

덕트내에서의 능동 소음 제거를 위한 Transducer의 최적 위치 선정

(Optimal Selection of Transducer Locations for Active Cancelation of Noise in a Duct)

남 현 도* · 강 택 동**

(Hyun-Do Nam · Taeg-Dong Kang)

요 약

제어용 스피커 및 검출용 마이크로폰 등 트랜스듀서들의 위치는 능동 소음제어 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다. 능동 소음제어 시스템의 음향 특성이 매우 복잡하고, 유체 밀도, 복소 전파계수 등 음향 파라미터들의 값을 실제 적용 시에는 알 수 없는 경우가 많아 트랜스듀서들의 위치가 능동 소음제어 시스템의 성능에 미치는 영향을 해석적으로 구하기는 매우 어렵다.

본 논문에서는 트랜스듀서들 간의 전달함수들을 중첩의 원리를 이용하여 유도하였으며, 트랜스듀서들 간의 거리가 능동 소음제어 시스템의 성능에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 연구하였다.

단일극 시스템은 소음원과 제어 음원 사이의 거리에 영향을 받으며, 이중극 시스템은 두 제어 음원 사이의 거리와 소음원과 1차 제어 음원 사이의 거리에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

Abstracts

The attenuation property of active noise control system is much dependent on the locations of transducers. It is very difficult to determine the optimal locations of transducers analytically, because the acoustic behaviors in active noise control systems are very complex and the acoustic parameters, fluid density, complex propagation coefficients, etc., are usually unknown.

In this paper, effects of positions of transducers and of distances between transducers on attenuation properties of active noise control systems is investigated via computer simulations. The transfer functions between the transducers are derived using the superposition principle for computer simulations.

Computer simulations show that the acoustic monopole and dipole systems for duct noise attenuation are sensitive to variations of the transducer location.

* 정회원 : 단국대학교 전기공학과 교수

** 정회원 : 단국대학교 대학원 전기공학과

접수일자 : 1998. 12. 4.

1. 서론

사무실 소음의 주요 원인이 되고 있는 공조용 덕트 내에서의 저주파 소음을 효율적으로 제거하기 위한 단일극, 이중극 및 3중극과 같은 여러 가지 구조를 갖는 능동 소음 제어(active noise control, ANC) 시스템이 연구되어 왔다[1-3].

능동 소음제어 시스템은 제어기의 구조에 따라 소음이 많은 공장 등에서 사용되는 헤드폰과 같이 모든 소리를 제거하는 폐환 제어(feedback control) 방식과 자동차와 비행기 내부의 소음 제어와 같이 승객의 대화 및 오디오 시스템 등에는 영향을 주지 않고 원하지 않는 소음만을 선택적으로 제거하는 전향 제어(feedforward control) 방식으로 분류할 수 있다[4-5]. 전향 제어 시스템은 센서에서 검출된 기준 신호와 제어 대상 신호의 상관 관계를 이용하여 비교적 넓은 영역에서의 소음 감쇄가 가능한 광역 제어 방식인 반면, 제어 음원에서 발생한 제어 음파가 소음원 방향으로 역전되어 소음 신호를 검출하기 위한 센서에 검출되는 음향 폐환이 발생되어 시스템의 성능이 저하되거나 불안정해질 수 있다[6].

한 개의 제어용 스피커만 사용하는 단일극 시스템은 제어 음원으로부터 방사된 음파가 덕트 내부에서 반사하여 소음파와 동시에 센서에서 검출되어 소음 제어를 어렵게 만들므로 이러한 음의 반사를 피하기 위한 연구들이 진행되어 왔다[7-10]. Swinkbanks[7]는 두 개의 제어 음원을 사용하여 반사된 음파가 업스트림으로 전파되는 것을 억제하는 이중극 시스템을 제안하였다. 두 개의 제어 음원을 사용하는 이중극 시스템은 음향폐환의 영향을 적게 받는 장점이 있으나 제어 음원의 수가 많아지게 되어 음장의 제어가 어렵고 비용이 높아지며 트랜스듀서들의 위치에 영향을 많이 받는다고 알려져 있다[3].

본 연구에서는 제어기의 성능에 영향을 미치는 트랜스듀서들의 최적 위치 선정에 관하여 연구하였다. 지금까지는 이론적인 해석의 어려움으로 트랜스듀서들의 최적 위치에 관한 연구가 없어 경험에 의존하거나 시행착오법으로 트랜스듀서들의 위치를 선정하여 왔다[3].

능동 소음제어 시스템에 가장 많이 사용되고 있는 단일극 및 이중극 시스템에 대하여 검출 및 오차 센서와 제어 음원으로써 사용되는 스피커 사이의 전달

함수를 전기 음향 중첩 모델을 이용하여 유도하였으며, LMS 알고리즘을 이용하여 적응 필터를 구성하였다.

