

# SEA에 의한 실선소음 예측 정도에 관한 고찰

°김재승\*, 강현주\*, 김현실\*, 김상렬\*

## On the Accuracy of Shipboard Noise Prediction Using SEA

Jae-Seung Kim, Hyun-Ju Kang, Hyun-Sil Kim, Sang-Ryul Kim

### ABSTRACT

Statistical energy analysis is suitable for shipboard noise prediction in many respects. It could effectively model the large and complicated ship structures for noise analysis. This paper introduces the procedure of SEA for shipboard noise analysis gained from author's experiences in the past few years. Also, prediction accuracies of shipboard noise analysis using statistical energy analysis are discussed. It is found that the prediction results could be much improved when using the actual measured data of source levels and material properties such as loss factors, absorption coefficients and etc..

### 1. 서 론

선박의 소음해석에 통계적에너지 해석법(SEA : Statistical Energy Analysis)이 관심을 끌기 시작한 동기는 1976년 Jensen[1]에 의해 마련되었다. Jensen은 당시의 관심사였던 고체음의 수직전달손실 해석을 위한 이론적 모델로서 SEA를 택하였으며 그는 선체의 수직단면을 27개의 SEA 요소로 분할하여 그 유용성을 입증하였다. 당시에 SEA는 새로운 개념으로서 대부분 2-3개 정도의 SEA 요소를 이용하여 개념적인 차원에서 다루어지고 있었음에 반하여 Jensen의 모델은 선체와 같이 복잡한 구조에 적용하였다는 점에서 그 의의가 있다. 이후 SEA는 선박소음 해석에 활발히 이용되어

국부적인 소음해석 뿐만 아니라 선박 전체를 SEA 모델에 포함시키고 고체음과 공기음을 동시에 다루는 등 현재에는 선박소음 해석기법으로서 확고한 자리를 차지하게 되었다.[2,3]

국내에서도 90년대 초반에 선박소음 해석에 대한 연구에 착수하여 SEA를 근간으로 하는 소음해석 프로그램인 'NASS'[4]를 개발한 이후 최근에는 해석기능을 보완한 'SEANV'[5]로 발전시켜 지금까지 일반 상선과 함정의 방음설계에 활용하고 있다. 상기한 두가지 프로그램은 선박 뿐만 아니라 일반 구조물의 소음해석에도 활용될 수 있으며 특히 복잡한 구조의 SEA 해석 모델링에 유용한 전처리 기능을 갖추고 있다는 특징이 있다.

SEA를 이용한 소음해석에서 가장 시간과 노력이 소요되는 과정은 SEA 요소를 정의하는 일과 이들 요소간의 연결을 정의하는 작업으로서 이 작업에 걸리는 시간은 SEA 요소의 갯수가 증가할수

\* 한국기계연구원 음향연구그룹

록 기하급수적으로 늘어나게 된다. 상기한 전처리 기능은 이 과정을 구조해석용 유한요소 모델에서 얻을 수 있는 기하학적 정보, 즉 절점 좌표와 각 유한요소를 구성하는 절점의 정보를 이용함으로써 선박과 같이 수백개에서 천개가 넘는 SEA 요소로 구성되고 따라서 아주 복잡한 연결정보를 정의하여야 하는 구조물의 SEA 해석을 효과적으로 처리할 수 있다.

본 논문에서는 선박소음해석 전용 SEA 프로그램 사용 경험에서 얻은 SEA의 소음해석 과정을 소개하였으며 각 과정의 처리방법과 지난 수년간 개발 프로그램을 이용해 구한 예측과 측정결과와의 비교를 통해 오차의 원인에 대해 살펴보았다.

## 2. 선박의 SEA 모델

### 2.1 SEA 방정식

$N$ 개의 SEA 요소로 구성되는 SEA 방정식은 다음과 같이 주어진다.[5]

$$\omega [C_{ij}] \{\epsilon_j\} = \{II_{in,i}\} \quad (1)$$

단,  $\omega$ ,  $\{\epsilon_j\}$  및  $\{II_{in,i}\}$ 는 각각 원진동수, 각 요소의 모달에너지 벡터와 입력파워 벡터를 나타내며  $[C_{ij}]$ 는 결합손실계수 행렬로서 다음과 같이 주어진다.

$$C_{ij} = (\eta_i + \sum_{k=1, k \neq i}^N \eta_{ik}) n_i, \quad \text{for } i = j$$

$$- \eta_{ij} n_i, \quad \text{for } i \neq j$$

$$(i, j = 1, \dots, N)$$

$n_i$ 는  $i$ 번째 요소에서 중심주파수가  $\omega$ 인 주파수 밴드내에 포함되는 전체 공진모드 수(mode count)를 의미한다.

