

< 논 문 >

# 진동파워를 이용한 다차원 진동절연계 해석시 절연요소의 파동효과를 고려한 등가강성화

## Equivalent Stiffness Modeling of Isolators to Consider Wave Effects in Multi-dimensional Vibration Isolation Analysis, via Vibrational Power

최 규 상\*\* · 이 호 정\* · 김 광 준\*\*

Gyu-Sang Choe, Ho-Jung Lee and Kwang-Joon Kim

(1999년 1월 18일 접수 : 1999년 3월 27일 심사완료)

**Key Words** : Vibrational Power(진동파워), Vibrational Power Isolation Effectiveness(진동파워 절연효율), Isolator Mass(절연요소 질량), Equivalent Complex Stiffness(등가강성), Wave Effect(파동 효과)

### ABSTRACT

Mathematical formulas for multi-dimensional isolation analysis via vibrational power transmission can be derived in a rather simple form when the wave effects of the isolators are completely neglected. With increase of frequency range of interest, however, the wave effects play a very important role and, hence, cannot be neglected. The formulas get involved accordingly. In this study, a method of equivalent stiffness modeling of the isolators to include the wave effects is proposed in such a way that not only the complexity of the mathematical expressions but also that of experiments of necessity can be reduced. This method is illustratively applied to a two-dimensional vibration isolation system with nonrigid source and base structures

### 1. 서 론

가진부-진동 절연부-수진부로 이루어진 진동 절연계의 해석에 있어서, 가진부와 수진부가 강체이고 한 지점, 한 방향에 대해서만 관심을 가지고 있다면 힘이나 속도의 전달률로써 절연요소의 성능을 평가할 수 있다. 그런데, 실제 진동 절연계에서는 흔히 가진부가 여러 개의 절연요소에 의해 수진부에 설치될 뿐만 아니라, 관심 주파수 범위가 높을 경우 가

진부나 수진부의 탄성에 의한 영향 그리고 가진부나 수진부의 각 절연요소 연결점들 사이의 연성효과를 무시하기 힘들다. 이와 같은 경우에는 하나의 절연요소만을 대상으로, 한 지점, 한 방향만을 고려한 전달률만으로써 진동 절연 성능을 평가하는 것은 부적절하기 때문에 다차원 해석을 도입하게 된다.

진동 절연계에 대한 다차원 해석의 경우, 수진부로 전달되는 진동파워를 직접 이용하는 방법<sup>(1)</sup>, 절연요소와 수진부의 연결점에서의 속도와 결합구조물로부터 간접적으로 얻어진 수진부의 모빌리티를 이용하여 수진부로 전달되는 진동파워를 추정하는 방법<sup>(2)</sup>, 절연요소들의 설치 유무에 따른 수진부의 속도(또는 수진부로 전달되는 힘) 벡터의 관계식으로

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

정의되는 효율(effectiveness) 행렬의 특이치를 이용하거나<sup>(3)</sup> 또는 절연요소의 설치 유무에 따라 수신부로 전달되는 진동 파워의 비인 진동파워 절연효율을 이용하는 방법<sup>(4)</sup> 등이 제안되고 있다. 그런데, 다차원 해석이나 수신부로 전달되는 진동파워 해석에 있어서 종종 절연요소를 질량이 없는 것으로 가정하고 있는데<sup>(3-6)</sup>, 이와 같이 가정하면 수식의 전개 및 진동 절연 성능의 해석은 간단해지나 절연요소의 질량에 의한 영향인 파동 효과(wave effect)가 배제된다. 이러한 파동 효과가 나타나는 주파수 부근에서는 전달률이 급격히 증가하고 진동 절연 성능이 저하된다는 것은 널리 알려져 있다<sup>(7)</sup>. 특히 1차원 절연계의 절연부 질량의 영향을 고려한 절연부 모형화가 시도된 적이 있었으나 수식의 복잡성은 여전히 존재하였다<sup>(8)</sup>. 이를 무시하였을 때 실제 절연요소의 진동절연 성능 평가에 있어서 많은 오차를 유발할 수도 있음을 짐작할 수 있다.

이에 본 논문에서는 절연요소의 질량을 무시하기 때문에 발생하는 오차를 줄일 수 있으면서 수식적 전개 및 해석의 간결성은 유지할 수 있는 방법으로 절연요소의 질량을 반영한 등가탄성체로 모형화하는 방법을 제안하고자 하며, 절연요소의 질량이 진동 절연 성능의 평가에 끼치는 영향을 2지점에서 지지되는 진동 절연계를 대상으로 수신부로 전달되는 진동파워와 진동파워 절연효율의 관점에서 수치 해석을 이용하여 고찰하였다.