두 시스템에 대하여 센서 및 스피커의 위치 변화에 따른 제어기의 성능 및 제어 결과를 시뮬레이션을 통해 고찰하였으며, 제어기가 최적의 성능을 보이는 트랜스듀서의 위치를 선정하였다.

2. 덕트의 수학적 모델링

2.1 단일극 시스템

신호가 주기적인 경우나, 자동차 내부의 소음제어와 같이 연소 기관에 의해 잡음이 발생하는 경우에는 엔진의 회전속도와 소음신호는 상당한 연관 관계를 가지므로 소음 신호를 측정하지 않고 소음 신호의 추정이 가능하므로 이를 이용하여 소음 신호를 상쇄시키는 제어 신호를 계산할 수 있다. 소음 신호를 쉽게 추정할 수 없는 경우에는 마이크로폰을 사용하여 측정해야 하는데 이러한 경우에는 제어 음원에서 발생한 제어 신호가 소음 신호의 측정에 영향을 주는 음향 폐환 문제가 발생되어 제어가 어렵게 된다.

덕트에 대한 능동 소음 제어 시스템과 이에 대한 블록선도는 각각 그림 1과 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, R_1 과 R_2 는 덕트 상단 및 하단의 반사 계수이며, 센서 및 제어 스피커가 무지향의 특성을 보인다고 가정하였다. 덕트 내부를 전파하는 음파는 평면파로 가정하였으며 음원과 센서가 서로 영향을 미치지 않도록 충분히 이격되어 있다고 가정한다. V_p 와 V_s 는 소음원 및 제어 스피커를 구동하기 위한 전기적인 입력 신호이며, V_d 와 V_e 는 검출 및 오차 센서에서 측정되는 전기적인 출력 신호를 나타내고 있다.

1차 경로 전달 함수 $A(z)$ 는 소음원만을 동작시킨 경우 오차 및 검출 센서에 측정되는 신호의 비로 정의되며 오차 경로(2차 경로) 전달 함수 $C(z)$ 는 제어 음원만을 동작시켰을 때 오차 센서의 출력 신호와 제어 음원으로 들어가는 입력 신호의 비로 정의된다. 제어 음원의 근접 효과(near-field effect), 즉 스피커에서 발생한 고차의 감쇄 모우드 음파가 잔류 소음과 함께 측정되는 현상을 피하기 위해 오차 센서를 제어 음원으로부터 어느 정도 떨어진 위치에 설치하여야 하고, 잔류 소음의 검출 위치와 제어 음원을 통

한 소음 제어의 위치가 다른 점을 고려하여야 한다. 오차 경로는 이러한 제어 음원과 오차 센서 사이의 경로를 고려하기 위한 것이며 음향 제한 경로의 전달 함수 $F(z)$ 는 제어 음원에서 발생된 제어 음파가 상부(upstream)로 전파하여 소음과 함께 검출 센서에서 측정되는 효과를 고려하기 위한 것이다.

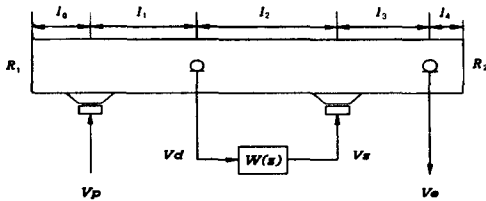


그림 1. 덕트의 구조
Fig. 1. Structure of a duct

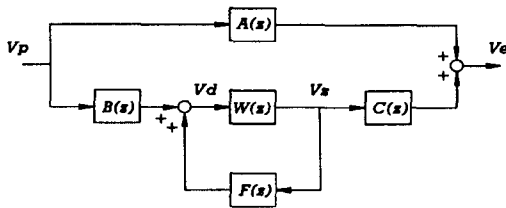


그림 2. 중첩 모델에 이용한 능동 소음 제어 시스템의 블록선도
Fig. 2. Block diagram of ANC system using superposition models

그림 2의 블록선도에서 제어기의 전달 함수에 중첩의 원리를 적용하면 음향, 전기 및 전기 음향 시스템은 다음과 같은 선형방정식으로 나타낼 수 있다.

$$V_e = AV_p + CV_s \quad (1)$$

$$V_d = BV_p + FV_s \quad (2)$$

덕트에 대한 전기 음향 시스템에서 음원 및 센서를 무지향 트랜스듀서라고 가정하면 각각의 덕트 경로에 대한 전달 함수 A, B, C, F 의 계산이 가능하며, 이것을 이용하여 이상적인 제어기의 모델을 얻을 수 있다. 여기서 k 는 복소 전파계수이며, 트랜스듀서의 전달 함수 H 및 지향 지수 D 는 복소 주파수 함수로 표현된다. 지향 지수는 소음의 진행 방향에

