

## 덕트내에서의 능동소음제어 시스템의 비교연구

강 택 동<sup>\*\*</sup> 홍 석 기<sup>\*</sup> 안 동 준<sup>\*\*</sup> 남 현 도<sup>\*</sup>

\* 단국대학교 전기공학과

\*\* 대천전문대학 전기공학과

## Comparison of Active Noise Control Systems in a Duct

Tae-Dong Kang<sup>\*\*</sup> Suk-Gi Hong<sup>\*</sup> Dong-Jun Ahn<sup>\*\*</sup> Hyun-Do Nam<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Dept. of Electrical Eng. Dankook Univ.

<sup>\*\*</sup> Dept. of Electrical Eng. Dae-Chun Junior College

**Abstract -** Effects of positions of transducers and of distances between transducers on attenuation properties of active noise control systems is investigated via computer simulations. Computer simulations show that the acoustic monopole and dipole systems for duct noise attenuation are sensitive to variations of the transducer location.

### 1. 서론

공조용 덕트의 소음은 사무실 소음의 주요원인이 되고 있으므로 이러한 소음을 제거해야 할 필요성이 점차 증대되고 있다. 공조용 덕트내에서의 저주파 소음을 효율적으로 제거하기 위해 서 단일극, 이중극, 그리고 3중극 등과 같이 여러가지 구조의 능동소음제어(active noise control, ANC) 시스템이 연구 발표되었다[1,2,3]. 일반적으로 공조용 덕트에서의 능동소음제어 시스템은 음향궤환 뿐만 아니라 센서 및 제어음원의 위치변화에 따라 제어능력이 크게 달라진다[4].

본 연구에서는 단일극, 이중극 시스템에서 센서와 스피커 사이의 전달함수를 전기음향 중첩모델을 이용하여 유도하였으며, 정규화된(Normalized) LMS 알고리즘[5] 이용하여 적응필터를 구성하였다. 각 시스템에 대하여 센서 및 스피커의 위치변화에 따른 제어기의 성능 및 제어결과를 시뮬레이션을 통해 고찰하였으며, 제어기가 최적의 성능을 보이는 트랜스듀서들의 위치선정에 대하여 논하였다.

덕트의 다운스트림 측이 개방된 경우와 밀폐된 경우를 고찰하였는데 시뮬레이션 결과 단일극 시스템은 센서 및 스피커의 위치변화에 덜 민감한 반면 수렴률이 다소 느린 특성을 보였으며, 디중극 시스템은 센서 및 스피커의 위치가 잘 선정된 경우에는 좋은 수렴특성을 보이나 그렇지 않은 경우에는 발산하므로 센서 및 스피커의 위치선정이 특히 중요함을 알 수 있었다.

### 2. 덕트의 수학적 모델링

#### 2.1 Lueg의 단일극 시스템

ANC 시스템이 음향축정에 의존하지 않고서도 소음원에서 발생된 신호의 추정이 가능하고 시스템의 동작으로 인해 추정이 영향을 받지 않는다면 소음신호를 상쇄시키는 제어음원의 동작신호를 발생시키기 위한 추정된 데이터의 필터링 작업이 상당히 단순해진다. 그러나 소음원으로부터 발생된 소음신호를 독립적으로 추정할 수 없는 경우에는 센서를 사용하여 측정해야 하는데, 이러한 경우에는 스피커에서 발생된 제어신호가 측정에 영향을 미치는 음향궤환 문제가 발생된다. 전기증첩모델을 이용하

여 덕트에 대한 ANC 시스템을 표현하면 그림 2.1, 2.2와 같다. 그림 2.1에서 덕트 내부를 전파하는 음파는 평면파이며, 음원과 센서가 서로 영향을 미치지 않도록 충분히 이격되어 있다고 가정하고 제어기의 전달함수에 중첩의 원리를 적용하면 음향, 전기 및 전기음향 시스템의 모든 성분들이 선형의 성질을 가지게 된다. 덕트단의 복소음압 반사계수가  $R_1, R_2$ 이며, 센서 및 제어음원이 무지향 특성을 가진다고 가정하면, 각 덕트경로의 전달함수  $A, B, C, F$ 를 계산할 수 있다. 이때, 각 트랜스듀서의 지향성은 일반적인 형태로 간주하고 부하특성을 무시한다.

