

# 접수 구조물의 연성손실계수 변화에 관한 연구

## A Study on the Characteristics of Coupling Loss Factor Associated with Fluid Loading

류 정 수\*  
(Jeong-Suh Ryu\*)

\* 국방과학연구소

(접수일자: 2000년 7월 3일; 채택일자: 2000년 7월 20일)

항공기나 선박과 같은 복잡한 구조물의 광대역 진동, 소음 예측을 위해 통계에너지해석법(SEA)이 널리 이용되고 있다. SEA를 이용해 접수 구조물의 진동, 소음을 정확히 해석하기 위해서는 접수에 의한 각 파라미터의 변화를 알아야만 한다. 본 연구에서는 기본 결합 요소인 'L'형과 'T'형 선결합 구조물에서 접수를 고려한 연성손실계수를 해석하고 공기중 진동시의 해석 결과와 비교하였다. 또한 'L'형, 'T'형 선결합을 가지는 단순한 형상의 steel box가 수중에서 진동하는 경우에, 접수에 의한 연성손실계수 변화가 세부시스템의 진동에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 통해, 구조물이 접수될 때 발생하는 연성손실계수의 변화를 확인하였으며, SEA를 이용한 접수 구조물의 진동 및 소음 해석시 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 접수에 의한 모드밀도, 내부손실계수 변화와 더불어 접수에 의한 연성손실계수 변화를 반드시 고려하여야 함을 확인하였다.

핵심용어: 통계에너지해석법, 파워투과계수, 연성손실계수, 접수효과, L형 선결합, T형 선결합

투고분야: 구조음향 및 진동 분야(11.1)

Statistical Energy Analysis(SEA) is an efficient tool to predict the broadband noise and vibration for the huge and complex structures such as aircraft and ships. To estimate the noise and vibration by using SEA accurately, the characteristics of SEA parameters associated with fluid loading have to be investigated. In this report, the fluid loaded coupling loss factors were calculated for an 'L' and 'T' type line connections and compared to the ones without fluid loading. Then, the vibration levels for steel box model with 'L' and 'T' type line connection were computed using the fluid loaded and no fluid loaded coupling loss factors, respectively. As a result, the calculated vibration levels of the model using the fluid loaded coupling loss factors were lower than those without fluid loading. As a conclusion, it is necessary to use the fluid loaded coupling loss factors for increasing the prediction accuracy on the noise and vibration of immersed structures.

Key words: SEA, Power transmission coefficient, Coupling loss factor, Fluid loading effect, L type line connection, T type line connecton

### I. 서 론

함정에서 발생하는 수중방사소음을 감소시키기 위해서는 기계류에서 발생되어 선체로 전달되는 진동수준을 예측하는 작업이 필수적이다. 그러나, 함정의 방사 소음 해석에 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM)과 같은 전통적인 수치해석 기법을 이용할 경우 중, 고주파수 대역 해석에 많은 시간이 소요되고 해석 오차가 증가하게 된다. 따라서, 근래에는 통계적인 방법을 이용하여 진동에너지의 평균적인 변화를 예측하는 통계에너지해석법(Statistical Energy Analysis, SEA)[1]이 제시되어 항공기나 선박과 같이 복잡한 기계 구조물의 고주파수 대역 진동 및 소음 해석에 널리 이용

되고 있다. 특히, 수중에서는 매질의 밀도와 음파 전파 속도의 증가로 인해 SEA 적용 주파수 대역이 공기중 해석시보다 저주파수 대역으로까지 확대되므로, 접수 구조물의 진동, 소음을 해석하는데 SEA는 유용한 도구가 될 수 있다.

SEA에 사용되는 매개변수는 모드밀도(modal density), 내부손실계수(internal loss factor), 연성손실계수(coupling loss factor)이며, 이 중 연성손실계수는 세부시스템 간의 에너지 흐름을 해석한다는 SEA의 기본 가정에서 유도된 중요한 인자이다. 구조물이 물과 접하는 경우에는 세부시스템 사이의 에너지 흐름이 공기중 진동시와는 달라지므로 구조물의 연성손실계수도 주위 매질에 따라 바뀔 것이다.