## 2. 진동 절연계의 모형화

진동 절연계는 가진부, 진동 절연부, 수신부로 구분하여 모형화를 할 수 있다. 기초 구조물 위에 절연요소들에 의해 기계 구조물이 설치되어 있는 경우, 기계 구조물의 진동이 기초 구조물에 전달되는

것이 주 관심이 되는 경우도 있고 기초 구조물의 진동이 기계 구조물에 전달되는 것이 주 관심이 되는 경우도 있는데 본 논문에서는 전자의 경우만을 취급하였다. 그리고 가진원의 경우 힘이 가진원이 되는 경우와 변위가 가진원이 되는 경우가 있는데, 본 논문에서는 힘이 가진원이 되는 경우를 기준으로 고찰하였다. 따라서, 가진부는 기계 구조물과 이 기계 구조물에 가해지는 힘으로 구성되며 이들은 임피던스와 차단 가진력으로 모형화된다. 진동 절연부는 절연요소들로 구성되며 4단자 정수(4-pole transmission parameter)<sup>(1,9)</sup>를 이용하여 모형화할 수 있고, 수신부는 모빌리티를 이용하여 모형화할 수 있다.

### 2.1 가진부의 모형화

기계 구조물에 실제 가해지는 가진력은 여러 가지 요인에 의해 여러 가지 형태로 발생하나, 그 크기나 발생 위치 등을 측정하거나 규명하기는 아주 힘들다. 따라서, 차단 가진력(blocked force)<sup>(7)</sup>과 임피던스를 이용하여 가진부를 모형화하게 되는 데, 이를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서  $F_E^1 \sim F_E^m$ 은 기계 구조물에 가해지는 실제 가진력을 의미하며  $E_1 \sim E_m$ 은 그 발생 위치를 의미한다.  $F_I^1 \sim F_I^n$ 은 절연요소와의 연결점들에서 발생하는 반력을,  $V_I^1 \sim V_I^n$ 은 그 연결점들의 속도를, 그리고  $S_1 \sim S_n$ 은 연결점들의 위치를 의미한다.  $F_s^1 \sim F_s^n$ 은 차단 가진력을 의미하고  $Z_s$ 는 임피던스 행렬을 의미한다.

차단 가진력은 연결점들을 움직이지 않게 고정된 후, 실제 기계 구조물을 운전하면서 연결점들에서 측정되는 힘과 모멘트를 의미하며, 임피던스 행렬은 각 연결점들에서의 포인트 임피던스(Point Impedance), 상호 임피던스(Cross Impedance), 전달 임피던스(Transfer Impedance)들로 이루어진 행렬을 의미한다. 이들의 정의는 다음 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다. 다음 식들에서  $F_s$ 는 차단 가진력 벡터를,  $F_I$ 는 연결점에서의 반력 벡터를 그리고  $V_I$ 는 연결점들의 속도 벡터를 의미한다.

$$F_s = F_I |_{V_I=0} \quad (1)$$

$$Z_s^k = F_I^k / V_I^k, \text{ 단 } V_s^j = 0 \text{ for } j \neq k \quad (2)$$

차단 가진력 벡터와 연결점에서의 반력 벡터 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

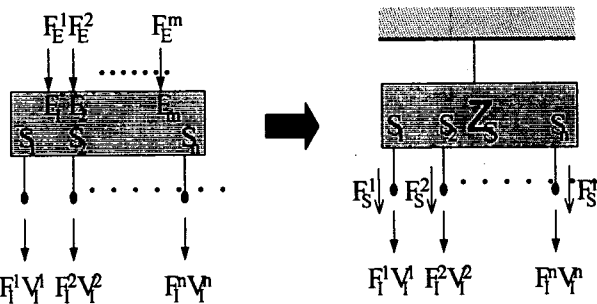


Fig. 1 Schematic representation of blocked force and source impedance

$$F_I = F_S - Z_S V_I \quad (3)$$

## 2.2 절연요소의 모형화

절연요소는 4단자 정수(4-pole transmission parameter)를 이용하여 모형화할 수 있으며 좌표계를 주축(principal axis)과 일치되게 설정하면 하나의 절연요소에서 각 방향의 특성은 서로 연성되지 않게 된다. 따라서 각 주축 방향에 대해 Fig. 2와 같은 입출력 관계를 고려하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 2에서 1은 입력단으로서 절연요소에서 가진부와 연결되는 부분을 의미하며 2는 출력단으로서 수진부와 연결되는 부분을 의미한다. 그리고 위첨자  $i$ 는  $i$ 번째 요소를 의미한다. 만약 각 연결점에서 6자유도를 고려하고 연결점이  $n$ 개 있다면 절연요소의 자유도는 총  $6n$ 이 된다.