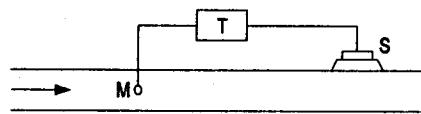


그림 2.1 Lueg의 단일극 시스템

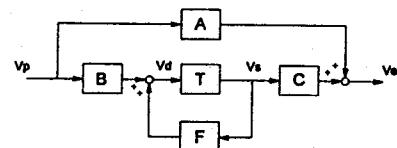


그림 2.2 블록선도로 표현된 중첩모델

음원 및 센서의 전달함수와 지향지수를 1로 가정하고 정상상태의 진행파 이론을 ANC 시스템에 적용하여 각 덕트경로에 대한 전기음향 전달함수  $A, B, C, F$ 를 유도하면 다음과 같다.

$$A = \frac{e^{-r(l_1+l_2+l)}}{(1+R_1 e^{-2\pi f_l})(1+R_2 e^{-2\pi f_l})} \quad (2.1)$$

$$B = \frac{e^{-r l_1}(1+R_1 e^{-2\pi f_l})(1+R_2 e^{-2\pi f(l_1+l_2+l)})}{(1-R_1 R_2 e^{-2\pi f_l})} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{e^{-r l_2}(1+R_1 e^{-2\pi f(l_1+l)})}{(1-R_1 R_2 e^{-2\pi f_l})} \quad (2.3)$$

$$F = \frac{R_1 R_2 e^{-r(2l-l)}(1+(1/R_1)e^{2\pi f(l_1+l)})(1+(1/R_2)e^{2\pi f(l_1+l)})}{(1-R_1 R_2 e^{-2\pi f_l})} \quad (2.4)$$

## 2.2 Swinbanks의 이중극 시스템

Lueg의 단일극 시스템은 제어음원에서 발생된 업스트림 음파 때문에 소음의 검출지점에서 음향궤환이 발생되는 문제점이 있다. 이러한 음향궤환을 제거하기 위한 여러가지 다중극 시스템들이 연구 발표되었다. 그러나 다중극 시스템은 다운스트림 음파만을 제공하는 반면 스피커, 검출 및 오차센서의 물리적인 위치변화에 따라 소음의 감쇄특성이 크게 달라지기 때문에 각 트랜스듀서의 위치선정시 주의를 해야한다. Swinbanks의 이중극 시스템은 주파수 종속적인 제어기 설계 및 이와 관련된 문제를 해결하기 위한 방안으로 제안되었다. 다시 말해서, 제어음원의 음방사로부터 검출센서를 격리시키거나 단일 지향성의 음방사를 발생시켜 음향궤환을 제거함으로써 시스템이 불안정해지는 것을 방지하고자 하였다. 그러나 이 시스템은 반사된 음파와 트랜스듀서의 위치변화에 민감하여 단일극 시스템에 비해 제어문제가 훨씬 더 복잡해진다.

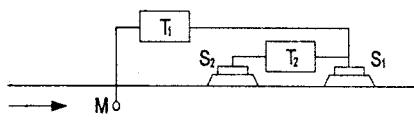


그림 2.3 Swinbanks의 이중극 시스템

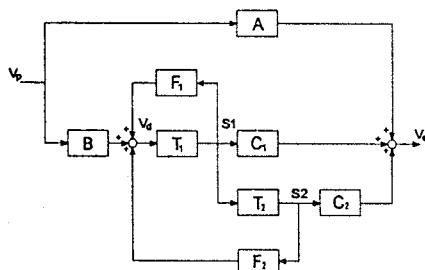


그림 2.4 불특선도로 표현된 중첩모델

그림 2.3과 2.4는 Swinbanks의 이중극 시스템에 대한 능동소음제어 시스템을 나타낸 것이다. 그림 2.3에 전기음향 중첩모델과 정상상태에서의 진행파 이론을 적용함으로써 각 덕트경로에 대한 전달함수  $A, B, C_1, C_2, F_1, F_2$ 를 얻을 수 있는데, 그 유도된 결과는 다음과 같다.

