

〈論 文〉

벡터합성법에 의한 냉장고 압축기의 진동전달 해석

오재응* · 조준호** · 김진동***

(1993년 12월 20일 접수)

Analysis of Vibration Transmissibility for Compressor of Refrigerator by Vector Synthesis Method

Jae-Eung Oh, Jun-Ho Cho and Jin-Dong Kim

Key Words : Vibration Reduction(진동저감), Cross Specturm(상호스펙트럼), Complex Specturm Vector (복소스펙트럼벡터), Vector Synthesis Method(벡터합성법), Degree of Effect(영향도), Synthesized Vector Locus(합성벡터 궤적)

Abstract

General Mechanical Structures have arious and complex vibration transmission paths. In order to identify the mechanism of vibration trasmission. the correct estimation of exciation forces and the exact modeling of transmission paths are required. In this paper, vector synthesis technique is employed to identify the characteristics of vibration input and it's transmission to body structure for the mounting system of a compressor in a refrigerator. Vibration reduction efficiency of each transmission path is evaluated by comparing individual vector components obtained before and after the paths from experimental research. The degree of effect is used to estimate the contribution of vibration input components to total output. And this paper presents a new techiqud based on simulation studies using vector synthesis diagram, by which the effects of change of the magnitude and phase of fromsmission paths can be predicted.

1. 서 론

냉장고와 같은 기계구조물에 있어서 구동계통의 운전에 의하여 발생하는 진동 및 소음의 전달특성을 파악하여 사용자에게 불편감을 주는 진동이나 소음을 저감시키기 위한 연구가 최근 활발히 수행되고 있다.⁽¹⁾ 특히 전달계통의 성질 및 결합상태에 따라 여러가지 형태로 이루어지는 복잡한 진동전달 기구를 해석하기 위해서는 진동 입력과 전달계통을 다양한 방법으로 모형화하고 각 입력 성분들의 출

력에 대한 기여를 평가하여 전달과정에서 발생하는 물리적 특성을 파악하는 것이 필요하다. 이러한 요구를 만족시키기 위하여 주파수 응답함수(frequency response function), 다차원 스펙트럼해석 (multi-dimensional spectral analysis) 등을 이용한 많은 연구가 진행되고 있다.⁽²⁻⁴⁾

벡터합성법은 주로 자동차의 부밍소음에 대한 해석법으로써 제시되었고 여러가지 진동 및 소음 현상의 해석에 적용되어 다각도의 저감 대책을 제공하였다.^(5,6) 벡터합성법에 대한 초기 논문으로 藤田 節男 등은 부밍음해석을 위한 벡터합성이론과 방진 마운트의 효과를 평가하였으며,⁽⁷⁾ 近森順 등은 벡터합성법에 의한 진동 입력의 추정법에 관점을 두고 발표하였다.⁽⁸⁾ 또한, Wolf는 차실 유한요소모

*정회원, 한양대학교 자동차공학과

**정회원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

***한양대학교 정밀기계공학과

델을 이용하여 부밍음해석을 수행하였으며, (9) 이정 권 등은 벡터합성 해석 후 소음저감 대책으로 동흡진기 및 강성의 증가를 이용하였다. (10) 최근에는 일본 Nissan 자동차의 石兵正男 등이 벡터합성해석 기술을 유체봉입 엔진마운트에 적용하여 진동저감을 시도한 바 있다. (11)

본 연구에서는 벡터합성법의 이론적 타당성을 제시하고, 냉장고 압축기를 지지하고 있는 고무마운트로 구성되는 진동전달계의 해석에 벡터합성법을 적용하여 각 진동전달경로의 절연 성능을 평가함으로써 물리적 의미를 규명하는 것을 목적으로 한다. 또한, 벡터합성 선도에서 각 성분벡터의 크기와 위상을 변경시키는 시뮬레이션을 통하여 합성벡터의 궤적 (synthesized vector locus) 을 구함으로써 출력변화의 경향을 예측할 수 있는 기법을 제안하였다.

2. 이 론

2.1 상호스펙트럼 신호의 벡터합성

시간역의 입력과 관련하여 상호스펙트럼의 의미를 파악하기 위해서 복소성분 $X(\omega)$, $Y(\omega)$ 를 벡터로써 표시하는 것이 유효하다. 2개의 시간 변동량 $x(t)$ 및 $y(t)$ 를 푸리에변환(Fourier transform)하여 얻어진 복소함수를 극좌표 형식으로 나타내면 다음과 같다.