그러나, 접수 구조물에 대한 SEA 적용시 많은 경우 공기 중에서 구한 연성 손실 계수를 그대로 사용하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 접수된 구조물에서 발생하는 연성손실계수의 변화를 산출하고, 접수시 연성손실계수 변화가 세부시스템의 진동에 미치는 영향을 간단한 예제모델을 통해 살펴보았다. 세부시스템 사이의 결합 모델로는 평판으로 연결된 'L'형, 'T'형 선결합(line connection)을 선정하였고, 시스템 적용을 위한 구조모델로는 내부에 격벽을 가진 단순한 steel box를 선정하여 해석하였다.

II. 결합 형태에 따른 접수시 연성손실계수

2.1. SEA 기본 이론

N개의 세부시스템(subsystem)으로 이루어진 전체시스템에 대한 파워평형식은 다음과 같다[1].

$$W_{i,in} = W_{i,diss} + \sum_{j=1}^N (W_{ij} - W_{ji}) \quad (1)$$

$$W_{i,diss} = \omega \eta_i E_i = \omega \eta_i n_i \Delta \omega E_i^m \quad (2)$$

$$W_{ij} = \omega \eta_{ij} E_i = \omega \eta_{ij} n_i \Delta \omega E_i^m \quad (3)$$

여기서,  $W_{i,in}$ 는 세부시스템  $i$ 에 입력되는 파워,  $W_{i,diss}$ 는 세부시스템  $i$ 에서 소실되는 파워,  $W_{ij}$ 는 세부시스템  $i$ 에서  $j$ 로 전달되는 파워,  $\eta_i$ 는 세부시스템  $i$ 의 내부손실계수,  $\eta_{ij}$ 는 세부시스템  $i$ 와  $j$ 의 연성손실계수,  $n_i$ 는 세부시스템  $i$ 의 모드밀도,  $\omega$ 는 주파수 밴드의 중심주파수,  $\Delta \omega$ 는 주파수 밴드폭,  $E_i$ 는 세부시스템  $i$ 의 에너지,  $E_i^m$ 는 세부시스템  $i$ 의 모드당 에너지이다. 식 (3)에서 세부시스템  $i$ 와  $j$ 사이에는 다음과 같은 가역정리가 성립된다.

$$\eta_{ij} n_j = \eta_{ji} n_i \quad (4)$$

식 (1)~(4)를 이용하여 한 밴드 내의 파워평형식을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\omega [a_{ij}] [E_i^m] = [W_{i,in}] \quad (5)$$

$$a_{ij} = n_i \sum_{k=1}^N \eta_{ik} \quad (i=j)$$

$$= -n_i \eta_{ij} \quad (i \neq j) \quad (6)$$

식 (5)로부터 구한 각 세부시스템의 수직방향 속도성분(normal velocity)은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\langle v_n^2 \rangle = \frac{E_i}{m_i} \quad (7)$$

여기서  $m_i$ 는 세부시스템  $i$ 의 질량이며,  $\langle \rangle$ 는 시간과 공간에 대해 평균화된 값을 의미한다.

2.2. 선결합된 평판 구조의 연성손실계수

평판이 수직하게 연결된 선결합 구조에서 입사파가 결합선에 수직하게 입사된다고 가정하면, 입사파는 결합부를 통해 굽힘파(bending wave)와 종파(longitudinal wave)의 두 가지 진동 형태로 표현된다.

선결합을 이루는 두 세부시스템에 전달파 이론을 이용하여 얻은 연성손실계수  $\eta_{ij}$ 는 식 (8)과 같다[1][2].

$$\eta_{ij} = \frac{C_{gi} L_{ij}}{2\pi^2 f S_i} \tau_{ij} \quad (8)$$

여기서  $\tau_{ij}$ 는 파워투과계수,  $C_g$ 는 그룹속도,  $L$ 은 결합길이,  $f$ 는 주파수(Hz),  $S$ 는 세부시스템의 면적이다. 그룹속도는 접수시 발생하는 평판의 모드밀도 변화에 의해 영향을 받으며 굽힘파인 경우 접수효과는 아래 식으로 표현된다[3].