$$A = \frac{e^{-\gamma(l_1+h_1+l_2)}(1+R_1 e^{-2\gamma l_1})(1+R_2 e^{-2\gamma l_2})}{(1-R_1 R_2 e^{-2\gamma l})} \quad (2.5)$$

$$B = \frac{e^{-\gamma l_1}(1+R_1 e^{-2\gamma l_1})(1+R_2 e^{-2\gamma(l_1+h_1+l_2)})}{(1-R_1 R_2 e^{-2\gamma l})} \quad (2.6)$$

$$C_1 = \frac{e^{-\gamma l_1}(1+R_1 e^{-2\gamma(l_1+h_1+l_2)})(1+R_2 e^{-2\gamma l_1})}{(1-R_1 R_2 e^{-2\gamma l})} \quad (2.7)$$

$$C_2 = \frac{e^{-\gamma(l_1+l_2)}(1+R_1 e^{-2\gamma(l_1+h_1+l_2)})(1+R_2 e^{-2\gamma l_2})}{(1-R_1 R_2 e^{-2\gamma l})} \quad (2.8)$$

$$F_1 = \frac{R_1 R_2 e^{-\gamma(2l_1-h_1)}(1+(1/R_1)e^{2\gamma(l_1+h_1)})(1+(1/R_2)e^{2\gamma(l_1+h_1)})}{(1-R_1 R_2 e^{-2\gamma l})} \quad (2.9)$$

$$F_2 = \frac{R_1 R_2 e^{-\gamma(2l_1-h_1)}(1+(1/R_1)e^{2\gamma(l_1+h_1)})(1+(1/R_2)e^{2\gamma(l_1+h_1)})}{(1-R_1 R_2 e^{-2\gamma l})} \quad (2.10)$$

## 3. 트랜스듀서의 위치변화에 따른 감쇄특성

### 3.1 Lueg의 단일극 시스템

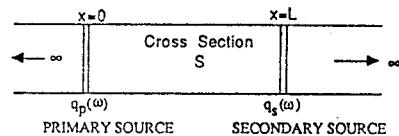


그림 3.1 단일극 음원을 이용한 다운스트림 음파의 제거

그림 3.1에서 소음원으로부터 발생된 음압과 제어음원에서 방사된 음파의 음압을 각각 식(3.1), (3.2)와 같이 정의하면

$$p_p(x, \omega) = z q_p(\omega) e^{-ik|x|}, \quad z = \frac{\rho_0 c_0}{2S} \quad (3.1)$$

$$p_s(x, \omega) = z q_s(\omega) e^{-ik|x-L|} \quad (3.2)$$

선형중첩의 원리로부터 덕트 내부를 전파하는 전체음압은

$$p(x, \omega) = p_p(x, \omega) + p_s(x, \omega) \quad (3.3)$$

$x \geq L$  영역에서  $p(x, \omega) = 0$ 이므로

$$0 = z q_p(\omega) e^{-ikx} + z q_s(\omega) e^{-ik(x-L)} \quad (3.4)$$

$$q_s(\omega) = -q_p(\omega) e^{-ikL} \quad (3.5)$$

단일극 시스템의 경우 제어음원에서 방사되는 음파는 소음파와 크기는 같고  $180^\circ$  위상차를 가져야 한다. 즉 소음원과 제어음원 사이의 거리가 소음파의 반파장의 배수일 때 파괴적인 간섭이 발생하여 다운스트림에서 소음이 감쇄된다. 그러나 제어음원에 의해 음향궤환이 발생하기 때문에 검출 및 오차센서의 위치변화에 따라 시스템의 소음 감쇄성능이 크게 달라진다.

### 3.2 Swinbanks의 이중극 시스템

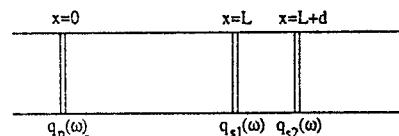


그림 3.2 이중극 음원을 이용한 다운스트림 음파의 제거

그림 3.2에서  $x \leq L$  영역에서  $p(x, \omega) = 0$ 이기 위해서는 아래의 조건을 만족해야 한다.

$$q_{s1}(\omega) = -q_{s2}(\omega) e^{-ikd} \quad (3.6)$$

$x > L+d$ 에서 음압의 분포는 식(3.7), (3.8)과 같다.

