

일반논문-07-12-1-03

# Tapped and nested-allpass delay line을 이용한 잔향특성 개선에 관한 연구

윤재연<sup>a)†</sup>, 박준선<sup>b)</sup>, 진용옥<sup>c)</sup>

## A Study on the improvement of reverberation characteristics using tapped and nested-allpass delay line

Jaeyun Yoon<sup>a)†</sup>, Junsun Park<sup>b)</sup>, and Yongok Jin<sup>c)</sup>

### 요 약

본 논문에서는 기존에 제안된 잔향 알고리즘 구조에서 문제점으로 대두된 잔향특성을 개선한 새로운 알고리즘 구조를 제안하였다. 제안된 알고리즘 구조는 초기 잔향을 위하여 탭 지연라인을 사용하여 초기반사음을 충분히 구현하였고, 후기 반사음과 잔향을 위해 nested allpass delay line을 이용하여 잔향 밀도를 높이도록 제안하였다. 실내음향의 파라미터를 추출하여 각 지연 라인의 지연 시간을 설정 및 조절하여 가장 좋은 잔향 효과를 갖도록 계수 값들을 설정하였으며, 제안한 알고리즘을 일반 범용 신호처리를 이용하여 구현 및 실험 고찰을 통해 기존에 제시된 모델에서의 임펄스성음에 대한 비선형적인 거친 응답과 급격한 음색변화가 감소하여, 고르고 평탄한 잔향 밀도가 향상되어 잔향특성이 개선됨을 관찰하였다.

### Abstract

In this paper, we proposes an idea for improved sound characteristic which decreasing a problem in previous reverberation algorithm structure. To later reflection sound, proposed new reverberation structure, using a tepped and nested all-pass delay line, and it is designed to improve an natural concert hall sound. In addition, In order to have best imaginary sound effect, we extracted the factors by controlling each delay line's delay time, and we realized a proposed new algorithm by using general-purpose DSP. Through several experimental cases, we observed better effect on improvement of linear flatten and reverberation density and decreasing about colorlessness and non-linear sound at previous proposed model about impulse input.

Keyword : Acoustic reverberation, Sound effect

## I. 서 론

최근의 음향 시스템은 가전제품이나 멀티미디어 제작도

구, 그리고 게임산업에 이르기까지 다양한 방면으로의 발전과 지속적인 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구들은 인간이 개선된 양질의 음악을 듣고자 하는 욕구에 의한 것 볼 수 있겠다. 최근에는 입체음향의 발전으로 5.1채널을 이용하는 음량과 음질의 개선을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>[13]</sup>. 하지만 5.1채널은 원음을 녹음할 때 부터 모든 채널이 저장되어야 재생이 가능하다. 그리고 5.1채널의 서라운드 시스템이 인기를 얻고 있긴 하더라도 스피커의 개수와 케이블

a) 통일부 남북경협본부

Ministry of Unification

b) 한국방송위원회

Korean Broadcasting Commission

c) 경희대학교 정보통신대학원

Kyunghee university

† 교신저자 : 윤재연(dicdo@chol.com)

양이 증가하기 때문에 추가적인 비용을 감수해야하고 일반적인 음향기기는 전통적인 2채널 환경이 일반적이다.

본 논문에서는 2채널 환경에서 콘서트홀 같은 공간적 음향과 잔향을 감상하기 위한 좋은 잔향 시스템을 제안하고자 한다.

거실이나 집회장은 조용한 분위기를 연출하기 위하여 벽면과 실내의 적절한 흡음처리에 의해 반사음의 영향을 줄이고 있는 반면에 강당이나 연주 홀에는 실내의 모든 청중이 가급적 동일한 크기의 소리를 듣도록 효과적인 반사처리를 하고 있다.

실내의 음향특성은 일상적인 생활공간에서는 물론이지만 홀, 극장, 강당, 오페라 하우스 등 음악활동을 대상으로 하는 특수 시설인 경우에는 매우 큰 비중을 차지하게 된다.

실내의 음향특성에서 중요한 것으로는 음파의 제반 물리적인 현상은 물론 건축자재의 흡음 및 차음특성, 실내의 기하학적 구조, 음원의 음압발생 특성 등이 있다<sup>[12]</sup>.

최근 디지털 기술의 발달에 따라 디지털 오디오 신호처리기술에서는 음향에 대한 청취자의 다양성과 좋은 음향특성을 가진 콘서트홀과 같은 공간성을 부여하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다<sup>[2,3,11]</sup>. 작은 공간에서의 음은 발생과 동시에 소멸이 되어 버리지만 커다란 콘서트홀에서는 좀 더 오랫동안 발생된 음의 잔향이 유지되며, 아름다운 하모닉을 생성한다.

디지털 잔향기의 구조는 초기 슈로더에 의해 제시<sup>[2]</sup>되었으며, 그 기본적인 구조는 빗형 필터와 직렬 연결한 전역통과 필터로 구성되었으나 이러한 구조는 음색변화 특성<sup>[2]</sup>이 나타나며 임펄스성 음(드럼 같은 비트있는 음)에 대해서는 음이 불규칙하고 기복이 심한 감쇄특성이 관찰되었다. 모어러는 이러한 슈로더의 기본 구조에 빗형필터 부분에 Loop Feedback으로서 저역필터를 추가하여 에코의 밀도를 높이고 공기 흡수에 대한 주파수 특성을 고려하였고, 음악홀의 초기 측면반사응답을 탭 지연 라인<sup>[7]</sup>을 제안하였다. 모어러의 구조는 기존 구조에 비해 더 나은 특성을 보였으나, 임펄스성 음에 대해선 거친 응답은 여전히 관찰되었다. 또한 긴 음향잔향시간이 필요한 큰 콘서트홀의 구현에서는 피드백의 증가로 인하여 급속성 잡음을 수반하였다. 이 후 가드너는 이러한 문제를 개선하

기위해 직렬연결된 전역통과필터 내부에 또 다른 전역통과필터를 존치시키는 구조를 제안<sup>[8]</sup>하였다. 지금까지의 가상 음향공간의 구현에서는 현재 두 가지 주요 결점을 가지고 있다<sup>[14,15]</sup>.