$$\begin{Bmatrix} F_1^i \\ V_1^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a^i & b^i \\ c^i & d^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_2^i \\ V_2^i \end{Bmatrix} \quad (4)$$

위의 식 (4)에서  $a^i, c^i$ 는  $V_2^i = 0$ 일 때, 즉 수진부와 연결점이 고정경계조건을 만족할 때 구해지며  $b^i, d^i$ 는 자유경계조건을 만족할 때 구해진다. 따라서 이들 4개의 4단자 정수를 모두 구하기 위해서는 2가지의 경계조건에 대한 실험이나 유한요소해석 등이 필요하게 된다. 이들 4단자 정수들을 이용하여  $n$ 개의 절연요소가 설치된 경우의 가진부와 수진부 절연요소 연결점에서의 힘과 속도 행 벡터의 관계를 나타내면 다음 식 (5)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} F_I \\ V_I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_R \\ V_R \end{Bmatrix} \quad (5)$$

위의 식에서  $A, B, C, D$ 는 다음과 같다.

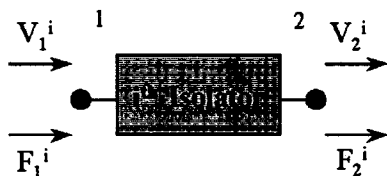


Fig. 2 Input-Output relation in one-direction in isolator

$$A = \text{diag}(a^i, i=1, \dots, n)$$

$$B = \text{diag}(b^i, i=1, \dots, n)$$

$$C = \text{diag}(c^i, i=1, \dots, n)$$

$$D = \text{diag}(d^i, i=1, \dots, n) \quad (6-a,b,c,d)$$

만약 절연요소가 질량이 없다고 가정하면 Fig. 2에서  $F_1^i = F_2^i$ 이므로 다음 식 (7)이 성립한다. 여기서  $I$ 는 단위 행렬을 의미한다.

$$A = I$$

$$B = 0$$

$$D = I$$

$$(7-a,b,c)$$

## 2.3 수진부의 모형화

탄성을 갖는 수진부의 동특성은 수진부 모빌리티 행렬( $Y_R$ )을 이용하여 나타낼 수 있는데, 수진부의 절연요소 연결점들에 가해지는 힘 벡터( $F_R$ )와 이 연결점들의 속도 벡터( $V_R$ ) 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$V_R = Y_R F_R \quad (8)$$

## 3. 진동파워 및 진동파워 절연효율 계산식

가진부로부터 절연부를 통하여 수진부로 전달되는 유효 진동파워( $P_R$ )는 다음 식 (9)와 같이 수진부 연결점에서의 힘 벡터의 공액전치 벡터와 속도 벡터의 곱의 실수부의 1/2로 정의된다<sup>(1)</sup>. 여기서 위첨자 \*는 공액전치를 의미한다.

$$P_R = \frac{1}{2} \text{Re} \{ F_R^* V_R \} = \frac{1}{2} \text{Re} \{ F_R^* Y_R F_R \} \quad (9)$$

한편, 수진부로 전달되는 힘 벡터는 다음 식 (10)처럼 전달률 행렬( $T$ )과 차단 가진력을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$F_R = T F_S \quad (10)$$

여기서 전달률 행렬  $T$ 는 절연요소 유무에 따라 달라지게 되는데, 절연요소를 설치하지 않고 가진부를 수진부에 직접 설치한 경우의 전달률 행렬  $T_N$ 은 식 (3)과 식 (8)에서  $V_R = V_I, F_R = F_I$ 라는 관계식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$T_N = [I + Z_S Y_R]^{-1} \quad (11)$$

그리고 절연요소를 설치한 경우의 전달률 행렬  $T_I$ 는 식 (3), (5), (8)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$T_I = [A + B Y_R + Z_S [C + D Y_R]]^{-1} \quad (12)$$

따라서 절연요소의 유무에 따른 수진부로 전달되는 진동파워는 각각 다음 식 (13)과 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$P_{IR} = \frac{1}{2} \text{Re}\{F_{IR}' Y_R F_{IR}\} = \frac{1}{2} \text{Re}\{F_S' T_I' Y_R T_I F_S\} \quad (13)$$

$$P_{NR} = \frac{1}{2} \text{Re}\{F_{NR}' Y_R F_{NR}\} = \frac{1}{2} \text{Re}\{F_S' T_N' Y_R T_N F_S\} \quad (14)$$