$$p(x, \omega) = z q_{s1}(\omega) e^{-ik(x-L)} + z q_{s2}(\omega) e^{-ik(x-(L+d))} \quad (3.7)$$

$$p(x, \omega) = z q_{s1}(\omega) e^{ik(x-L)} \{2j \sin kd\} \quad (3.8)$$

이 영역에서 전체 음압의 분포는

$$p(x, \omega) = z q_p(\omega) e^{ikx} + z q_{s2}(\omega) e^{ik(x-L)} \{2j \sin kd\} \quad (3.9)$$

만약,  $x \geq L+d$ 에서  $p(x, \omega) = 0$ 이면 소음원과 제어음원의 관계는 다음과 같다.

$$q_{s2}(\omega) = \frac{-q_p(\omega) e^{-ikL}}{2j \sin kd} \quad (3.10)$$

이중극 시스템은 소음원과 스피커 사이의 이격거리 뿐만 아니라 각 트랜스듀서 간의 거리에도 민감하게 작용하기 때문에 단일극 시스템에 비하여 적절한 트랜스듀서의 위치를 선정하기가 어렵고 제어문제도 훨씬 더 복잡하다.

### 3.3 시뮬레이션 및 검토

#### 3.3.1 단일극 시스템의 경우

본 절에서는 시뮬레이션을 통하여 제어음원 및 센서의 위치변화에 따른 시스템의 감쇄특성을 살펴보고 그 결과로부터 음원과 센서의 적절한 위치선정 문제를 고찰하였다. 300[Hz]의 단일 주파수(pure tone) 특성을 갖는 신호에 대하여 샘플링 주파수는 2[kHz], 음속은 340[m/s]로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Filtered-X LMS 알고리즘을 사용하여 ANC 시스템을 구성하였으며, 제어필터의 적용 알고리즘으로는 정규화된 LMS 알고리즘을 사용하였다. 스피커 및 센서는 무지향 특성을 가지며, 덕트단에서의 반사계수  $R_1, R_2$ 는 0.1로 가정하였다.

덕트의 다운스트림 측이 개방된 경우와 밀폐된 경우에 대하여 각각 센서와 스피커의 위치를 바꾸어 가면서 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 소음원과 검출센서 사이의 거리가 소음신호의 파장의  $(2n-1)\lambda/2, n=1,2,\dots$ 이고 검출센서와 제어음원 사이의 거리가 파장의 정수배인  $n\lambda, n=1,2,\dots$ 일 때 좋은 성능을 보였다. 둘째, 소음원과 검출센서의 거리가  $n\lambda, n=1,2,\dots$ 이고 검출센서와 제어음원 사이의 거리가  $(2n-1)\lambda/2, n=1,2,\dots$ 인 경우에 소음이 크게 감쇄되었다. 이때, 오차센서의 거리는 소음원과 검출센서 사이의 거리 보다 작게 선정된 경우에 수렴이 보장되었으며, 그렇지 않은 경우에는 발산하거나 매우 느리게 수렴하였다. 셋째, 소음신호의 파장의  $(2n-1)\lambda/4, n=1,2,\dots$  지점에 스피커 및 센서를 위치시키는 경우에는 발산하거나 매우 느린 수렴특성을 보였다.

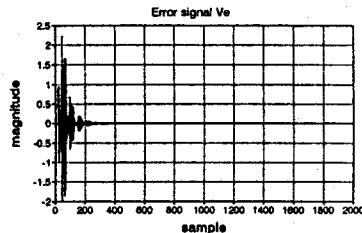


그림 3.3 개방 :  $I_1 = 7\lambda/8, I_2 = 5\lambda/4, I_3 = 3\lambda/4$

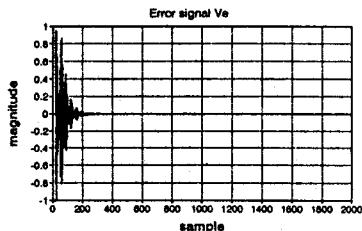


그림 3.4 밀폐 :  $I_1 = 9\lambda/8, I_2 = 5\lambda/4, I_3 = \lambda$

#### 3.3.2 이중극 시스템의 경우

이중극 시스템은 단일극 시스템과 마찬가지로 트랜스듀서가 소음신호의  $(2n-1)\lambda/4, n=1,2,\dots$  파장에 위치할 때 발산하거나 느린 수렴특성을 보였다. 이중극 시스템에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