$$C_g = 2C_b = \omega^{1/2} \left( \frac{D}{\rho h (1 + \epsilon)} \right)^{1/4} \quad (9)$$

$$\epsilon \approx \frac{\rho_0 C_l}{\sqrt{12(1-\nu^2)\rho c_0}} \frac{1}{M_f} \quad (10)$$

$$M_f = \sqrt{\frac{\omega}{\omega_c}} \quad (11)$$

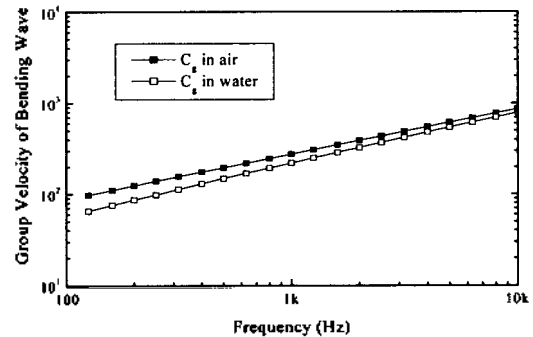


그림 1. Steel plate에서 전파되는 굽힘파의 그룹속도( $C_g$ )

( $h=2\text{ mm}, S=1\text{ m}^2$ )

Fig. 1. The group velocity of the bending wave in steel plate ( $h=2\text{ mm}, S=1\text{ m}^2$ ).

여기서  $C_b$ 는 굽힘파 전파속도,  $\epsilon$ 은 접수시 부가질량,  $D$ 는 굽힘강성,  $h$ 는 평판의 두께,  $\nu$ 는 프와송비,  $M_f$ 는 굽힘파 Mach수로써 음속에 대한 평판 굽힘파의 전파 속도비이다. 접수된 steel plate에서 전파되는 굽힘파의 그룹

속도 변화를 Fig. 1에 나타내었다.

파워투과계수  $\tau_{ij}$ 는 세부시스템의 재질, 두께 및 선결합 형태에 따라 달라진다. 결합 형태에 따른 세부시스템의 파워투과계수는 Wohle[4] 등이 제시한 모델링 방법을 이용해 산출하였다. 평판의 길이에 비해 두께가 두껍지 않은 경우, 진동 에너지는 대부분 굽힘파의 형태로 투과되므로 본 연구에서도 굽힘파에 의한 파워 투과만을 계산하였다. 이하의 내용에서 연성손실계수의 하첨자 a는 공기중 진동을, w는 접수시 진동을 의미한다.

2.2.1. 'L'형 선결합 구조

'L'형 선결합 구조의 결합부 모델과 각 세부시스템의 좌표는 Fig. 2에 나타내었다. 크기  $v_0$ 의 굽힘파가 세부시스템 1에 입사될 때 결합부를 통하여 각 세부시스템에 전달되는 굽힘파의 속도 성분은 식 (12), 식 (13)으로 표현된다.

$$v_{y1} = v_0 [ e^{-ik_1x_1} + r e^{ik_1x_1} + r_d e^{-k_1x_1} ] \tag{12}$$

$$v_{y2} = v_0 [ t_2 e^{-ik_2x_2} + t_{2d} e^{-k_2x_2} ] \tag{13}$$

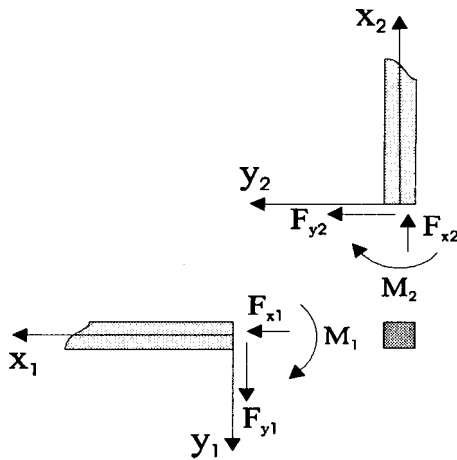


그림 2. 'L'형 선결합 모델링  
Fig. 2. The 'L' type line connection modeling.

