

능동흡음재를 이용한 음파반사 제어기법 연구

Study on Sound Reflection Control using an Active Sound Absorber

장 우 석*, 권 대 용*
(Woosuk Chang*, Dae Yong Gweon*)

*LIG넥스원 Maritime 연구센터

(접수일자: 2009년 9월 24일; 수정일자: 2009년 10월 22일; 채택일자: 2009년 10월 28일)

이 논문은 능동흡음재를 이용한 수중음향반사파 상쇄에 관한 연구이다. 능동흡음재는 평판형 구동센서와 수신센서로 몰딩되고 외부 제어기와 연결된 구조로 되어있다. 이 두 층의 센서와 피드백제어기는 하나의 피드백 루프를 이루며, 이 루프의 특징은 외부로부터 인가되는 입사파에 대해 유한 임피던스가 자동적으로 정합되어, 자동적으로 반사파를 상쇄하는 특성을 가진다. 능동흡음재의 전기·구조·음향의 다중물리특성은 1차원 전달함수로 모델링 되고, 운용주파수 대역에서 입사파에 대한 반사파가 최소화 되도록 제어기의 전달함수가 설정된다. 능동형 흡음재는 수동형 흡음재의 두께에 비하여 현저히 얇은 두께를 가지며, 간단한 아날로그 회로 제어기만으로도 넓은 주파수 대역에서 우수한 흡음특성을 보인다.

핵심용어: 능동흡음재, 능동제어, 압전복합재료, 음파반사

투고분야: 음향측정 및 센서분야 (14.2)

This paper reviews a study about sound reflection control using an active sound absorber. An active sound absorber includes sound transmitting and receiving piezocomposite sensor layers molded by water tight epoxy, and connected with a feedback controller. The multi-layer sensors and the controller consists a closed feedback loop, whose intrinsic characteristics shows excellent impedance matching performance within specified frequency band, and consequently, minimizes reflection waves. Multilayer sound transmission model is derived based on one dimensional model, and its performance is verified with experiment using a pulse tube setup.

Keywords: Active Sound Absorber, Feedback Control, Piezocomposite, Acoustic Reflection

ASK subject classification: Acoustical Measurements and Sensors (14.2)

I. 서론

일반적으로 수중 음파반사감소기법에는 저충구조 혹은 쉘구조의 고무복합재의 흡음재가 많이 사용된다. 그러나 저주파대역 (~10 kHz)에서는 파장길이에 따른 흡음재 두께가 지나치게 두꺼워져서 실용적으로 사용하기 어려운 경우도 있다. 이러한 경우에 대한 해법으로 능동흡음재가 연구되었고 그 접근방법 및 가능성이 다루어졌다.

Howarth 등 [1]은 판형 압전복합재료 구동센서와 음파의 반 파장 간격으로 배치된 압전비닐 (PVDF) 수신기를 정합고부로 몰딩하여 제작한 능동흡음재를 개발하였다. 이는 비록 센서간격과 일치하는 주파수에서는 뛰어난 흡

음특성을 보이지만, 광대역 흡음설계 관점에서는 다른 주파수에서 반사파를 증폭시키는 단점이 있고, 또한 구조적으로 아주 두꺼운 단점이 있었다.

두께 및 주파수 대역 문제를 보완한 모델이 Mazzola [2]에 의해 이론적으로 검증되었고 Corsaro 등 [3]에 의해 시험되었다. 이 모델은 하나의 음향수신센서와 하나의 가속도센서가 평면형 구동센서 앞에 배치된 구조를 가진다. 음파반사는 매질과 구조물의 음향 임피던스 차이에 의해 발생되고 이는 음압과 입사속도의 비에 의해 결정된다. 수신된 음압과 표면속도를 능동제어기를 이용하여 인위적으로 매질의 값으로 조절을 하면 이론적으로 모든 주파수대역에서 완벽한 흡음을 이룰 수 있다. 이 개념은 임피던스 정합 오차를 피드백 하는 구조로 구현되는데, 오차 피드백 특성 상 흡음 성능은 아주 높은 증폭비를 요구한다. 이 경우 특히 가속도센서의 운용주파수대역

한계, 구조 공진 및 감도 오차 등이 정합 오차 특성에 영향을 미치고 이 것이 증폭되어 전체 성능을 심각하게 저하시킨다. 특히 증폭비가 지나치게 증대되면 전체 피드백 구조가 불안정해지는 단점을 가진다.

Shields 등 [4]은 피드포워드 방식의 음파 반사 및 투과 제어기법을 개발하여 펄스튜브 시험시설을 이용하여 검증하였다. 이는 특별한 수신센서는 장착되지 않고 펄스튜브 송신센서에 장착된 송신신호를 시간지연하여 능동흡음재의 음파발신기를 구동하는 방식으로 개발되었다. Lafleur 등 [5]은 음파발신기 전면에 압전고무를 장착하여 입사파, 반사파 그리고 상쇄파를 감지. 이 신호를 디지털 신호처리회로를 이용하여 음파발신기를 구동하는 능동흡음재를 개발하였다. 시험결과 이 장비는 8.5 kHz에서 최고의 흡음성능을 보였다. 그러나 이는 피드포워드 특성 상 입사파를 사전에 측정할 수 없는 경우 사용이 불가능 하다.

Gentilman 등 [6]은 저주파대의 구동센서 제작에 효과적으로 사용될 수 있는 얇고 넓은 평면형 압전복합재료를 개발하여 능동흡음재의 두께를 감소시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

Wu 등 [7]은 적응제어기법을 도입하여 광대역 주파수에서 음파반사 제어방식을 고안하였고 이를 펄스튜브에서 검증하였다. 이 기법은 입사파의 신호 길이가 짧고 일정한 시간을 두고 반복적으로 발생하는 입사파에 대해서는 적응기법이 유효하나 입사파 길이가 길어지면 이를 버퍼링하고 계산하는 디지털회로의 계산 량이 많아지고, 입사파의 주파수나 파형이 변하면 적응기간 동안 반사파 제어가 이루어지지 않는 단점이 있다. 특히 고가의 디지털 장비가 필요하여 한 벽면을 능동흡음재로 배치할 경우 그 비용 및 설치 가능성은 현실성이 떨어진다.