- 진폭 주파수 응답(감쇄특성)이 평탄하지 않았다. 사실이 응답은 평탄하지 않아 불쾌한 음을 생성을 하였다. 특히 비트가 강한 음에서 심하다.
- 에코 밀도(예 : single 펄스 인가시 잔향기의 출력에 있어서 초당 에코의 수)가 실제 음악홀의 잔향 밀도에 비해 너무 작게 구현되었다.

따라서 본 논문에서는 잔향특성을 개선하기 위한 새로운 잔향기 구조를 제시하고 주파수 특성과 음색 변화 특성을 평가하기 위하여, 임펄스 응답을 이용하였으며, 잔향기의 실시간 동작을 무향실 음원을 이용하여 청취 실험하였다.

## II. 음향의 일반적인 특성

### 1. 실내 음향의 구조

음압이 거리 r에 반비례하여 변화하는 환경을 자유공간이라 부른다. 음원을 충분히 작다고 가정하여 하나의 점으로 보고, 이 음원이 반사체에서 떨어져 있다고 가정하면, 이때 음파는 음원으로부터 흘러나와 반대 방향으로 발산하

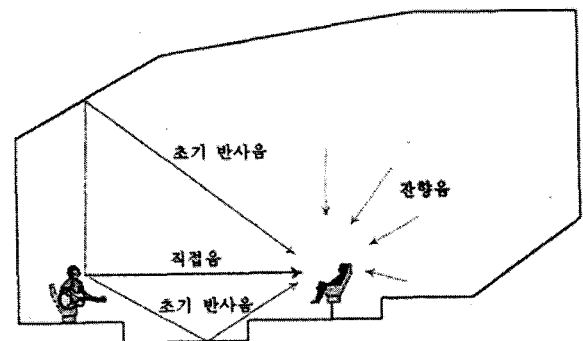


그림 1. 홀에서의 음의 경로  
Fig. 1. Sound path at the hall

게 된다. 보통 실내에서는 이 자유공간의 조건이 성립되지 않으며, 이를 위해서는 음의 반사가 일어나지 않는 무향실을 따로 꾸며야 한다<sup>[12]</sup>.

직접 음은 그림 2에서  $t_0$  음파에 해당되며, 보통 0.002초에서 0.2초(20~200ms)안에 청취자에게 도달된다. 잠시 후 같은 음이 벽이나 천장 등의 표면에 반사되어 청취자에게 도달하는데 이를 즉반음이라 하며, 직접음 이후에 보통 50~100ms 정도 도달한다. 그림 2에서처럼 이러한 반사음들은 다양한 시간  $t_1, t_2, \dots$ 로 지연되어 청취자에게 도달하게 된다. 직접음을 포함한  $t_0, t_1, t_2 \dots$  들을 초기 잔향이라 부른다. 이 후에 들리는 반사음을 후기 잔향음이라고 한다. 이 후기 잔향음은 직접음과 비례하게 ~100ms 정도 시작된다. 이 후기 잔향음은 음의 확산에 해당하며 지수적으로 감쇄한다<sup>[12]</sup>

잔향의 증가와 감쇄는 그림 2에 나타내었다.

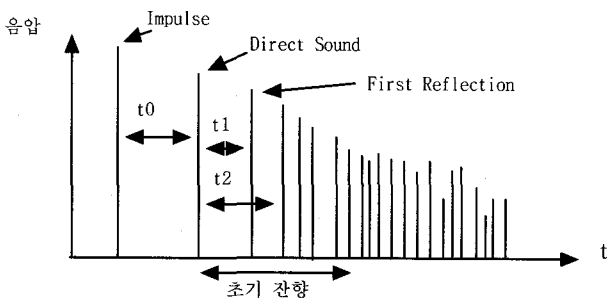


그림 2. 임펄스 음에 대한 직접 음과 반사음의 진폭응답 파형  
Fig. 2. Direct and reflection sound response wave about impulse sound

## 2. 잔향

### 2.1 잔향 시간(RT: Reverberation Time)

실내 음향 특성을 나타내는 물리량으로서는 잔향 시간은 가장 기본적인 양으로 잔향시간의 산출은 샤빈(Sabin)에 의해 정의가 되었다.

샤빈의 잔향시간을 산출하는 기본식<sup>[1]</sup>은 다음과 같다.

$$RT60 = K * Volume / Area$$

여기서 K는 온도에 연관된 비례상수로서 그림 3에 나

타내었다.

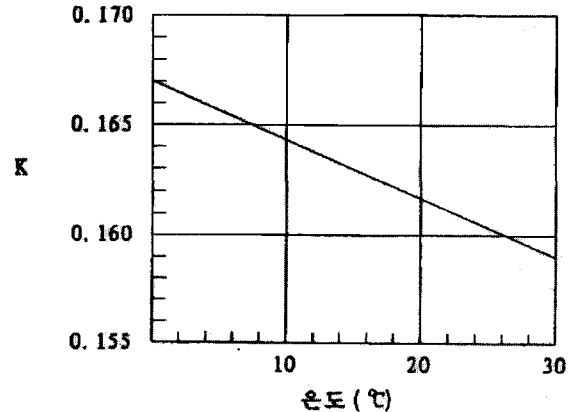


그림 3. 온도와 비례상수 K의 관계그래프  
Fig. 3. Relation graph of temperature and ratio constant K

S를 실내의 표면적이라 하고 평균 흡음률은  $\alpha$ 라 하면 흡입력(absorption power) A는 다음과 같다.

$$A = S \times \alpha \quad (m^2) \quad (1)$$

단음을 발생 후 음압이 60dB 떨어지기까지의 시간을 잔향 시간이라 정의하였다(이를 RT 혹은 RT60 이라 한다)<sup>[1]</sup>.