대한 반대 방향의 감도비를 표시하며 무지향성(omnidirectional)인 경우는 1이 되고, 지향성(uni-directional)인 경우에는 0이 됨을 뜻하며 아래 첨자 d 와 e 는 각각 검출 및 오차 센서의 전달함수 및 지향 지수를 나타내고, 아래 첨자 p 와 s 는 소음원과 제어 스피커의 전달함수 및 지향 지수를 의미한다. 전기 중첩 모델과 정상 상태 진행과 이론을 그림 1에 적용하면 다음과 같이 각 덕트 경로에 대한 전기 음향 전달 함수를 유도할 수 있다.

$$A = \frac{H_e H_p e^{-k(l_1+l_2+l_3)} \{1 + D_e R_2 e^{-2kl_4}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + D_p R_1 e^{-2kl_0}\} \quad (3)$$

$$B = \frac{H_d H_p e^{-kl_1} \{1 + D_d R_2 e^{-2k(l_2+l_3+l_4)}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + D_p R_1 e^{-2kl_0}\} \quad (4)$$

$$C = \frac{H_e H_s e^{-kl_3} \{1 + D_e R_2 e^{-2kl_4}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + D_s R_1 e^{-2k(l_0+l_1+l_2)}\} \quad (5)$$

$$F = \frac{H_d H_s R_1 R_2 e^{-k(2l-l_2)} \{1 + (D_d/R_1) e^{2kl_0+l_1}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + (D_s/R_2) e^{2kl_0+l_1}\} \quad (6)$$

2.2 이중극 시스템

Lueg의 단일극 시스템은 제어 음원에서 발생된 업스트림 음파 때문에 소음의 검출 지점에서 음향 제한이 발생되는 문제점이 있다. 이러한 음향 제한을 제거하기 위한 여러가지 다중극 시스템들이 연구 발표되었다. 그러나 다중극 시스템은 다운스트림 음파만을 제공하는 반면 스피커, 검출 및 오차 센서의 물리적인 위치 변화에 따라 소음의 감쇄 특성이 크게 달라지기 때문에 각 트랜스듀서의 위치 선정시 주의할 해야한다. Swinbanks의 이중극 시스템[7]은 주파수 종속적인 제어기 설계 및 이와 관련된 문제를 해결하기 위한 방안으로 제안되었다. 즉, 제어 음원의 음방사로부터 검출 센서를 격리시키거나 단일 지향성의 음방사를 발생시켜 음향 제한을 제거함으로써 시스템이 불안정해지는 것을 방지하고자 하

였으나 이 시스템은 반사된 음파와 트랜스듀서의 위치 변화에 민감하며 단일극 시스템에 비해 제어문제가 훨씬 더 복잡해진다.

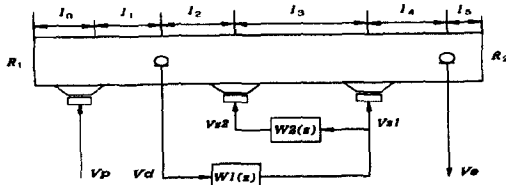


그림 3. Swinbanks의 이중극 시스템
Fig. 3. Dipole system of Swinbanks

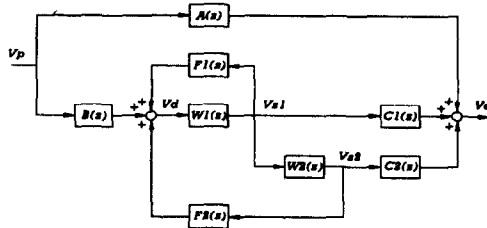


그림 4. 이중극 시스템의 블록선도
Fig. 4. Block diagram of a dipole system

그림 3과 그림 4는 Swinbanks의 이중극 시스템에 대한 능동 소음 제어 시스템을 나타낸 것이다. 그림 3에 전기 음향 중첩 모델과 정상 상태에서의 진행파 이론을 적용함으로써 각 덕트 경로에 대한 전달 함수 A, B, C1, C2, F1, F2 를 얻을 수 있는데, 그 유도된 결과는 다음과 같다.