Zhang 등 [8]은 압전복합재와 전기회로를 이용한 준 능동흡음재를 제안하였다. 이는 압전복합체의 음향임피던스 특성을 전기회로의 전기적 임피던스와 결합하여 전체적인 음향 임피던스를 매질의 임피던스와 정합하는 방식이다. 그러나, 계산결과 마이너스의 전기용량(Negative Capacitance)에 해당하는 회로가 요구되었고, 이는 이론적으로는 구현가능하나 실제적으로 회로의 불안정성 등의 이유로 구현에 한계가 있다.

Zhang [9], Chang 등 [10]은 평판형 구동센서 전면에 압력센서를 설치하고 이 센서들 사이를 위상지연회로를 이용한 피드백 제어기로 연결하여 반사파를 상쇄하는 기법을 고안하고 펄스튜브 시설을 이용하여 검증하였다. 이는 압력신호 피드백을 이용한 능동음향반사제어의 가

능성을 제시하였고, 특히 제어회로를 간단한 아날로그회로로 구현가능하며, 제어기의 전달함수를 특정한 함수로 설계할 경우 광대역 주파수에서 입사파에 대한 사전정보 없이 반사제어가 가능하다는 사실을 밝혔다.

Chang [11]은 3차원에서 평면 입사파가 압전복합체에 미치는 진동 특성 및 이에 따른 반사파 파형을 수치해석하고 전기적으로 구동되는 압전복합체의 진동특성 및 발신 파형을 수치해석 비교하여, 구조 음향 관점에서 3차원 공간에서 압전복합체가 적절한 위상 및 전압으로 구동될 경우 반사파를 완벽하게 상쇄가능 하다는 사실을 밝혔다.

이 논문에서는 하나의 음향 수신센서와 구동센서를 적층하여 몰딩된 적층구조물과 제어회로, 그리고 이들을 피드백 루프로 결합한 능동흡음재의 흡음특성이 연구되었다. 특히, 압전재료층과 제어회로의 피드백 루프의 특성을 최적화하여 운용주파수대역 내의 어떠한 주파수 및 파형의 음향신호가 인가되더라도 반사를 최소화하는 능동흡음재 설계에 초점이 맞추어져 있다. 이러한 반사파 상쇄 특성은 입사파를 입력신호로 하고 반사파를 출력신호로 하며, 특정주파수에서 입력신호를 필터링하는 밴드 스톱필터(Band Stop Filter)와 같다. 또한 구동센서-수신센서 적층구조물 해석과 제어기 전달함수 설계를 이론적으로 전개하고, 실험적인 기법을 이용하여 제어를 설계하는 방법도 제시한다. 펄스튜브를 이용한 실험결과도 제시하여 능동흡음재 설계의 유효성을 증명 한다.

II. 다중적층재료 1차원 음파전달모델

능동흡음재는 평판 압전복합재로 구성된 구동센서, 뒤펅층, 수신용 압전복합재로 구성된 수신센서, 음향정합층 등으로 구성되어 있다. 또한 두 센서 층 사이에 종파 이외의 파동전달을 차단하여 회파, 굽힘응력 등에 의한 구동센서 수신센서 전달함수 왜곡을 최소화 하고, 전자파에 의한 신호 왜곡을 최소화 하기 위하여 센서의 양면은 전극 판으로 코팅된 GRP (Glass fiber Reinforced Plastic) 보드를 접착한다. GRP보드는 화이버를 격자 형으로 적층 접합한 재료로 횡 방향 인장강도가 우수하며 폴리머 등의 연성재료 양면에 집합 될 경우 두께방향 강도특성은 폴리머 고유의 특성을 가지게 하나, 평면방향 굽힘을 차단하는 특성을 가진다. 이는 전자회로 기판에 많이 사용된다. 적층된 능동흡음재는 방수 몰딩 되었으며, 후면은 주로 구조물이나 벽면에 접착되어 설치된

다. 구조물 벽면의 후면은 공기에, 전면은 물에 노출되어 있고, 이 매질 등의 두께는 무한대라고 가정한다. 이러한 적응 구조는 그림 1에 상세히 나타나 있다. 능동흡음재는 총 10층의 레이어, 11면의 경계 면을 가지며, 그 중 1층의 구동센서 층과 1층의 수신센서 층이 있다. 각 층의 물성 값은 표 1에 나타나 있다.

각 적응 변은 독립적인 기계·전기적 임피던스 특성을 나타낸다. 이를 표현하기 위해 층 번호는 아래첨자로 나타내고, 기계적 임피던스는 표변속도 $U_I (I=1,2,3,...)$ 와 응력 P_I 로 정의한다. 전기적 임피던스를 정의하는 전류와 전압은 각각 I_I 와 V_I 로 표현한다. I 번째 층과 $I+1$ 번째 층의 결합특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [12, 13].

$$\begin{Bmatrix} AP_I \\ V_I \\ AP_{I+1} \\ V_{I+1} \\ AP_{I+2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} & -Z'_{12} & & & \\ Z'_{12} & Z'_{11} & -Z'_{11} & & & \\ & & & Z'_{13} & -Z'_{13} & \\ & & & Z'_{13} & -Z'_{13} & \\ & & & & & Z'_{13} & -Z'_{13} \\ & & & & & & Z'_{13} & -Z'_{13} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_I \\ I_I \\ U_{I+1} \\ I_{I+1} \\ U_{I+2} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$Z'_{11} = \frac{jAP_I c_I}{\tan(k_I d_I)}, Z'_{12} = -jAP_I c_I, Z'_{13} = -\frac{jh_{33}}{\omega}, Z'_{14} = -\frac{j\beta_{33}^s d_I}{\omega A}$$

