

회전기에 의한 소음 제어를 위한 능동 소음 제어 - 3차원 공간의 경우

남현도, 안동준*, 이호석

단국대학교 전기공학과

Active control of noise induced by rotating machines - A 3-dimensional enclosure case

Hyun-do Nam, Dong-Jun Ahn*, Ho-Seok Lee

Dept. of Electrical Eng. Dankook Univ.

ABSTRACT - In this paper, analysis of the noise induced by rotating machines and the mode analysis of a 3-dimensional enclosure are presented. Adaptive active noise control algorithms for the multi-channel case are proposed. Computer simulations were done to show usefulness of the designed algorithm in a 3-dimensional enclosure case.

1. 서론

산업환경에서의 소음은 대부분 회전기에서 발생하며 이러한 소음 환경 공해는 인체에 심리적, 신체적 악영향을 주고 있다. 이에 대한 저감 대책은 수동적인 방법과 능동적인 방법으로 분류되는데, 수동적인 소음제거 방식은 흡음재등으로 소음을 흡수하는 방식으로, 소음의 주파수 성분이 500Hz 이상일때는 효과적이거나 500Hz 이하의 저주파 성분의 주파수를 가지는 소음에 대해서는 흡음재의 체적이 커져야 하는 등 면적이 제한되는 비행기나 자동차와 같은 예에서는 적용하기 어렵다. 능동 소음제거 방식은 음의 간섭효과를 이용하여 소음원의 위상과 180° 위상차를 가지는 2차 음원을 부가함으로써 소음을 상쇄시키는 방법으로 저주파 소음제거에 효과적이다. [1, 2]

이러한 능동 소음 제어계를 구성하기 위해서는 소음원의 주파수 특성과 주변 상태등이 완전히 파악되어야 하는데, 실제로 이러한 조건들은 미지이거나 시변이기 때문에 적응필터를 사용하게 된다.

본 논문에서는 회전기에서 발생하는 소음원의 주파수 특성을 분석하고 밀폐된 3차원 공간에서의 모드분석(mode analysis)을 통하여 3차원 공간 소음계의 동 특성을 분석하였으며 다중 채널 LMS 알고리즘을 이용하여 3차원 공간에 대한 적응 능동 소음 제어계를 설계하였으며 컴퓨터 시뮬레이션으로 제안한 알고리즘의 유용성을 보였다.

2. 회전기 소음 특성

회전기(전동기)에서 발생하는 소음은 크게 보아서 전기적인 소음, 기계적인 소음, 공기 역학적인 소음으로 분류할 수 있다(3) (그림 1. 참조)

전기적인 소음은 영구자석의 자속밀도, 자극과 슬롯의 수, 공극의 형태등과 같은 전동기 설계 사항과 밀접한 관계가 있으며 기계적인 소음은 전동기의 기계적인 구조학 즉 브러시의 형태, 베어링 등의 특성에 의하여 나타나게 되며 airborne noise의 경우는 난류등의 소음이 나타나고, 특히 회전기의 날개에 부착하는 경우에는 새로운 형태의 소음특성이 나타나게 된다(fan noise).

회전에서 발생하는 소음특성을 분석하기 위해서 직류 전동기와 유도 전동기를 무부하 운전시켜 발생한 소음을 마이크로폰으로 채집하고 A/D 변환기를 이용하여 IBM PC/AT에 소음신호를

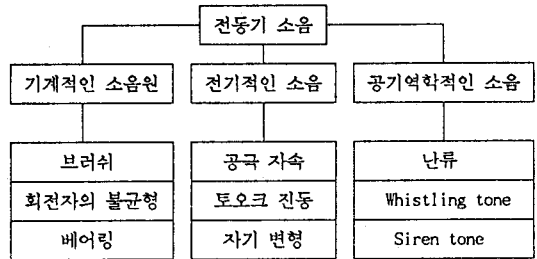


그림 1. 전동기의 소음특성

저장하고 FFT로 소음신호의 주파수 분포를 고찰하였는데, 그림 2는 정격전압 100[V] 최대전류 28[A], 출력 2.2 [kW], 정격속도 1800 [RPM]인 직류 전동기의 소음 신호를 FFT한 결과이고, 그림 3은 정격전압 220[V], 정격전류 8.5[A], 출력 2.2[kW], 정격속도 1800[RPM]인 유도전동기의 소음 신호를 FFT한 결과이다.