여기서  $r$ 은 반사계수,  $r_d$ 는 감쇠파 반사계수,  $t$ 는 투과계수,  $t_d$ 는 감쇠파 투과계수이며,  $k$ 는 굽힘파의 파수이다. 'L'형 선결합의 결합부에서 가지는 경계 조건은 다음과 같다.

$$v_{x1} = v_{y2}, v_{y1} = -v_{x2} \tag{14}$$

$$F_{x1} + F_{y2} = 0, F_{y1} - F_{x2} = 0 \tag{15}$$

$$M_{x1} + M_{x2} = 0, \omega_1 = \omega_2 \tag{16}$$

평판에 작용하는 힘  $F_x, F_y$  와 모멘트  $M_x$ 는 다음 관계식으로 표현된다.

$$\frac{\partial F_x}{\partial t} = -m' C_l^2 \frac{\partial v_x}{\partial x}, F_y = -\frac{\partial M_x}{\partial x} \tag{17}$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2}, D = \frac{m'}{\omega^2} C_l^4 \tag{18}$$

여기서  $E$ 는 평판의 영계수,  $m'$ 는 단위면적당 질량,  $C_l$ 은 종파진파속도이다.

이상의 관계식들로부터 'L'형 선결합이 가지는 반사계수와 투과계수를 얻을 수 있다. 'L'형 선결합의 두 세부시스템이 모두 물과 접하고 두 세부시스템의 형상이 동일할 때, 접수에 의한 연성손실계수의 변화율은 Fig. 3과 같다.

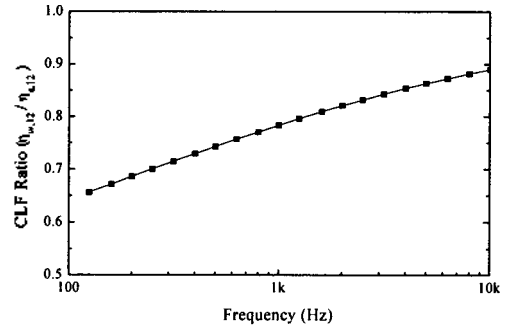


그림 3. 접수에 따른 'L'형 선결합된 평판의 연성손실계수 변화율 ( $h=2\text{ mm}$ )  
Fig. 3. The coupling loss factor ratio of 'L' type line connection due to fluid loading ( $h=2\text{ mm}$ ).

2.2.2. 'T'형 선결합 구조

'T'형 선결합 구조의 결합부 모델과 각 세부시스템의 좌표는 Fig. 4에 나타내었다. 세부시스템 1과 3은 구조물 외부의 물과 접하고 세부시스템 2는 구조물 내부의 공기와 접하는 일반적인 'T'형 선결합의 접수형태에 대해 해석하였다. 각 세부 시스템에 전달되는 굽힘파 속도 성분은 아래 식으로 표현된다.

$$v_{y1} = v_0 [ e^{-ik_1x_1} + r e^{ik_1x_1} + r_d e^{-k_1x_1} ] \tag{19}$$

$$v_{y2} = v_0 [ t_2 e^{-ik_2x_2} + t_{2d} e^{-k_2x_2} ] \tag{20}$$

$$v_{y3} = v_0 [ t_3 e^{-ik_3x_3} + t_{3d} e^{-k_3x_3} ] \tag{21}$$

결합부에서 주어지는 경계 조건은 아래와 같다.

$$v_{x1} = v_{y2} = -v_{x3}, v_{y1} = -v_{y2} = -v_{y3} \tag{22}$$

$$F_{x1} + F_{y2} - F_{x3} = 0, \quad F_{y1} - F_{y2} - F_{y3} = 0 \quad (23)$$

$$M_{x1} + M_{x2} + M_{x3} = 0, \quad \omega_1 = \omega_2 = \omega_3 \quad (24)$$

위 관계식들로부터 ‘T’형 선결합의 반사계수와 투과계수를 얻을 수 있다.

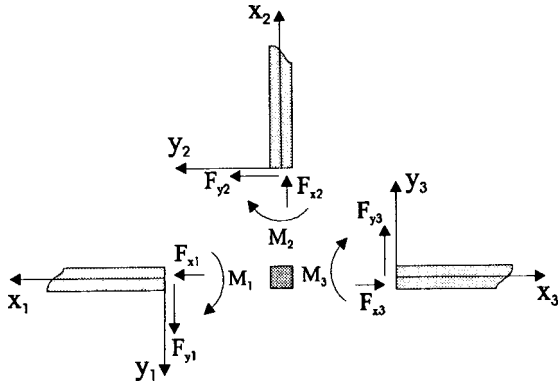


그림 4. ‘T’형 선결합 모델링.  
Fig. 4. The ‘T’ type line connection modeling.