(C_I : 탄성파 속도, P_I : 밀도, k_I : 파수 ($=\omega/c_I$), A : 단면적, d_I : 두께, w : 각속도)

압전재료의 압전상수 h_{33} , 유전률 β_{33}^s 의 물리적 의미는 참고자료 [14]에 상세히 나타나 있다. 여기서 주의할 점은 좌변에 나타난 변수들은 내부에서 작용되는 응력 및 전압의 총 합을 의미하며 이 값들이 0이 아닌 특정 값을 가지기 위해서는 외부에서 추가적인 응력이나 전압이 인가되어야 한다.

P_{in} 과 P_{re} 를 흡음재 외부에 작용하는 입사파와 반사

파로 각각 정의하고, Z_f 를 매질의 밀도 (ρ_w)와 음파전달 속도 (c_w)로 정의된 임피던스로 가정하면 이들과 표면속도간의 관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{11} = P_{in} + P_{re}, \quad U_{11} = (P_{in} - P_{re})/Z_f \quad (2)$$

식(2)를 수정하여 능동흡음재 전면 (경계면 11)에서의 경계조건을 반사파에 대하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$2P_{re} = P_{11} - U_{11} \cdot Z_f \quad (3)$$

능동흡음재가 장착된 구조물의 후면이 (경계면 1) 노출되어있는 매질의 음향임피던스를 $Z_b (-\rho_{air} c_{air})$ 로 정의하면 후면에 대한 경계조건은 다음과 같이 정의된다.

$$P_1 = Z_b U_1 \quad (4)$$

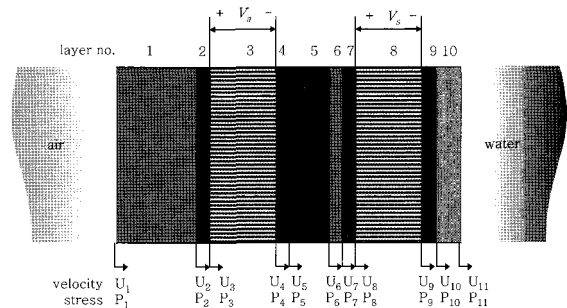


그림 1. 능동흡음재 적응재료 구성 (레이어 번호 및 경계면 좌표 방향)

Fig. 1. Layers configuration (layer numbering and coordinate orientations).

표 1. 능동흡음재 레이어 구성 및 재료물성
Table 1. Material properties of the active sound absorber layers.

레이어 번호	레이어 기능	재질	두께(d_I) [mm]	음속 (c_I) [m/s]		밀도 (P_I) [kg/m ³]	β_{33}^s [m/nF]	h_{33} [MV/m]
				절대값	Loss Factor			
1	설치구조물	스틸	30	4500	-	7900	-	-
2	EMI, 굽힘 차단	GRP	1	1800	-	1200	-	-
3	구동센서	입전복합재	6	3097	0.103	2942	162	1200
4	EMI, 굽힘 차단	GRP	1	1800	-	1200	-	-
5	댐핑층	고무	2	1600	0.300	1100	-	-
6	진동격리층	스틸	1	4500	-	7900	-	-
7	EMI, 굽힘 차단	GRP	1	1800	-	1200	-	-
8	수신센서	입전복합재	6	3097	0.103	2942	162	1200
9	EMI, 굽힘 차단	GRP	1	1800	-	1200	-	-
10	물딩	에폭시	2	2300	-	1500	-	-

전기적 변수에 관한 경계조건은 두 센서 층에 대해 정의된다. 수신센서의 압전복합체의 (경계면 8) 외부입력 전압이 0이다. 이 경우 압력에 의해 발생하는 전압은 압전 재료 내부의 전하 이동 량에 의해 결정되며 이는 전류 (I_8)에 의해 발생된 전압으로 정의된다. 그러므로 수신용 압전재료에 의해 수신된 신호는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_s = Z_{00}^* I_8 \quad (5)$$

구동센서의 압전재료층 (layer 3)에는 일정한 전압 (V_3)이 외부에서 인가되고 이에 해당하는 경계조건은 다음과 같다.

$$V_3 = V_a \quad (6)$$

음파전달모멘인 식 (1)과 경계조건 식 (3)~(6)를 종합하여 능동흡음재의 전달함수 및 주파수 응답특성을 다음장에서 유도한다.

III. 능동흡음재 주파수 응답특성

피드백제어기를 이용한 능동흡음재를 설계하기 위해서는 우선 입·출력변수 및 비용변수를 정의하고, 이 변수들간의 관계를 정의해주는 전달함수 모델이 필요하다. 입사파 (P_{ia}) 인가 시 피드백제어기를 이용하여 최소화시켜야 할 물리량은 반사파 (P_r)와 송신파 (P_a)가 중첩된 중첩파 (P_{sp})이다. 또한 피드백제어기의 입력신호로 사용될 수신신호 (V_s)와 피드백제어기가 구동할 구동신

호 ($V_a (= V_3)$)도 필요하다. 이를 입출력 함수로 표현하면 다음과 같은 연립 전달함수가 정의된다.