진동파워 절연효율(vibrational power isolation effectiveness)은 절연요소가 없을 때 수진부로 전달되는 진동파워와 절연요소가 있을 때 수진부로 전달되는 진동파워의 비로 정의되며<sup>(4)</sup> 다음 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$E_p = \frac{P_{NR}}{P_{IR}} \quad (15)$$

만약 절연요소의 질량을 무시한다면 식 (12)의  $A, B, D$  행렬은 식 (7)과 같이 되어 이 때의 전달률 행렬을  $T_{IO}$ 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{IO} = [I + Z_S [C + Y_R]]^{-1} \quad (16)$$

식 (16)을 식 (12)와 비교하면 알 수 있듯이 절연요소의 질량을 무시하면 진동파워나 진동파워 절연효율을 구하는데 사용되는 전달률 행렬의 계산이 아주 간단해 지는 것을 알 수 있다. 그러나, 이런 경우 오차가 발생하게 되는데, 다음 절에 진동파워나 진동파워 절연효율을 구하는 데 있어서 질량을 무시한 식 (16)을 사용하는 경우에 있어서 발생하는 오차를 2점 지지 진동 절연계를 이용하여 고찰한 내용을 나타내었다.

#### 4. 2점 지지 모형계에서의 절연요소 질량의 영향

가진부가 2개의 절연요소에 의해 수진부에 연결된 진동 절연계의 모형을 Fig. 3에 나타내었다. 가진부와 수진부는 양 끝이 복소 강성체로 지지된 강체 보이며 절연요소는 집중질량의 양단에 복소 강성체가 연결된 형상의 1자유도 계로 모형화한 것이다.

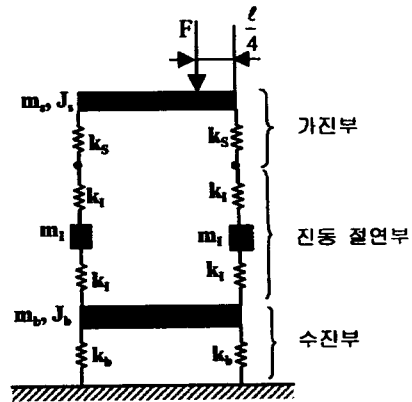


Fig. 3 Modeling of two-dimensional isolation system for nonrigid source and receiver.

Table 1 Material properties of simulation model

$m_S$	14.2 kg	$k_S$	$7(1 + j 0.005)$ MN/m
$m_I$	0.15 kg	$k_I$	$1.28(1+j0.12)$ MN/m
$m_B$	7.1 kg	$k_B$	$180(1+j0.005)$ MN/m
$J_S$	$0.0592 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$J_B$	$0.0251 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
$l$	0.2 m		

각 요소의 물성치는 Table 1과 같다

#### 4.1 가진부와 수진부의 동특성

가진부 포인트 임피던스와 수진부 포인트 모빌리티의 주파수에 따른 특성은 다음과 같다. 여기서 대상으로 하는 모형은 좌우 대칭이기 때문에 양단 연결점에서의 포인트 모빌리티나 임피던스는 서로 같다.

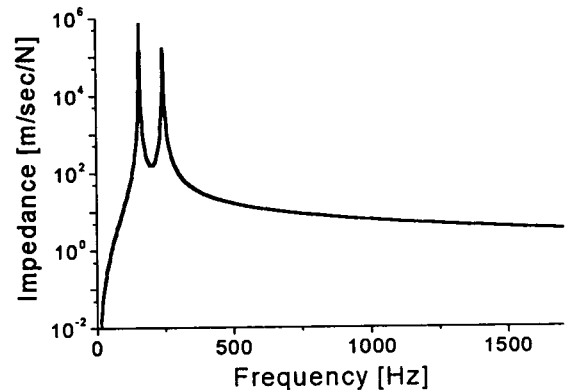


Fig. 4 Magnitude of point impedance of source

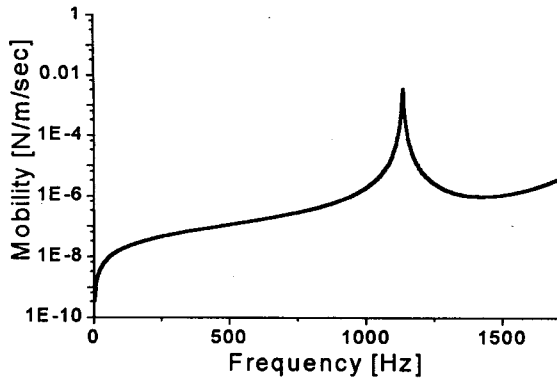


Fig. 5 Magnitude of point mobility of receiver

#### 4.2 절연요소의 모형화와 동특성

Fig. 3에 나타낸 절연요소에 대한  $A, B, C, D$  행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\omega^2 m_I}{k_I} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\omega^2 m_I}{k_I} \end{bmatrix} \quad (17-a)$$

$$B = \begin{bmatrix} j\omega m_I & 0 \\ 0 & j\omega m_I \end{bmatrix} \quad (17-b)$$