첫째, 소음원과 검출센서가  $(2n-1)\lambda/2, n=1,2,\dots$ 로 이격되고 다운스트림 소음을 제거하는 제어음원과 검출센서 사이의 거리가  $(2n-1)\lambda/2, n=1,2,\dots$ 일 경우에는 음향궤환을 제거하는 제어음원은 음향궤환을 발생시키는 제어음원과 검출센서 사이의 거리 만큼 떨어져 있고 오차센서는 소음원과 검출센서 사이의 거리보다 작은 지점에 위치할 때 좋은 성능을 보였다. 둘째, 소음원과 검출센서 사이의 거리가  $(2n-1)\lambda/2, n=1,2,\dots$ 이고 다운스트림 소음을 제거하는 제어음원과 검출센서 간의 거리가  $n\lambda, n=1,2,\dots$ 이며, 두 제어음원 사이의 거리가  $n\lambda, n=1,2,\dots$ 일 때 소음이 크게 감소되었다.

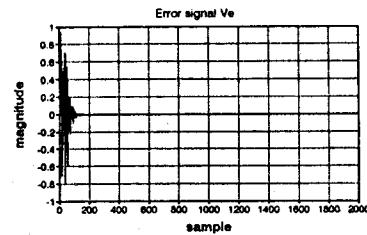


그림 3.5 개방 :  $I_1 = 9\lambda/4, I_2 = 7\lambda/8, I_3 = \lambda, I_4 = 5\lambda/4$

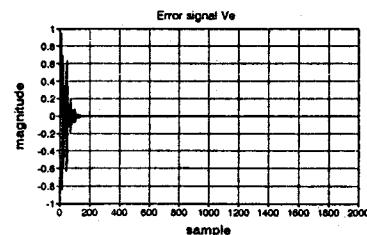


그림 3.6 밀폐 :  $I_1 = 9\lambda/4, I_2 = 7\lambda/8, I_3 = 11\lambda/4, I_4 = 5\lambda/4$

#### 4. 결론

본 연구에서는 스피커 및 센서의 위치선정문제에 따른 능동소음제어 시스템의 감쇄성능을 고찰하기 위해서 단일극 및 이중극 시스템의 각 덕트경로에 대한 전기음향 전달함수를 유도하였으며, 시뮬레이션을 통하여 트랜스듀서의 위치변화에 따른 제어성능을 고찰하였다. 시뮬레이션은 덕트의 디운스트림 측이 개방된 경우와 밀폐된 경우에 대하여 수행하였다.

단일극 시스템은 센서와 스피커의 위치변화에 덜 민감하며 수렴이 다소 느린 특성을 보이는 반면, 이중극 시스템은 센서 및 스피커의 위치변화에 민감하기 때문에 각 트랜스듀서의 위치가 적절히 선정된 경우에는 수렴특성이 우수하지만 그렇지 않은 경우에는 발산하거나 잘 수렴하지 않는 경향을 보인다.

음향궤환 및 덕트단에서의 반사파의 영향 때문에 제어음원, 검출 및 오차센서의 상호관계를 해석적으로 얻기가 용이하지 않음을 알 수 있다. 따라서 트랜스듀서 사이의 상호적인 이격거리의 관계를 보다 해석적으로 고찰해 볼 필요가 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Swinbanks M. A. "The active control of sound propagation in long ducts," Journal of Sound and Vibration, 27(3), pp. 411-436, 1973.
- [2] Jessel M. and Angevine O. L. "Active sound absorbers in an air duct," Journal of Sound and Vibration, 23(3), pp. 383-390, 1972.
- [3] Leventhal, H. G. and Eghatesadi, Kh. "Active attenuation of noise : monopole and dipole systems," Proceedings of Inter-noise 79 : International Conference on Noise Control Engineering, Warsaw, I, 175-80, 1979.
- [4] Leitch, R. R. and Tokhi, M. O., "The implementation of active noise control systems using digital signal techniques," Proceedings of the Institute of Acoustics, 8, Part 1, 147-57, 1986.
- [5] G. C. Goodwin, K. S. Sin "Adaptive Filtering, Prediction, and Control," Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1984.

본 연구는 한국과학재단 특정연구과제의 지원에  
의하여 이루어졌음.