$$\begin{Bmatrix} P_{sp} \\ V_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R(j\omega) & T_{TVR}(j\omega) \\ T_{RVS}(j\omega) & T_{AS}(j\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_{in} \\ V_a \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$R(j\omega)$ 는 흡음재의 반사계수이고 $T_{TVR}(j\omega)$ 는 구동센서의 송신감도이다. $T_{RVS}(j\omega)$ 는 수신센서의 입사파에 대한 수신감도를 나타내며, $T_{AS}(j\omega)$ 는 입사파가 없을 경우 구동신호에 대한 수신신호의 비 값이다. 이들 함수는 모두 구동주파수에 대한 복소전달함수로 표현된다. 전달함수 $R(j\omega)$, $T_{TVR}(j\omega)$, $T_{RVS}(j\omega)$ 및 $T_{AS}(j\omega)$ 는 식 (1)~(6)을 연립하여 다음과 같은 연립방정식을 이용하여 구한다.

$$\begin{Bmatrix} U_1 \\ I_1 \\ U_2 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \\ U_{in} \\ I_{in} \\ U_{in} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11} - Z_a & Z_{12} & -Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ -Z_{31} & -Z_{32} & Z_{33} + Z_{a1} & Z_{34} \\ & & Z_{43} & Z_{44} \\ & & \vdots & \vdots \\ & & & Z_{nn} & Z_{nn} \\ & & & -Z_{n1} & Z_{n1} + Z_{a2} & Z_{n2} & -Z_{n2} \\ & & & Z_{n1} & Z_{n1} & Z_{n1} & -Z_{n1} \\ & & & -Z_{n2} & -Z_{n2} & Z_{n1} + Z_{a1} & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ V_1 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ P_a \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{Bmatrix} P_{sp} \\ V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\rho_a c_s U_{in} + P_{in} \\ Z_{nn} I_n \end{bmatrix}, \quad (V_1 = V_3)$$

반사계수 $R(j\omega)$ 및 수신감도는 구동전압 (V_a)을 0으로 가정하여 식 (8)에서 구하고, 송신감도 $T_{TVR}(j\omega)$ 및 $T_{AS}(j\omega)$ 는 입사파를 0으로 가정하여 구한다.

표 1에 해당하는 치수 및 물성을 지닌 능동흡음재의 전달함수는 그림 2와 3에 주파수 응답특성 그래프로 나타나 있다. 그림 2에 나타난 송신감도 및 구동센서-수신센서 전달함수는 1차 공진주파수인 22 kHz까지 일정한 비

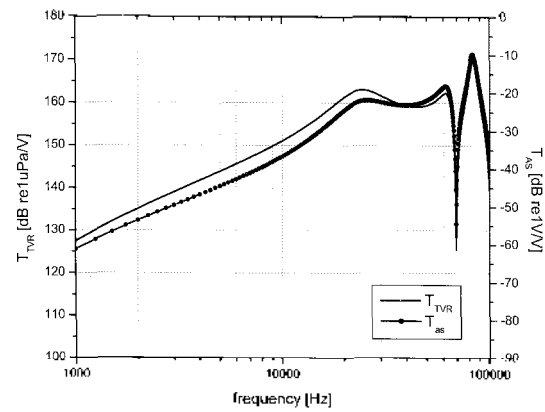


그림 2. 송신감도 및 송수신기 전달함수 스펙트럼
Fig. 2. Transmitting sensitivity and actuator-sensor transfer function spectrums.

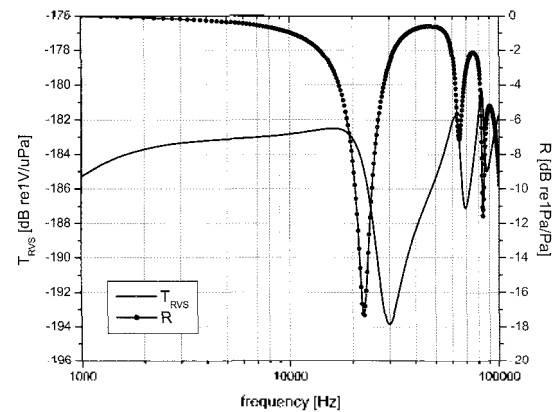


그림 3. 입사파에 대한 수신감도 및 반사계수 스펙트럼
Fig. 3. Receiving sensitivity and reflection coefficient spectrums.

울을 보이거나 그 이상의 주파수에서는 비율도 일정하지 않고 전달함수 크기도 주파수에 따라 심하게 변한다. 이는 1차 공진주파수 이하의 주파수 대역에서는 수신센서가 송신된 음파를 일정한 감도로 수신한다는 것을 의미한다. 입사파에 대한 수신감도 및 반사계수의 주파수 응답 특성은 그림 3에 나타나 있다.

4 가지 전달함수의 주파수 응답특성 그래프 결과를 종합해 보면 1차 공진 주파수보다 낮은 주파수 대역에서는 송수신감도, 반사계수 등이 모두 안정적이고 일정한 특성을 가진다. 이러한 주파수 대역에서는 피드백 제어기를 설계하기도 쉽고 제어성능도 설계오차에 대해 민감하게 저하되지 않는다. 그러나, 구동효율 관점에서 보면, 공진주파수 보다 낮은 대역에서는 음파 송신 감도가 현저히 낮다. 그러므로, 안정성과 효율 두 가지 요소를 동시에 만족하기 위해서는 구조공진 주파수를 운용 주파수대역 보다 약간 높게 설정하여 성능의 안정성과 음파발신평효율을 적절하게 절충하여 설계한다.

