

# 다채널 음장 재현시스템에서의 역필터의 설계에 관한 고찰

박병욱\*, 김학윤\*

\*청주대학교 전자공학과

## An inverse filter design for multi-channel sound field reproduction system

Park Byoung-Uk\*, Kim Hack-Yoon\*

\*Dept. Electronic Eng., Chongju Univ.

afatpup@orgio.net, hykim@chongju.ac.kr

"본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것입니다."

### 요 약

다채널 음장 재현 시스템에서 공간 전달 특성을 제거하는 역필터의 설계가 불가결하다. 주파수영역에서 최소 Norm해를 이용한 설계 방법은 시간 영역 설계 방법과 비교하여 볼 때, 적은 계산량과 메모리량으로 설계할 수 있다. 그러나, 이 방법에서는 역필터를 필요로 하게 되고 FIR 필터로 설계 가능하다는 보장이 없다. 따라서, 본 연구에서는 주파수 영역 처리를 반복하여 수행하는 것으로 다 채널 음장 재현시스템을 위한 안정한 역필터를 설계하는 방법을 제안한다.

### 1. 서 론

라우드 스피커 재생에 의한 음장 재생 시스템은 라우드 스피커(2차 음원)로부터 청취점(제어포인트)까지의 공간 전달 특성의 영향을 고려할 필요가 있다. 이 때문에 공간 전달 특성을 보정하는 역필터 설계가 필요하게 된다. 음장 재현 시스템에서 역필터 설계 방법은 시간영역에서 설계와 주파수 영역에서 설계로 대별되지만, 여기서는 다중채널-다중포인트 제어계에서 역필터 설계 방법에 관하여 고려한다. 시간영역 설계의 역필터는 엄밀히 FIR필터로 구할 수 있다. 그러나, 임펄스 응답이 길어지거나 재현계의 규모가 커지게 되면, 요구되는 계산량과 메모리량이 방대하여지므로 시간영역에서 역필터를 산출하는 것이 어렵다. 주파수영역에서는 최소 Norm해(Least Norm Solution : LNS)를 이용한 방

법이 제안되어져 있다[2]. 이 방법은 (이차 음원의 수× 제어포인트의수)크기의 행렬계산을 각주파수마다 수행하므로, 시간영역의 설계방법과 비교하여 계산량과 메모리량이 대폭 감소되어진다.

그러나, 음장재현에서 역필터는 실현 가능한 길이의 FIR 필터라는 것이 요구되기 때문에, 주파수 영역에서 설계된 역필터는 시간영역에서 소망의 역필터 길이가 되도록 잘라내는 처리를 한다. 그러나, 이 처리는 필터 계수가 수렴하지 않는 길이에서 행하는 일이 많고, 역필터를 FIR로 구한다는 보장이 없다.

그러므로, 주파수영역에서 설계된 역필터에 의한 재현 정밀도 향상을 위해, 시간영역 역필터의 순차적인 근사 설계를 제안하였다[3]. 본 연구에서는 이 방법을 이용하여, 다중채널-다중포인트 제어계에서 안정한 역필터를 설계하는 방법을 제안한다.

### 2. 역필터 설계방법

#### 2.1 다중채널-다중포인트 제어 역필터의 설계

그림 1은 이차 음원의 수  $M$ , 제어포인트 수  $N$ 의 다중채널 음장재현 시스템에서 역필터 그룹(역 시스템)의 구성을 나타낸다. 여기서, 실내전달함수를  $G_j(\omega)$ , 역필터를  $H_j(\omega)$ , 입력신호를  $X(\omega)$ , 관측신호를  $D(\omega)$ 로 한다. 단,  $\omega$ 는 주파수이다. 또한  $i(1,2,\dots,M)$ 와  $j(1,2,\dots,N)$ 는 각각 이차음원과 제어포인트 번호이다. 다중채널 음원재현 시스템에서는, 각 제어포인트의 제어물

다른 점들과 독립적으로 행하여야 한다. 이와 같은 역 시스템에서는 입력  $X_i$ 을 펄스로 하였을 때, 제어포인트  $C_i$ 에만 펄스가 관측되도록 하는 역필터 그룹을 기본 단위로 한다. 그리고, 각 제어포인트에 대해 이와 같은 필터를 구하고, 그것을 이차음원 해에 weighting시킴으로써 역필터를 구성한다.

