

Circulant Feedback Delay Networks(CFDN's)를 이용한 인공 잔향기 구현에 관한 연구

고병섭*, 김학윤*

청주대학교 전자공학과*

A Study on the Implementation of an Artificial Reverberator Using Circulant Feedback Delay Networks(CFDN's)

Ko, Byeong-Seob*, Kim, Hack-Yoon*

Dept. of Electronic Eng., Chongju University*

kobs91@wslab.chongju.ac.kr, hykim@alpha94.chongju.ac.kr*

요 약

인공 잔향은 콘서트홀에서와 같이 수백·수천개의 극점과 영점들을 갖는 커다란 시스템을 모델링하기 위한 신호처리 분야 중에서 매우 매력적인 응용 분야중 하나이다^[1,2].

이러한 인공잔향을 구현하기 위하여, 기존에는 순환적인 디지털 필터인 Comb 필터와 Allpass 필터를 조합시킨 인공 잔향기가 제안되어 왔다. 그러나, 이와 같은 방법은 시스템이 커질수록 실시간 처리와 안정도의 문제가 제기되고, 인공 잔향의 특성이 저하되는 문제점이 있다^[3,4]. 따라서, 최근에는 이와 같은 문제점을 효과적으로 감소시킬 수 있는 귀환 지연 회로망(Feedback Delay Networks : FDN's)과 디지털 도파관 회로망(Digital Waveguide Networks : DWN's)을 이용한 방법이 제안되어지고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 귀환 행렬이 Circulant 행렬로 이루어진 귀환 지연 회로망(CFDN's)을 이용한 인공 잔향기 구현에 관하여 논하고자 한다.

1. 서 론

입의의 음원에서 발생한 음은 청취자에게 직접 도달하는 직접 음과 음이 발생한 공간의 면에 반사되어 도달하는 여러 가지 반사 음들이 존재하는데, 이러한 반사음중에서도 후기 반사

음들을 잔향이라고 한다^[5]. 따라서, 잔향은 음이 발생되고 있는 공간의 특성을 결정짓는 중요한 인자중 하나이기 때문에, 입의의 공간을 모델링하기 위해서는 인공 잔향이 필수적이라 할 수 있으며, 또한 3 차원 입체 음향을 실현하기 위해서 요구되는 중요한 요소이다.

이와 같은 인공 잔향을 실현하기 위한 기존의 방법은 순환적인 디지털 필터인 Comb 필터와 Allpass 필터를 이용한 인공 잔향기가 널리 사용되어 왔다. 그러나, 시스템이 커질수록 실시간 처리의 문제, 인공 잔향기의 안정도와 시간-주파수 응답을 효율적으로 제어할 수 없는 문제점을 갖고 있다. 최근에는 효율적으로 위와 같은 문제점을 해결할 수 있고, 무손실의 원형 형태에서 수치적으로 구현이 가능한 귀환 지연 회로망(FDN's)과 디지털 도파관 회로망(DWN's)을 이용한 방법이 제안되고 있다. 특히, 일반적인 귀환 지연 회로망은 귀환행렬이 Unitary 행렬의 형태로 되기 때문에, Unitary 행렬보다 인공 잔향기의 안정도와 시간-주파수 응답을 효율적으로 제어 할 수 있는 Circulant 행렬을 귀환 행렬로 하는 귀환 지연 회로망(CFDN's)이 제안되었다.

따라서, 본 연구에서는 CFDN's를 이용한 인공 잔향기를 구현하기 위한 방법에 대하여 논하고, 일반적인 순환 Comb 필터에 의한 방법과의 특성을 비교하여 CFDN의 유용성을 제시하고자 한다.

II. 귀환 지연 회로망 (FDN's)

귀환 지연 회로망은 귀환 행렬을 가지고 있는 귀환 루프에 연결된 지연 라인의 집합으로 특징지어진다. 귀환 지연 회로망은 순환적인 Comb 필터 $y(n) = x(n-N) + gy(n+N)$ 에 준 단일 N -표본 지연 라인을 다른 길이를 가지는 지연 대각 행렬로 대체하고, 지연 이득 g 을 행렬 $G = UD$ 로 대체한 구조로 구성된다. 여기서, U 는 임의의 Unitary 행렬이고, D 는 모든 요소가 $1 - \epsilon$ 보다 작은 값을 갖는 임의의 대각 행렬이다. 여기서, $\epsilon > 0$ 이도록 하여 안정도의 여유 (margin)를 결정한다. 그림 1은 일반적인 N 차 귀환 지연 회로망을 보이고 있다. 지연 라인은 $\tau_i = m_i/T$ 만큼의 시간 길이를 갖는다. 이때, T 는 샘플링 주기이다. 또한, 그림 1에서 $h_1(n) \sim h_N(n)$ 과 $t(n)$ 를 제거한 회로망을 원형 귀환 지연 회로망이라고 한다.