$$A = \frac{H_e H_p e^{-k(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)} \{1 + D_p R_1 e^{-2kl_0}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + D_e R_2 e^{-2kl_5}\} \quad (7)$$

$$B = \frac{H_d H_p e^{-kl_1} \{1 + D_d R_2 e^{-2k(l_2 + l_3 + l_4 + l_5)}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + D_p R_1 e^{-2kl_0}\} \quad (8)$$

$$C1 = \frac{H_e H_{s1} e^{-kl_1} \{1 + D_{s1} R_1 e^{-2k(l_0 + l_1 + l_2 + l_3)}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + D_e R_2 e^{-2kl_5}\} \quad (9)$$

$$C2 = \frac{H_e H_{s2} e^{-k(l_3 + l_4)} \{1 + D_{s2} R_1 e^{-2k(l_0 + l_1 + l_2)}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + D_e R_2 e^{-2kl_5}\} \quad (10)$$

$$F1 = \frac{H_d H_{s1} R_1 R_2 e^{-k(2l - l_2 - l_3)} \{1 + (D_d/R_1) e^{2k(l_0 + l_1)}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + (D_{s1}/R_2) e^{2k(l_1 + l_3)}\} \quad (11)$$

$$F2 = \frac{H_d H_{s2} R_1 R_2 e^{-k(2l - l_2)} \{1 + (D_d/R_1) e^{2k(l_0 + l_1)}\}}{\{1 - R_1 R_2 e^{-2kl}\}} \times \{1 + (D_{s2}/R_2) e^{2k(l_3 + l_4 + l_5)}\} \quad (12)$$

3. 제어 음원의 최적 위치 선정

3.1 단일극 시스템

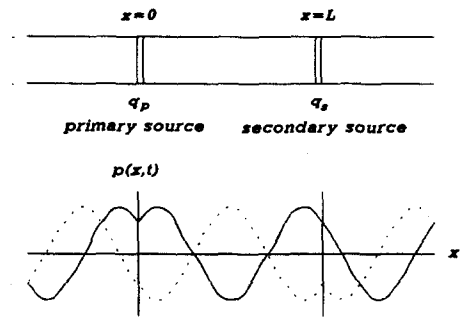


그림 5. 단일극 음원을 이용한 다운스트림 방사파의 제거 과정
Fig. 5. Cancellation procedure of downstream waves in monopole systems

그림 5와 같이 반무한(semi-infinite)의 덕트 내에서 \$x=0\$ 지점에 복소 음압의 세기가 \$q_p\$ 인 단일극 음원이 위치하며 이 음원으로부터 다운스트림 방향으로 \$x=L\$ 지점에 음압의 세기가 \$q_s\$ 인 단일극 음원이 위치한다고 가정하였을 때 두 음원이 독립적으로 동작하는 경우에 발생하는 복소 음압은 다음과 같다.

$$p_p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p e^{-jk|x|} \quad (13)$$

$$p_s(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_s e^{-jk|x-L|} \quad (14)$$

여기서 \$\rho_0\$는 공기 밀도, \$c_0\$는 음속, \$S\$는 단면의 면적이다.

중첩의 원리를 이용하여 총 복소 음압이 식(15)와 같이 되도록 1차 및 2차 음원에서 발생하는 음압의

음장을 증첩시키면 두 음원에 의해 형성되는 음장은 다음과 같이 표현된다.

$$p(x) = p_p(x) + p_s(x) \quad (15)$$

또한 2차 음원의 다운스트림 측의 음장이 0이 되도록 2차 음원의 세기를 다음과 같이 선정할 수 있다. 즉

$$p(x) = 0, \quad x \geq L \quad (16)$$

식(13), (14), (15)을 식(16)에 대입하면

$$\frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p e^{-jkx} + \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_s e^{-jk(x-L)} = 0, \quad x \geq L \quad (17)$$

그러므로 1차 음원과 2차 음원에서 발생한 복소 음압의 세기 사이의 관계는 식(17)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$q_s = -q_p e^{-jkL} \quad (18)$$

식(18)을 식(15)에 대입하면 1차 음원과 2차 음원 사이의 영역에서 총 복소 음압은 다음과 같은 형태를 취하게 된다.

$$p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p e^{-jkL} [e^{jk(L-x)} - e^{-jk(L-x)}], \quad 0 \leq x \leq L \quad (19)$$

이것은 1차 및 2차 음원 사이의 음장이 두 음원에 의해 형성되는 음장의 합성에 의해 크기는 같고 방향이 반대인 두 개의 진행파로 구성되는 정재파임을 보여준다. 따라서 1차 음원의 업스트림 복소 음압은

$$p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p [1 - e^{-j2kL}] e^{jkx}, \quad x \leq 0 \quad (20)$$

위의 식으로부터 1차 음원의 업스트림 영역에서는 업스트림 방향으로 진행하는 평면파만이 존재함을 알 수 있다. 이 평면파의 크기는 파라미터 kL 의 값

에 따라 변한다. 즉 $kL = n\pi$ 가 되는 kL 의 값에 대하여 평면파의 크기는 0이 된다. 따라서 임의의 주파수에 대하여 1차 및 2차 음장의 간섭에 의해 발생되는 총 음장은 음의 파장에 대한 두 음원 간의 이격 거리에 크게 의존함을 알 수 있으나, 실제의 경우에는 k 를 알 수가 없어 이론적으로 트랜스듀서의 최적 위치를 정하는 것은 매우 어렵다.