### 1.2 초기 지연 시간

IDT(Initial Delay Time :  $\Delta t$ )는 홀의 친밀감을 나타내는 물리량으로서 Beranek에 의해 처음 제안<sup>[10]</sup>되었으며, 식 (2)로 정의된다.

$$\Delta t = \frac{d_1 - d_0}{C} \quad (2)$$

여기서  $d_1$ 는 1차 반사음의 경로,  $d_0$ 는 음원과 청취자와의 거리이며, C는 음속이다. Beranek는 20ms 이하의 초기 반사음이 친밀감을 준다고 주장하고 있다. 이러한 초기 반사음의 최적 지연시간은 음원에 따라 다르며, 음원의 자기 상관함수로 구할 수 있다. 무향실내(15×16)에서 직접음에 대해 단일 반사음의 지연시간을 6~250ms 변화시키면서 청감 테스트한 결과 청감이 최대가 되는 지연시간은 음악에 따

라 다르며, 단일 반사음의 경우 음성은 최적지연시간이 약 12ms 템포가 빠른 음악은 약 30ms 템포가 느린 음악은 약 130ms와 같이 범위가 넓다. 이러한 실험으로 각각의 음악 장르에 따라 초기 지연시간을 조절해야 함을 알 수 있다. 그래서 음악 홀을 구현하는데 있어서 신호처리 기법을 이용하여 초기 측면반사음을 적절히 증가 시킬 필요가 있으며, 이러한 잔향들은 신호처리 기법을 이용하여 특성 재현이 가능하다<sup>[12]</sup>.

### 1.3 공간적 파라미터

공간적 파라미터는 음장의 확산감(또는 공간감)과 관계되는 것으로 실내음향의 주관평가에 있어서 중요한 파라미터이다. 옆 방향에서 도래하는 초기 측면반사음은 청감상 공간 인상(Spatial impression)에 영향을 주는 성질이 있으며, 음향적으로 중요한 파라미터이다. 측방 반사음(Lateral Efficiency)는 0ms부터 80ms까지의 에너지와 25~80ms 사이의 도래하는 측방반사음(Lateral Reflection) 에너지와의 비로 정의된다<sup>[12]</sup>.

## 3. 잔향생성기의 일반적 구조

### 3.1 파이프지연선로 잔향기

지름 1인치 또는 그 이상 그리고 길이가 9~30 미터인 파이프를 가지고 잔향발생기를 말할 수 있다. 이 시스템은 지연시간을 얻기 위해 지름이 수십 미터인 파이프를 사용하여 8미터 간격으로 마이크로폰을 놓는 형태를 취하였다. 스피커 유닛을 사용하여 소리를 파이프 한쪽 끝으로 유입시킨후, 15미터의 위치에서 지연은 1/20초가 되고 30미터에선 1/10초가 된다. 이 잔향기의 단점은 파이프라인이 길고, 다수의 마이크와 증폭기가 신호 수신에 필요하다. 지연시간이 짧기 때문에 마이크로폰에 잡힌 신호는 다시 음원 방향으로 피드백 시켜야하며 이로 인해 다중화된 반향음이 만들어진다. 15미터 파이프의 경우 5KHz에서의 손실은 23dB이고 30미터의 경우에는 45dB에 이른다. 이러한 이유 때문에 이 시스템은 더 이상 쓰이지 않는다. 이 시스템 구조를 그림 4에 보인다.

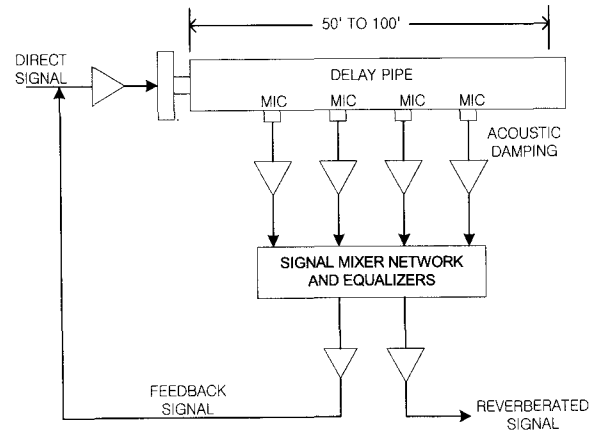


그림 4. 파이프지연선로를 이용한 기구적 잔향 시스템  
Fig. 4. Physical reverberation using the pipe delay line

### 3.2 코일 스프링(coil spring)을 이용한 잔향발생기

코일 스프링을 이용한 잔향 생성 유니트는 보통 전기기타에 많이 쓰이며, 코일 스프링에 인가된 음의 스프링 진동에 의해 잔향을 생성한다. 이 잔향기는 기계적인 요소가 포함된 것으로서 30cm 길이의 스프링에 의한 음이 진동으로 잔향을 생성하며, 길이가 짧은 스프링은 금속성음을 발생시키며, 외부의 충격에 심한 왜곡 현상을 보인다.

### 3.3 BBD IC를 이용한 에코 발생기

에코의 가장 뚜렷한 물리적인 현상은 산 정상에서 “야호”를 외쳤을 때 수초 후 접하게 되는 입체적 반향음인 산 울림에서 찾을 수 있다. 가요반주기에 사용되는 종래의 에코 발생기는 원 신호에 원 신호를 일정한 시간만큼 BBD IC를 이용 지연시켜 원 신호에 더하는 구조로 되어 있다. 그림 5에 이의 구조를 보인다.

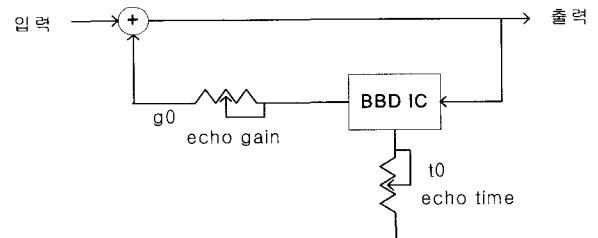


그림 5. BBD IC를 이용한 에코 발생기 구조  
Fig. 5. Echo gen structure using the BBD IC

이 구조는 모노의 입력을 받아 모노의 출력 응답을 생성한다.

