

# Modified CFDN's 특성 파라미터의 최적화에 대한 고찰

고병섭\*, 김학운\*  
청주대학교 전자공학과\*

## A Study on the optimum characteristic parameter of Modified CFDN's

Ko, Byeong-Seob\*, Kim, Hack-Yoon\*  
Dept. of Electronic Eng., Chongju University\*  
kobs@chongju.ac.kr, hykim@chongju.ac.kr\*

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

### 요 약

인공 잔향기를 구현하는데 있어서, 잔향 시스템의 안정도 및 시간-주파수 응답을 용이하게 제어하기 위하여 일반 FDN's(Feedback Delay Networks)에서의 귀환 행렬인 unitary 행렬을 circulant 행렬로 사용한 CFDN's가 최근에 제안되었다. 그러나, 이 구조는 주파수 응답의 평탄도가 낮고, 영점들의 위치를 조절하기 어렵다는 문제점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 CFDN's의 시간응답 특성을 최대한 유지하면서 주파수 응답 특성을 개선하기 위하여, 일반 귀환 필터의 귀환부에 직접경로가 없는 CFDN's를 적용한 MCFDN's(Modified CFDN's)에 관하여 고찰하고, 이 시스템의 특성을 결정하는 특성 파라미터의 최적화에 대하여 고찰하고자 한다.

### 1. 서 론

잔향은 음이 전파되고 있는 공간의 특성을 인지할수 있는 인자들을 내포하고 있다. 따라서, 임의의 공간을 모델링하기 위해서는 잔향을 인공적으로 모사하는 것이 필수적이고, 또한 3

차원 입체 음향을 실현을 위한 중요한 요소이다<sup>[1,2,6]</sup>.

이와 같이, 초기에는 인공잔향기는 순환적인 Comb 필터와 Allpass 필터를 이용한 방법이 널리 사용되어 왔다<sup>[1,2]</sup>. 그러나, 이 구조는 시스템이 커질수록 실시간에 처리할 수 없다는 문제점과 잔향기의 안정도와 시간-주파수 응답을 효율적으로 제어할 수 없다는 문제점을 갖고 있다. 따라서, 위와 같은 문제점을 해결하기 위하여 최근에는, 일반 FDN's의 귀환행렬인 unitary행렬을 circulant행렬을 사용한 CFDN's가 제안되었다<sup>[3,4,5]</sup>. 이 CFDN's는 인공 잔향기의 안정도 및 시간-주파수 응답을 효율적으로 제어 할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 주파수 응답의 평탄도가 상당히 낮다는 단점을 갖고 있다.

따라서, 본 연구에서는 CFDN's 시간응답 특성을 최대한 유지하면서 주파수 응답 특성을 개선하기 위하여, 일반 귀환 필터의 귀환부에 직접경로가 없는 CFDN's를 적용한 MCFDN's에 관하여 고찰하고, 이 시스템의 특성을 결정하는 특성 파라미터를 최적화하는 방법에 대하여 고찰하고자 한다.

## II. Modified CFDN's (MCFDN's)

MCFDN's는 CFDN's의 시간영역 응답을 최대한 유지시키고, 주파수 응답의 평탄도를 개선하는데 중점을 두고 있다. 그림 1에 MCFDN's의 시스템 블록도 및  $A(z)$ 의 구조를 나타낸다. 그림 1에서 알 수 있는 것과 같이, CFDN's는 입력과 출력에 연결되는 직접경로가 없는 형태를 취하고 있다.

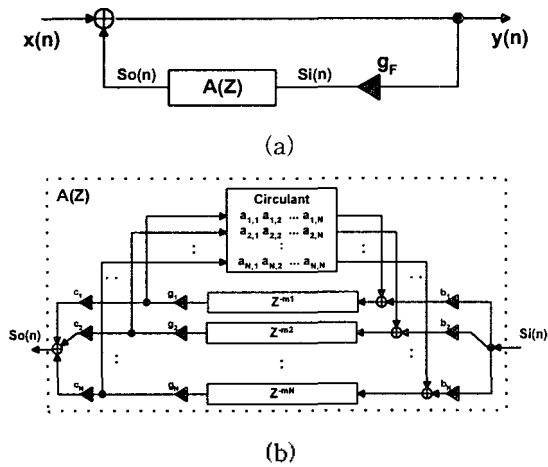


그림 1. (a) MCFDN's의 시스템 흐름도, (b) 그림1(a)의  $A(z)$ 의 구조.

