

디지털 신호처리를 이용한 자연스러운 실시간 잔향기의 구현

이동우*, 김영오*, 고대식*, 강성훈**

*목원대 전자공학과, **대전보건전문대 방송제작기술과

Real-time Implementation of Natural Reverberator using a Digital Signal Processor

Dongwoo Lee*, Youngoh Kim*, Deasik Ko*, Seonghoon Kang**

*Mokwon Univ., **Taejon medical junior college

dwlee@ee.mokwon.ac.kr

youngman@mwus.mokwon.ac.kr

dsk@mwus.mokwon.ac.kr

shkang@tiger.tmj.ac.kr

요 약

본 연구에서는 TMS320C40을 이용하여 자연스러운 실시간 잔향기를 구현하기 위하여 주파수특성의 보상 및 coloration의 제거, 그리고 실행코드를 최적화하는 방법을 연구분석하였다. 주파수특성이 평탄한 문제를 해결하기 위하여 잔향기를 구성하는 comb필터의 케환부에 저역통과필터를 추가하는 방법을 제안하였으며 coloration을 제거하기 위하여 comb 필터의 지연과 allpass 필터의 이득 및 지연을 변화시켜가면서 최적의 값을 결정하였다.

임펄스응답을 이용하여 구현된 잔향기의 특성을 실험한 결과, 실제 공간에서 측정된 임펄스응답의 잔향 시간에 따른 주파수특성과 유사한 결과를 얻었으며 CD음악을 이용하여 44.1kHz에서 실시간동작시킨 청취실험에서도 자연스러운 특성을 나타내었다.

I. 서론

잔향은 3D 음향 재생시 공간감과 거리감을 나타내는 중요한 파라미터이므로 우수한 성능을 갖는 3D 음향을 재현하기 위해서는 자연스러운 특성의 잔향기가 필요하다.

Schroeder는 잔향기 구현을 위하여 comb 필터와 allpass 필터를 이용하는 알고리즘을 제안하였으나 주파수 특성이 평탄하여 자연스럽지 못한 단점과 coloration이 발생하는 문제점이 있었다. 1981년에 Naraji Sakamoto는 주파수특성이 평탄한 문제를 해결하기 위하여 주파수 대역을 3개 대역으로 나누어 서로 다른 잔향시간을 부여하였으나 3개 대역의 경계면에서의 특성이 부자연스러운 단점이 노출되었다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 잔향기를 구성하는 comb 필터의 케환부에 저역통과필터를 추가하는 방법을 제안하였으며 44.1kHz의 동작속도를 갖는 실시간 잔향기의 구현을 위한 실행코드의 최적화 방법을 연구분석하였다. 한편, 구

현된 잔향기에서 나타나는 coloration을 제거하기 위하여 comb 필터의 지연과 allpass 필터의 이득 및 지연을 변화시켜가면서 최적의 값을 결정하였다.

제안된 잔향기의 주파수 특성과 coloration 특성을 평가하기 위하여, 임펄스 응답을 이용하였으며, 잔향기의 실시간 동작을 무향실 음원을 이용하여 청취실험하였다.

II. 잔향기 시뮬레이션

2.1 실제공간의 잔향 주파수특성

잔향의 특성을 조사하기 위해 실제 공간에서 임펄스 응답을 측정하였다. 그림 1은 실제 콘서트홀에서 측정된 임펄스 응답을 갖고 잔향의 주파수 특성을 콘서트 홀의 좌석별로 나타낸 것이다. 콘서트 홀의 잔향시간은 좌석마다 약간씩 차이를 보

이며 주파수 특성도 약간씩의 차이가 있다. 그러나, 우리는 콘서트 홀에서 측정된 임펄스 응답을 통해 실제 공간의 잔향에 몇가지 공통적인 특성이 있는 것을 알수 있었다. 잔향의 특성은 다음과 같다.

- 공간이 일정하면 후기반사음이 거의 일정하다.
 - 초기반사음은 위치에 따라 다르다.
 - 주파수에 따라 잔향시간이 다르다.
 - 청취시 자연스럽다.
- 잔향시간이 주파수에 따라 다르게 나타나는 이유는 저주파성분에 비해 고주파성분이 공기에 의해서 빠르게 감쇠되기 때문이다. 이러한 실제 잔향의 특성을 이용해 잔향기의 성능을 평가하였다.