IV. 능동흡음특성

피드백제어기 $K(j\omega)$ 는 수신센서신호 V_s 의 위상 및 세기를 적절하게 조정하여 구동신호 V_a 를 생성한다. 이 전기신호는 구동센서를 구동시켜 상쇄파를 발생시킨다. 이 상쇄파는 반사파를 상쇄하여 흡음재가 완전 무반향 특성을 가지도록 한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_a \equiv -K(j\omega) \cdot V_s \quad (9)$$

식 (9)을 식 (7)과 연관하여 반사파와 상쇄파가 중첩된 중첩파에 관하여 정리하면 다음 식과 같이 능동흡음재의 음파 반사특성함수를 구할 수 있다.

$$P_w = \frac{R(j\omega) - (T_{TR}(j\omega) \cdot T_{RS}(j\omega) - R(j\omega) \cdot T_{AS}(j\omega))K(j\omega)}{1 + T_{AS}(j\omega) \cdot K(j\omega)} P_m \quad (10)$$

반사파와 상쇄파의 중첩인 중첩파는 식 (10)의 분자의 항이 0이되면 완전히 사라지게 되어 모든 주파수 대역에서 완벽한 무반향 특성을 가진다. 이 경우를 만족하는 제어기의 전달함수는 다음과 같이 정의된다.

$$K(j\omega) \equiv \frac{R(j\omega)}{T_{TR}(j\omega) \cdot T_{RS}(j\omega) - T_{AS}(j\omega) \cdot R(j\omega)} \quad (11)$$

1차 공진주파수 보다 낮은 주파수대역만을 고려하면 식 (11)은 더 간단히 표현된다. 수신 감도 $T_{RS}(j\omega)$ 는 입사파에 대한 감도로 정의되어 있다. 공진주파수보다 낮은 주파수 대역에서는 수신감도는

$$T_{RS}(j\omega) \approx (1 + R(j\omega))T_s(j\omega) \quad (12)$$

로 근사화 시켜 나타낼 수 있다. 여기서 $T_s(j\omega)$ 는 수신센서의 표면 음압에 대한 감도를 의미한다. 그러므로 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{AS}(j\omega) \approx T_{TR}(j\omega) \cdot T_s(j\omega) \quad (13)$$

식 (12)과 (13)를 식 (10)에 대입하면 다음과 같은 근사화 된 식을 구할 수 있다.

$$K(j\omega) \approx \frac{R(j\omega)}{T_{AS}(j\omega)} \quad (14)$$

피드백제어기 회로의 전달함수가 식 (11)을 만족할 경우 모든 주파수대역에서 반사파를 상쇄할 수 있으며, 식 (14)을 만족하면 1차 공진주파수보다 낮은 주파수대역에서 반사파를 상쇄시킬 수 있다.

V. 피드백 제어기 설계

이상적인 제어기는 식 (14)에 나타난 전달함수를 가지는 제어기가 필요하다. 그러나 이러한 제어기는 사실상 구현하기가 거의 불가능하다. 식 (14)의 분모에 포함되어 있는 전달함수들은 모두 자연상태에서 입력 값에 대한 출력 값은 현재 혹은 과거의 상태변수와 입력변수 값에 의하여 결정된다. 이러한 전달함수의 역을 취하면 그 출력 값은 미래의 상태 변수와 입력변수에 의해 결정되는 구조를 가지며, 이들의 응답특성을 시간에 대한 함수로 변환하여 전개해 보면, 대부분 그 출력 값이 무한대로 발산하기 때문이다.

이러한 피드백제어의 특성, 제어기의 구현 가능성 및 운용주파수 대역에서의 제어성능 등을 고려할 때에 가장 간편한 제어기 설계법은 운용주파수 대역에서 식 (14)의 주파수 응답특성을 간단한 필터함수의 조합으로 커브피

팅 (Curve-Fitting)하는 것이다. 그림 4는 식 (14)의 이상적인 전달함수와 커프피팅된 제어기 전달함수를 보여준다. 운용주파수 대역에서 두 그래프가 일치하는 영역을 확인할 수 있는데, 이 일치하는 부분이 넓을수록 반사파 상쇄 주파수대역이 넓다.

그림 5는 제어되지 않은 상태에서의 반사계수와 제어된 상태에서의 음파반사 비 값을 주파수 응답 그래프로 보여준다. 반사제어의 중심주파수는 8 kHz로 정의되었고 중심주파수 부근에서의 제어된 반사계수는 -25 dB 이하로 내려간다. -15 dB 이하의 반사계수를 유지하는 주파수 대역도 6.2 kHz ~ 10.3 kHz 에 이른다. 후면 장착 구조를 두께를 제외한 순수 능동흡음재의 두께가 21 mm 라는 사실과 흡음 주파수 대역을 고려하면 수동흡음재 [15]와 비교되는 능동 흡음재의 성능을 짐작할 수 있다.

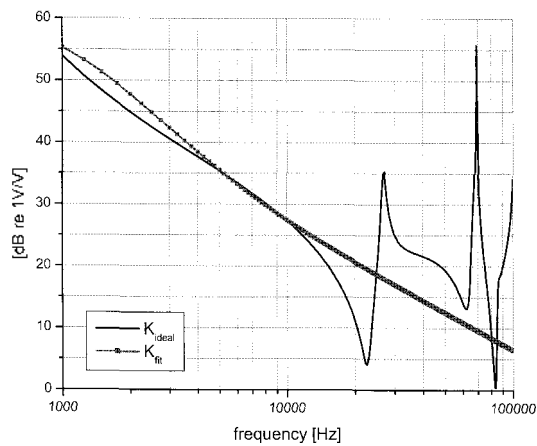


그림 4. 피드백제어기 스펙트럼 및 커프피팅된 전달함수
Fig. 4. Feedback controller spectrum and curve-fitted transfer function.

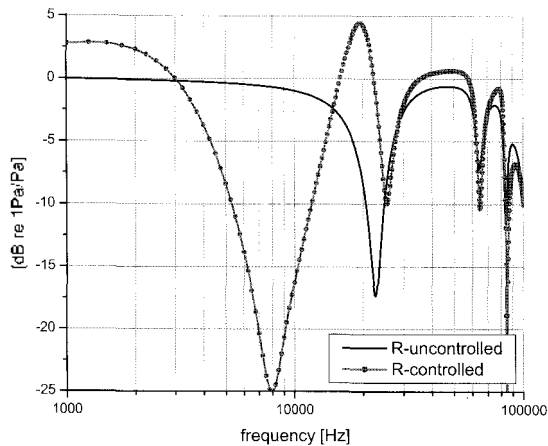


그림 5. 피드백 제어 및 비 제어 시 음파반사계수 스펙트럼
Fig. 5. Reflection spectrum with and without feedback controller.