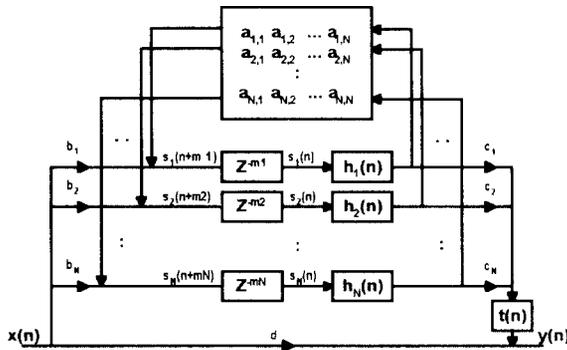


그림 1. 일반적인 N 차 귀환 지연 회로망

원형 귀환 지연 회로망의 임·출력관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$y(n) = \sum_{i=1}^N c_i s_i(n) + dx(n) \quad (1)$$

$$s_i(n+m_i) = \sum_{j=1}^N a_{ij} s_j(n) + bx(n) \quad (2)$$

귀환 지연 회로망의 초기상태를 0으로 가정하고, 식 (1),(2)를 Z 변환하면 다음 식이 얻어진다.

$$Y(z) = c^T S(z) + dX(z) \quad (3)$$

$$S(z) = D(z)[AS(z) + bX(z)] \quad (4)$$

여기서,

$$S^T = [s_1(z), \dots, s_N(z)], \quad b^T = [b_1, \dots, b_N],$$

$$c^T = [c_1, \dots, c_N] \text{이고,}$$

지연 행렬 $D(z) = \text{diag}(z^{-m_1}, \dots, z^{-m_N})$ 이고,

$A = [a_{ij}]_{N \times N}$ 는 귀환 행렬을 나타낸다.

식(3)과 (4)에서, 전달함수는

$$H(z) = c^T [D(z^{-1}) - A]^{-1} b + d \quad (5)$$

이 되고, 이때 시스템의 극점은

$$\det[A - D(z^{-1})] = 0 \quad (6)$$

의 해가 된다. 또한, 영점은

$$\det[A - b \frac{1}{d} c^T - D(z^{-1})] = 0 \quad (7)$$

의 해가 된다. 여기서, 귀환 행렬 A 는 일반적으로 Unitary 행렬로 주어지는데, 이는 Unitary 행렬의 고유값이 단위원상에 존재하기 때문이다. 결국, Unitary 행렬을 적절히 선택하므로써 시스템의 극점이 단위원상에 존재하도록 할 수 있으므로, 모든 주파수에 대하여 무한 산향 시간으로 설계 가능하며, 주파수 말도는 초(second)로 표현한 전체 지연 길이의 합과 관계된다. 만일, 지연이 충분하다면 원형 귀환 지연 회로망은 유사-랜덤 잡음 발생기와 상응된다⁶⁾.

따라서, 실제 인공 산향기를 구현하기 위해서는 $h_1(n) \sim h_N(n)$ 과 $t(n)$ 를 적절히 삽입하여 산향의 특성을 효율적으로 제어할 수 있을 것이다.

III. Circulant 귀환 지연 회로망

원형 귀환 지연 회로망의 경우, 귀환 행렬의 특성이 전체 시스템의 특성을 결정짓는 중요한 요인임을 쉽게 알 수 있다. II장에서 논한 Unitary 귀환 행렬을 사용한 경우와 마찬가지로 단위원상에 극점이 위치하는 특성을 유지하면서 시스템의 안정도와 귀환 행렬에 대한 분석이 쉽다. 실시간 처리가 가능한 것이 Circulant 귀환 행렬이다. 이러한 Circulant 행렬은 다음 식과 같은 구조를 갖는다.

$$A = \begin{bmatrix} v(0) & v(1) & \dots & v(N-1) \\ v(N-1) & v(0) & \dots & v(N-2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ v(1) & \dots & v(N-1) & v(0) \end{bmatrix}$$

이와 같은 Circulant 행렬은 normal 행렬이고, 부순실이며, Unitary한 특징을 갖고 있다. 특히, 모든 Circulant 행렬은 이산 푸리에 변환(DFT) 행렬에 의하여 대각화된다는 것은 잘 알려져 있다. 이것은 A 의 고유값들이 첫 번째 열의 DFT에 의하여 계산할 수 있음을 의미한다^[6].