3.2 이중극 시스템

1973년 Swinkbanks[7]는 두 개의 제어 음원을 사용하여 반사된 음파가 업스트림으로 전파되는 것을 억제함으로써 덕트 내에서 다운스트림으로만 방사되는 이중극시스템을 실현하였다.

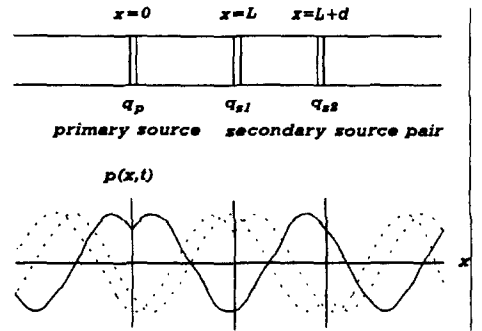


그림 6. 이중극 음원을 이용한 다운스트림 방사파의 제거 과정
Fig. 6. Cancellation procedure of downstream waves in dipole systems

만약 $x = L$ 지점에 음의 세기가 q_{s1} 인 제어 음원과 $x = L + d$ 지점에 음의 세기가 q_{s2} 인 제어 음원이 반무한의 덕트 내에 설치되어 있다면, 2차 제어 음원의 세기는 1차 제어 음원의 세기를 이용하여 얻을 수 있다.

$$q_{s1} = -q_{s2} e^{-jkd} \quad (21)$$

위의 식으로부터 1차 제어 음원의 세기는 2차 제어 음원의 크기와 반대이고 d/c_0 만큼의 지연 시간을 가져야 한다. 이 지연 시간은 음파가 2차 제어 음원의 업스트림으로부터 1차 제어 음원까지 전파되는

때 걸리는 시간이다. 이러한 두 음원의 관계를 이용함으로써 음의 업스트림 방사를 방지할 수 있다. 다운스트림에서 2차 제어 음원의 총 복소 압력은 다음과 같다.

$$p(x) = \frac{\rho_0 C_0}{2S} q_{s1} e^{-jk(x-L)} + \frac{\rho_0 C_0}{2S} q_{s2} e^{-jk(x-(L+d))}, \quad x \geq (L+d) \quad (22)$$

일반적으로 다운스트림 방사가 영이 되는 지점에는 여러개의 주파수가 존재한다. 이들 주파수들은 $\sin kd = 0$ 일 때 kd 의 값이며, 또한 두 제어 음원이 소음의 반파장의 정수배 만큼 이격되는 조건이기도 하다. 소음원이 동작할 때 다운스트림에서의 음압을 영으로 만들기 위한 제어 음원의 세기, 즉 2차 제어 음원의 다운스트림에서의 총 복소 압력식은 중첩의 정리를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(x) = \frac{\rho_0 C_0}{2S} q_p e^{-jkx} + \frac{\rho_0 C_0}{2S} e^{-jk(x-L)} \{j2\sin kd\}, \quad x \geq (L+d) \quad (23)$$

만약 $x > (L+d)$ 에 대하여 $p(x) = 0$ 조건을 적용하면, 2차 제어 음원의 세기는 다음과 같이 된다.

$$q_2 = \frac{-q_p e^{-jkl}}{j2\sin kd} \quad (24)$$

이 음원의 세기가 $\sin kd = 0$, 즉 두 제어 음원이 음파의 반파장의 정수배로 이격되는 주파수에서 무한이 됨을 의미한다. 즉, 두 제어 음원 사이의 거리가 $d = n\lambda$ 일 때 다운스트림에서의 음압을 0으로 만들기 위해서는 무한 크기의 제어 음원을 필요로 한다.

4. 시뮬레이션 및 결과 검토

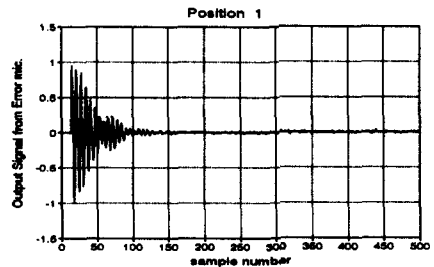
4.1 단일극 시스템

단일극 시스템의 경우, 그러나 제어 음원에 의해 음향 제한이 발생하기 때문에 검출 및 오차센서의 위치 변화에 따라 시스템의 소음 감쇄 성능이 크게

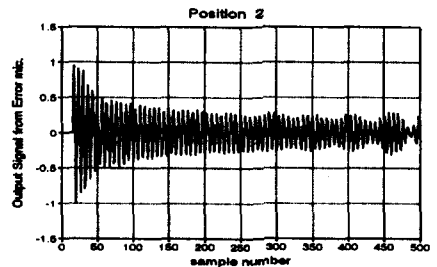
달라진다.