(1)은 옥타브 혹은 1/3옥타브 주파수 구간 등 일정 주파수밴드에서 평균개념에 입각하여 각 SEA 요소의 모달에너지인  $\epsilon_j$  사이에 성립하여야 하는 에너지의 평형을 나타내는 식이다. 구체적인 해석 주파수 분할은 중심주파수 31.5Hz에서 8000Hz 까지 모두 9개의 옥타브밴드 주파수 대역에 대하여 계산을 수행하는 것이 일반적인 경향이다.

$\eta_i$ 는 SEA요소  $i$ 에서 소멸되는 음향에너지의 감

쇠를 나타내는 자체손실계수,  $\eta_{ij}$ 는  $i$ 에서  $j$ 요소로 이동되는 음향에너지를 의미하며 요소  $i$ 에서 볼 때에는 또 다른 메커니즘에 의해 발생하는 에너지 손실이 된다. 이러한 현상에 의해 나타나는 에너지 소멸을 특히 결합손실계수라고 하여 자체손실계수와 구분하고 있다.

한편, SEA.요소의 모달에너지  $\epsilon_j$ 는 SEA방정식의 미지수로서 이 값으로부터 곧 해당 요소의 진동에너지인 고체음레벨 혹은 음향에너지인 공기음레벨을 구할 수 있다.

### 2.2 입력파워 벡터, $\{II_{in,i}\}$

입력파워  $II_{in,i}$ 는 SEA요소에 외부 소음원이 존재하는 요소에서만 값을 가지며 단위시간당 해당 요소에 유입되는 에너지를 나타낸다. 선박소음의 경우, 기관실로 모델링된 SEA요소에 대한 입력파워는 주기관을 비롯해 기관실내에 설치된 각종 장비의 음향출력이, 판요소로 모델링되는 기관실 하부 갑판에는 주기관의 고체음 출력이 이에 해당한다. 따라서, 소음해석을 위해서는 고려대상이 되는 모든 소음원 장비의 공기음 및 고체음 출력에 대한 정보를 알고 있어야 한다.

일반적으로 소음원의 음향출력레벨은 비교적 정확히 정의되어 있으며 동시에 여러지점에서 음압을 측정하여 구할 수 있다.

한편, 구조물에 유입되는 고체음출력은 다음과 같이 정의된다.

$$II_{in,stm} = \langle F^2 \rangle Re\{M\} = \langle v^2 \rangle Re\left\{ \frac{1}{M} \right\} \quad (2)$$

여기에서,  $\langle F^2 \rangle$ ,  $\langle v^2 \rangle$  및  $M$ 은 각각 장비가 설치된 지점에서 구조물에 걸리는 제곱평균 힘, 속도와 해당지점에서 구조물의 모빌리티를 나타내고  $Re\{\cdot\}$ 는 실수부를 의미한다.

(2)는 고체음 출력은 장비뿐만 아니라 장비가 설치되는 구조물의 특성에도 관계하고 있음을 말해준다. 그러나, 장비의 고체음 출력은 일반적으로 장비지지점에서의 진동레벨로 표시하고 있어 엄밀한 의미에서 볼 때 SEA의 입력자료에 그대로 이용될 수 있는 값이 아니므로 장비의 진동레벨로부터 구조물의 지지점에서 예상되는 구조물의 진동레벨을 구하는 등 이 문제에 대한 보정이 필요

하다. 이 때 흔히 사용되는 방법으로 무한평판의 모빌리티 값을 사용하고 있다. 또 다른 방법은 해당 SEA요소에서 계산되는 진동에너지레벨이 사전에 주어진 진동레벨로부터 얻어지는 에너지레벨과 일치시켜 주는 것으로 현재 사용중인 프로그램에서는 이 두가지 방법을 사용자의 선택에 따라 사용할 수 있도록 구성되어 있다.