VI. 실험장비 구성 및 실험방법

5장에서 언급한 능동흡음재를 이용한 음파반사제어 개념을 실험을 통하여 검증하였다. 그림 6은 펄스튜브를 이용한 능동흡음재 시험장비 구성을 보여준다 [10]. 펄스 튜브는 내경이 7.5 cm, 외경이 15 cm, 길이가 7 m인 절재 파이프로 내부는 매질인 물로 가득 채워져 있다. 상단에는 능동흡음재가, 하단에는 입사파를 발생시키는 음파발신기가 장착되어있다. 음파발신기는 능동흡음재의 구동 센서와 동일한 압전복합재로 제작되었고 신호발생기와 연결되어있다. 신호발생기는 지정된 주파수에 해당하는 신호를 인장 기간 동안 발생시킨다. 또 펄스튜브 중간에는 입사파와 반사파를 측정하기 위한 하이드로폰이 설치되어있다. 신호발생기간은 펄스튜브 길이와 음속을 고려, 측정된 입사파와 반사파 신호가 서로 중첩되지 않도록 조정한다. 능동흡음재는 간단한 아날로그 피드백제어기와 연결되어 있다. 아날로그 피드백제어기는 로우패스 필터 (Low Pass Filter), 가변위상천이가 (Adjustable Phase Shifter), 증폭기 등으로 구성되어있다.

능동흡음재의 직층재료 구성 및 형상은 표 1에 나타난 바와 같다. 다만 센서 양면에 부착된 GRP보드의 외벽은 얇은 알루미늄 호일로 코팅되어있다. 이 호일은 센서 모

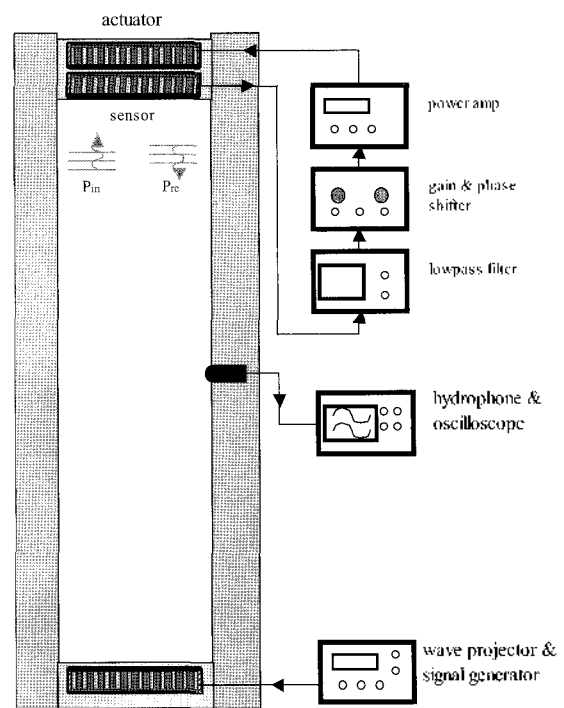


그림 6. 펄스튜브를 이용한 능동흡음재 특성시험장비 구성
Fig. 6. Pulse-tube test set-up for active acoustic damping system.

서리 및 측면 부분도 감싸며, 동축케이블의 접지선과 연결된다. 결과적으로 센서는 전기적으로 차폐되어 있어 구동센서와 수신센서가 전기적으로 완전히 분리되어 있다. 적층된 재료는 방수처리를 위해 에폭시로 몰딩되어 있다. 그림 7은 구동신호와 수신신호 사이의 전달함수 $T_{AS}(j\omega)$ 의 주파수응답그래프의 측정된 값과 계산된 값을 나타낸다. 중심 설계 주파수 대역에서는 (5 kHz ~ 10 kHz) 두 그래프가 잘 일치하나, 극저주파 대역에서는 신호가 미약하여 측정오차가 크고, 고주파대역은 고려대상인 종파 (longitudinal wave) 이외의 횡파 (transverse wave)나 압축진동 혹은 기생공진 등의 요소에 의해 벗어날 수 있다.

VII. 실험결과

식 (14)에 의하면 제어기 설계를 위해서는 설계 주파수 대역에서의 구동센서와 수신센서 사이의 전달함수 $T_{AS}(j\omega)$ 및 반사계수 $R(j\omega)$ 가 필요하다. 전달함수 $T_{AS}(j\omega)$ 의 입·출력 물리량은 모두 전압이므로 그 크기 및 위상은 쉽게 측정가능하나, 반사계수 $R(j\omega)$ 는 그 크기는 측정하기 쉬워도 위상은 정밀하게 측정하기가 아주 어렵다. 이러한 문제는 식 (10)을 이용한 피드포워드 제어 방식으로 해결할 수 있다.

피드포워드 제어는 입사파의 신호특성을 사전에 인지하여 반사파를 완전히 제거하는 것이다. 이는 입사파를 사전에 측정할 수 없는 실제상황에서는 적용 불가능하나 펄스튜브 시험장치를 이용한 제어기 설계에는 유용하다.