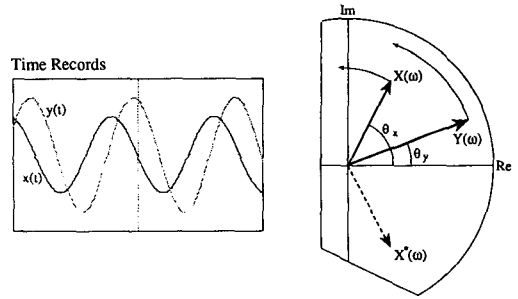
$$\begin{aligned} X(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \\ &= |X(\omega)| e^{i\theta_x(\omega)} \\ Y(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt \\ &= |Y(\omega)| e^{i\theta_y(\omega)} \end{aligned} \quad (1)$$

시간역 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 는 2개의 벡터 $X(\omega)$ 와 $Y(\omega)$ 가 일정한 편각차 $\theta_{xy}(\omega)$ 를 이루며 주기 $[2\pi/\omega]$ 로 원점의 주위를 회전하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 2개의 벡터의 관계를 $X(\omega)$ 의 공액 벡터 $X^*(\omega)$ 와 $Y(\omega)$ 의 곱으로 표현하는 것이 가능하다.

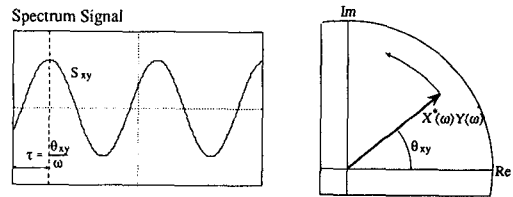
$$X^*(\omega) Y(\omega) = |X(\omega)| |Y(\omega)| e^{-i\theta_{xy}(\omega)} \quad (2)$$

여기서, $\theta_{xy}(\omega)$ 는 $\theta_x(\omega)$ 와 $\theta_y(\omega)$ 의 위상각차를 나타낸다.

Fig. 1은 푸리에변환에 의해서 얻어진 스펙트럼의 특징주파수 신호에 대한 벡터적 표현을 나타낸다.



(a) Two-domain signal and their Fourier transform vectors



(b) Cross-spectrum signal and its vectorial representation

Fig. 1 Vectorial representation of cross-spectrum obtain by the Fourier transform of two time-domain signals

시계열(time series)에 있어서 정상 불규칙 신호의 특성을 기술하는 함수로서 스펙트럼 밀도함수 (spectral density function)가 이용된다. 스펙트럼 밀도함수 가운데 상호스펙트럼은 다음 식으로 표현된다.

$$S_{xy}(\omega) = \frac{2\pi}{T} E[|X(\omega)| |Y(\omega)| e^{-i\theta_{xy}(\omega)}] \quad (3)$$

여기서, $E[]$ 는 기대치를 취하는 것을 의미한다.

식(2)와 식(3)으로부터 상호스펙트럼이 가지는 크기와 위상정보를 이용하여 출력을 벡터적으로 합성하는 것이 가능함을 알 수 있다.

2.2 영향도해석에 의한 전달계의 성능평가

구조계의 각 입력점에 작용하는 가진력에 의하여 발생하는 입력 성분들이 전체계의 출력에 있어서 어느 정도 영향을 미치고 있는가를 정량적으로 판정하기 위해서 다음과 같은 식으로 정의되는 영향도(degree of effect)를 사용한다.

$$\text{영향도} = \frac{|S_{xy}(\omega)| \cos \theta_{xy}(\omega)}{\sum |S_{xy}(\omega)|}$$

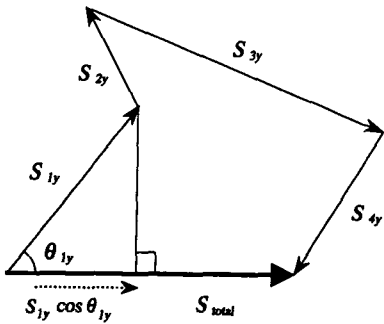


Fig. 2 Degree of effect of input vectors total vector

$$= \frac{|S_{xy}(\omega)| \cos \theta_{xy}(\omega)}{|S_{total}(\omega)|} \quad (x=1,2,3,\dots) \quad (4)$$

