재질, 흡음재, 크기, 연결부 특성 등을 포함한다.

설계 민감도는 SEA 모델의 응답이 일반적으로 설계 변수에 대하여 비선형이므로 특정 변수의 변화에 대해 다음 식을 이용하여 구한다.

$$S_{ij} = \frac{R_j' - R_j}{X_i' - X_i} \quad (3)$$

여기서  $S_{ij}$ 는 설계 변수  $X_i$ 에 대한 응답 변수  $R_j$ 의 민감도이다.  $R_j'$ 은 설계 변수  $X_i$ 를  $X_i'$ 으로 변경하였을 때의 응답이다. 이때 설계 변수의 폭은 임의로 조절이 될 수 있는데 20% 나 50%의 설계 변수 폭이 주로 사용된다. 그런데 여기서 보여질 민감도는 설계 변수가 두 배될 때 응답의 값이 변하는 정도(dB)를 나타내도록 조정되었다.

전형적으로 관심 있는 응답 변수는 주로 차실내의 음압이나 구조물의 진동이다. 그러나 모달 에너지, 총 파워 그리고 방출되는 에너지도 응답 변수로서 계산된다. 이런 값은 전체 구조물의 응답을 이해하는데 도움을 준다. 본 연구에서는 설계의 목표를 차실내의 음압을 낮추는 것으로 하였다. 그리고 두 가지 설계 변수가 고려되었다. 첫 번째로 차실 구조 마운팅 스프링의 영향이 연구되었다. Figure 4에 나타낸 1000 Hz 영역에서의 파워 흐름 해석을 살펴보면 상당한 양의 파워가 차실 구조 마운팅 부에 연결된 좌석 주변으로부터 차실로 들어온다는 것을 알 수 있다. 마운팅 스프링 상수는 마운트를 통한 에너지 전달을 낮추기 위하여 설계 변수로써 조정될 수 있다. Figure 5는 차실 구조 마운팅의 스프링 상수를 낮출 경우에 대한 민감도를 보여준다. 4 곳의 마운팅 스프링 상수가

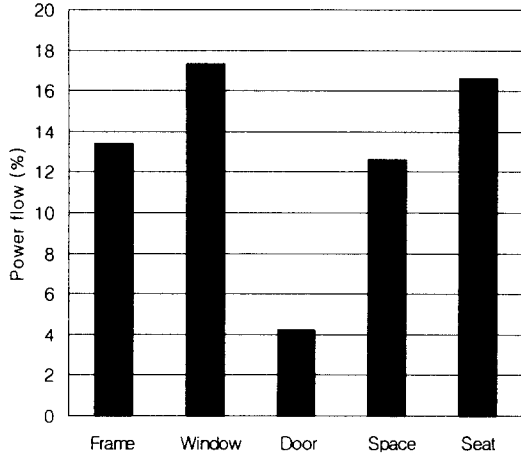


Figure 4. Power flow to interior in 1000 Hz

동시에 낮춰졌다. 실내 소음과 차실 바닥 진동의 예상되는 민감도가 주어졌다. 스프링 상수를 낮춤으로써 800 Hz - 2000 Hz 구간의 실내 소음이 줄어든 것을 알 수 있다. 2000 Hz 이상의 고주파 영역에서는 연결부의 응답이 연결부를 구성하는 접시시스템의 강도에 더욱 영향을 받기 때문에 마운팅 스프링 상수의 영향은 줄어든다.

두 번째 설계 변수로 차실의 바닥을 구성하는 제일 큰 철판의 두께를 변경하여 보았다. Figure 6에 차실 내 소음, 제일 큰 바닥 판의 진동 그리고 주변 판의 민감도를 나타내었다. 두께를 두껍게 하여 늘어난 부가 질량으로 인하여 기대한 대로 바닥 판의 진동은 감소하였다. 민감도가 3dB 정도 되는데 이는 판의 두께를 2배로 하면 판의 진동을 약 반으로 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 실내 음압은 바닥 판의 두께에 그리 민감하지 않다. 여러 주파수 영역에서 실내 음압은 바닥 판의 두께를 증가시키기에 따라 증가한다. 그래서 실제적으로는 두께를 높여 질량을 증대시키면 성능을 악화시키는 결과를 초래한다. 이러한 현상은 주 바닥 판 주변의 판의 진동이 주 바닥 판의 두께가 증가함에 따라 증대됨을 봄으로써 설명되어 질 수 있을 것이다. 바닥 판의 임피던스가 커짐에 따라 더 많은 에너지를 반사시키고 이에 따라 파우어는 주변의 다른 판으로 흘러들어 가는 것이다. 그리고 이 판이 진동이 실내 공간에 소음으로 발산된 것이다.