따라서, Circulant 행렬은 전체 행렬을 단지한 열이나 행의 성분만으로 결정할 수 있고, 고유치의 실대치가 1로 되어 부순실이다. 그러므로, 행렬의 고유치로부터 첫 번째 행(row)을 역이산 푸리에 변환(IDFT)에 의하여 구할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

VI. 시뮬레이션 및 결과

VI-1. 시뮬레이션 조건

그림 1의 귀환 지연 회로망에서, $t(n)$ 은 생략하고, $h_{1(n)} \sim h_{N(n)}$ 를 $g_i = a^m$ 로 대신하고, Unitary 행렬을 Circulant 행렬로하여 잔향기의 특성을 제어하였다. 그림 2는 시뮬레이션을 위한 Circulant 귀환 지연 회로망을 나타낸다.

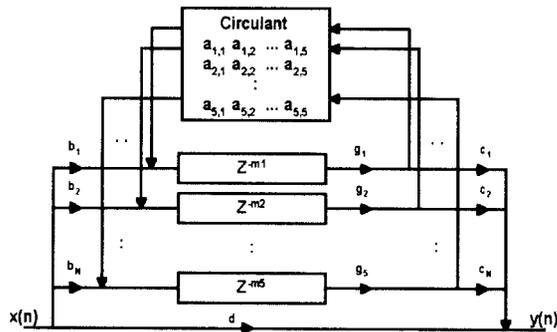


그림 2. 지연 라인의 출력에 이득이 첨가된 Circulant 귀환 지연 회로망

그림 2에서의 각 변수 값을 다음과 같은 조건하에서 시뮬레이션을 수행하였다.

$$g_i = 0.99^{m_i}, \quad d = 1,$$

$$\mathbf{b}^T = [1, 1, 1, 1, 1],$$

$$\mathbf{c}^T = [1, -1, 0, 0, 0],$$

$$\mathbf{m} = [13, 15, 17, 16, 14]$$

또한, Circulant 행렬의 고유치에 의한 특성을 비교하기 위해 다음과 같이

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{3}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} \\ \frac{2}{5} & -\frac{3}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} \\ \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & -\frac{3}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} \\ \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & -\frac{3}{5} & \frac{2}{5} \\ \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & -\frac{3}{5} \end{bmatrix}$$

$$\lambda_1 = [1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1]$$

인 경우와

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & -\frac{3}{5} \\ -\frac{3}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} \\ \frac{2}{5} & -\frac{3}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} \\ \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & -\frac{3}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} \\ \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & \frac{2}{5} & -\frac{3}{5} & \frac{2}{5} \end{bmatrix}$$

$$\lambda_2 = [e^{-j1.8849} \quad e^{j1.8849} \quad 1 \quad e^{j0.6283} \quad e^{-j0.6283}]$$

인 경우를 사용하였다.

VI-2. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 3은 A_1 의 결과를 보이고 있으며, 그림 4는 A_2 일때의 임펄스 응답을 보이고 있다.