여기서, $|S_{xy}(\omega)|$ 는 x 번째 입력과 출력 y 의 상호스펙트럼에 의한 성분벡터의 크기이며, $|S_{total}(\omega)|$ 는 각 입력이 동시에 작용하여 발생하는 합성출력의 크기이다. 그리고, θ_{xy} 는 $S_{xy}(\omega)$ 벡터와 $S_{total}(\omega)$ 벡터의 상대위상을 의미한다. 이러한 관계를 Fig. 2에 나타낸다.

영향도는 (+) 또는 (-) 부호의 값을 가질 수 있으며, 1 이상이 되기도 한다. (+)의 영향도를 가지는 입력은 합성출력을 증가시키는 성분으로 작용하며, (-)의 영향도를 가지는 입력은 (+)의 영향도를 가지는 다른 입력들과 반대 방향의 정상영 성분으로 작용하여 합성출력을 감소시키는 역할을 하는 것을 의미한다. 그러므로 각 성분벡터의 영향도는 그 크기 뿐만 아니라 전체 출력벡터와의 상대 위상에 의해서 평가될 수 있다.

3. 벡터합성법의 적용

3.1 실험장치 및 방법

본 연구에서는 4점 지지방식의 압축기 고무마운트를 부착한 냉장고를 대상으로 실험을 수행하였다. Fig. 3은 실험장치 구성을 나타낸다.

진동가속도 신호의 측정은 압축기의 운전이 정상적(steady)으로 된 상태에서 진동의 주된 전달경로인 고무마운트에 지지되어 있는 압축기 바닥 4점에서의 신호와 고무마운트를 바로 지난 후 4점에서의 신호를 입력으로 하고, 압축기대에서의 진동을 출력으로 하는 모형으로 실시하였다. 본 연구에서는 압축기대의 수평방향 진동신호가 수직방향의 신호에 비하여 미약하게 나타나므로 압축기대와 평행

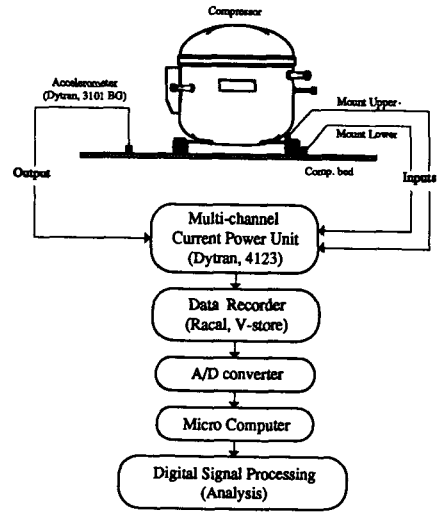
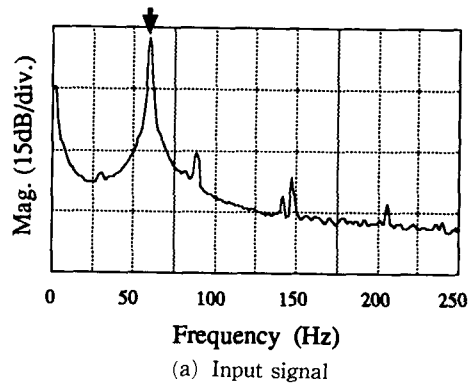
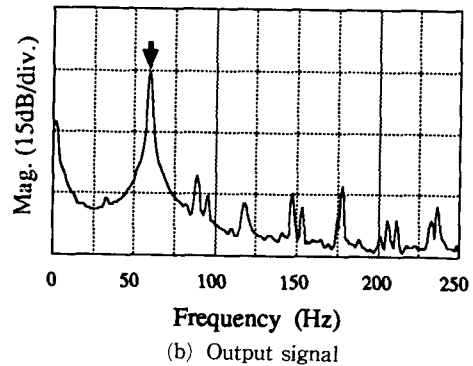