‘T’형 선결합이 접속되었을 때는  $\tau_{w,12}$ 와  $\tau_{w,13}$ 의 차가  $\tau_{a,12}$ 와  $\tau_{a,13}$ 보다 더욱 크게 나타났는데, 이것은 세부시스템 1과 3에 접속으로 인한 부가질량이 작용하여 단위면적당 질량( $m' = \rho h$ )이 증가하였기 때문이다. 따라서, 접속시 세부시스템 1에서 2로 투과되는 파워는 감소하고 세부시스템 3으로 투과되는 파워는 증가하게 된다. Fig. 5에는 접속으로 인한 연성손실계수의 변화율을 표현하였다. 접속으로 인한 연성손실계수 변화는 저주파수에서 크게 발생하고 있는데, 이는 부가질량의 영향이 저주파수에서 크게 나타나기 때문이다. Fig. 5를 보면  $\eta_{w,12}$ 는 접속으로 인해 전 주파수 대역에서  $\eta_{a,12}$ 보다 현저히 크게 변하고 있다. 이러한 현상은 파워투과계수와 그룹속도 변화를 통해 이해할 수 있다.  $\eta_{w,13}$ 은 접속으로 인해 파워투과계수가 증가되지만 그룹속도는 감소되므로 접속으로 인한 연성손실계수의 변화는 크지 않으며, 고주파수 대역에서는  $\eta_{w,13}$ 가  $\eta_{a,13}$ 보다 커지는 현상을 보인다. 이와는 반대로  $\eta_{w,12}$ 는 파워투과계수와 그룹속도가 모두 감소하므로  $\eta_{a,12}$ 와 비교해 큰 차이를 가지게 된다. 이러한 결과로부터 세부시스템 1에서 세부시스템 2, 3으로 파워가 투과되는 경우, 연성손실계수에 접속의 영향이 크게 나타남을 확인할 수 있다.

접속된 ‘T’형 선결합에서는 세부시스템의 형상이 같더라도 접속 효과로 인해 식 (8)과는 달리  $\tau_{w,12}$ 와  $\tau_{w,21}$ 이 다른 값을 가지게 된다. 따라서, 입사파가 어느 세부시스템에 주어지느냐에 따라 파워투과계수에 큰 차이가 발생

함을 알 수 있다. 세부시스템 2에 입력파워가 유입되어 세부시스템 1과 3으로 투과되는 경우, 접속으로 인한 연성손실계수의 변화율을 Fig. 6에 표현하였다.  $\eta_{21}$ 도 접속으로 인해 저주파수에서 큰 변화를 보이며 고주파수로 갈수록 줄어드는 경향을 가진다.

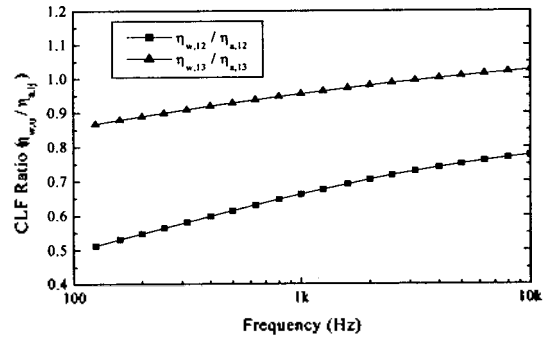


그림 5. 접속에 따른 ‘T’형 선결합된 평판의 연성손실계수 변화율 ( $h=2\text{ mm}$ )  
Fig. 5. The coupling loss factor ratio of ‘T’ type line connection due to fluid loading ( $h=2\text{ mm}$ ).

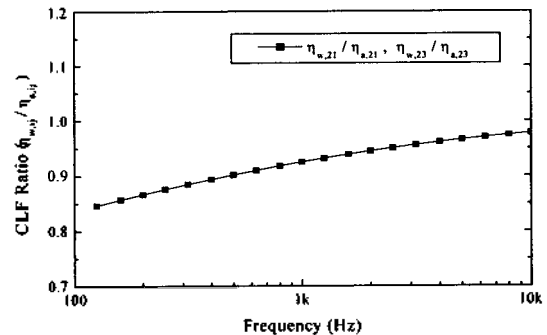


그림 6. 접속에 따른 ‘T’형 선결합된 평판의 연성손실계수 변화율 ( $h=2\text{ mm}$ )  
Fig. 6. The coupling loss factor ratio of ‘T’ type line connection due to fluid loading ( $h=2\text{ mm}$ ).