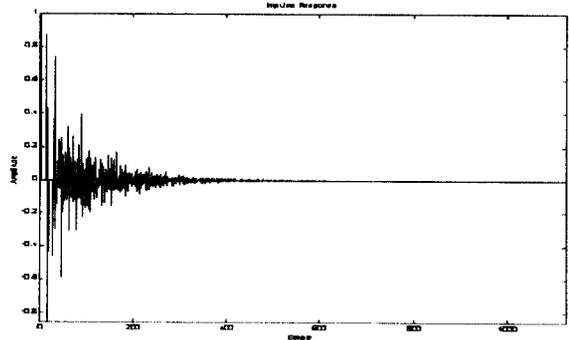


그림 3. 귀환 행렬이 A_1 일 때의 임펄스 응답

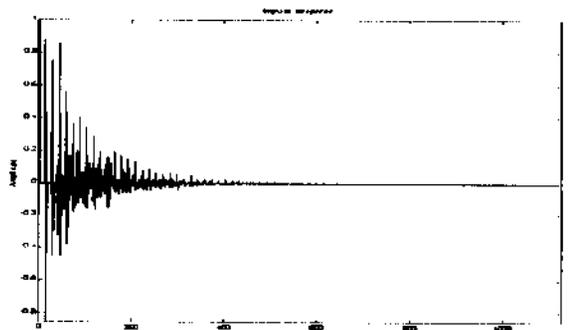


그림 4. 귀환 행렬이 A_2 일 때의 임펄스 응답

그림 3과 4를 보면 귀환 행렬의 고유지에 따라 임펄스 응답이 변화하고 있음을 알 수 있다. 물론 감쇄 계수가 $g_i=1$ 이면, 그림 3과 4와 같은 감쇄는 발생하지 않는다. 그 이유는 II상에서 언급한 바와 같다. 그리고, 그림 2와 3으로 부터 초기 반사음에 대한 결과가 좋지 않음을 알 수 있으므로, Circulant 귀환 지연 회로방사체만으로는 성능이 우수한 인공 산향기를 구현할 수 없음을 알 수 있다.

Circulant 귀환 지연 회로망의 유용성을 고찰하기 위하여 일반적인 Comb 필터의 특성과 비교하기 위하여, 그림 2에서 귀환 행렬을 대각 요소가 0.99인 대각 행렬로 대신하고, $g_i=1$ 로 하였다.

그림 5는 Comb 필터의 임펄스 응답이고, 그림 6은 동일한 조건으로 귀환 행렬이 A_1 인 때의 임펄스 응답을 나타낸다.

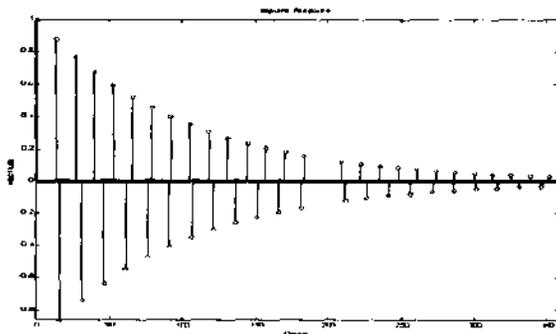


그림 5. 그림 2에서 귀환 이득이 0.99로 하였을 때의 Comb 필터의 임펄스 응답

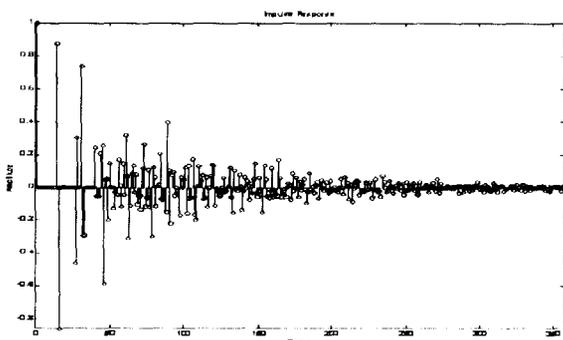


그림 6. 그림 3과 동일한 임펄스 응답(단, 입력 샘플수는 256개이다.)

그림 5와 6을 비교하여 보면, Comb 필터의 경우는 균일한 지연특성을 가지고 있고, 귀환 지연 회로망은 어느 정도 시간이 경과 후 거의

삼음성과 같은 특성을 보이고 있다. 따라서, 귀환 지연 회로망을 가지고 성능이 우수한 인공 산향기를 구현하기 위해서는 초기 반사를 위한 일반적인 필터단과, 후기 확산을 위한 귀환 지연 회로망을 서로 조합함으로써 우수한 성능의 인공 산향기를 구현할 수 있음을 의미한다.

V. 결 론

본 연구에서는 Circulant 귀환 지연 회로망을 이용한 인공산향기를 구현시키는 방법에 관하여 논하였으며, Circulant 행렬의 고유지에 따른 특성변화에 대하여 논하였다. 또한, 제시한 산향기는 기존의 Comb 필터와 Allpass 필터를 사용하였을 때보다, 밀도가 높은 산향특성을 보였다.

참고문헌

- [1] Durand R. Begault, 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia, Academic Press, Boston, MA, 1994
- [2] K. Steiglitz, A digital Signal Processing Primer, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1995
- [3] G. H. Golub, C. F. Van Loan, Matrix Computations, The Johns Hopkins Univ. Press, 1989
- [4] J. M. Jot, "An Analysis/Synthesis Approach to real-Time Artificial Reverberation, Proc. Int. Conf. Ac. Speech and Sig. Proc., San Francisco, 1992.
- [5] William G. Gardner, " Transaural 3-D audio", MIT Media Lab. Perceptual Computing Section Technical Report No. 342 July 20, 1995
- [6] J. O. Smith, " Physical Modeling using Digital Waveguides", CMJ, Vol. 16, no. 4, pp. 74-91, Winter, 1992.