즉, 그림 1(a)로부터 알 수 있듯이, MCFDN's는 일반적인 순환 필터의 구조와 동일하고, 또한 이 구조는 간향기로 널리 사용되어진 comb 필터의 구조와도 유사성을 갖고 있다<sup>[1,2,6]</sup>. 이와 같이, MCFDN's는 일반 순환 필터인 comb 필터의 특성을 이용하여 CFDN's의 주파수 응답을 개선하는 것이다.

MCFDN's의 시스템 응답을 CFDN's의 경우와 동일하게 적용하여 계산하면 다음식과 같이 나타내어진다<sup>[3]</sup>.

$$H_M(z) = \frac{A - D(z^{-1})}{A + g_F c^T b - D(z^{-1})} \quad (1)$$

이 시스템의 극점은 다음식과 같이 주어지고,

$$\det[A + g_F c^T b - D(z^{-1})] = 0 \quad (2)$$

영점은 다음식과 같이 얻어진다.

$$\det[A - D(z^{-1})] = 0 \quad (3)$$

한편, 그림 1(b)내부의 이득  $g_i$ 는 다음과 같은 관계식으로 주어진다<sup>[3]</sup>.

$$g_i = \alpha^i \quad (4)$$

여기서,  $i=1 \dots N$ 이고  $\alpha$ 는 1보다 작은 상수로써 잔향시간과 밀접한 관계가 있다.

식(1)에서,  $g_F = -1/d$ 이면, MCFDN's는 CFDN's의 역시스템이 된다. 그러나, MCFDN's에서는 CFDN's의 시간 영역에서의 특성을 최대한 유지하고, 주파수 응답이 역이 되는 것을 피하기 위하여  $g_F$ 가 영보다 큰 경우만을 사용하게 된다. 그림 2는, 각 파라미터 값을

$$\alpha = 0.99, \quad m = [16 \ 17 \ 15]^T$$

$$b = [1 \ 1 \ 1]^T, \quad c = [1 \ -0.8 \ 0]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} -1/3 & 2/3 & 2/3 \\ 2/3 & -1/3 & 2/3 \\ 2/3 & 2/3 & -1/3 \end{bmatrix} \text{ 이고}$$

$g_F = -0.2$ ,  $g_F = 0.2$ 과 같이 주고, 시뮬레이션한 결과의 시간-주파수 응답을 나타낸다.

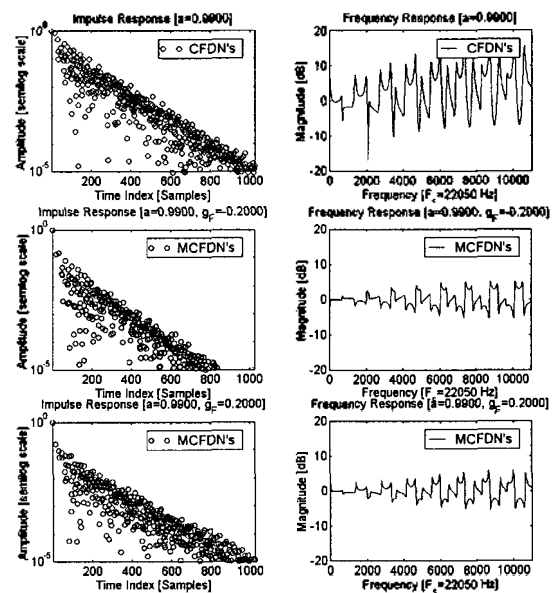


그림 2.  $g_F = -0.2$ ,  $g_F = 0.2$  일 때 MCFDN's의 시간-주파수 응답과 비교를 위한 CFDN's의 시간-주파수 응답

그림 2에서, MCFDN's와 CFDN's의 임펄스 응답을 비교하여 보면, 초기 영역에서 오차가 발생하고 있지만, 에코밀도, 잔향시간은 거의 유사함을 알 수 있고, 주파수 응답은 MCFDN's 이 CFDN's보다 개선되었음을 알 수 있다.