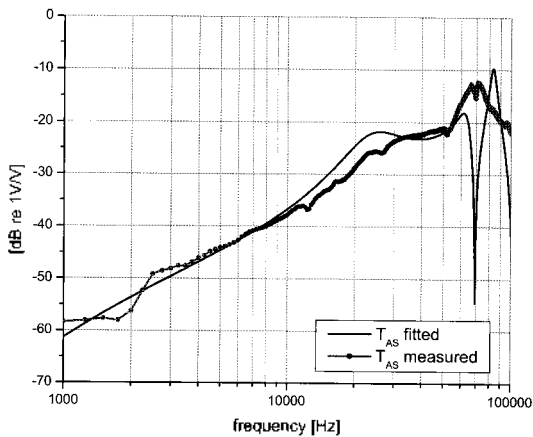


그림 7. 능동흡음재 구동기-수신기 전달함수 이론모델 및 측정 결과
Fig. 7. Comparison between estimated and measured actuator-sensor transfer function.

피드포워드 제어법은 다음과 같다. 펄스튜브 하단에 위치한 음파발생기를 이용 특정주파수의 입사파 신호를 발생시킨다. 이 파가 흡음재에 반사되어 측정용 하이드로폰을 지나갈 때 하이드로폰을 이용하여 반사파의 크기를 측정한다. 이를 B_0 이라 정의하자. 그 다음, 흡음재 내부의 구동센서를 적절한 전압으로 구동하여 발신된 음파의 세기가 B_0 와 동일한 크기가 되도록 한다. 이때의 구동 전압을 V_0 라 하자. 마지막으로 음파 발생기와 흡음재를 동시에 구동하면 반사파와 상쇄파는 크기가 같고 위상은 다르다. 이때 구동신호의 위상을 위상천이기를 이용하여 적절히 조절하면 상쇄파가 반사파를 완전히 상쇄한다. 이 때에 수신센서에 수신된 신호와 구동신호의 크기 비와 위상차이를 측정하면 제어기 전달함수의 크기와 위상을 알 수 있다. 여기에 측정된 $T_{AS}(j\omega)$ 를 곱하면 반사계수의 크기 및 위상을 정밀하게 계산할 수 있다. 이 결과에 대해 커브피팅을 이용하여 다음 식과 같이 피드백 제어기 전달함수를 구할 수 있으며, 그 결과는 그림 8에 나타나 있다.

$$K(j\omega) = \frac{-5.868 \times 10^{11}}{(j\omega)^2 + 1.118 \times 10^5 \cdot (j\omega) + 5.204 \times 10^8} \quad (15)$$

피드백제어기는 가변위상천이기, 가변 로우패스필터, 전력증폭기 등을 직렬연결하고 각각의 파라미터를 조정하여 구현 되었다. 능동흡음재의 흡음특성은 하이드로폰에 의해 감지된 입사파와 반사파 신호를 비교하여 알 수 있다 (그림 9참조). 7 kHz 신호의 경우 피드백 제어기를 사용하지 않은 경우 반사파의 크기는 입사파 크기의 거의 80% 이상이다. 그러나 피드백제어기에 사용되었을 경우

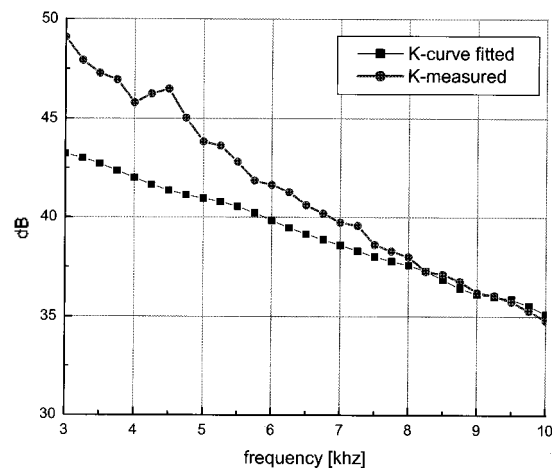


그림 8. 측정된 능동흡음재 제어기 스펙트럼 및 커브피팅
Fig. 8. Measured and curve-fitted controller transfer function.

반사파의 크기는 노이즈 수준으로 내려감을 알 수 있다. 능동흡음재의 흡음비율은 입사파와 반사파의 제곱평균을 (Root Mean Square) 취하여 계산하였다. 각 주파수에 대한 반사계수는 그림 10에 나타나 있다. 먼저 제어되지 않았을 경우 음파반사계수는 전 주파수 대역에서 -2 dB ~ -5 dB 값을 보인다. 피드백제어기를 이용한 반사계수는 6.5 kHz ~ 10 kHz 사이에서는 -20 dB 이하의 흡음 특성을 보인다. 실험결과 운용주파수 대역에서 흡음특성 결과는 수식으로 예측하였던 결과와 유사함을 알 수 있다.

VIII. 결론

지금까지 능동흡음재를 이용한 음파 반사 제어기법에 관한 이론적 접근법을 검토하고 시험결과와 비교하였다. 이론과 실험 모두 1차원적인 모델을 다루었고 이들의 결과는 모두 운용주파수 대역에서 수동흡음재로서는 도달할 수 없는 우수한 흡음특성을 보인다. 특히 피드백 제어기는 복잡하고 고비용의 디지털회로 대신 간단한 아날로그 회로의 조합으로 구현될 수 있어 비용적인 측면에서 아주 유리하다. 실질적으로, 음파반사제어의 성능은 제어기 전달함수를 얼마나 정확히 커브피팅하여 구현하는가에 달려있고 이는 간단한 op-amp회로 조합을 이용하여 구현할 수 있다. 디지털 회로를 사용할 경우 A/D, D/A 과정에서의 신호지연, 계산시간으로 인한 신호지연 등을 고려 운용주파수 대비 최소 20배 이상의 샘플링 주파수를 가지며 계산으로 인한 응답지연시간이 샘플링 주기보다 짧은 고성능 DSP 장비가 필요하다.