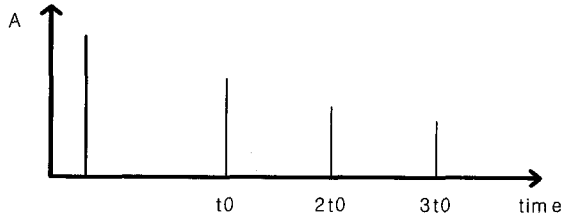


그림 6. 임펄스 응답 출력 파형  
Fig. 6. Impulse response of BBD IC

그림 6은 에코 이득 조정계수가  $g_0=1/2$  일 때의 출력파형을 나타내며 여기서 이득  $g_0$  와 시간  $t_0$ 을 조작하여 에코 지속 시간을 결정한다.

위의 구성은 단순히 원 신호를 피드백 시켜 원 신호에 합성한 단순한 아날로그 모노 에코 패턴만 생성하며, BBD IC를 사용하므로 메모리의 한계로 에코 시간이 짧다. 이 회로는 아날로그적인 구성으로 여러가지 효과 패턴을 구성 시 시스템 구성이 방대하며, 회로적인 잡음과 외부 잡음에 취약한 단점이 있다.

### III. 잔향 구현을 위한 알고리즘

디지털 오디오신호처리 기법을 이용한 잔향시스템 구현은 음악홀의 반사음들을 생성하기 위해 디지털 필터를 개선에 하는데 연구가 집중되었으며<sup>[9,10,11]</sup>, 실내 음악 홀과 디지털 필터 동작으로 구현한 반사음이 유사하다는 것에 착안하여 슈로더는 처음으로 디지털 잔향 시스템 구조를 제안하였다. 슈로더는 잔향의 구성이 초기 잔향과 후기 잔향으로 구성된다고 보았으며, 초기 잔향을 구현하기 위한 빗형 필터와 후기 잔향을 위한 전역통과필터를 직렬 연결한 구조를 제안하였다. 슈로더가 제안한 빗형 필터 구조를 그림 7과 같이 보인다.

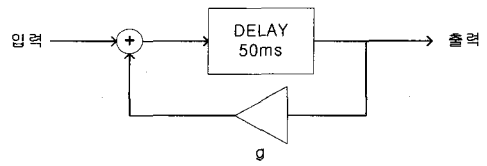


그림 7. 빗형 필터  
Fig. 7. comb filter

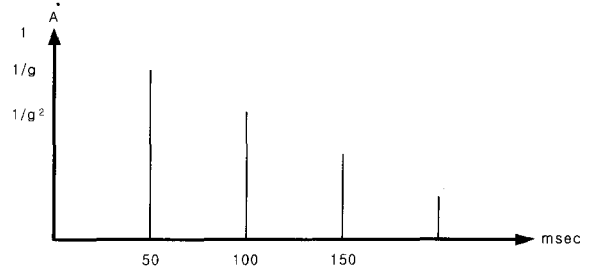


그림 8. 빗형 필터의 임펄스 응답  
Fig. 8. Impulse response of comb filter

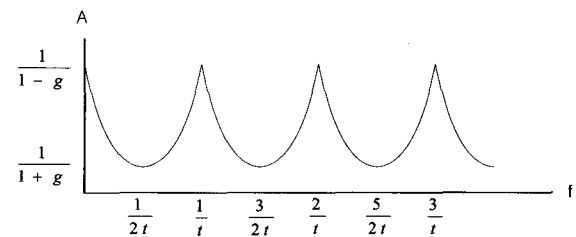


그림 9. 빗형 필터의 진폭응답  
Fig. 9. Amplitude response of comb filter

이 빗형 필터의 시간 영역에서의 임펄스 응답은 지수함수적으로 감쇄하는 펄스열로 두 벽면 사이의 반사음과 뒷벽면에서의 반향의 평면파를 구현 할 수 있었다<sup>[10]</sup>. 이 빗형 필터의 주파수 응답은 각 pole의 위치에서 최대이며 pole들의 사이에서는 최소로 나타난다. 후기잔향용 전역통과 필터는 빗형 필터에 feed-forward path가 있는 구조로 구성<sup>[11]</sup>되어 있다.

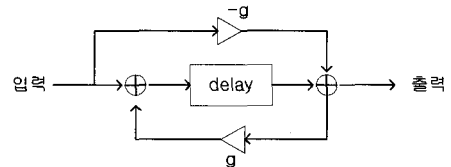


그림 10. 전역통과필터  
Fig. 10. all-pass filter

이 전역통과 필터는 주파수 영역에서 zero pole의 작용에 의해 사라지므로 평탄한 주파수 응답을 갖는다.

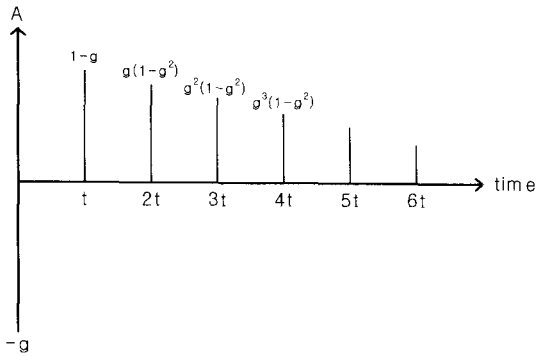


그림 11. 전역통과 필터의 임펄스 응답  
Fig. 11. Impulse response of all-pass filter

슈로더 잔향시스템<sup>[2,3,4,5,6]</sup>은 4개의 빗형 필터와 2개의 직렬연결된 전역통과 필터로 구성되어 있다. 구성은 그림 12에 보인다. 여기서 빗형 필터의 이득은 콘서트홀의 잔향 시간에 따라 결정이 된다.

이러한 병렬로 접속한 빗형 필터의 기본적인 구조는 시간영역에서 홀의 벽면 사이에서 발생하는 잔향들을 구현하기 위함이며, 빗형 필터에 의해 생성되는 진폭 특성에 의해 콘서트홀을 적절히 구현 할 수 있다.