그 이유는 식 (1)에서 보인 것과 같이, MCFDN's과 CFDN's의 차이점은 영점과 극점이 서로 상대적이라는 것이다. 즉, MCFDN's에서는 영점이 단위원상에 존재하고, 극점은 그림 1(a)처럼  $g_F$ 의 값에 의하여 결정된다. 따라서,  $g_F$ 는 MCFDN's의 특성을 결정하는 중요한 특성 파라미터가 되고, 식 (4)의  $\alpha$ 는 CFDN's의 시간영역 특성을 결정하는 파라미터가 된다. 그러므로, MCFDN's가 시간영역에서 CFDN's의 특성을 최대한 유지시키기 위해서는  $g_F$ 와  $\alpha$ 간의 상관관계를 조사하여 최적화된  $g_F$ 를 구하지 않으면 안된다.

### III. 특성 파라미터의 최적화

최적화된  $g_F$ 를 수치적으로 유도하기에는 시스템 해석의 어려움과 같은 많은 문제가 내포되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 최적화된  $g_F$ 를 구하기 위하여 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 잔향시간을 기준으로 분석하여, 각  $\alpha$ 에 대한 최적화된  $g_F$ 를 얻었다.

그림 3은 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 각  $\alpha$ 에 대한  $g_F$ 와 3차 비선형 방정식으로 근사화한 결과를 나타내고 있다.

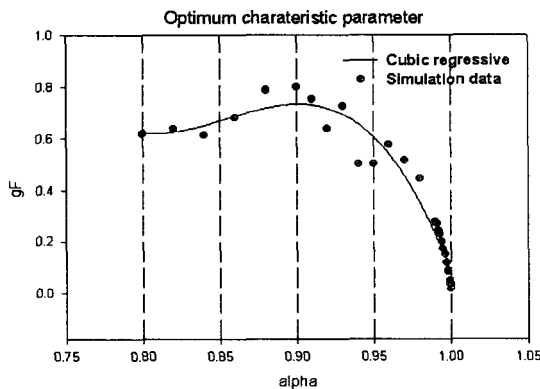


그림 3. 표 1에 대한 결과와 3차 비선형 방정식으로 근사화한 결과

그림 3에서, 근사화한 3차 비선형 근사식은 다음식과 같다.

$$g_F = y_0 + ax + bx^2 + cx^3 \quad (5)$$

여기서,  $y_0 = 156.0517$ ,  $a = -551.5269$ ,  $b = 650.4526$  이고  $c = -254.8869$  이다.

그림 3에서,  $\alpha$ 가 0.9보다 작으면, 임펄스 응답이 임펄스성이 되고, 0.999보다 큰 경우에는 MCFDN's나 CFDN's 모두 주파수 응답이 상당히 저하되기 때문에, 실제 유효한  $\alpha$  구간은  $0.9 < \alpha < 0.999$ 이다.

그림 3에서 유효구간을 살펴보면, 다음식과 같은 삼각함수를 이용하여 근사화가 가능함을 알 수 있다.

$$g_F = A \cdot \text{sech}^{-1}(\alpha), \quad (6)$$

$A = g_{F1} / \text{sech}^{-1}(\alpha_1)$  이고,  $g_{F1}$ 와  $\alpha_1$ 는 첫 번째 측정치이므로,  $\alpha$ 와  $g_F$ 간에는 식(6)의 근사식이 성립하고, 각  $\alpha$ 에 대하여  $g_F$ 가 최적화되었다고 할 수 있다.

그림 4는 유효구간에 대한 측정치와  $\text{sech}^{-1}x$ 로 근사화한 결과를 나타내고 있다.

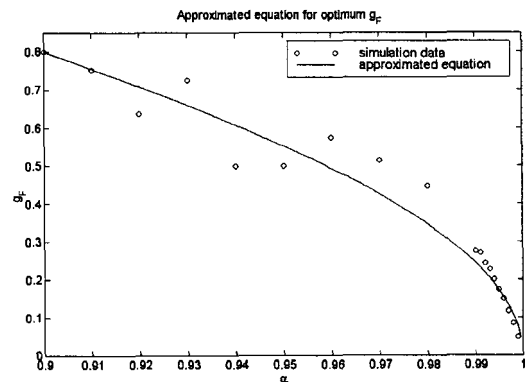


그림 4. 함수  $\text{sech}^{-1}x$ 를 사용한  $\alpha$ 와  $g_F$ 간의 상관관계를 근사화한 결과

### VI. 시뮬레이션 및 고찰

본 장에서는 식(6)으로 주어진 MCFDN's의

특성 파라미터에 대한 최적화 식의 타당성을 조사하기 위하여, 시뮬레이션을 수행하고 그 결과에 대하여 논하고자 한다.