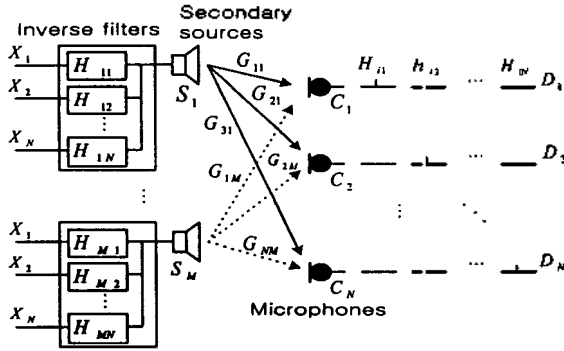


그림 1 시스템의 구성

## 2.2 LNS을 이용한 설계 방법

그림 1과 같은 재현계에서,

$$G = \begin{bmatrix} G_{11}(\omega) & G_{12}(\omega) & \dots & G_{1M}(\omega) \\ G_{21}(\omega) & G_{22}(\omega) & \dots & G_{2M}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{M1}(\omega) & G_{M2}(\omega) & \dots & G_{MM}(\omega) \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) & \dots & H_{1N}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \dots & H_{2N}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1}(\omega) & H_{M2}(\omega) & \dots & H_{MN}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

로 하였을 때, 전달함수  $G$ 와 역필터  $H$ 와의 사이에

$$GH = I_N \quad (2)$$

와 같은 관계가 성립된다. 단,  $I_N$ 은  $N$ 차 단위행렬이다.

이때  $H$ 는

$$H = G^{-1}I_N \quad (3)$$

을 계산함으로써 구하여 진다. 여기서  $G^{-1}$ 은  $G$ 의 역행렬이다. 재현계의 이차음원 수  $M$ 과 제어포인트 수  $N$ 의 관계가  $M > N$ 일 때는,  $H$ 는  $(M-N)$ 차원의 폐공간을 가진다. 이 경우, 아래와 같이하여 LNS에 의한 역필터  $H_{LNS}$ 를 계산할 수 있다.

$$H_{LNS} = G(GG^T)^{-1} \quad (4)$$

단,  $G$ 은  $G$ 의 헤르미트 전치행렬이다.

$H_{LNS}$ 는 폐공간에서  $|H(\omega)|^2$ 이 최소가 되는 해이다. 따라서, LNS에 의한 역필터는 이차음원으로부터 방출되는 음향파워를 최소로 할 수 있다. 또한, 이 역필터는

이차음원수의 증가함에 따라 실내 전달계의 측정오차나 라우드 스피커간의 주파수특성의 차이등의 영향을 받지 않고, 강건성이 높은 역 시스템을 구축할 수 있다[5].

## 2.3 순차처리를 이용한 설계 방법

여기서는 역필터의 제  $z$ 차 근사해  $h^{(k)}$ 을 이용하여 제  $(k+1)$ 차 근사해  $h^{(k+1)}$ 을 구하는 방법을 생각한다. 단,  $h^{(k)}$ 는 역필터  $H_{ij}^{(k)}(\omega)$ 의 시간영역표현  $h_{ij}^{(k)}(n)$ 을 성분으로 하는

$$h^{(k)} = \begin{bmatrix} h_{11}^{(k)}(n) & h_{12}^{(k)}(n) & \dots & h_{1N}^{(k)}(n) \\ h_{21}^{(k)}(n) & h_{22}^{(k)}(n) & \dots & h_{2N}^{(k)}(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1}^{(k)}(n) & h_{M2}^{(k)}(n) & \dots & h_{MN}^{(k)}(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

로 표현되는 행렬이다. 같은 방법으로  $G_{ij}(\omega)$ 의 시간영역표현  $g_{ij}(n)$ 을 성분으로 한  $g$ 를 다음과 같이 정한다.