Fig. 3 Experimental setup



(a) Input signal

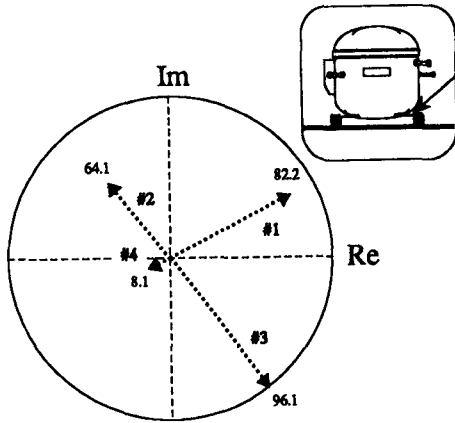


(b) Output signal

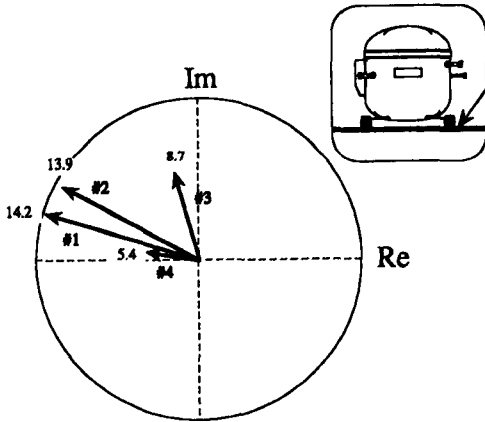
Fig. 4 Typical power spectrum signal and output

한 방향의 진동 자유도와 각 자유도 사이의 연성향은 무시하고 압축기대에 수직인 방향의 진동 성분만을 고려하여 실험모형을 구성하였다.

입력으로 작용하는 압축기의 진동전달계 전후와



(a) Obtained at mount upper



(b) Obtained at mount lower

Fig. 5 Vector component diagram

출력으로 나타나는 압축기대의 측정점에 가속도픽업(Dytran, 3101BG)을 부착한 상태에서 진동신호를 측정 후 증폭기(Dytran, 4123)를 거쳐 신호기록기(Racal, VS0801)에 기록한다. 기록된 신호들

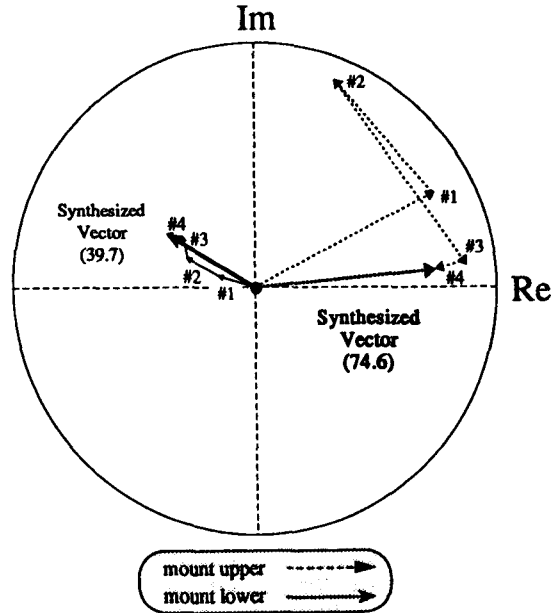


Fig. 6 Vector synthesis diagram

을 A/D 변환기를 거쳐 디지털 데이터를 얻고 소형컴퓨터(IBM PC, 80486)를 이용하여 신호처리를 행하였다.

3.2 벡터합성법에 의한 진동전달경로의 성능평가
냉장고 압축기 마운트의 실험에서 얻어진 진동신호들을 처리하여 얻은 자기스펙트럼(auto spectrum)을 Fig. 4에 나타내었다. 압축기 고무마운트를 지나기 전과 지난 후 위치에서 측정한 입력 신호와 압축기 대에서 측정한 출력 신호의 스펙트럼으로부터 입, 출력 모두 59 Hz의 신호가 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이는 압축기의 운전시 가진력으로 작용하는 구동주파수에 해당하는 값이