그림 5와 6은 식(6)을 적용하고, 그림 2와 동일한 조건하에서 컴퓨터 시뮬레이션 결과의 시간-주파수 응답을 나타내고 있다.

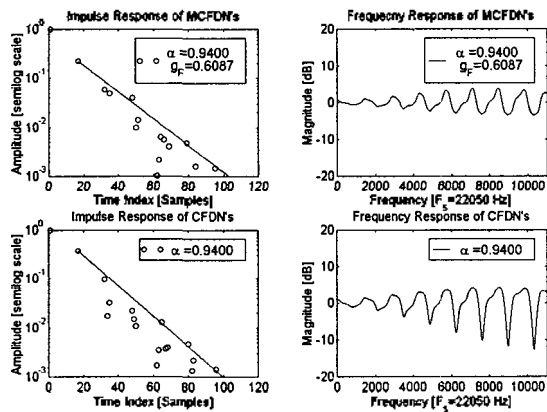


그림 5.  $\alpha = 0.94$ ,  $g_F = 0.6087$ 인 경우의 시간-주파수 응답

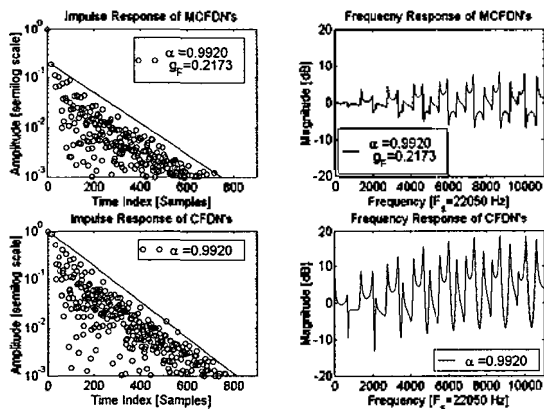


그림 6.  $\alpha = 0.992$ ,  $g_F = 0.2173$ 인 경우의 시간-주파수 응답

그림 5와 6에서 시간 응답 특성을 보면, CFDN's과 MCFDN's의 경우, 초기 영역에서 오차가 발생하고 있지만, 결국 잔향시간을 결정하는 감쇠비 및 예코 밀도가 유사함을 알 수 있다. 반면, 주파수 응답은 상당히 개선되었음을 알 수 있다. 즉, 식(6)로 주어진  $\alpha$ 와  $g_F$ 간의 상관관계에 대한 근사식이 유효함을 알 수 있다. 결국, MCFDN's의 시스템 동작은 식(6)를 적용하므로써, CFDN's에 대한 결과를 그대로 사용할 수 있게 된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 CFDN's의 시간영역 특성을 최대한 유지하면서, 주파수 응답특성을 개선하기 위한 MCFDN's에 대하여 고찰하였고, MCFDN's의 특성을 결정하는 파라미터의 최적화에 대하여 논하였다. 또한, 특성 파라미터의 최적화식을 제시하고 그 유효성을 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

앞으로는, 시간응답에서 초기영역에서의 차를 줄일 수 있는 연구 및 본 논문에서 제안한 방법을 이용한 청취실험을 수행할 예정이다.

## 참고문헌

- [1] M.R. Schroeder, "Natural Sounding Artificial Reverberation", Journal of the AES, Vol. 10, no. 3, pp. 219-223, July 1962.
- [2] M.R. Schroeder and B.F. Logan, "Colorless Artificial Reverberation", IRE Transactions on Audio, pp. 209-214, November-December 1961.
- [3] Davide Rocchesso and Julius O. Smith, "Circulant and Elliptic Feedback Delay Networks for Artificial Reverberation", IEEE Transactions on speech and audio processing, vol. 5, no. 1, January 1997.
- [4] Jean-Marc Jot, "An Analysis/Synthesis Approach to real-Time Artificial Reverberation", Proc. Int. Conf. Ac. Speech and Sig. Proc., San Francisco, 1992.
- [5] G. H. Golub, C. F. Van Loan, Matrix Computations, The Johns Hopkins Univ. Press, 1989.
- [6] Ko Byeong-Seob and Kim Hack-Yoon "A Study on the Implementation of an Artificial Reverberator Using Circulant Feedback Delay Networks(CFDN's)", Proc. Acoust. Soc. Kor, vol. 17, no. 2(s), pp. 19-22, 1998.