### III. ‘L’형, ‘T’형 선결합 구조를 가진 steel box 모델링

접속으로 인한 연성손실계수의 변화가 전체 구조물의 진동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 앞 장에서 살펴본 ‘L’형, ‘T’형 선결합으로 이루어진 steel box를 모델링하였다 (Fig. 7). box 모델은 한 변의 길이가 1m인 11개의 정사각형 평판으로 구성되며, 세부시스템들은 두께가 2mm, 면적이 1m<sup>2</sup>으로 모두 동일하다. 입력파워는 1/3 옥타브 밴드로 전 주파수 대역에서 60dB(re 1x10<sup>-12</sup> watt)이며, 세부시스템 1에 주어진다고 가정하였다.

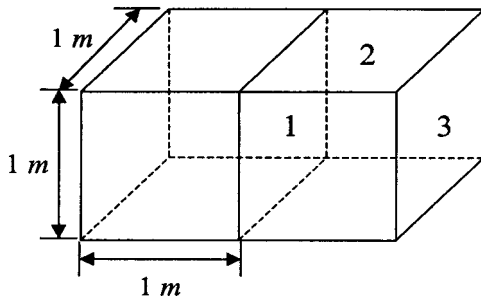


그림 7. 'T'형과 'L'형 선결합으로 이루어진 steel box 모델  
Fig. 7. The steel box model with the 'T' and 'L' type line connection.

먼저, 접수로 인한 모드밀도와 내부손실계수의 변화를 살펴보자. 단순 사각 평판의 모드밀도는 식 (25)와 같다.

$$n(f) = \frac{\sqrt{3}S}{hC_1} \quad (25)$$

평판이 접수되면 부가 질량이 발생하여 굽힘파 전파 속도가 달라지게 된다. 접수시 평판에서 전파되는 굽힘파 전파 속도는 식 (9)에 표현하였다. 평판에서 굽힘파 전파 속도와 종파 전파 속도는 식 (26)과 같은 관계를 가진다.

$$C_1 = \frac{\sqrt{3}C_2^2}{\pi f h} \quad (26)$$

따라서, 식 (25)를 이용해 접수된 평판의 모드밀도를 계산할 수 있다.

접수된 세부시스템의 내부손실계수는 세부시스템이 가지는 감쇠에 의한 감쇠손실과 주위 매질로의 음향 방사에 의한 부가손실의 합으로 표현된다. 세부시스템의 감쇠손실은 Yoshiko[5]가 제시한 실험식을 이용하였다.

$$\eta_d = 0.041 f^{-0.7} \quad (27)$$

세부시스템에서 수중으로 방사되는 음향 파워에 의한 부가손실은 Maidanik의 방사효율( $\sigma$ )을 이용하여 다음과 같이 표현된다[6].

$$\eta_{rad} = \frac{\rho_0 C_0 \sigma}{\omega m^2} \quad (28)$$

위의 식 (25)~(28)에서 구한 접수시 모드밀도, 내부손실계수와 앞 장에서 구한 연성손실계수를 이용하여 세부시스템의 진동을 계산하였다. 접수된 steel box의 진동 해석에  $\eta_{a,i}$ 와  $\eta_{w,i}$ 를 사용하여 구한 세부시스템 1, 2, 3의 속도레벨을 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 해석 결과,  $\eta_{a,i}$ 를 이용해 구한 세부시스템 2와 3의 속도레벨이  $\eta_{w,i}$ 를 이용해 구한 속도레벨보다 높게 나타났다.

앞 장에서 살펴보았듯이 구조물이 접수되면 연성손실계수가 대부분 감소하였다. 연성손실계수가 낮아진다는 것은 세부시스템들 사이에 전달되는 파워가 줄어든다는 것을 의미한다. 그러므로  $\eta_{w,i}$ 를 이용하여 구한 세부시스템 2와 3의 속도레벨이  $\eta_{a,i}$ 를 이용하여 구한 진동레벨보다 낮아지며, 본 연구에서 이용한 간단한 steel box 구조물에서도 그 차이는 약 2~3dB 정도로 크게 나타났다. 더욱이, 세부시스템 3의 진동레벨 차이가 세부시스템 2에서 발생한 진동레벨 차이보다 크게 나타나고 있어, 세부시스템을 지날수록 연성손실계수에서 발생한 오차가 누적되는 것을 알 수 있다. 따라서, 접수 구조물에 대한 SEA 해석에는 반드시  $\eta_{w,i}$ 를 사용해야 한다.