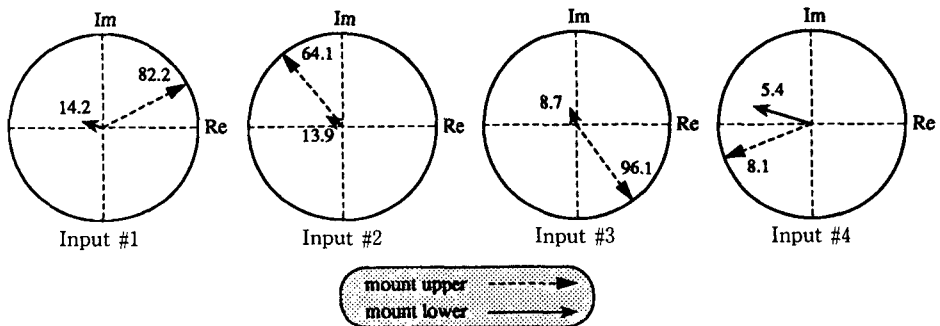


Fig. 7 Comparison of input vectors obtained at mount upper and lower

다. 실험에서 구한 각 입력 성분들이 합성출력에 미치는 영향을 규명하기 위하여 상호스펙트럼 데이터의 59 Hz에서 추출한 성분벡터에 대해 벡터합성법을 적용하였다.

Fig. 5는 진동전달경로를 지나기 전과 지난 후에서 얻은 입력 신호로부터 추출한 벡터성분선도를 나타낸다. 각 성분벡터는 최대 크기를 기준으로 하여 표시하였으며, 벡터의 크기를 비교하기 위하여 절대량(cm/s^2 단위)으로 기입하였다. 전달경로를 지나기 전 위치에서 얻은 벡터 가운데 가장 큰 성분은 3번(96.1 cm/s^2)이고, 전달경로를 지난 후 절연된 벡터에 있어서는 1번(14.2 cm/s^2) 성분이 가장 크다.

Fig. 6에 각 성분벡터를 합성하여 벡터합성선도를 구성하였다. 마운트 전과 후에서 얻어진 합성벡터를 비교할 수 있도록 하나의 선도위에 동시에 나타내었다. 벡터합성선도로부터 고무마운트를 지나기 전 입력 신호에 의한 합성벡터의 크기는 74.6 cm/s^2 이고, 지난 후 입력 신호에 의한 합성벡터의 크기는 39.7 cm/s^2 로 나타난다. 이와 같이, 4개의

고무마운트에 의한 전체 진동저감은 2.7 dB가 되는 것을 알 수 있다.

고무마운트의 작용에 의한 입력 성분들의 변화를 파악하기 위하여 성분벡터들의 크기와 위상을 각각 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 각 마운트에 의해 많은 양의 진동이 저감되고 있으며, 특히 3번 입력의 경우 96.1 cm/s^2 에서 8.7 cm/s^2 로 높은 진동절연 성능을 나타내었다.

이러한 결과를 정량적으로 파악하기 위하여 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 전달경로를 지나기 전과 지난 후에서 얻어진 진동입력의 성분벡터 및 합성출력의 크기와 위상을 각각 비교하고, 각 성분의 합성출력에 대한 영향도를 계산하였다. 영향도에 의하여 각각의 진동 입력이 합성출력에 어느 정도 영향을 미치고 있는가를 정량적으로 평가할 수 있다.

고무마운트로 구성된 각 전달경로를 지나면서 나타나는 진동 저감효과를 파악하기 위하여 고무마운트를 지나기 전과 지난 후의 성분벡터 및 합성벡터의 크기를 비교하여 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Magnitude and phase of vector components and degree of effect to total vector (obtained at mount upper)

Mount	#1	#2	#3	#4	Total vector
Mag. (cm/s^2)	82.2	64.1	96.1	8.0	74.6
Phase ($^\circ$)	29.2	128.7	301.5	200.3	4.1
Degree of effect	0.99	-0.49	0.60	-0.10	1.0

Table 2 Magnitude and phase of vector components and degree of effect to total vector (obtained at mount lower)

Mount	# 1	# 2	# 3	# 4	Total vector
Mag. (cm/s^2)	14.2	13.9	8.7	5.4	39.7
Phase ($^\circ$)	156.1	150.4	105.7	163.8	145.4
Degree of effect	0.35	0.34	0.18	0.13	1.0

Table 3 Vibration reduction efficiency by rubber mounts

Mount	# 1	# 2	# 3	# 4	Total vector	
Magnitude (cm/s^2)	upper	82.2	64.1	96.1	8.0	74.6
	lower	14.2	13.9	8.7	5.4	39.7
Vibration reduction (dB)	7.6	6.6	10.4	1.7	2.7	