그림 7은 소음 신호의 파장을 λ 라고 할 때 단일극 음원을 이용한 덕트 시스템에 대하여 소음원과 제어 음원 사이의 거리가 각각 (a) $3\lambda/2$, (b) $7\lambda/4$, (c) $9\lambda/4$, (d) $5\lambda/2$ 만큼 이격되어 있는 경우 제어기의 감쇄 성능과 수렴 속도를 비교한 것이다. 소음 신호의 주파수 및 파장에 따른 제어 음원의 위치를 결정하기 위해서 150[Hz] 단일 주파수(pure-tone) 특성을 가지는 신호를 사용하였으며, 샘플링 주파수는 2[kHz], 음속은 340[m/s]로 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 적용 알고리즘으로는 정규화된 LMS 알고리즘을 사용하여 제어 필터를 구성하였으며, 덕트 양단에서의 반사 계수 R_1, R_2 , 는 0.1로 가정하였으며 H와 D는 1로 두었다. 센서와 스피커의 위치를 변화시키면서 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 소음의 감쇄 특성은 3장에서 본 바와 같이 소음원과 제어 음원 사이의 거리에 민감하였다. 둘째, 소음원과 제어 음원 사이의 거리가 $(2n-1)\lambda/2$, $n=1,2,\dots$ 일 때 좋은 성능을 보였다. 셋째, 소음원과 제어 음원 사이의 거리가 $n\lambda \pm \lambda/4$, $n=1,2,\dots$ 인 경우에는 발산하거나 매우 느린 수렴 특성을 보였다.

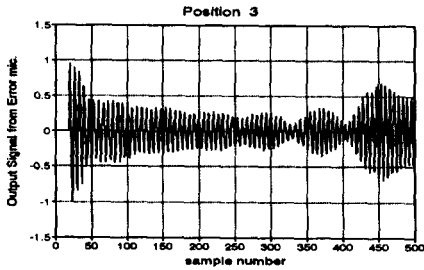


(a)

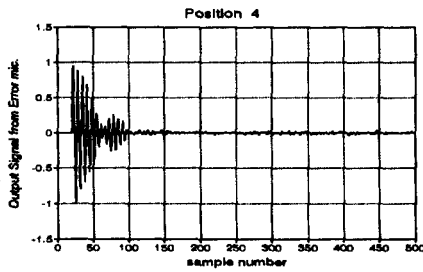


(b)

덕트내에서의 능동 소음 제거를 위한 Transducer의 최적 위치 선정



(c)



(d)

그림 7. 제어 음원의 위치 변화에 따른 감쇄 성능의 비교

(l_1+l_2 가 (a) $3\lambda/2$, (b) $7\lambda/4$,
(c) $9\lambda/4$, (d) $5\lambda/2$ 인 경우)

Fig. 7. Comparison of attenuation capacities according to positions of control loudspeakers

(when l_1+l_2 are (a) $3\lambda/2$, (b) $7\lambda/4$,
(c) $9\lambda/4$, (d) $5\lambda/2$, respectively)

4.2 이중극 시스템

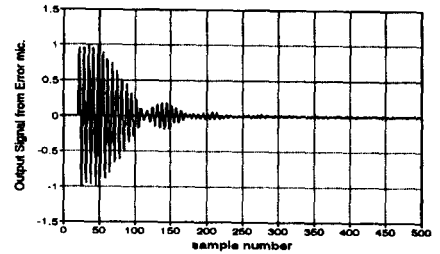
이중극 시스템은 소음원과 스피커 사이의 이격거리 뿐만 아니라 각 트랜스듀서간의 거리에도 민감하게 작용하기 때문에 단일극 시스템에 비해서 적절한 트랜스듀서의 위치를 선정하기가 어렵다. 이중극 시스템은 단일극 시스템에 비해 매우 복잡한 경향을 보였는데, 많은 시뮬레이션 결과 소음원과 1차 제어 음원 사이의 거리 및 두 제어 음원 사이의 거리에 민감한 특성을 보임을 알 수 있었다.