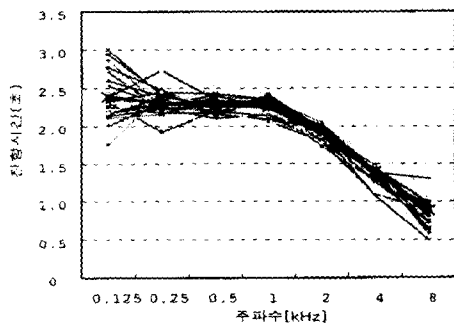


그림 1. 콘서트 홀의 20좌석에서의 잔향시간 주파수 특성

2.2 자연스러운 잔향기의 설계

Schroeder 제안한 잔향기 알고리즘^[12]을 Matlab으로 시뮬레이션하여 그림 2의 임펄스 응답과 그림 3의 주파수 특성을 얻었다. Schroeder 잔향기의 임펄스 응답에는 coloration이 많이 포함되어 있으며, 그림 3과 같이 잔향시간에 따른 주파수 특성이 전대역에 걸쳐서 평탄하게 나타난다. 잔향시간에 따른 주파수 특성을 개선하기 위하여 주파수를 3개대역으로 나누어 처리한 잔향기 알고리즘도 시뮬레이션해보았지만 대역이 겹치는 부분에서 부자연스러운 문제점을 발견하였고, 주파수를 여러대역으로 나누어 잔향기를 설계한 발표에서도 여러 문제점을 발견하였다^[13].

이러한 문제점을 해결하기 위해 잔향기를 새롭게 설계하였다. 설계된 잔향기는 초기 반사음 생성부와 후기 반사음 생성부로 구성되며 전체적인 구성도는 그림 5와 같다. 초기 반사음의 파라미터값은 실제 공간의 임펄스 응답을 기반으로 직접음 이후 20ms~80ms 사이의 값으로 결정하였고, 후기 반사음 생성부는 반사음이 지수적으로 감쇠하는 특성^[14]을 만족하게끔 comb 필터 4개와 allpass 필터 3개를 이용해 설계하였다. Comb 필터의 이득은 잔

향시간에 따라 식(1), (2)에 의해서 결정된다^[5]. 4개의 comb 필터 지연은 지연시간의 간격이 일정하지 않은 숫자들을 이용해 결정하였고, allpass 필터의 이득 및 지연은 변화시켜가면서 최적의 값으로 결정하였다. 잔향기의 평탄한 주파수 특성을 실제공간의 주파수 특성처럼 가져가기 위해서 그림 4와 같이 comb 필터 계환에 저역통과필터를 추가하였다.

$$N = RT/cd \quad (1)$$

$$cg = 10^{-3/N} \quad (2)$$

여기에서, RT 는 잔향시간, N 은 직접음에 비해 -60dB 감쇠하는 동안의 comb루프횟수, cd 는 comb지연, cg 는 comb이득이다.

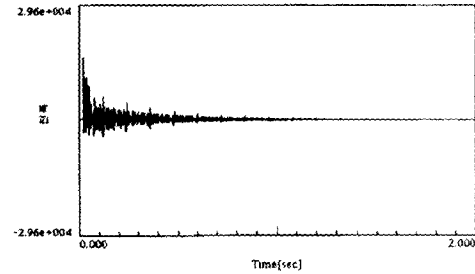


그림 2. 시뮬레이션한 Schroeder 잔향기의 임펄스 응답

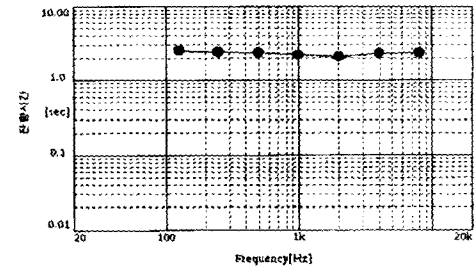


그림 3. 시뮬레이션한 Schroeder 잔향기의 잔향시간에 따른 주파수 특성(잔향시간 2초)

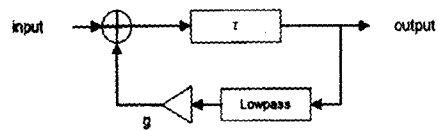


그림 4. comb필터에 저역통과필터를 추가시킨 잔향기의 블록도

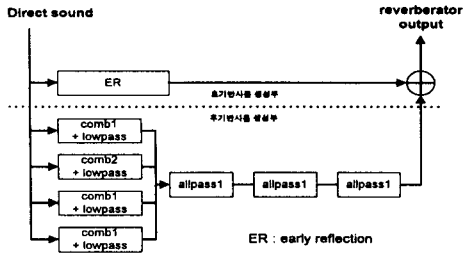


그림 5. 설계된 잔향기의 전체 구성도

2.3 시뮬레이션 결과

Coloration 이 나타나지 않는 자연스러운 잔향을 얻기 위해 comb 필터와 allpass 필터의 최적 파라미터값을 결정하였다. 또한, 잔향의 주파수 특성을 개선하기 위하여 comb 필터 케환부에 저역통과필터를 추가한 결과 잔향기의 주파수 특성이 실제 측정된 잔향의 주파수 특성과 유사하게 나타났다. 그림 6과 그림 7은 잔향시간 1초, 5초에 대한 임펄스 응답의 주파수 특성이다.