고체음출력에 관한 문제는 물리적인 현상으로부터 예측방법에 이르기까지 해결하여야 할 부분이 많이 남아있는 실정이며, 따라서 공기음출력에 비하여 상대적으로 정확도가 떨어지고 있다.

### 2.3 결합손실계수 행렬, $[C_{ij}]$

본 행렬식은 SEA의 핵심적인 내용을 담고 있는 사항으로 이 값의 추정 가능여부는 곧 SEA의 실용성과 직결된다.

#### 1) Mode count, $n_i$

SEA에서 각 요소간의 에너지 균형은 공진모드에 의해 이루어진다고 가정하고 있다. 이 값은 해당주파수 구간에서 얼마나 많은 수의 공진모드가 에너지 평형에 참여하느냐를 나타내주는 인자로서 SEA방정식은 이 값이 크다는 가정하에서 유도된 것이다. 따라서, SEA는 고주파수 해석에 적합하며 동시에 해석주파수 구간이 넓을수록 좋은 해석정도를 기대할 수 있다.

실제문제에 있어서 선박에서 많이 사용되는 평판이나 공간요소에 대하여는 면적과 체적을 사용하여 간단한 계산에 의해 얻어지는 이론식을 사용하고 있다.

#### 2) 자체손실계수, $\eta_i$

구조요소의 경우, 자체손실계수는 일반 진동에서와 동일한 개념의 감쇠를 의미하나 단지 해당 주파수구간에서의 평균값이라는 차이점이 있을 뿐이다.

한편, 음장 SEA요소에서는 실내 경계면의 흡음력과 관계하며 각 경계면을 이루는 재료의 흡음계수를 사용하여 다음식으로부터 구한다.

$$\eta_i = \frac{c}{4\omega V_i} \sum \alpha_k A_k \quad (3)$$

여기에서  $c$ ,  $V_i$ 는 음속과 실내체적을 나타내고  $\alpha_k$ 와  $A_k$ 는 각 경계면을 이루는 재료의 흡음계수와 해당면적을 의미한다.

SEA프로그램에서 본 계수의 계산은 실험에 의해 얻어진 각 재료의 손실계수와 흡음계수의 옥타브밴드별 값을 수록한 자료뱅크를 이용하거나 사용자가 직접 입력한 값을 이용할 수 있도록 구성되어 있다.

#### 3) 결합손실계수, $\eta_{ij}$

결합손실계수는 SEA모델 요소간의 연성을 나타내 주는 SEA파라미터에 속한다. 여기서, SEA요소란 해석대상인 전체 구조물을 물리적 혹은 개념적인 관점에서 다수의 블럭으로 나누었을 때 하나하나의 블럭을 의미한다. 즉, 전체구조물 혹은 SEA모델은 이들 SEA요소의 집합체로 표현된다.

선박의 경우, SEA요소는 물리적인 관점에서 볼 때 갑판, 격벽, 외판은 평판요소로 선실, 기관실 등 격실은 음장요소로 가정할 수 있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 선박의 구조자체는 매우 복잡하나 이 복잡성은 다루어야 할 SEA요소의 갯수와 요소간의 연결에만 반영될 뿐이다. 이는 SEA의 모델링에 있어서 SEA요소의 분할을 대부분 기하학적 형상에 따른 물리적인 방법에 의존할 수 있기 때문으로서 이 특성은 SEA가 선박소음해석 모델에 적합한 이유중의 하나이다.

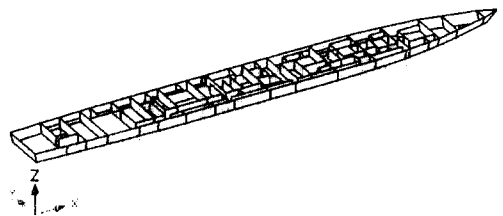


Fig. 1 Typical ship structures on a deck.