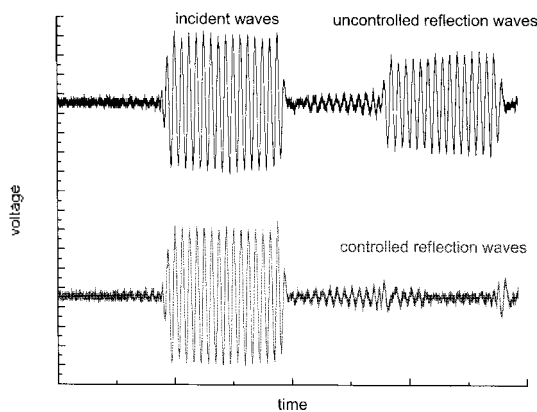


그림 9. 제어 및 비제어 시 측정된 입사파와 반사파
Fig. 9. Measured incident and reflection waves with and without controller.

이 연구는 1차원 능동흡음에만 초점이 맞추어져 있어 실제 적용하기에는 추가적인 검증이 필요하다. 그 첫 번째 항목이 3차원에서의 유효성, 특히 입사파가 수직이 아닌 경우의 흡음특성이다. 3차원 음파 반사 및 반사의 경우 흡음재 표면에서의 음향임피던스는 더 이상 상수가 아니라 표면크기 대비 파장의 함수로 나타낼 수 있다. 또한 수직이 아닌 방향의 입사파에 대한 음향반사 제어의 경우, 흡음재 크기를 운용주파수 대역에서의 최소파장의 절반크기 혹은 그 이하로 설계하여 음파 반사 및 반사지향성이 거의 없도록 하고, 흡음재를 보자이크 형식으로 설치 운용하여 해결할 수 있다. 또한 저주파와 고주파 대역을 망라한 광대역 능·수동 흡음재를 설계하고자 할 경우, 능동흡음재는 후면에, 수동흡음재를 전면에 배치한 직층방식으로 구현할 수 있다.

참고 문헌

1. T.R. Howarth, V.K. Varadan, X. Bao and V. V. Varadan, "Piezocomposite coating for active underwater sound reduction," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 91, no. 2, pp. 823-831, 1992.
2. C. J. Mazzola, *C J Active Sound Absorption*, Namlak Publication, New York, 1993.
3. R. D. Corsaro, B. Houston, J. Bucaro, "Sensor-actuator tile for underwater surface impedance control studies," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 102, no. 3, pp. 1573-1581, 1997.
4. F. D. Shields, L. D. Lalleur, "Smart acoustically active surfaces," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 102, no. 3, pp. 1559-1566, 1997.
5. L. D. Lalleur, F. D. Shields and J. E. Hendrix "Acoustically active surfaces using piezorubber," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, pp. 1230-1237, 1991.
6. R. Gentilman, D. Fiore, H. Phan, W. Serwalka and L. Bowen, "Manufacturing of 1-3 piezocomposite SonoPanel™ transducers," *SPIE proceedings*, vol. 447, pp. 274-281, 1995.

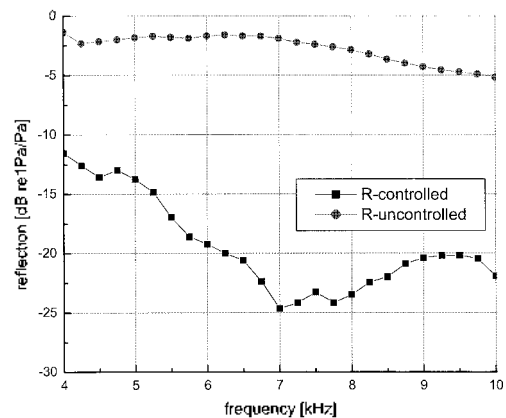


그림 10. 제어 및 비 제어 시 측정된 능동흡음재 반사계수
Fig. 10. Measured reflection spectrum with and without controller.

7. Z. Wu, X.-Q. Bao, V.K. Varadan, V.V. Varadan, "Broadband active acoustic absorbing coating with an adaptive digital controller," *Smart Matr. Struct.*, vol. 2, no. 1, pp. 40-44, 1993.
8. J. M. Zhang, W. Chang, V. K. Varadan and V. V. Varadan, "Passive underwater acoustic damping using shunted piezoelectric coating," *Smart Matr. Struct.*, vol. 10, no. 2, pp. 414-420, 2001.
9. J. M. Zhang, W. Chang, V. K. Varadan and V. V. Varadan, "Active underwater acoustic cancellation with pressure sensor and piezo-composite transducer," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 108, no. 5, pp. 2638.
10. W. Chang, "Model Reduction and Robust Controller Design for Structural Acoustics," Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University, 2001.
11. W. Chang, "Modeling of acoustic reflection and radiation fields generated from elastic boundary using MHSV model reduction," SPIE proceedings series, Modeling, signal processing, and control, Conference, San Diego CA, vol. 5757, pp. 398-407, 2005
12. B.A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids," vol. 1, pp. 324-333, Wiley, New York, 1973.
13. W. P. Mason, *Electromechanical Transducers and Wave Filters*, Van Nostrand, New York, 1948.
14. IEEE Standard on Piezoelectricity, *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, vol. 31, no. 2, pp. 1-55, 1984.
15. V. Easwaran, M. L. Munjal, "Analysis of reflection characteristics of a normal incidence plane wave on resonant sound absorbers: A finite element approach," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 93, no. 3, pp. 1308-1318, 1993.

저자 약력

•장 우 석 (Woosuk Chang)



1994: 한양대학교 기계설계공학과 학사
 1996: Lehigh University 기계공학과 석사
 2002: Pennsylvania State University 기계공학 박사
 2002~2006: 싱가포르 국립대학 연구원
 2006~: LIG넥스원 연구원

•권 대 용 (Dae Yong Gweon)



1982: 경북대학교 전자공학과 학사
 2003: 경북대학교 전자공학과 석사
 1983~: LIG넥스원 연구원 (현 센터장)