4. 입력 변경 시뮬레이션에 의한 출력 예측

실험을 통하여 얻어진 성분벡터들은 시간역 신호의 크기 및 위상이 변함에 따라 바뀌게 된다. 따라서, 상호스펙트럼으로부터 구한 성분벡터들의 크기와 위상을 임의로 바꾸었을 때 출력벡터의 변화 경향을 파악함으로써 입력의 변화에 의한 출력제어 효과를 예측할 수 있다. 성분벡터의 변경은 가진력이 일정할 때 입력의 전달경로가 바뀌는 것을 의미하며 이것은 마운트의 강성, 감쇠 및 부착조건 등을 변경시켰을 때 발생하는 효과로 볼 수 있다.

4.1 진동 입력의 크기변화에 의한 출력 예측

각 성분벡터의 크기를 200%~10%까지 바꾸어 가면서 합성벡터의 궤적을 예측하는 시뮬레이션을 수행하였다. 1번으로부터 4번 성분벡터의 크기를 각각 변경시키면서 합성벡터의 궤적을 그려보고, 합성벡터의 크기를 변경전의 크기와 비교하여 입력의 크기변경에 의한 출력 저감효과가 나타나는 범위를 알아본다.

4.2 진동 입력의 위상변화에 의한 출력 예측

각 입력 성분에 대하여 벡터의 크기는 그대로 유지한 상태에서 위상각에 0°~360°까지 더하면서 입력의 위상각 변화에 대한 합성벡터의 궤적을 구하

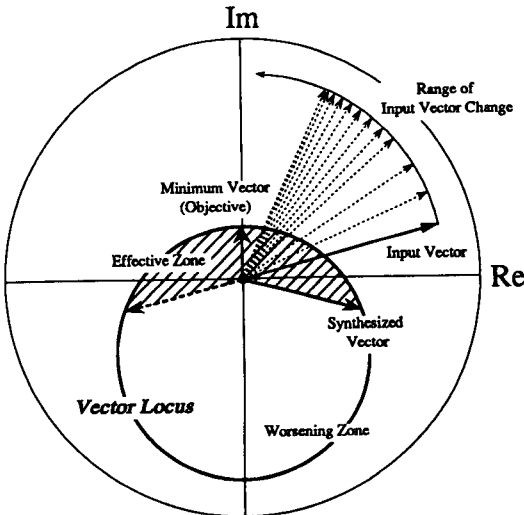


Fig. 8 Synthesized vector locus diagram

였다. 1번으로부터 4번 입력의 위상각을 각각 독립적으로 변경시키면서 합성벡터의 궤적선도를 구성하고, 합성벡터의 크기를 변경전의 크기와 비교하여 입력의 위상각 변경에 의한 출력의 저감효과가 나타나는 영역을 파악한다.

Fig. 8에 성분벡터의 변화에 따라서 얻어지는 합성벡터의 궤적이 가지는 의미를 표현하였다. 그림에서 원점을 중심으로 하여 회전하는 부채꼴의 벡터변화는 성분벡터의 궤적이며, 실선으로 나타나는 원은 입력의 위상각 변경에 의한 합성벡터의 궤적을 의미한다. 합성벡터의 크기가 입력의 위상각을 바꾸기 전보다 작아지는 위상제어 효과 영역을 빗금으로 표시하였으며, 입력의 변화에 의해 합성출력이 오히려 커지게 되는 악화영역도 존재하게 된다. 합성출력의 크기가 가장 작아지는 성분벡터의 위상각 변화량이 전달경로 변경의 목적으로 되며 이때 최대의 출력 저감효과가 나타나는 것으로 볼 수 있다.