반면에, SEA요소의 갯수와 SEA요소간의 연결의 복잡성은 지금까지 많아야 수십개 정도로서 대부분 사용자의 판단에 의존해 SEA 해석모델을 세우는 방법은 실용적 관점에서 더 이상 사용할 수 없다는 단점이 있다. 즉, 선박의 SEA모델은 적게

는 수백개에서 많으면 수천개에 이르며 각 SEA 요소에 연결되는 인접 SEA 요소의 갯수도 수십개를 넘는 경우가 많아 결합손실계수의 산정에 이용되는 결합길이, 결합형태 등 연결상태에 관한 정보를 일반 상용 SEA프로그램에서 사용하고 있듯이 일일이 수작업에 의해 정의하기란 불가능하다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 전처리 프로그램을 개발하였으며 여기에서는 SEA의 결합손실계수 계산에 필요한 연결정보를 각 SEA 요소의 기하학적 정보인 좌표를 이용하여 자동적으로 처리하는 방식을 취하고 있다. 즉, 사용자는 소음해석용 SEA 요소를 모델링할 때 각 SEA 요소를 유한요소 모델링과 동일한 방법으로 취급하고 전처리 프로그램은 유한요소 모델의 입력자료인 절점과 요소의 좌표를 이용하여 결합손실계수 계산에 필요한 모든 정보를 추출한다. 이 때, 추출되는 정보에는 어느 한 SEA 요소에 연결되어 있는 모든 SEA 요소와 연결되는 길이(판요소끼리 연결시) 혹은 면적(판과 공간요소 연결시)은 물론 판요소 연결시에는 +형 연결, T형 연결, L형 연결 등 에너지 전달계수 계산에 필요한 결합형식도 포함된다.

실제 결합손실계수의 계산에는 이상의 결합정보와 각종 음향/구조음향학 이론에서 나타나는 전달손실, 방사효율 등의 계산 결과와 차음패널의 전달손실 계측자료 등 실험으로부터 얻어진 결과가 이용되고 있다.

### 3. 해석정도 비교

여기에 소개되는 비교자료는 모두 함정에 관한 자료로서 앞에서 설명한 SEA 소음해석 프로그램을 이용하여 소음예측이 수행되었으며 동시에 시운전시 계측에 참여해 자료를 얻을 수 있었던 신조 함정 3척으로부터 얻은 자료에 국한시켰다.

일반격실의 소음은 SEA 소음해석에서 고려되는 각종 탑재장비의 소음성분 이외에도 공기조화 장치에서 발생하는 HVAC소음이 중요한 원인의 하나이다. 소음해석시 HVAC소음은 SEA해석과는 별도과정을 거쳐 구한 후 최종결과에 합산된다. 따라서, SEA해석으로부터 얻어진 소음 예측결과 비교에 HVAC소음이 주요 소음성분이 되는 격실의

비교는 의미가 없으므로 비교대상에서 제외시켰다.

Fig. 2에서 Fig. 4는 비교 대상 함정의 SEA 모델과 해석결과와 계측으로부터 얻은 소음레벨의 dB(A)값을 비교한 것이다. 그림에서 실선의 위와 아래에 보인 점선은 일반적으로 선박에서 격실의 측정오차 범위가  $\pm 2\text{dB(A)}$ 로 알려져 있음을 고려하여 예측과 계측값의 차이가  $\pm 3\text{dB(A)}$ 로 가정하였을 때 오차범위를 참고로 나타낸 것이다.

Fig. 2에 보인 함정은 전체 선박에 대한 SEA 소음해석이 최초로 이루어진 것으로 본 함정의 SEA 모델은 799개의 판요소와 124개의 공간요소로 이루어졌다. 예측값과 계측값의 차이는 일반격실은 물론 소음원실에 대하여도 매우 불만스러운 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 예측한 값의 일반적인 경향은 소음레벨이 과도하게 예측되고 있음을 알 수 있으며 이러한 큰 차이점에 대한 한가지 원인은 예측시와 계측시 장비가동 상태와 소음원레벨의 부정확성이 일차적으로 지적되었으나 이에 관한 확인작업은 이루어지지 못하였다.

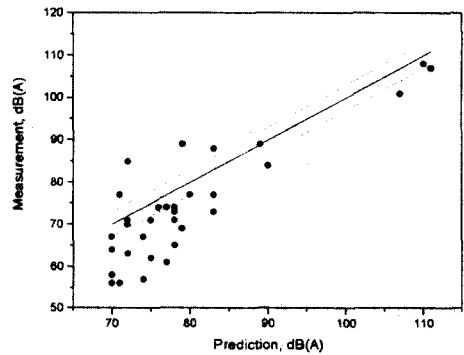
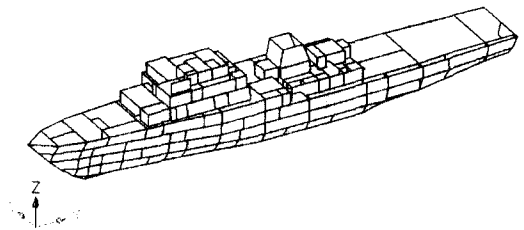


Fig. 2 Prediction error of ship A.