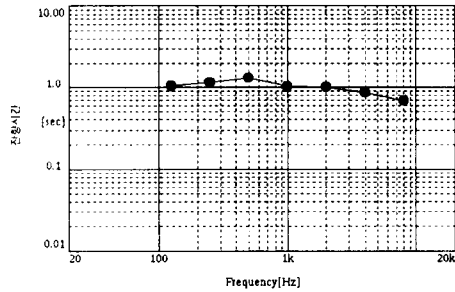


그림 6. 설계된 잔향기의 잔향 시간에 따른 주파수 특성 (잔향시간 1초)

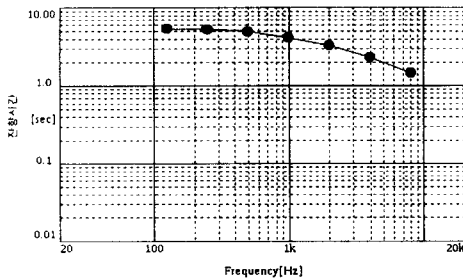


그림 7. 설계된 잔향기의 잔향시간에 따른 주파수 특성 (잔향시간 5초)

III. TMS320C40을 이용한 실시간 잔향기 구현

3.1 실시간 잔향기를 위한 시스템 구성

Matlab에서 시뮬레이션한 잔향기를 실시간으로 구현하기 위해서는 comb 필터 4개, 저역통과 필터 4개, allpass 필터 3개, 그리고 초기 반사음 5개~20개를 22.676 μ s안에 처리해야 한다. 이러한 연산을 데이터 손실 없이 실시간으로 처리하기 위해서는 고속의 연산과 데이터 전송이 가능한 디지털 신호처리 프로세서를 사용하는 것이 효과적이다. 그래서 본 논문에서는 TI사의 범용 DSP칩을 장착한 시스템을 이용하였다. 실험에 사용된 DSP 시스템은 부동소수점 연산용 DSP칩인 TMS320C40을 4개까지 장착할 수 있으며, 각 프로세서 당 사용자의 데이터와 프로그램을 위하여 1Mbytes의 SRAM 블록을 2개씩 장착하고 있다. 아날로그 신호의 입·출력을 위해서는 직렬포트가 있어 ADC/DAC box인 Proport656을 연결하여 사용하였으며, 프로세서간 데이터 전송을 위해서는 20Mbytes/sec의 전송속도를 갖는 COMM-port와 양방향으로 읽고, 쓰기가 가능한 DPRAM을 장착되어 있다.

3.2 실시간 잔향기의 구현

잔향기를 실시간으로 구현하기 위해서는 먼저, 시뮬레이션한 잔향기로부터 데이터 처리단위를 블록단위 처리에서 샘플단위 처리로 바꾸고, 데이터 흐름을 실시간 처리에 알맞게 수정한다. 시뮬레이션에 사용된 잔향기의 구조는 시뮬레이션상의 편의를 위해 128개의 샘플을 하나의 블록으로 묶어 처리했지만, 실시간으로 처리하기 위해서는 입력 데이터를 개별적으로 처리해야만 잔향기를 이루고 있는 각각의 필터를 가능한 적은 시간 안에 처리할 수 있다. 둘째로, 각각의 필터 이득을 실시간 구현에 알맞게 조정한다. 그리고 마지막으로 구현한 프로그램을 최적화하기 위하여 어셈블리어를 사용하여 처리시간을 단축한다.

그림 8은 잔향기를 구성하고 있는 comb 필터의 데이터 흐름을 나타낸 것이다. 전체 구성도에서 보인것과 같이 각각의 comb 필터 입력으로는 직접음이 들어오고 4개의 comb 필터는 독립적으로 동작하여 출력을 allpass 필터로 보낸다. 여기서 각 comb 필터의 buffer크기는 comb 필터 지연 파라미터에 의해 결정된다. Comb 필터는 먼저 포인터가 가리키는 현재의 buffer에서 출력을 allpass 필터로 전송하고, 그 값에 이득(g)을 곱한 후 직접음과 더하여 buffer에 다시 입력한다. 포인터를 한번 shift한 후 위의 과정을 반복하게 된다.^[6] buffer의 크기가 comb 필터 지연에 의해 결정되기

때문에 처음 buffer에 입력된 직접음은 각각의 comb 필터 지연시간 이후에 allpass 필터로 출력된다.