$$g = \begin{bmatrix} g_{11}(n) & g_{12}(n) & \dots & g_{1M}(n) \\ g_{21}(n) & g_{22}(n) & \dots & g_{2M}(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M1}(n) & g_{M2}(n) & \dots & g_{MM}(n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$k=0$ 일 때의 근사해, 즉 초기값은 어떠한 설계방법으로 구한 것이든 상관없다.  $k>0$ 일 때, 시간영역에서 각 제어포인트마다 목표 파형과의 오차  $e^{(k)}$ 을 구한다.

$$e^{(k)} = d - C\{gh^{(k)}\} \quad (7)$$

단  $e^{(k)}$ ,  $d$ 는 각각  $e_{ij}(n)$  ( $1 \leq N$ ),  $d_{ij}(n)$ 를 성분으로 하는 행렬이다.

$$e^{(k)} = \begin{bmatrix} e_{11}(n) & e_{12}(n) & \dots & e_{1N}(n) \\ e_{21}(n) & e_{22}(n) & \dots & e_{2N}(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{M1}(n) & 0 & \dots & e_{MN}(n) \\ d_{11}(n) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{22}(n) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_{NN}(n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

또한,  $C\{gh^{(k)}\}$ 는 아래와 같이 나타낸다.

$$C\{gh^{(k)}\} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M g_{1m} * h_{m1}^{(k)} & \dots & \sum_{m=1}^M g_{1m} * h_{mN}^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{m=1}^M g_{Nm} * h_{m1}^{(k)} & \dots & \sum_{m=1}^M g_{Nm} * h_{mN}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 \*는 convolution을 나타낸다.  $d$ 는 그림 1에서 제어포인트마다 목표 파형과 대응한다. 따라서,  $d$ 의 대각성분에는 단위 펄스가 대입된다.

다음으로  $e^{(k)}$ 의 주파수영역 표현인  $E^{(k)}$ 로부터 역필터의 갱신 차분  $H_{diff}^{(k)}$ 를 구한다.

$$H_{diff}^{(k)} = H_{LNS}E^{(k)} \quad (10)$$

마지막으로 시간영역에서 역필터를 갱신한다.

$$h^{(k+1)} = h^{(k)} + h_{diff}^{(k)} \quad (11)$$

### 3. 실환경데이터를 이용한 역필터 계산

#### 3.1 실내 전달함수의 측정

이차음원수  $M$ , 제어포인트수  $N$ 의  $M-N$  음장재현 시스템[7] (이하,  $M-N$ 시스템이라 함)을 상정한 역필터를 실 환경 데이터를 이용하여 그림 2와 같은 음향실험실(용적: 약70m<sup>3</sup>, 잔향시간: 약 0.2초)을 설계하였고, 다음과 같이 임펄스 응답을 측정하였다.

우선, 이차음원이 되는 라우드 스피커를 룸 중앙을 둘러싸듯이 네 곳마다 배치하였다. 다음으로 HATS (Head And Torso Simulator)는 중앙에 배치하였다. 제어포인트는 HATS의 양귀부, 및 그 전후 5.5cm사이 에 둔 곳의 동일 수평면내의 계 6개소를 상정하고, 상당부 에는 그림 3과 같이 마이크로폰을 설치하였다. 일차음 원인 라우드 스피커는 HATS의 두부정면으로부터 오른 쪽 60도 방향, 1.5m 떨어진 위치에 HATS의 이개와 같 은 높이에 설치하였다. 임펄스응답의 측정에는 TSP 신호[8]을 이용하였다. 측정에서 수치 조건을 표 1이 나타 낸다.