Fig. 3은 A함정보다 약 1년 후에 건조된 함정에 대하여 dB(A)레벨을 비교한 것이다. 따라서, 소음 해석도 동일한 기간 후에 이루어졌다. 본 함정의 SEA모델은 선박의 주요 구조부재를 862개의 판요소로 나타냈으며 격실은 155개의 공간요소로 나타내었다. Fig. 3은 함정 A보다 훨씬 그 예측정도가 향상되었음을 알 수 있다. 해석시, 함정 A와 비교하였을 때 차이점은 소음원레벨로서 경험식 혹은 제작사가 제공한 자료의 사용을 억제하고 주보기를 비롯하여 계측이 가능하였던 탑재장비의 소음원레벨로 가능한 한 실제 계측값을 사용하였으며 이 밖에도 격실에 사용된 흡음재의 흡음계수도 직접 계측한 값을 사용했다는 점을 들 수 있다. 따라서, 함정 A와 함정 B에서 보이는 예측과 계측 사이에 나타난 소음레벨 오차정도의 큰 차이는 대부분 해석에 사용하는 소음원레벨의 부정확성에서 비롯하고 있음을 유추할 수 있다.

그러나, 소음원과 상대적으로 멀리 떨어져 있는 격실에서의 예측 값은 과도하게 추정되고 있음을 보여주고 있다.

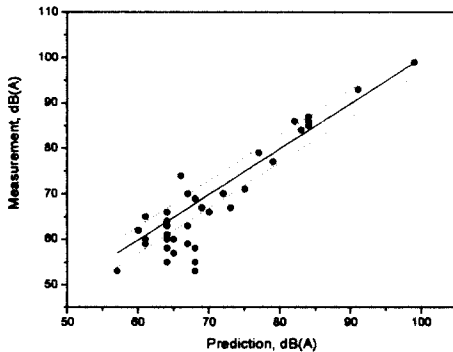
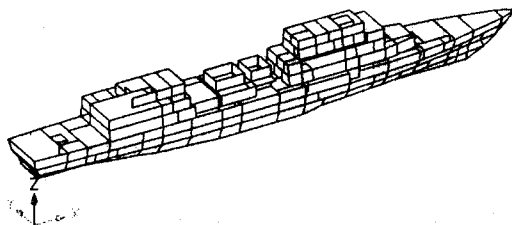


Fig. 3 Prediction error of ship B.

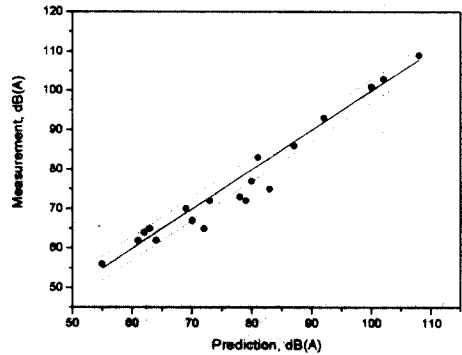
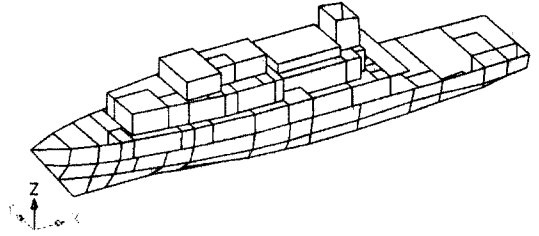


Fig. 4 Prediction error of ship C.

Fig. 4는 가장 최근에 해석과 계측이 수행된 함정에 대한 결과를 보여준다. 본 함정은 함정 A나 B에 비하여 소형함정으로서 SEA모델에는 252개의 판요소와 68개의 공간요소가 사용되었다. 특히 본 함정은 선체의 재질이 일반 함정과는 다른 복합재료를 사용하였으므로 해당 재료의 손실계수 등 물리적 특성을 소음원레벨과 함께 직접 계측하여 적용하였다. 참고로, 타 함정의 경우에는 외국의 문헌에 인용된 값인 프로그램 내부의 자료뱅크를 이용하여 해석이 수행되었다.