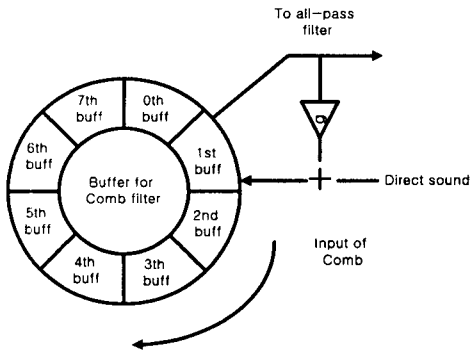


그림 8. 실시간 잔향기 구현을 위한 comb필터의 데이터 흐름도

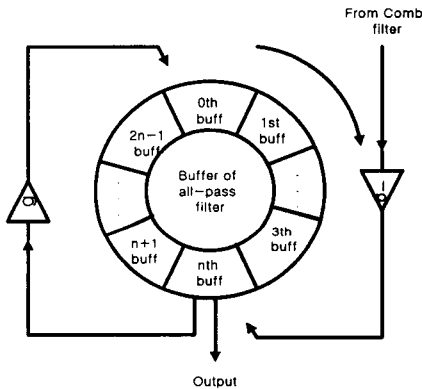


그림 9. 실시간 잔향기 구현을 위한 allpass필터의 데이터 흐름도

그림 9는 allpass 필터의 데이터 흐름을 나타낸 것으로 comb 필터와 마찬가지로 순방향 케환과 역방향 케환이 쌍을 이룬 구조로 되어있다. 이러한 구조는 최소한의 메모리 접근과 shift로서 케환이 있는 필터를 구성할 수 있다^[6].

3.3 잔향기의 실시간 처리결과

앞에서 언급한 방법으로 시뮬레이션한 내용을 실시간으로 처리한 결과, 실시간 잔향기는 4개의 comb 필터, 3개의 allpass 필터, 초기 반사음을 위

한 지연을 사용하여 coloration이 없이 구현이 가능하지만 임펄스 응답이 전체 주파수대에 걸쳐서 평탄하게 나타나므로 저주파 성분에 비해 고주파 성분이 크게 느껴지고, 저역통과 필터를 comb 필터의 케환에 추가하여 처리한 결과는, 시뮬레이션한 결과와 마찬가지로 고주파 성분이 시간에 따라 빠른 감쇠를 보여 자연스러운 잔향을 얻을 수 있었다.

IV. 결론

잔향의 주파수특성이 평탄한 문제를 해결하기 위하여 잔향기를 구성하는 comb 필터의 케환부에 저역통과 필터를 추가한 잔향기를 설계하였고, coloration을 제거하기 위하여 comb 필터와 allpass 필터의 최적 파라미터값을 결정하였다.

한편, 잔향기의 실시간 처리를 위하여 고속 연산이 가능한 TMS320C40을 사용하였고, comb 필터와 allpass 필터의 연산 흐름을 고속 처리에 적합하게 재구성 하였으며, 필터연산 시간을 줄이기 위하여 어셈블러를 사용했다.

구현된 잔향기는 coloration이 없는 자연스러운 잔향 특성을 얻었으며, 잔향시간에 따른 주파수 특성은 실제 공간의 잔향 주파수 특성과 같은 특성의 패턴을 가지고있다. 잔향의 음질을 평가하기 위하여 20대 남자 10명을 대상으로 무향실 환경에 잔향을 부가시켜 청취실험한 결과 전원이 실제공간의 잔향특성과 유사하다는 평가 결과를 보였다.

본 연구를 통해 구현된 실시간 잔향기는 앞으로 3D 음향 재생, 오디오 분야, 통신, 멀티미디어, 가상현실등에도 응용될 수 있다.

<참 고 문 헌>

- [1] M. R. Schroeder, "Natural Sounding Artificial Reverberation," J. Audio Engineering Society, Vol. 10, No. 3, 1962.
- [2] William Grant Gardner, "The Virtual Acoustic Room", Master's Thesis, Dept. of Computer Science and Engineering, MIT, 1992
- [3] 박경수, 최영하, 성평모, "주파수대역별 잔향시간을 고려한 인공잔향의 연구", 한국음향학회 논문집, 15권 1호, 1996.
- [4] N Sakamoto, A Kurahashi, Y Edahiro, S Yamaguchi, and T Kogure, "A Digital Audio Reverberator", ASE 70th Conv. preprint No. 1810 (I-7) Oct. 1981.
- [5] 강성훈, 강경욱, "입체음향", 기전출판사, 1997
- [6] Paul M. Embree, "C Algorithms for real-time DSP", Prentice-Hall, Inc., 1995.