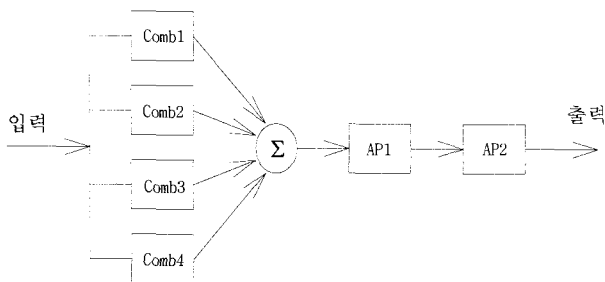


그림 12. 슈로더의 디지털 잔향기  
Fig. 12. Schroeder digital reverberator

이러한 병렬 접속된 빗형 필터들은 실질적으로 반사음이 확산하면서 생성되는 후기 잔향특성 구현이 부족하였다. 이 필터들은 일정한 비율로 반사음 패턴들을 갖고 있었으나 다양한 음향공간을 구현하기에는 한계가 있었다.

표 1. Medium-sized 콘서트홀을 위한 파라미터  
Table 1. Parameter for Medium-sized concert hall

Parameter	comb1	comb2	comb3	comb4	AP1	AP2
Delay (ms)	29.7	37.1	41.1	43.7	5	1.7

여기서 반사음의 밀도를 증가시키고 후기잔향을 구현 하기 위해 빗형 필터의 출력을 직렬로 연결한 전역통과 필터에 다시 인가 하였다.

모어러는 슈로더의 기본 구조의 빗형 필터의 loop feedback에 저역통과필터를 추가하여 잔향의 밀도를 높이고 공기 흡수에 대한 주파수 응답 특성을 구현 하였고, 음악홀에서의 초기 반사음을 구현하기 위하여 탭지연라인 사용을 제안<sup>[7]</sup>하였다.

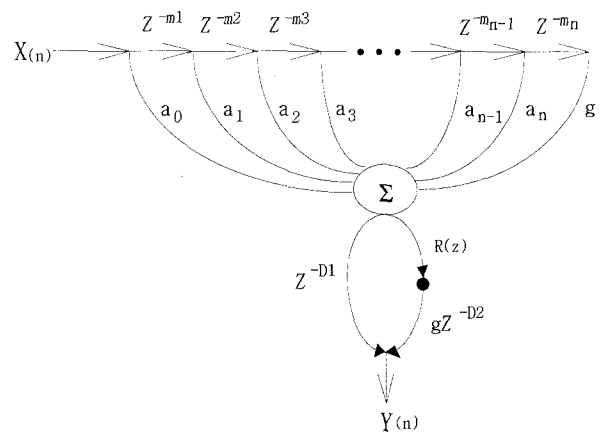


그림 13. 모어러의 6 FIR과 1전역통과필터 잔향기  
Fig. 13. 6-FIR filter, 1-allpass filter reverberator by James.A. Moorer

모어러의 구조는 슈로더보다 더 나은 감쇄특성이 구현됨을 관찰되었다. 그러나 임펄스성 음원에 대해선 거친 응답을 보인 것은 동일하였다. 긴 잔향시간을 갖는 큰 홀을 구현 시에는 피드백의 증가로 위상의 비선형적인 왜곡<sup>[15]</sup>이 존재하였다.

모어러의 잔향기 구조는 잔향밀도와 좀더 부드러운 감쇄 특성에 효과적이었으나 임펄스 음에 대한 평탄하지 못한 응답특성을 생성하는 단점은 동일하였다.

가드너는 이러한 단점을 보완하기 위해 화이트 노이즈가

랜덤한 위상차를 가지지만 평탄한 진폭응답특성을 가지는 것에 착안하여 직렬 연결한 전역통과필터 안에 샘플지연시간이 다른 전역통과필터를 삽입하는 구조를 제안하였다. 가드너가 제안한 등지형 전역통과 필터를 직렬 연결한 잔향기의 구조를 그림14와 같이 보인다.

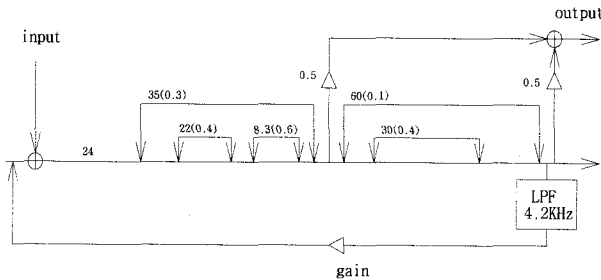


그림 14. 가드너의 잔향기 구조  
Fig. 14. Reverberator by Gardner

가드너의 잔향기 구조는 후기 확산 잔향을 많이 수반하는 음악홀을 구현하는데 잔향 특성이 우수하게 관찰되었으나 긴 잔향 시간을 갖고 초기 반사음이 많은 대형홀에 대한 구현에서는 적합하지 않는 것으로 관찰되었다. 또한 샘플정보를 저장하기 위한 많은 수의 메모리가 필요하며, 작은 홀에서 큰 홀로 전환 시 알고리즘의 구조와 출력 노드를 변경이 어려운 구조상의 어려움이 있다 [15].

초기 반사음이 많이 요구되는 큰 연주홀과 스타디움 등의 구현에서는 가드너의 구조는 초기 반사음의 부족으로 구현에 어려움이 많았으나, 후기 잔향을 구현하기에는 적합한 것으로 관찰 되었다.

지금까지의 디지털 잔향기의 구조는 현재 두 가지 주요 결점[15]을 가지고 있음이 연구되었다.

- 진폭 주파수 응답(감쇄특성)이 평탄하지 않았다. 사실이 응답은 평탄하지 않아 불쾌한 음을 생성을 하였다. 특히 비트가 강한 음에서 심하다.
- 에코 밀도(예 : single 펄스 인가시 잔향기의 출력에 있어서 초당 에코의 수)가 실제 음악홀의 잔향 밀도에 비해 너무 작게 구현되었다.

#### IV. 제안된 잔향기 구조

슈로더의 잔향기 구조로부터 현재까지 제안된 잔향기 구조들을 모두 구현을 하여 관찰하여 보았으나, 음악홀의 실질적인 현장에서 경험하는 다양한 잔향 감쇄특성을 구현할 수 있는 잔향기는 질적·양적으로 부족한 상태임이 관찰되었다.