본 함정의 예측과 계측 소음레벨의 비교는 훨씬 예측정도가 향상되었음을 보여주고 있다. 대부분의 격실에서 오차  $\pm 3\text{dB(A)}$ 의 오차내에 머무르고 있으며 다른 두 함정에서 나타난 과도한 예측값의 문제도 많이 좋아졌음을 알 수 있다.

이상 3척의 함정에 대한 비교결과로부터 얻을 수 있는 중요한 사항은 SEA를 이용해 선박의 소음해석 정도를 높이기 위해서는 무엇보다도 먼저 해석에 사용되는 각종자료의 정확성이 보장

되어야 함을 알 수 있다. 즉, 현재 사용하고 있는 SEA프로그램 내부에 저장된 자료는 대부분 약 15년 이전에 외국에서 계속된 값을 그대로 이용하고 있는 실정임을 고려할 때, 본 결과는 이의 보완이 시급한 실정임을 시사해 준다.

Fig. 5는 함정 C에 대하여 소음원실과 한 일반 격실의 옥타브 밴드별 소음레벨을 비교한 것으로 밴드레벨 또한 비교적 잘 맞고 있음을 보여주고 있다.

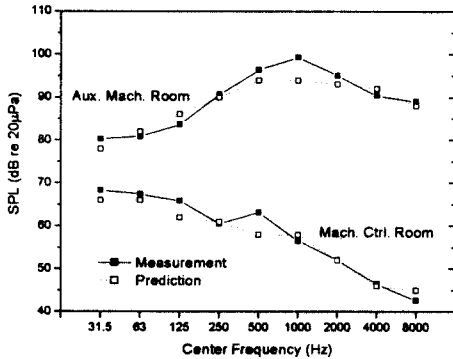


Fig. 5 Comparison of octave band level.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 SEA를 선박소음 해석에 적용할 때 고려되어야 할 사항과 이의 처리방법에 대하여 살펴보았다. 동시에, SEA를 이용해 예측된 결과와 실선에서 계속된 소음레벨을 비교하여 계산정도에 큰 영향을 주는 인자를 검토하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) SEA는 선박소음 해석에 적합한 방법으로 서 전체 소음레벨은 물론 밴드레벨 예측에서도 유용한 값을 줄 수 있으나, SEA파라미터 산정시 과거에 외국에서 발표된 자료를 사용할 경우 큰 오차를 초래할 수 있다.

2) 소음원레벨의 정확도는 계산정도에 가장 영향을 주는 인자로 나타나므로 가능한 한 실제 측정자료의 이용이 바람직하다.

3) 소음의 전파와 소멸에 관계하는 손실계수는 소음원실과 멀리 떨어진 격실에서의 소음레벨 예

측에 영향을 미친다.

4) 따라서, 국내에서 개발 활용되고 있는 선박 소음해석 SEA프로그램의 예측 정도를 높이기 위해서는 현재 국내에서 사용되는 탑재장비의 소음원레벨 등 우리 고유의 관련 자료축적이 시급히 요구되고 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Ødegaard Jensen, "Calculation of structureborne noise transmission in ship using the 'statistical energy analysis' approach", Proc. of ISSA 1976.
- [2] P. T. Hynnä, P. J. Klinge, and J. Vuoksinen, "Prediction of structure-borne sound transmission in large welded ship structures using Statistical Energy Analysis", J. Sound & Vib., 180(4), pp.583-607, 1995.
- [3] Y. Irie and T. Nakamura, "Prediction of structure-borne sound transmission using Statistical Energy Analysis", Bulletin of the Marine Engineering Soc. in Japan, 13(2), 1985.
- [4] "SEA법을 이용한 선박소음해석 시스템 개발", 김재승, 강현주, 김현실 외, 한국기계연구원 보고서, BSI1011(1), 1994.
- [5] J. S. Kim, H. S. Kim, H. J. Kang, and S. R. Kim, "Effects of inplane modes in SEA on structure-borne noise transmission in ship structures", Proc. of 4th ICSV, pp.214-224, St. Petersburg, Russia, June, 1996.