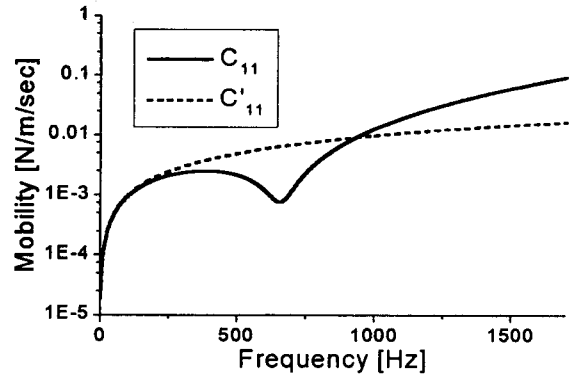
$$C = \begin{bmatrix} \frac{j\omega(-\omega^2 m_I + 2k_I)}{k_I^2} & 0 \\ 0 & \frac{j\omega(-\omega^2 m_I + 2k_I)}{k_I^2} \end{bmatrix} \quad (17-c)$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\omega^2 m_I}{k_I} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\omega^2 m_I}{k_I} \end{bmatrix} \quad (17-d)$$

만약 절연요소의 질량을 완전히 무시한다면 식 (17)에서  $m_I=0$ 으로 가정하는 것이 되고, 이 경우에 대한  $A, B, C, D$  행렬을  $A', B', C', D'$  라고 하면  $A', B', D'$  행렬은 식 (7)의  $A, B, D$  행렬과 같으며  $C'$  행렬은 식 (18)로 나타낼 수 있다.

$$C' = \begin{bmatrix} \frac{j2\omega}{k_I} & 0 \\ 0 & \frac{j2\omega}{k_I} \end{bmatrix} \quad (18)$$

식 (17-c)의  $C$  행렬과 식 (18)의  $C'$  행렬의 (1,1)

Fig. 6 Magnitude of (1,1) element of matrix  $C$  and  $C'$ 

요소를 비교하면 Fig. 6과 같다.

Fig. 6을 살펴 보면 파동 효과가 나타나는 700 Hz 부근에서  $C_{11}$ 과  $C'_{11}$ 의 크기가 많은 차이를 보이고 있고 주파수가 높아질 경우에도 많은 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 따라서  $A, B, D$  행렬은 절연요소의 질량을 무시한 경우인 식 (7)의 값을 사용하더라도  $C$  행렬만은 식 (17-c)의 값을 사용하는 것을 생각해 볼 수 있다. 이 경우는 마치 절연요소를 다음의 식 (19)로 표시되는 질량 효과를 고려한 등가탄성체로 가정하는 것과 같다. 실제 실험을 통해서 절연요소의 질량의 영향을 완전히 고려하기 위해서는 절연요소에 대한 2가지의 경계조건에 대한 실험이나 유한요소해석 등을 통해 4개의 4단자 정수들을 모두 구해야 한다. 그러나 여기서 절연요소를 등가강성체로 가정한다는 것은  $C$  행렬만 실험이나 유한요소해석을 통해 구하고 나머지  $A, B, D$  행렬은 식 (7)을 이용한다는 것이다.

$$k_{eq} = \frac{k_I^2}{2k_I - \omega m_I} \quad (19)$$

#### 4.3 진동파위와 절연효율에서 절연요소 질량의 영향

Fig. 3과 Table 1에 나타낸 진동절연계에서 수진부로 전달되는 파워를 추정할 때 절연요소 질량의 영향을 살펴보았다.

Fig. 7은 세가지 종류의 절연요소 질량을 통해 질량의 변화가 파동 효과에 어떠한 영향을 미치는지 살펴본 것인데, 여기서 사용된 절연요소 질량  $m_{11}, m_{12}, m_{13}$ 은 각각 가진원의 질량의 0.5%, 1%, 5%에 해당하는 값들이다. 파동 효과는 가진원의 가진주파수가 절연요소의 정재파에 해당하는 주파수