지금까지의 각 실내 음향의 파라미터 추출에 대한 연구는 종래에 비하여 처리 정보량이 늘어나 실내의 물리적인 특징[12]인 잔향시간, IACC, 잔향의 주파수 특성들을 구현할 수 있는 다음과 같은 잔향기의 구조를 제안한다.

##### 1. 제안 알고리즘 구조

현재까지의 제안된 구조에서 가드너의 구조는 초기잔향을 구현하기에는 적절하지 못하나 후기잔향 모델에는 가장 우수함을 관찰할 수 있었다. 이러한 단점을 보완하고 두가지 구조의 장점을 살려 가드너의 모델에 초기 반사음 구현을 보완할 수 있도록 탭지연라인을 추가하는 복합구조를 그림15와 같이 제안하였으며, 각 실내의 음향의 파라미터 추출을 통하여 지연시간과 계수 값을 구하였다.

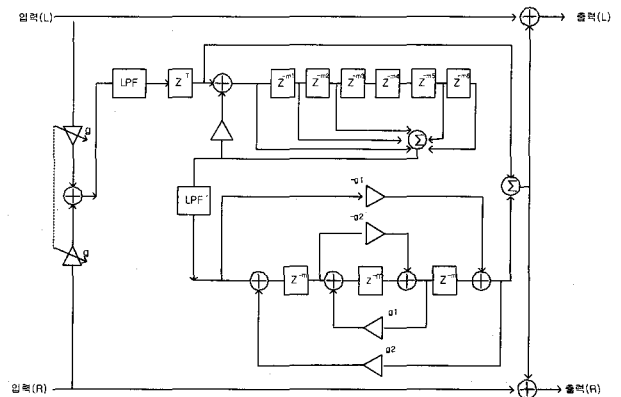


그림 15. 제안된 알고리즘 구조  
Fig. 15. Proposed new reverberator

본 구조에서 저역통과필터의 역할은 물리현상에서 공기, 습도, 반사체의 흡입과 반사에 의한 감쇄 특성을

구현하기 위함이며, 반사체의 특성에 따라 반향음의 대역폭이 감소함을 2pole IIR 필터로 설계하였다. 반사체의 흡수 계수가 크면 IIR의 stop band 주파수는 낮아진다. 반면 반사체의 거리가 가까우며, 흡수계수가 적다면, 이 IIR 필터의 stop band의 주파수는 높아지게 설계하였다 (최대 15KHz).

초기 반사음의 구현은 긴 잔향 특성을 살리기 위해서 모어러가 제안한 FIR 필터 구조 갖는 7개의 탭샘플지연라인을 구성하였다.

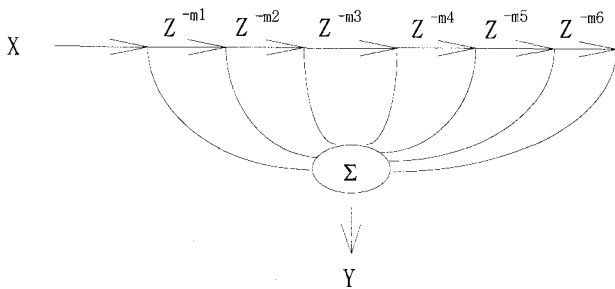


그림 16. Sample Delay Line을 이용한 FIR의 구조  
Fig. 16. FIR filter using sample delay line

그러나 모어러 구조의 후단에 적용한 피드백과 직렬 연결된 전역통과필터는 제거를 하여 단순화 시켰다.

후기 잔향은 잔향의 시간은 짧으나 높은 잔향 밀도의 요구로 이러한 잔향 밀도를 높이기 위해서 가드너의 등지형 전역통과필터로 구성하였다.

본 논문에서는 실제 실내에서와 같이 에코의 지수 함수

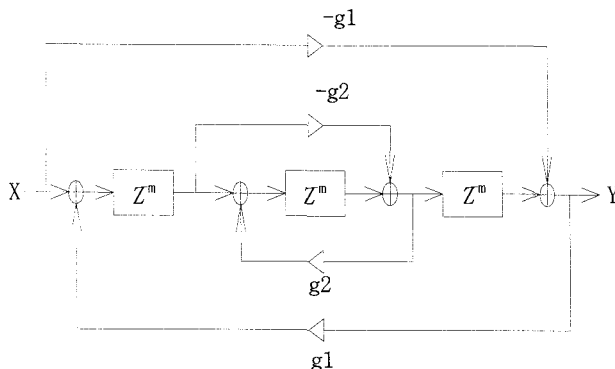


그림 17. 등지형 전역통과필터 지연 라인의 구조  
Fig. 17. Modified nested allpass filter delay line

적 감쇄 특성을 이어지도록 하는 방법을 선택하였다. 이러한 해결책은 전역통과 필터를 다른 전역통과필터의 지연 요소에 안에 구성 하는 것으로 그림 17에 보인다.

빗형 필터를 등지형으로 또는 직렬하는 구조도 가능할지 모르나, 시스템응답은 주파수 공명현상을 보이며 안정도가 문제가 된다. 그러나 이 시스템은 전역통과필터이기 때문에 가능하다.

### V. 각 모델에 대한 실험

#### 1. 잔향 시스템의 구성

위에서 언급한 잔향 알고리즘의 구현을 위하여 아래와 같은 실험시스템을 제작하여 알고리즘을 구현하여 비교 평가를 통하여 검증을 실시하였다.

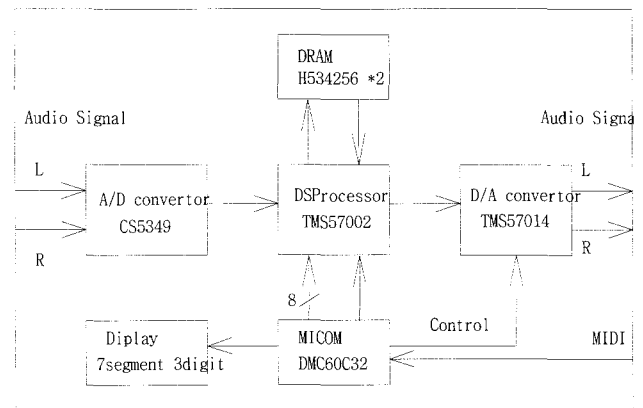


그림 18. 실험 시스템의 블록 다이어그램  
Fig. 18. Block diagram of test system

디지털 신호처리용 프로세서는 TI사의 TMS57002 Fixed Point 24×32 Bit = 57Bit MAC와 32+32=32Bit 덧셈기가 있어 Overhead를 보유한 DSP이며, 500Tap이상의 FIR 필터를 구현이 가능하다. 또한 4개의 데이터 버스를 갖춘 하바드 구조로 2개의 명령을 동시에 병렬로 수행이 가능하다.