5. 결과 및 고찰

5.1 진동 입력의 크기변경 시뮬레이션 결과

Fig. 9 는 성분벡터의 크기를 각각 200%~10%

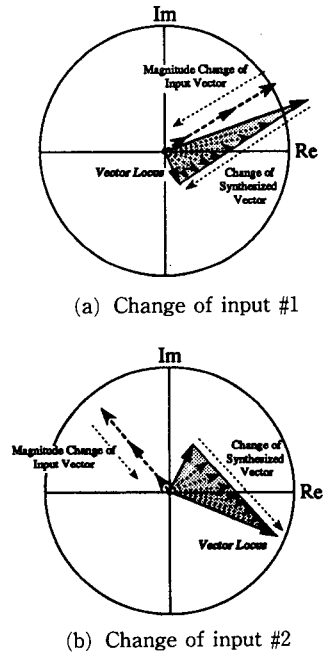


Fig. 9 Synthesized vector locus according to the magnitude change of input vectors

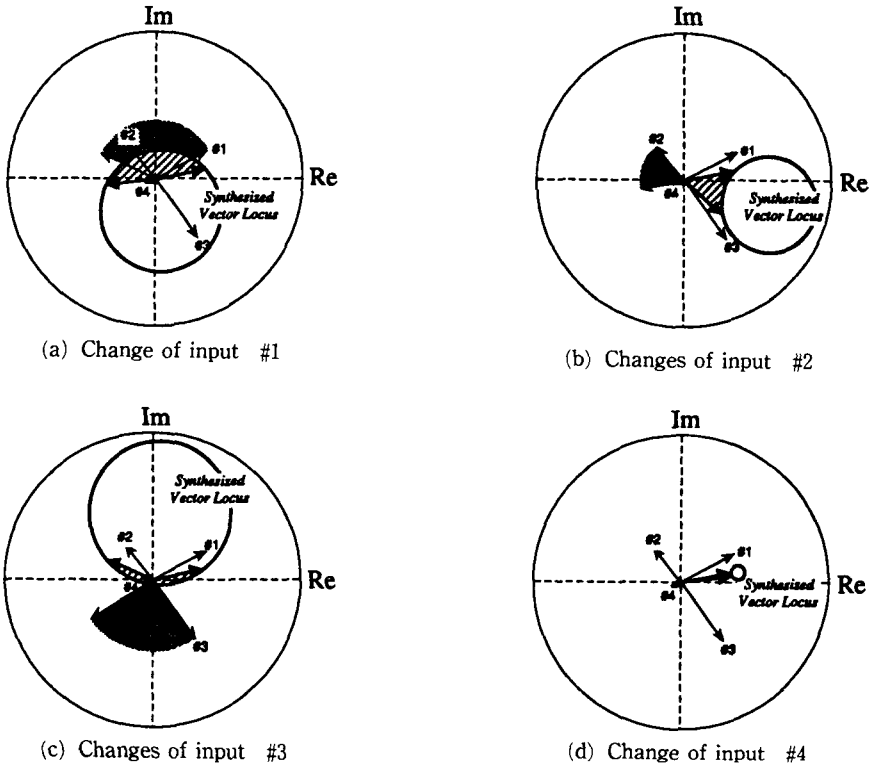


Fig. 10 Synthesized vector locus and control effect region according to change of phase angle of vectors

Table 4 Object value of phase shift of vector components for minimum synthesized vector

Vector change		Mount	#1	#2	#3	#4
Synthesized vector	Minimum mag. (cm/s ²)		47.4	58.8	5.8	74.3
	Reduction of (dB)		2.0	1.0	11.0	0.1
Input vector	Original phase(°)		29	128	301	200
	Object value of phase shift(°)		66	30	(-)48	(-)15

(- : clockwise)

까지 바꾸어 가면서 합성벡터의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)에서 1번 입력의 크기가 작아짐에 따라 합성벡터의 크기도 작아지며 이는 대부분의 경우 타당한 결과로 생각할 수 있다. 그러나, Fig. 9(b)에서는 2번 벡터의 크기가 작아짐에 따라 합성벡터의 크기는 오히려 커지게 되는데, 이는 2번 입력이 음의 영향도를 가지는 성분으로 작용하여 합성출력을 감소시키는 역할을 하고 있기 때문이며, 음의 영향도를 가지는 입력을 저감시키는 경우

합성출력이 더 커지게 되는 것을 의미한다. 따라서, 다수의 진동 입력의 크기를 개별적으로 저감시키는 경우 합성출력이 커지는 역효과가 생길 수 있으므로 영향도를 고려한 효과적인 대책이 필요하다.