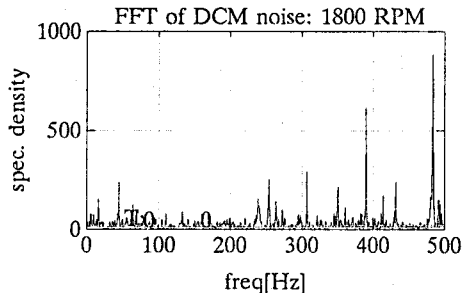


그림 2. 직류 전동기의 소음특성

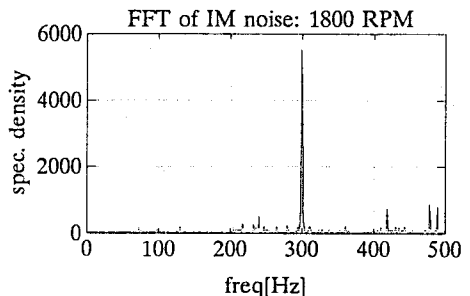


그림 3. 유도 전동기의 소음특성

3. 모드 분석

밀폐된 3차원 공간에서의 소음전달 특성을 알기 위해 모드 분석을 행하였는데, 그림 4는 능동 소음 제어를 위해 제작된 모델룸의 도면이다. 모드 분석을 위해서 IBM PC 에서 백색 정규 분포 잡음을 만들어 이를 D/A 변환기를 통해 loudspeaker에 보내어 소음을 발생시키고, 이를 마이크로폰으로 채집하였는데(표본화 주파수 5kHz, data 수: 4000), 우선 인체의 청각 감지 높이인 z=1.6m 에서 그림 5와 같이 균등 간격(0.4m x 0.6m)으로 36개의 node를 나누어서 분석을 행하여 FFT를 해본 결과 19.5Hz, 29.3Hz, 39.1Hz에 각각의 모드가 있음을 알 수 있었고, 그림 6은 일례로 node 7에 대한 FFT 결과와 1 번째 모드의 음압분포를 보인 것이다.

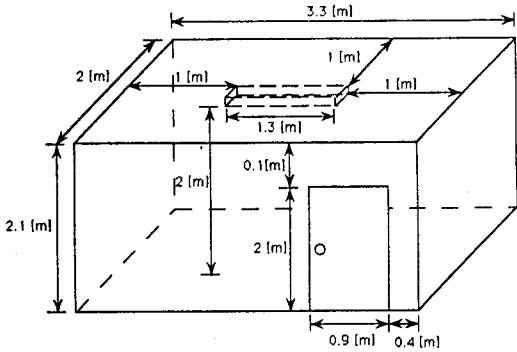


그림 4. 모델룸

	Y	1	2	3	4	5	6
X	7	8	9	10	11	12	
	13	14	15	16	17	18	
	19	20	21	22	23	24	
	25	26	27	28	29	30	
	31	32	33	34	35	36	

소음원 (z=0)

그림 5. node 의 분할

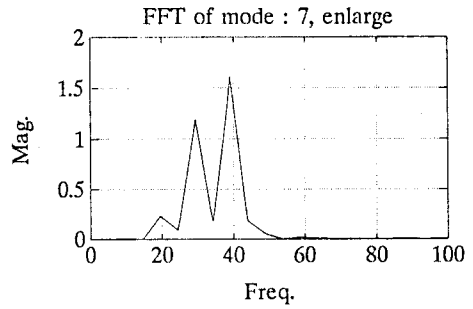
4. 다중 채널 LMS 알고리즘

밀폐된 공간내에 예를 들어 100Hz 정도의 주파수를 가지는 소음원이 있다면 이 공간내에서는 많은 음향모드가 여기되는데, 이론적으로 완전한 소음제거를 위해서는 여기되는 음향모드의 수 만큼 2 차 음원이 필요하나 실제로 하나의 음향모드를 다른 음향 모드의 여기없이 독립적으로 제어한다는 것은 매우 어려운 일이므로 여러개의 오차 마이크로폰 출력의 제곱의 합을 최소화하는 능동 소음 제어계를 구성하는 것이 실질적이다[5].