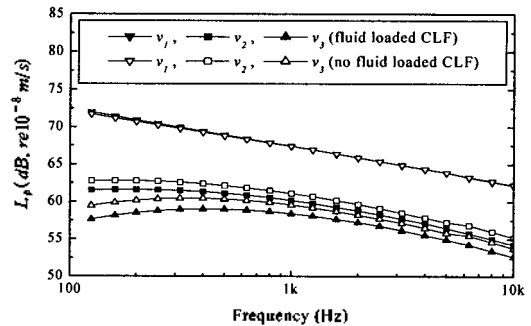


그림 8. 연성손실계수 변화에 따른 세부시스템의 속도 변화 ( $h=2\text{ mm}, S=1\text{ m}^2$ )

Fig. 8. The velocity variations of the subsystem caused by the difference between fluid loaded and no fluid loaded coupling loss factor ( $h=2\text{ mm}, S=1\text{ m}^2$ ).

#### IV. 결 론

본 연구에서는 SEA를 이용한 접수 구조물의 진동 해석 시 접수에 의한 연성손실계수 변화가 해석 결과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 'L'형, 'T'형 선결합에 대한 접수시 연성손실계수 변화를 산출하고, 간단한 steel box 모델에 대해 진동레벨을 계산하였다. 접수된 steel box 모델에 공기중 연성손실계수와 접수시 연성손실계수를 적용하여 진동을 해석한 결과, 공기중 연성손실계수를 이용하여 구한 속도레벨이 접수시 연성손실계수를 이용하여 구한 속도레벨보다 약 2~3dB 높게 나타났으며, 이러한 오차는 세부시스템을 지날수록 증가하는 것을 확인하였다. 따라서, 선박과 같이 많은 세부시스템들로 구성된 복잡한 접수 구조물의 진동 및 소음 해석에 공기중 연성손실계수를 이용하는 경우, 오차가 누적되어 해석 결과에 큰 오차가 발생할 것으로 판단된다. 특히, 공기중 연성손실계수를 사용하면 해석 결과가 과도하게 예측되므로, 함정과 같은 접수 구조물의 경우에는 과도예측된 진동수준으로 인해 함정의 성능 및 구조를 변경해야하는 등의 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서, SEA를 이용한 접수 구

조물의 진동 및 소음 해석시 해석의 정도를 향상시키기 위해서는 연성손실계수에 점수의 영향을 반드시 고려해 주어야 함을 확인하였다. 또한, 점수효과가 고려된 연성손실계수를 사용하면 SEA가 큰 오차를 보이는 중, 저주파수 대역에서 해석 결과에 대한 신뢰성을 높일 것으로 판단된다

### 참고문헌

1. R. H. Lyon, *Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems*, MIT, 1975.
2. Vibro-Acoustic Sciences Ltd., *AutoSEA Theory and Quality Assurance Manual*, Vol. 1, pp. 5-2, 1995.
3. D. Ross, *Mechanics of Underwater Noise*, Peninsula Publishing, Los Altos, pp. 162-166, 1987.
4. W. Wohle, TH. Beckmann and H. Schreckenbach, "Coupling Loss Factors for Statistical Energy Analysis of Sound Transmission at Rectangular Structural Slab Joints," Part I, *J. Sound Vib.* 77, pp. 323-334, 1981.
5. Yoshiko Irie, "Prediction of Structure Borne Sound Transmission Using Statistical Energy Analysis," *Bulletin of the M.E.S.J.*, Vol.13, pp. 60-73, 1984.
6. F. Fahy, *Sound and Structural Vibration*, Academic Press, pp. 65, 1985.

▲ 류 정 수(Jeong-Suh Ryu) 1969년 9월 5일생



1995년 2월 : 부산대학교 기계설계  
공학과(학사)

1997년 2월 : 한국과학기술원 기계  
공학과(석사)

1997년 2월 ~ 국방과학연구소 연구원

※ 주관심분야 : 구조음향, 수중방사  
소음