5.2 진동 입력의 위상각변경 시뮬레이션 결과

Fig. 10에 성분벡터의 위상각을 변경하였을 때 얻어지는 벡터합성선도를 나타내었다. 각 그림에서

부채꼴로 나타나는 위상변경 효과 영역은 성분벡터의 위상각 범위로 표시되며, 원점으로부터 합성벡터의 궤적에 이르는 거리가 짧을수록 전달경로의 수정을 통한 가진 입력의 위상제어가 효과적이라는 것을 의미한다. 그림에서 1번과 3번 성분벡터의 위상제어 효과 영역이 넓으며, 특히 3번 입력의 위상변화에 의한 합성출력의 저감이 크게 나타나므로 3번 입력의 전달경로를 변경하는 것이 효과적이라고 할 수 있다. Table 4에 성분벡터의 위상변화에 따라 합성출력이 최소로 되는 위치에서의 출력의 크기 및 위상각을 나타내었고, 전달경로 수정에서 제어효과가 예상되는 위상각 범위와 목적하게 되는 입력의 위상각 변화량을 함께 나타내었다. 이로부터 출력의 크기를 효율적으로 저감하기 위하여 입력의 위상각을 변경하는 경우 3번 입력의 위상각을 (-)48° 만큼 변경하는 것이 효과적인 것을 알 수 있다.

6. 결 론

냉장고 압축기 고무마운트계의 진동 절연성능 평가 및 전달특성 해석을 위하여 벡터합성법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상호스펙트럼이 가지는 크기와 위상에 대한 정보를 이용하여 벡터합성법을 수행하였고, 얻어진 성분벡터로부터 1번과 3번 마운트를 통한 가진 입력이 압축기대의 진동에 주요한 입력으로 작용하는 것을 알았다.

(2) 냉장고 실험결과로부터 구한 진동 성분벡터들을 크기와 위상에 대하여 마운트별로 비교 평가한 결과 3번 전달경로의 진동 절연성능이 10 dB로써 가장 좋으며, 마운트를 지나기 전과 지난 후의 합성벡터를 비교함으로써 전체 출력에 대한 진동저감이 2.7 dB인 것을 평가하였다.

(3) 벡터합성선도를 이용한 입력 변경 시뮬레이션으로부터 성분벡터의 크기 및 위상의 변화에 따른 출력의 변화 경향을 예측하여, 최적의 진동저감을 위해서 압축기 마운트의 3번 입력의 크기를 저감하는 동시에 위상을 48° 변경하는 것이 효과적임

을 제시하였다.

참고문헌

- (1) 오재웅, 1991, "냉장고의 소음진동 제어," 한국소음진동공학회지, 제1권, 제1호, pp. 95~101.
- (2) 오재웅, 1985, "구조물 모드해석의 기초와 응용," 희성출판사.
- (3) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1980, *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, John Wiley & Sons, pp. 1~77.
- (4) 吳在應, 康明順, 徐相炫, 車周憲, 1986, "多次元スペクトル解析によるガソリンエンジンのパワー寄與評價に関する研究," 日本機械學會論文集(C編), 52卷 481號, pp. 2330~2335.
- (5) Sakamoto, H., Yazaki, K. and Fukushima, M., 1981, "Reduction of Automobile Booming Noise Using Engine Mountings That Have an Auxiliary Vibrating System," *SAE Paper* 810399, pp. 1~8.
- (6) 桶本卓志, 杉本繁, 1992, "パネル振動寄與率解析法のアイドルごもり音への適用," マツグ技報, No. 10, pp. 168~176.
- (7) 藤田節男, 1972, "車室ごもり音現象の解析," 自動車技術會論文集, No. 4, pp. 32~37.
- (8) 近森順, 1981, "ベクトル合成法による車室内ごもり音の實驗解析," 三菱重工技報, Vol. 18, No. 3, pp. 128~133.
- (9) Wolf Jr., J. A., Joachin, C. A. and Nefske, D. J., 1981, "Application of structural-Acoustic Diagnostic Technique to Reduce Boom Noise in a Passenger Vehicle," *SAE Paper* 810398, pp. 1~11.
- (10) 이정권, 민형선, 심상준, 1991, "벡터해석법에 의한 차실 소음의 저감," 한국소음진동공학회지, 제1권, 제1호, pp. 141~147.
- (11) 石兵正男, 佐藤茂樹, 青木弘文, 土井三浩, 1992, "流體封入エンジンマウントの振動傳達位相制御による車輛振動低減手法の研究," 日本機械學會論文集(C編), 58卷 551號, pp. 45~50.