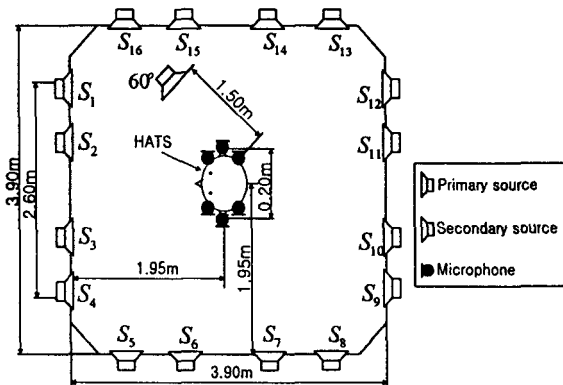


그림 2 실험환경

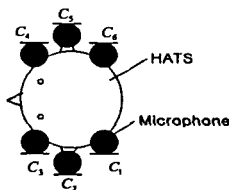


그림 3 제어포인트의 배치

#### 3.2 LNS에 의한 역필터 설계

측정한 임펄스응답(신호 길이 9600점)을 65536점의 길이의 FFT로 주파수영역으로 변환하고, 식(4)를 이용하여 역필터  $H_{LNS}$ 를 구하였다. 이것에 통과대역 150 - 4000Hz의 대역필터를 걸치고, IFFT에 의해 시간영역으로 변환하였다. 다시 모든 전달계에 대한 역필터의 시간응답중에서 제일 빠른 피크와 제일 느린 피크 사이를 필터군의 중심으로하여, 역필터 길이가 16384점이 되도록 이 전후 구간을 구형창으로 잘라내었다.

표 1 : 임펄스 응답의 측정조건

TSP 신호장	131072점
샘플링 주파수	48000Hz
양자화 비트수	16bit
동기가산회수	4회

표 2 : 2차 음원의 배치

2차음원수	사용한 2차음원 번호
4	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
8	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>10</sub> , S <sub>11</sub> , S <sub>14</sub> , S <sub>15</sub>
16	전부

#### 3.3 순차처리를 행하는 역필터 설계

LNS에 의해 구하여진 역필터군과 임펄스 응답파를 convolution하고, 시간영역에서 제어포인트마다 목표파형과의 오차  $e^{(k)}$ 를 65536점 길이의 FFT로 주파수영역으로 변환하고, 식 (10)에 의해 오차의 역필터  $H_{diff}^{(k)}$ 를 구하였다. 이것을 IFFT에 의해 시간영역에 되돌린 후, 신호의 선두로부터 16384점을 구형창에서 잘라내고, 원 역필터를 가산하였다. 구하여진 역필터로부터 같은 방법의 처리를 반복하고, 역필터를 갱신하였다.

### 4. 수치계산에 의한 검토

전 절에서 설계한 두 종류의 역필터에 관하여 비교 검토를 행하기 위하여, 설계한 역필터의 정밀도를 조사 하였다. 이차음원의 수  $M$  ( $M = 4, 8, 16$ ), 제어포인트의 수  $N$  ( $N = 2, 6$ )의  $M-N$ 시스템의 역필터를 각각 설계 하였다. 표 2에 이차음원의 수마다의 음원 배치를 나타 낸다.

재현계의 규모나 오차의 감소량의 관계를 조사하기 위해, 그림 9에 각  $M-N$ 시스템에서 제어포인트에서 이차오차의 평균을 제시하였다. 각각 가로축은 주파수 영역 처리의 반복회수를 나타내고, 세로축은 이차오차의 감소량을 나타낸다. 제어포인트  $C_j$ 에서 이차오차  $Error(C_j)$ 는 다음 식을 이용하였다.

$$Error(C_j) [dB] = 10 \log_{10} \left( \sum_i |e_{ji}|^2 \right) \quad (12)$$

제어포인트가 2점일 경우와 6점일 경우 이차음원수

의 증가에 따라서 이차 오차의 감소량이 크게되어지고 있다. 이것으로부터 이차 음원수가 클수록 이차오차의 감소 경향이 크게되었다.

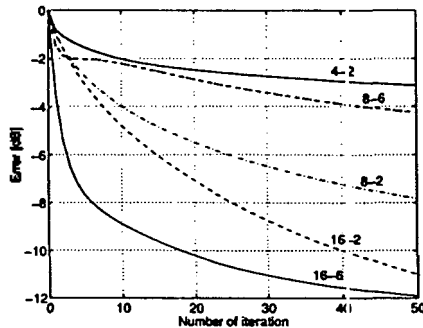


그림 4 M-N 시스템에서 각 제어포인트의 제공오차의 평균

16-6시스템의 제어포인트  $C_2$ 에서의 역필터와 전달계의 convolution파형을 그림 5에 제시하였다. 상단이 LNS에 의한 파형, 하단이 제안한 방법에 의한 파형이다. 그림 6은 그림 5에서 오차에 집중하고있는 부분을 확대한 것이다. LNS에서는 피크 전( $n=0-2000$ ), 및 피크 후( $n=16000-19000$ )에 오차가 집중하고 있지만, 제현음에서는 에코감으로 남는 경우가 있다. 따라서, 피크 전에 발생한 오차의 감소는, 제현음의 에코감의 감소에 크게 영향을 주는 것을 알 수 있다. 한편, 피크 후의 오차는 피크 전의 오차정도 감소하고있지 않지만, 이것은  $h_{diff}^{(A)}$ 를 설계할 때, 신호의 선두로부터 16384점으로 잘라내는 것이 원인이라고 생각된다.