표 2. DSP TMS57002의 주요 사양  
Table 2. Function of TMS57002 DSP

목 록	내 용
Instruction cycle timing	80ns
Program memory	256×24 Bit SRAM
coefficient memory	256×32 Bit SRAM
Data memory	256×24 Bit SRAM 32×24 Bit SRAM
external memory interface	2M DRAM
I/O Port	동기식 직렬 Input * 2 동기식 직렬 Output *2
Host interface	8Bit

A/D, D/A 또는 기타 주변 회로는 데이터 전송을 위한 일반적인 직렬전송이 I<sup>2</sup>S의 형태로 전송이 가능한 2쌍의 I/O 포트를 갖추고 있는 제품을 사용하였다. 호스트 인터페이스를 위한 병렬 8BIT 포트는 DSP가 실행 중에도 계수 값을 Download 가능하여 각 필터의 파라미터를 변경 할 수 있어 여러 가지로 변수를 증가하여 실험을 하였다.

## 2. 알고리즘의 구현

### 2.1 초기 측방 반향음(Lateral Reflection) 구현

초기 긴 잔향시간을 모델링을 하기위해 FIR 필터 구조를 택했으며, 탭수는 7탭으로 하였다. 메모리에 저장된 한 샘플씩 저장장치인 DRAM에 저장이 되며, 각 지연시간후의 음의 추출을 지연시간만큼 샘플수를 계산하여 DRAM의 저장위치를 계산하여 샘플을 추출하여 모두 더하여 합산하는 구조로 구현하였다.

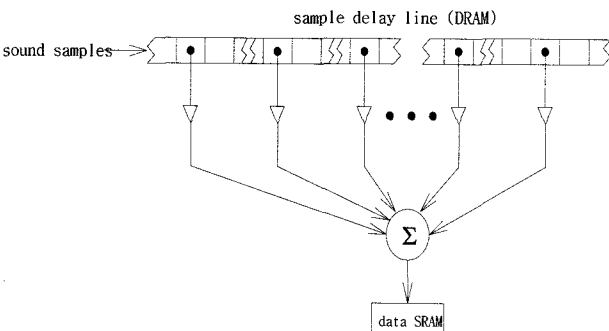


그림 19. 샘플 딜레이 라인을 이용한 Tap FIR 필터의 구현  
Fig. 19. Implement of FIR filter using sample delay line

그리고 모두 합산한 값은 다음 신호로 전달하기위해 다시 DRAM에 저장하여 DRAM의 어드레스를 참조하는 방식으로 구현 하였다.

### 2.2 등지형 전역통과필터를 이용한 후기반사음의 구현

등지형 전역통과필터는 그림 20에 보인바와 같이 샘플 지연라인에 연산자를 붙임으로써 쉽게 구현된다.

아래의 다이어그램에서 -g를 통과한 feed forward MAC(multiply accumulator)은 피드백 연산 이전에 연산이 이루어진다. 연산이 완료된 후에 지연 라인에 있는 샘플들은 오른쪽으로 한 위치씩 옮겨지고 처리는 계속 이루어지는 구조이다. 그러므로 좌측에서 들어오는 샘플들은 전역 통과 필터 처리되고 우측으로 출력이 된다.

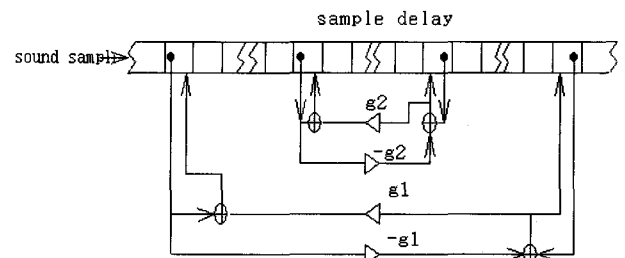


그림 20. 샘플지연라인을 이용한 등지형 전역통과 필터의 수행  
Fig. 20. Implement nested allpass filter using sample delay line

실제로 구현함에 있어서 메모리의 샘플데이터는 움직이지 않고 대신에 메모리 포인터(어드레스)의 조작으로 똑같은 효과를 내게 된다.

등지형 전역통과 필터는 전역통과 필터의 샘플 지연라인 안에 전역통과 필터 연산자를 삽입하여 그림 20과 같이 구성을 한다.

## VI. 실험 및 고찰

앞에서 기술한 본 알고리즘의 성능평가를 수행하기 위해 다음과 같이 실험 시스템을 구성하였다.

현재까지 잔향시스템을 평가를 하는 주요 척도는 체적에 대한 잔향시간을 측정하는 것과 진폭응답특성과 주파수 응

답특성을 비교하는 것이다. 또 입력 신호의 특성에 따라 잔향이 어떻게 달라지는 알아보는 것이다. 이를 통해 잔향이 “자연스럽다(부드럽다)”라는 평가는 청취자의 주관적인 판단에 의해 내려지는 평가이므로, 잔향평가는 사람이 직접 청취하는 청음평가 과정을 반드시 포함해야 한다.

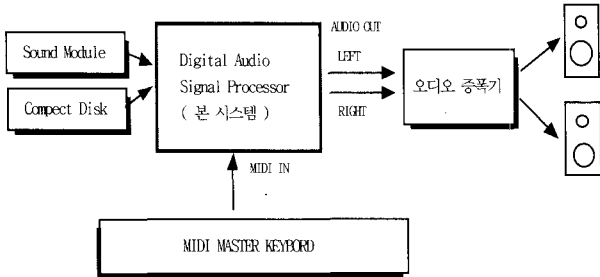


그림 21. 실험 시스템의 연결도  
Fig. 21. Testing system diagram

본 논문에서 제안한 모델을 구현하기 위하여 7탭의 FIR 구조를 사용하고 이의 각 계수 값은 표 3을 적용하였다.