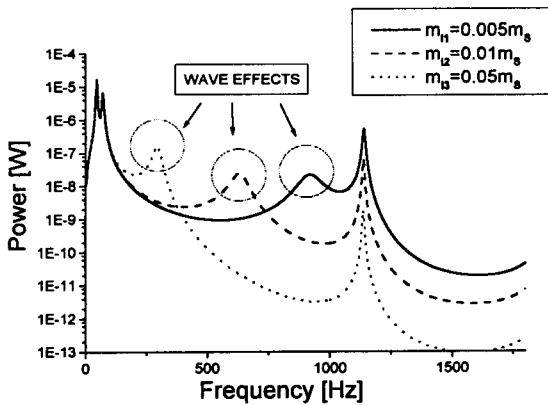


Fig. 7 Comparison of powers transmitted to receiver for various isolator masses

에 도달하였을 때 일어나는 공진현상이라고 볼 수 있다. 이로 인해 그 주파수 범위 부근에서 전달 파워가 증가하게 된다. Fig. 7에서 쉽게 볼 수 있듯이 파동 효과가 일어나는 주파수는 그 절연요소의 질량과 강성에 크게 좌우된다. 그리고 전달 파워의 증가량은 절연요소의 감쇠 계수가 작을수록 증가하게 된다. 이러한 파동 현상은 힘 또는 속도 전달률에서와 일치하는 것을 확인할 수 있었다<sup>(8)</sup>. 절연요소 질량을 무시하였을 때 발생 하는 오차는 다음 절에서 확인할 수 있다.

4.4 등가강성체를 이용한 진동파워와 절연효율 추정

Fig. 3과 Table 1에 나타낸 진동 절연계에서 절연요소없이 가진부와 수신부가 직접 연결된 경우 수신부로 전달되는 진동파워  $P_{NR}$  과 절연요소의 질량의 영향을 제대로 고려한 경우인 식 (12)와 식 (13)으

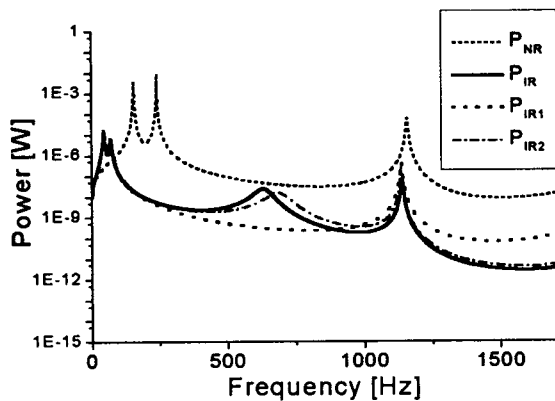


Fig. 8 Comparison of powers transmitted to receiver between non-isolator case and isolated cases

로부터 계산되는 진동파워  $P_{IR}$ , 절연요소의 질량을 완전히 무시한 경우인 식 (18) 로 정의되는  $C'$  행렬과 식 (16) 및 식 (13)으로부터 계산되는 진동파워  $P_{IR1}$ , 그리고, 절연요소의 질량을 고려한 등가탄성체로 가정하는 경우인 식 (17-c)로 정의되는  $C$  행렬을  $C'$  행렬 대신 사용하여 계산된 진동파워  $P_{IR2}$  를 비교하면 Fig. 8과 같다. 이때 가진력  $F$  는 크기 10N의 백색 잡음을 사용하였다.

Fig. 8에서  $P_{NR}$  과  $P_{IR}$  을 비교하면, 절연요소를 설치함으로써 가진부의 동특성에 기인하는 공진주파수가 많이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 뒤에 언급할 진동파워 절연효율이 저주파수에서는 극히 낮았다가 다시 피크를 이루면서 좋아지게 되는 원인이 된다. 이와 같은 현상은 엄밀한 의미에서는 절연요소의 성능과는 무관한 것이라고 판단된다.

절연요소의 질량을 완전히 무시하게 되면 파동 효과가 나타나는 주파수 부근인 700 Hz 부근과 1200 Hz 이상의 고주파수 부근에서 수신부로 전달되는 진동파워는 실제 전달되는 진동파워와 많은 오차를 보이고 있다. 그러나 등가탄성체로 가정하는 경우에는 파동 효과가 나타나는 공진주파수의 위치만 약간 틀릴 뿐 비교적 작은 오차 내에서 수신부로 전달되는 진동파워를 추정할 수 있음을 알 수 있다. 즉 절연요소의 모형화하는데 사용한 4단자 정수에서  $A$ ,  $B$ ,  $D$  행렬들은 식 (7)을 이용하고  $C$  행렬만 이론적, 또는 실험적으로 구해서 수신부로 전달되는 진동파워를 추정해도 절연요소 질량에 의한 파동효과가 충분히 나타나고 있다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 9는 진동파워 절연효율의 경우를 비교한 것