그림 8은 소음 신호의 파장을 λ 라고 할 때 이중극 음원을 이용한 덕트 시스템에 대하여 소음원과 1차 제어 음원 사이의 거리 및 두 제어 음원 사이의 거리가 각각 (a) $5\lambda/2$, $\lambda/2$, (b) $7\lambda/4$, $\lambda/2$ 일 경우

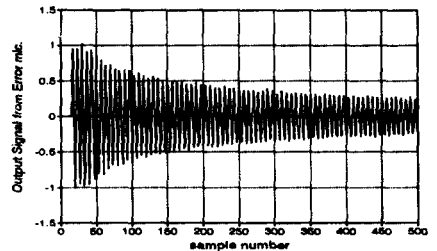
이중극 시스템의 감쇄 성능을 보인 것이며, 그림 9는 소음원과 1차 제어 음원 사이의 거리 및 두 제어 음원 사이의 거리가 각각 (a) $5\lambda/2$, $5\lambda/4$, (b) 2λ , $3\lambda/4$ 일 경우의 결과이며, 그림 10은 소음원과 1차 제어 음원 사이의 거리 및 두 제어 음원 사이의 거리가 각각 (a) 3λ , 2λ , (b) $7\lambda/4$, λ 일 경우의 시뮬레이션 결과이다.

시뮬레이션 결과로부터 다음과 같은 경향을 알 수 있었다.

첫째, 두 제어 음원 사이의 이격 거리가 $(2n-1)\lambda/2$, $n=1,2,\dots$ 일 때에는 소음원과 1차 제어 음원 사이의 거리가 $n\lambda \pm \lambda/4$, $n=1,2,\dots$ 인 경우를 제외하고는 제어 성능이 양호하였다. 둘째, 두 제어 음원 사이의 이격 거리가 $n\lambda \pm \lambda/4$, $n=1,2,\dots$ 인 경우에는 첫 번째 경우에 비해서는 다소 성능이 떨어지지만 1차 제어 음원의 위치 선정에 덜 영향을 받는다. 셋째, 두 제어 음원 사이의 이격 거리가 $n\lambda$, $n=1,2,\dots$ 일 경우에는 3장에서 본 바와 같이 수렴 특성이 좋지 않았다.



(a)

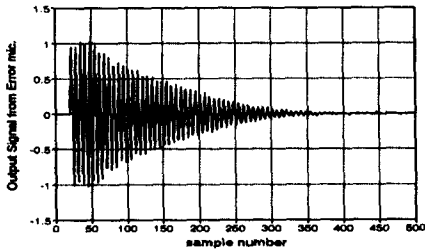


(b)

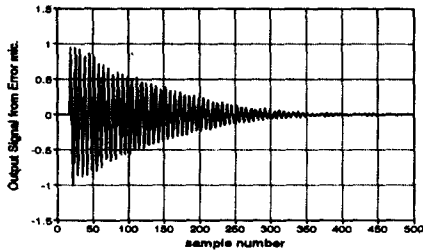
그림 8. 두 제어음원의 거리가 $(2n-1)\lambda/2$ 인 경우의 감쇄 성능

(l_1+l_2 가 및 l_3 가 각각 (a) $5\lambda/2$, $\lambda/2$,
(b) $7\lambda/4$, $\lambda/2$ 인 경우)

Fig. 8. Attenuation capacities when the distances of two control loudspeakers are $(2n-1)\lambda/2$. (when l_1+l_2 and l_3 are (a) $5\lambda/2, \lambda/2$, (b) $7\lambda/4, \lambda/2$, respectively)



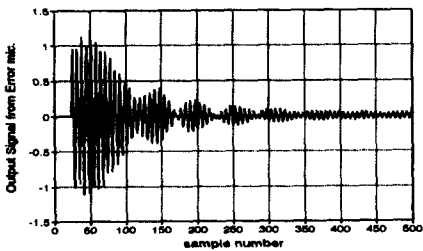
(a)



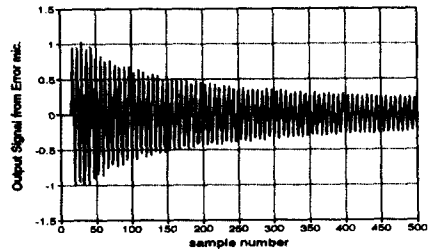
(b)

그림 9. 두 제어음원의 거리가 $n\lambda \pm \lambda/4$ 인 경우의 감쇄 성능 (l_1+l_2 및 l_3 가 각각 (a) $5\lambda/2, 5\lambda/4$, (b) $2\lambda, 3\lambda/4$ 인 경우)

Fig. 9. Attenuation capacities when the distances of two control loudspeakers are $n\lambda \pm \lambda/4$. (when l_1+l_2 and l_3 are (a) $5\lambda/2, 5\lambda/4$, (b) $2\lambda, 3\lambda/4$, respectively)



(a)



(b)