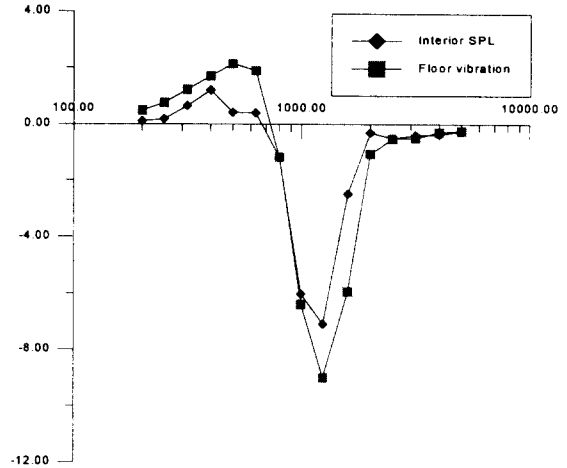


Figure 5. Sensitivity to reduction of cab mount stiffness

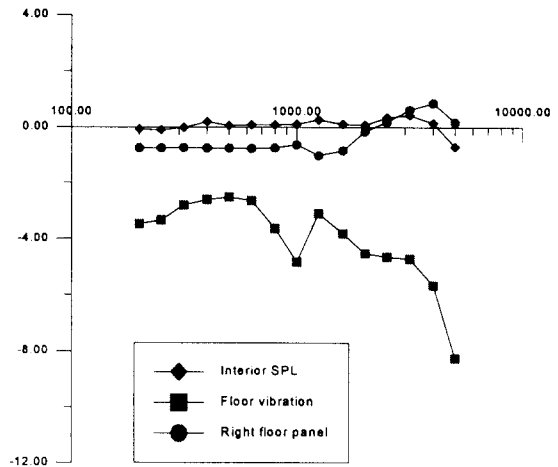


Figure 6. Sensitivity to cab floor thickness

## 6. 결론

본 논문에서는 통계적 에너지 방법을 이용하여 조용한 건설 장비 차실을 설계하는 방법에 대하여 논하였다. 설계의 최적화를 위해 건설 장비 차실의 모델이 먼저 개발되었다. 모델의 진동원, 소음원으로 사용되고 모델의 예측 응답과 비교하기 위하여

차실 마운팅 부와 차실 주위에서 진동과 소음이 측정되었다. 마운팅 조건하에서 측정치와 모델에 의한 예상치가 상당히 잘 일치하고 있음을 보여주었다. 검증된 모델을 이용하여 설계 변수의 민감도 해석이 수행되어 각 설계 변수가 차실 소음에 미치는 영향을 파악하였다. 마운팅 부의 스프링 상수의 감소는 실내 소음 감소에 좋은 결과를 주었으나 차실 바닥 판의 두께 증가는 예상과는 달리 별 효과가 없는 것으로 나타났다. 이는 제품의 모델링과 민감도 해석이 시작품의 제작과 이를 이용한 실험 없이 유용한 설계 변수와 그렇지 못한 설계 변수를 구분시켜주어 제품의 최적 설계에 도움을 준다는 것을 보여주었다.

### 참고문헌

- [1] Theory and Application of Statistical Energy Analysis, R. Lyon and R. DeJong, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Boston, 1995.
- [2] J.E. Manning and K. Weissman, "The Use of Statistical Energy Analysis Modeling in the Design of Quiet Earthmoving and Construction Vehicles", the SAE 44th Annual Earthmoving Industry Conference, Peoria, Illinois, April 20-21, 1993.
- [3] SEAM Manual, Cambridge Collaborative, Inc.

SEAM<sup>®</sup> is a registered trademark and SEAM-DSA<sup>™</sup> is a trademark of Cambridge Collaborative, Inc.