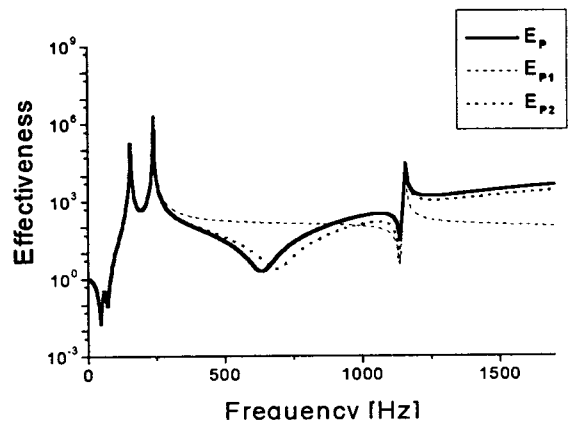


Fig. 9 Comparison of vibrational power isolation effectiveness for various treatment of isolator masses

으로  $E_p$ 는 절연요소의 질량을 제대로 고려한 경우를,  $E_{p1}$ 은 완전히 무시한 경우를 그리고  $E_{p2}$ 는 등가탄성체로 가정한 경우를 의미하며 진동파워 절연효율의 경우에도 수신부로 전달되는 진동파워의 경우와 같은 경향을 보인다는 것과 절연요소의 모형화할 때 사용한 4단자 정수들중  $C$  행렬만 실험적, 이론적으로 얻어내서 사용해도 충분히 파동효과를 나타냄을 다시 한 번 확인할 수 있다.

다음의 Fig. 10와 Fig. 11은 절연요소의 질량을 9배 증가 시킨 경우에 수신부로 전달되는 진동파워와 진동파워 절연효율을 나타낸 것이다.

기본적인 특성은 절연요소의 질량을 증가 시키기 전과 같게 나타나고 있다. 즉, 파동 효과가 나타나는 주파수 부근에서는 절연요소의 질량을 완전히 무시

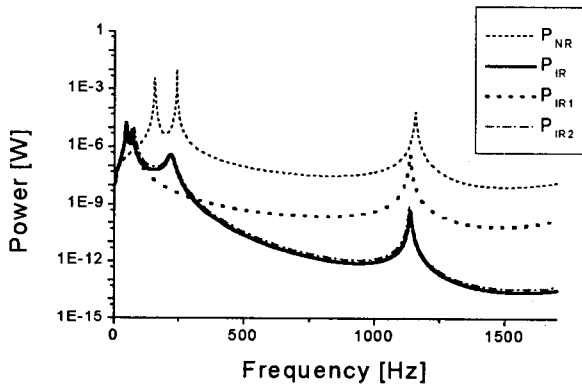


Fig. 10 Comparison of powers transmitted to receiver between non-isolated case and isolated cases when isolator masses were increased by 9 times.

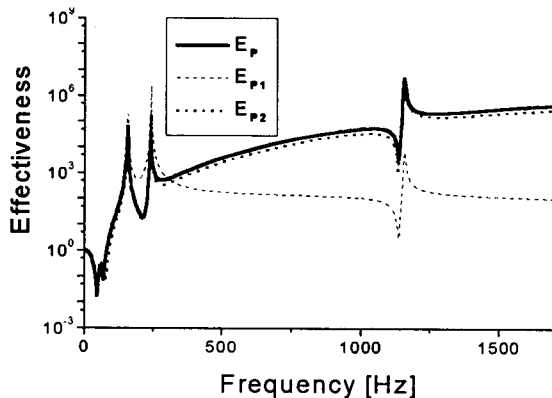


Fig. 11 Comparison of vibrational power isolation effectiveness for various treatment of isolator masses when isolator masses are increased by 9 times

하면 수신부로 전달되는 진동파워가 작게 추정이 되고, 고주파수로 가면서는 크게 추정이 되는 경향을 보인다. 즉, 진동파워 절연효율의 측면에서는 파동 효과가 나타나는 주파수 근처에서는 진동절연 성능이 실제보다는 좋은 것으로, 그리고 고주파수에서는 실제보다 나쁜 것으로 오판을 하게 한다.