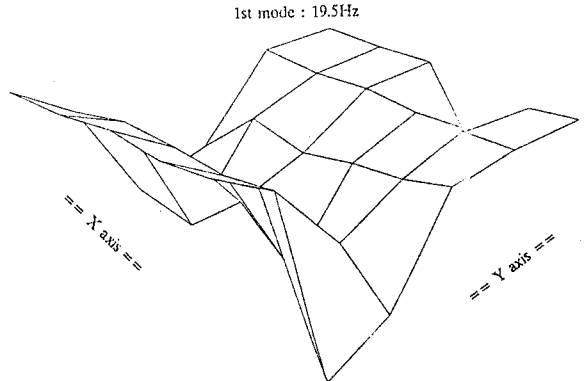
그림 7은 다중채널 기법을 이용한 능동 소음 제어계를 보인 것으로 소음원은 (P)이고, 기준신호 (X)는 음향개환이 없다는 가정하에서 측정된다고 가정하며, 오차 마이크로폰은 (ei) 이며 2 차 제어소음원은 (wi)이다.

따라서 오차 신호의 제곱의 합을 최소화 하도록 적응 필터를 설계하는데 적응필터의 계수들은 LMS 알고리즘에 의해 구해진다.

만일 소음원의 주파수중에 1개 고조파만을 제거하고자 한다면 디지털 필터의 설계는 주파수 영역해석에 의해 다음과 같이 간략화시킬 수 있다.



(a) node 7에 대한 FFT 결과



(b) 1번째 모드의 음압 분포

그림 6. 모드 분석 결과

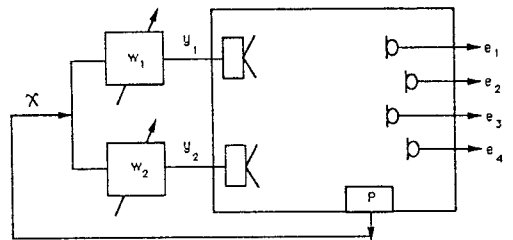


그림 7. 3차원 공간에서의 능동 소음제어계.

n 번째 고조파에서 1 번째 오차 신호의 2차 음원 신호 복소 성분을 $E_1(\omega_n)$ 이라고 할때 제어 대상 시스템이 선형이라고 가정하면 중첩 현상은 (1)식과 같이 오차 신호의 일반식으로 표현할 수 있다.

$$E_1(\omega_n) = D_1(\omega_n) + \sum_{m=1}^M C_{1m}(\omega_n) W_m(\omega_n) \quad (1)$$

여기서 $D_1(\omega_n)$ 은 소음원으로 인한 1 번째 복소 오차 신호 이고, $C_{1m}(\omega_n)$ 은 n 번째 고조파일때, m 번째 2차 음원에서 1 번째 마이크로폰까지의 복소 응답이고 벡터 형태로 나타내면 (2) 식과 같다.

$$E(\omega_n) = D(\omega_n) + C(\omega_n) W(\omega_n) \quad (2)$$

(2)식은 제어 대상 시스템이 시불변이라고 가정하였지만 실제로는 이를 만족하기 어려우므로 시변이거나 미지인 제어 대상 시스템의 파라미터를 추정하기 위하여 오차 신호와 2차 음원 구

동 신호를 포함하는 일반화된 비용함수를 이용한 최적사법으로 적응 알고리즘을 도출한다. 일반적으로 단일 소음원에 대한 비용함수는 (3)식과 같이 표현할 수 있다.

$$J = E^H A E + W^H B W \quad (3)$$

여기서 H는 벡터(또는 행렬)의 conjugate transpose이며 E와 W는 Lx1, Mx1 차수의 복소 오차 신호와 복소 2차 음원 신호이다. 그리고 A와 B는 LxL, MxM 차수의 비중 행렬(positive definite)이며 해를 구하기 위해 오차 신호를 비중 행렬없이 제곱을 하고 2차 음원 신호의 제곱에 비중 변수 β 를 고려한 비용 함수는

$$J = E^H E + \beta W^H W \quad (4)$$

(2)식을 (4)식에 대입하면 W에 대한 quadratic form을 얻는다.