그림 10. 두 제어음원의 거리가 $n\lambda$ 인 경우의 감쇄 성능 (l_1+l_2 및 l_3 가 각각 (a) $3\lambda, 2\lambda$, (b) $7\lambda/4, \lambda$ 인 경우)

Fig. 10. Attenuation capacities when the distances of two control loudspeakers are $n\lambda$. (when l_1+l_2 and l_3 are (a) $3\lambda, 2\lambda$, (b) $7\lambda/4, \lambda$, respectively)

5. 결론

덕트 등 일차원 음장에서의 능동 소음제어를 위해 단일극 시스템과 다중극 시스템이 많이 사용되고 있으나, 한 개의 제어용 스피커만 사용하는 단일극 시스템은 제어 음원으로부터 방사된 음파가 검출 센서에 검출되는 음향계환의 영향으로 제어 성능이 떨어질 수 있으며, 여러 개의 제어 음원을 사용하는 다중극 시스템은 음향계환의 영향을 적게 받는 장점이 있으나 제어 음원의 수가 많아지게 되어 음장의 제어가 어렵고 비용이 높아지며 성능이 트랜스듀서들의 위치에 많은 영향을 받는다고 알려져 있다.

본 연구에서는 제어기의 성능에 많은 영향을 미치는 트랜스듀서들의 최적 위치 선정에 관하여 연구하였다. 제어 음원에서 발생한 제어 음파가 소음원 방향으로 역전파 됨으로써 발생하는 음향 계환 문제 및 덕트단에서의 반사파의 영향으로 인해 제어 음원, 검출 및 오차 센서의 상호 관계를 해석적으로 얻기가 용이하지 않음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 스피커 및 센서의 위치 선정 문제에 따른 능동 소음 제어 시스템의 감쇄 성능을 고찰하기 위해서 단일극 및 이중극 시스템의 각 경로에 대한 전기 음향 전달 함수를 유도하였으며, 시뮬레이션을 통하여 트랜스듀서의 위치 변화에 따른 제어

성능을 고찰하였다.

시뮬레이션 결과 단일극 시스템의 성능은 소음원과 제어 음원 사이의 거리에 영향을 많이 받고 이중극 시스템의 성능은 센서 및 스피커의 위치 변화, 특히 두 제어 음원 사이의 거리와 소음원과 1차 제어 음원 사이의 거리에 많은 영향을 받으며, 각 트랜스듀서의 위치가 적절히 선정된 경우에는 수렴 특성이 우수하지만 그렇지 않은 경우에는 발산하거나 잘 수렴하지 않는 경향을 보였다.

본 연구에서는 중첩 모델을 이용하여 덕트를 분석하였으나 travelling wave 모델 등을 이용한 분석도 필요하리라 본다.

본 연구는 한국과학재단 1994년도 특정연구비 지원에 의하여 연구되었음
(과제번호 : 94-0100-16-01-3)

참 고 문 헌

[1] Elliott S. J. and Nelson P. A., "The active control of sounds," *Electronics and Communication Eng. Jour.*, pp. 127-136, 1990.
 [2] Kido K., "Active noise cancellation," *Text for Sing. acoustic conference 85*, Singapore, Aug.1985.
 [3] Leitch R. R. and Tokhi M. O., "Active noise control system," *IEE Proc.*, vol. 134, Pt. A, No. 6, pp. 525-546, 1987.
 [4] Tsujino M. and Elliott S. J., "An optimal feedback control strategy for active sound control," *ISVR Mem. no. 700*, University of Southampton, U.K., 1990.

[5] Elliott S. J., "The applications of back-propagation in feedforward active control systems," *ISVR Memorandum no. 707*, University of Southampton, U.K., 1990.
 [6] Ross C. F., "An adaptive digital filter for broadband active control system," *Journal of Sound Vibration*, 80(3), pp. 381-388, 1982.
 [7] Swinbanks M. A., "The active control of sound propagation in long ducts," *Journal of Sound and Vibration*, 27(3), pp. 411-436, 1973.
 [8] Jessel M. and Angevine O. L., "Active sound absorbers in an air duct," *Journal of Sound and Vibration*, 23(3), pp. 383-390, 1972.
 [9] Leventhal, H. G. and Eghtesadi, 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.
 [10] 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.
 [11] P. Leug, "Process of silencing sound oscillations," *U.S. Patent No.2, 043, 416*, 1936.

◇ 저자 소개 ◇

남 현 도 (南炫道)

1960년 3월 27일생, 1979년 서울대학교 공대 전기공학과 졸업, 1981년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1991년-1992년 Visiting Fellow, ISVR, Univ. of Southampton, England, 현재 단국대학교 전기공학과 교수, 산업기술연구소장.

강택동 (姜澤東)

1969년생, 1994년 단국대학교 공대 전기공학과 졸업, 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).