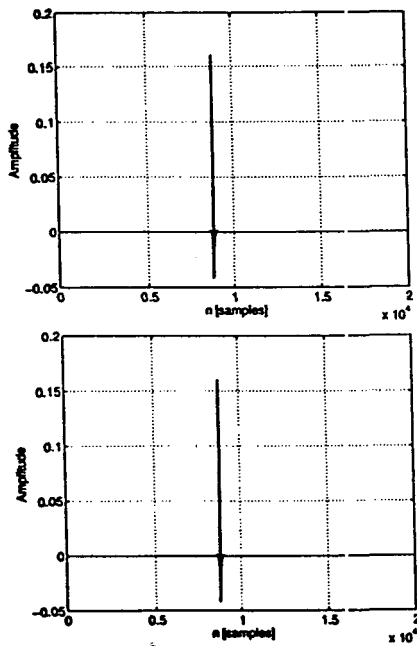


그림 5 16-6 시스템 시스템의 제어포인트  $C_2$ 에서의 convolution 파형(위)LNS, (아래) 제안한 방법

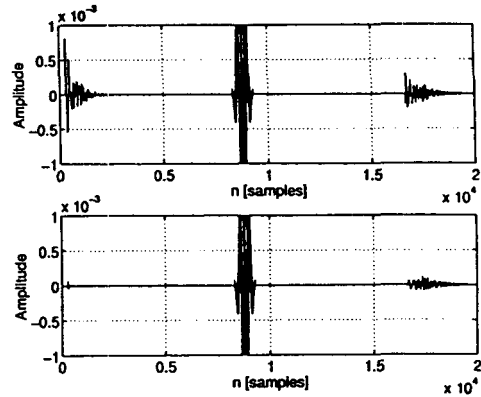


그림 6 두가지 방법에 의한 convolution 파형 비교 (위) LNS, (아래) 제안한 방법

## 5. 결 론

본 연구에서는 다중채널-다중포인트 제어계의 음장 재현 시스템에서 LNS로 설계된 역필터를 순차처리를 행하는 것에 의해, 새로운 역필터를 설계하는 방법을 제안하였다. M-N 음장재현 시스템을 설정하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 LNS에 의한 역필터와의 정밀도의 비교하였을 때, 설정한 어느 재현계에서도 전달계의 제공오차가 감소하고 있으므로 제안한 방법이 유용함을 알 수 있다. 더구나, 제안한 방법을 실제의 음장재현 시스템에 적용하였을 때, 보다 원음 신호에 충실한 음이 재현되리라 기대한다. 또한, 제현하는 계의 규모가 크게 될수록 이 방법의 효과가 기대되므로, 대규모 음장재현 시스템에 유효한 설계 방법이라고 본다.

## 참고문헌

- [1] M. Miyoshi and Y.Kaneda, "Inverse Filtering of Room Acoustics," IEEE Trans. ASSP, vol.36, no.2, pp.145-152, 1988.
- [2] S.Haykin, "Adaptive filter theory, third edition", Prentice-Hall, 1996
- [3] Kaneda Yutaka, "음향시스템과 디지털 처리" 전자정보통신학회, 1996
- [4] Yoiti Suzuki, Futoshi Asano, Hack-Yoon Kim, and Toshio Sone, "An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse response.", The journal of the acoustical society of America, vol. 97, no. 2 pp.1119-1123, 1995
- [5] Shiro Ise, "A principle of active control of sound based on th Kirchohoff-Helmholtz integral equation and th inverse system theory.", The journal of the acoustical society of Japan, vol.53, no. 9 pp.706-713, 1997