이와 같은 경향은 한 지점에서 한 방향만을 고려할 때 그리고 파동 효과가 일어나는 주파수가 관심 주파수 범위 내 하나만 존재할 때 수치적으로 수신부로 전달되는 진동파워와 진동파워 절연효율을 살펴본 결과 나타난 것들이다. 그러나 실제 절연요소는 한 주파수에서 파동 효과가 나타나기 보다는 여러 주파수에서 그 현상이 일어난다<sup>(7)</sup>. 즉, 관심 주파수 범위 내 여러 주파수에서 파동 효과가 일어난다면 그 첫번째 파동 효과가 일어나는 주파수 이전과는 달리 파동 효과가 일어나는 주파수들 범위 내에서는 전달률이 전체적으로 증가할 것이라는 것을 쉽게 예측할 수 있다. 따라서 절연요소 질량을 무시하게 되면 파동 효과가 나타나는 주파수들 부근에서 수신부로 전달되는 진동파워가 실제보다 작고, 그로 인해 진동절연 효과가 실제보다 좋은 것으로 오인하게 된다. 이러한 오차를 발생시키는 파동 효과는 절연요소를 등가탄성체로 나타냄으로써 수식의 간결성을 유지하고 필요한 실험 횟수를 줄이면서도, 충분히 고려될 수 있음을 Fig. 8 ~ Fig. 11들을 통해 확인할 수 있었다. 즉, 식 (4)에서 절연부의 4단자 정수들 모두 구하기 위해서는 수신부와 연결되는 단자의 2가지 경계조건 ( $V_2=0$ ,  $F_2=0$ )에 대한 실험이나 유한요소해석이 적용되어야 하나,  $V_2=0$ 의 조건하에서  $F_2$ 와  $V_1$ 만을 구해서 적용해도 진동파워 추정시 절연부의 파동효과를 충분히 나타낼 수 있는 것을 의미한다.

## 5. 결 론

가진부가 여러 지점에서 절연요소에 의해 수신부에 연결되어 있는 다차원 진동 절연계의 해석에 있어서, 절연요소의 질량을 완전히 고려한 상태에서 수신부로 전달되는 진동파워와 진동파워 절연효율의 계산식들을 유도하였으며, 절연요소의 질량을 무시할 경우 발생하는 오차에 대하여 검토하였다.

2점 지지 진동 절연계를 대상으로 수치적으로 검토한 결과, 절연요소의 질량을 무시할 경우 수신부로 전달되는 진동파워나 진동파워 절연효율을 이용

한 진동절연 성능의 평가에서 나타나는 영향은 파동 효과가 나타나는 주파수 부근에서는 진동절연 성능이 질량을 완전히 고려한 경우보다 작게 나타나고 고주파수로 가면서 크게 나타났다. 이와 같은 오차를 최소화하면서 절연요소의 질량을 무시하는 데서 오는 계산 및 처리의 편리성을 취할 수 있는 방법으로 질량이 없는 등가탄성체로 절연요소를 모형화하는 것을 제안하였으며, 수치해석 결과 진동절연요소의 질량을 완전히 고려하는 것과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 절연요소의 동특성을 나타낼 때 사용한 4단자 정수에서  $C$  행렬만 실험적, 또는 이론적으로 구해도 수진부로 전달되는 진동파워를 추정하거나 진동파워 절연효율을 이용한 진동절연 성능 평가에서 충분히 절연요소 질량의 영향이 나타난다는 것을 의미한다.

## 후 기

본 연구는 부분적으로 과학재단으로부터의 지원(과제번호: 98-0200-06-01-3)에 의해 수행되었음을 밝히며, 이에 재단측에 감사드리고자 한다.

## 참 고 문 헌

- (1) Jacobsen, F. and Ohlrich, M., 1986, "Vibrational Power Transmission from Multi-point Mounted Machinery to Supporting Structure," The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Report No. 35.
- (2) 김재철, 이종원, 1998, "진동원으로부터 지지구조물에 전달되는 진동 파워의 추정방법," 한국소음진동공학회지, 제 8 권, 제 2 호, pp. 306~312
- (3) Swanson, D. A., Miller, L. R. and Norris, M. A., 1994, "Multi-dimensional Mount Effectiveness for Vibration Isolation," Journal of Aircraft, AIAA, Vol. 31, No. 1, pp. 188~196.
- (4) 김광준, 이영빈, 최규상, 1998, "탄성 가진부 및 기초부를 갖는 다점 지지 마운트계의 진동파워 절연 기법," 대한기계학회, 1998년도 춘계학술대회 논문집.
- (5) Goyder, H. G. D. and White, R. G., 1980, "Vibrational Power Flow Machines into Built Up Structures, Part III: Power Flow Through Isolation Systems," Journal of Sound and Vibration, Vol. 68, No. 1, pp. 97~117.
- (6) Sanderson, M. A., 1996, "Vibration Isolation: Moments and Rotations Included," Journal of Sound and Vibration, Vol. 198, No. 2, pp. 171~191.
- (7) Harris, C. M. and Crede, C. E. 1998, Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill, 3rd Ed.
- (8) Ungar, E. E. and Dietrich, C. W., 1966, "High-Frequency Vibration Isolation," Journal of Sound and Vibration, Vol. 4, No. 2, pp. 224~241.
- (9) 박송해, 1991, 회로이론, 문운당.