$$J = D^H D + W^H C^H D + D^H C W + W^H [C^H C + \beta I] W \quad (5)$$

오차 마이크로폰의 수가 2차 음원의 수보다 크거나 같다면(L >= M), 이 행렬은 positive definite 이고, 따라서 오차 표면은 유일한 global minimum을 가지며 다음과 같은 복소 gradient 벡터 g를 정의할 수 있다.

$$g = 2 [C^H C + [C^H C + \beta I] \beta W] \quad (6)$$

(6)식의 좌변을 0으로 놓았을때의 필터계수는 최적이 되므로

$$W_{opt} = - [C^H C + \beta I]^{-1} C^H D \quad (7)$$

이 경우의 최적사법은 복소 gradient 벡터를 얻을 수 있다.

$$g = 2 [C^H C + \beta W] \quad (8)$$

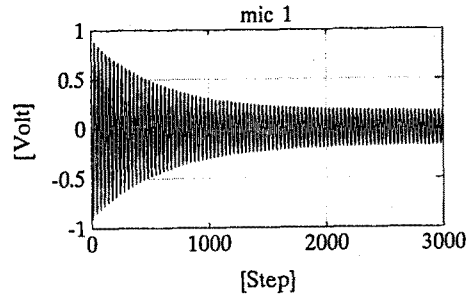
따라서 k번째 갱신식에서 gradient에 반비례하도록 복소 2차 음원신호를 조정하여 최적사 알고리즘을 얻는다.

$$W(k+1) = (1 - \alpha \beta) W(k) - C^H E(k) \quad (9)$$

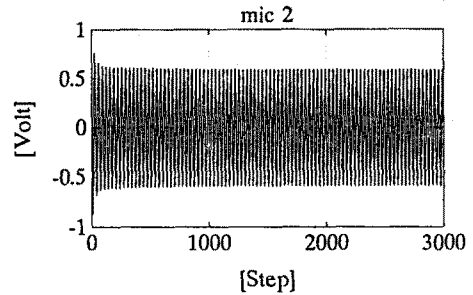
여기서 α 는 수렴 계수이다.

5. 시뮬레이션 및 검토

설계한 능동 소음 제어계의 특성을 분석하기 위하여 제작한 모델들의 실제 치수를 대입하고 소음원과 마이크로폰 사이의 전달함수는 지연시간만 있다고 가정하고 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 130Hz의 정현파(1V[p-p])를 발생하는 1차 소음원은 node 31에, 2차 음원은 node 3, 33에 두었고(각각 z=0), 오차 마이크로폰은 node 16, 17, 22, 23(z=1.6m)에 두었다(2차 음원: 2, 오차 마이크로폰: 4, 표본화 주파수: 2kHz). 그림 8은 node 16, 22의 오차 마이크로폰의 감쇄 특성을 보인 것으로, node 16에서 감쇄가 일어나고 있음을 알 수 있다.



(a) node 16



(b) node 22

그림 8. 모델 롬에 대한 능동 소음 제어

6. 결론

회전기에서 발생하는 소음의 특성을 분석하였고, 3차원 공간에서의 모드 분석을 통하여 능동 소음 제어계의 제어 대상 플랜트의 동 특성을 분석하였으며 다중 채널 LMS 알고리즘을 이용하여 3차원 공간의 능동 소음 제어계를 설계하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘의 유용성을 보였다.

향후 연구 과제로는 모드 분석을 통하여 얻어진 데이터로 소음원과 오차 마이크로폰 사이의 전달함수를 모델링하고 제안한 능동 소음 제어계를 DSP를 이용하여 구현하는 것으로, 연구가 진행중에 있으며 추후 발표할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Lueq P., "Process of silencing sound oscillations", US Patent 2043 416 1934.
- [2] P. A. Nelson and S. J. Elliot, Active control of sound, Academic Press, 1992.
- [3] Kh. Eghtesadi, "Comparison of noise spectra of small motors", Inter-noise 1989, Dec., 4-6, pp. 163-166.
- [4] R. G. White, J. G. Walker, Noise and Vibration, John Wiley, 1982.
- [5] S. J. Elliot and C. C. Boucher, P. A. Nelson, "The behavior of multiple channel active control system", IEEE Tr. on Signal Processing, Vol. 40, No. 5, May, 1992.

본 연구는 한국 전력 공사의 지원에 의하여 수행되었음