표 3. 초기잔향 지연시간과 이득값  
Table 3. coefficient for first reflection delay time

탭 수	지연 시간(ms)	계수(g)
0	19.9	0.818
1	35.4	0.635
2	38.9	0.719
3	41.4	0.267
4	69.9	0.242
5	74.1	0.181
6	79.7	0.167

반사음을 모델링하기 위해 FIR 구조 전에 IIR LPF를 적용하였으며, 여기에 적용한 LPF의 주파수 한계치를 표 4와 같이 적용하였다.

표 4. 각 홀에서의 잔향시간과 적용한 LPF의 주파수  
Table 4. LPF frequency and RT for Hall model

구분	LPF	RT(s)
Small Room	4.2KHz 이하	0.57
Medium Room	3.5KHz 이하	1.29
Large Room	2.6KHz 이하	1.5

### 1. 임펄스를 이용한 잔향특성분석

먼저 임펄스 응답을 구하기 위해 본 시스템의 입력에 Tektronix FG5010 Programmable function generator의 500Hz의 임펄스성 구형파 출력에 인가하여 각각의 잔향기 알고리즘을 구현한 본 시스템의 출력을 저장하여 분석하였다.

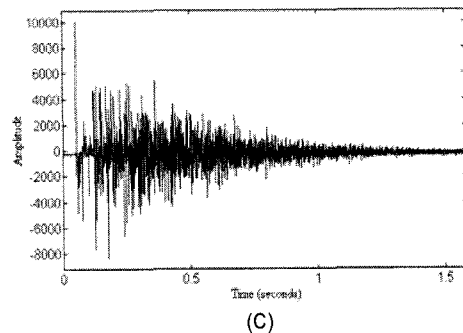
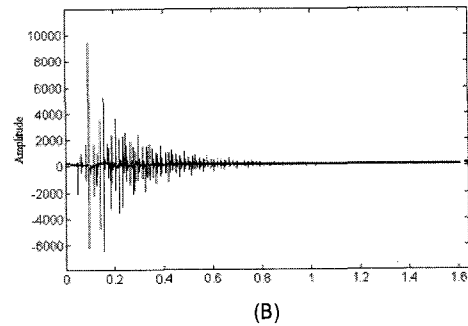
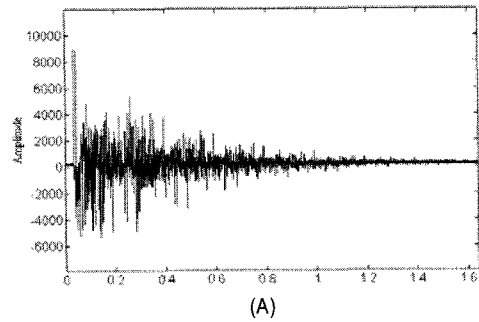


그림 22. 임펄스 잔향 응답 파형 비교  
Fig. 22. Compare impulse response wave

슈로더의 빗형 지연 라인은 초기 반향을 잘 표현됨을 그림 22-(A)과 같이 좋은 응답을 보임을 관찰하였다. 그러나

4개의 빗형 지연 라인에서 피드백 음에 의하여 비선형적으로 음이 생성됨을 관찰되었다.

그림 22-(B) 가드너의 전역통과 지연 모델은 작은 지연 라인으로 충분히 표현이 가능하여 메모리 사용이 효율적임을 구현상 알 수 있었으며, 빗형 지연 구조에서 보였던 비선형적인 응답은 없으며, 전체적으로 선형적인 응답을 관찰할 수 있었다. 그러나 짧은 지연 라인으로 인하여 잔향시간이 전체적으로 짧았으며, 각 지연 라인을 길게 위해 샘플 딜레이를 많이 주었을 때는 반향음이 너무 뚜렷해져 효과가 반감됨이 관찰되었다. 또한 슈로더 구조에 비하여 초기 반사음이 너무 부족함이 관찰되었다. 그러나 관악기와 같은 섬세함 음색이 요구되는 플루트, 바이올린 같은 악기에는 부드러운 잔향음 생성이 관찰되었다.

2. 청음 평가 실험

음향에 대한 평가는 최적이라는 학문적으로 검증된 기준치와 표준화가 어려운 분야이며, 각 청중의 취향에 따라 느낌과 기준이 다르다. 이러한 이유로 청취실에서 청취자에 의해 비교 평가 실시하는 실험 방법이 일반화된 방법 이외에 따라 평가하였다. 이러한 평가는 오차를 줄이기 위해서 많은 수의 청취자를 대상으로 여러번 반복하여 비교조사를 하는 것이 요구된다. 이는 시, 공간과 노력 측면에서 비효율적이다. 이를 위해서는 음향실을 꾸며 놓고 피아노 선생님 10명을 대상으로 각 알고리즘에 대한 음원을 들려주고 원음과 잔향음을 비교하면서 들려주고 잔향의 자연스러움을 1점에서 5점으로 매겼다. 아주 자연스러운 잔향은 5점, 금속성음이 생성되거나 에코가 느껴지거나, 직접음과 반사음의 위상간섭에 의해 음색이 변화되는 음색변화현상 등 거북한 음을 느껴지면 1점, 소리가 정확하게 명료하게 들리면 5점을 부여하도록 하였다.

청취자를 피아노 선생님을 선정한 것은 일반인 보다 음에 대한 청취감각이 뛰어나며 음의 구분이 뛰어나기 때문이다.

청취자를 통한 비교평가를 위해선 샘플링 레이트는 44.1KHz로 취하여 현재 가장 일반적인 CD/DVD 음질 수준으로 가청주파수인 22.05KHz까지 자연스런 음이 재현

이 가능하도록 배려하였으며, 다양한 콘서트홀을 실현하기 위해 가장 일반적이고 음질이 충실한 CD에 수록되어 있는 음원을 사용하였다. CD 음원을 사용함으로써 다음과 같은 장점이 있었다.

- 직접 음원을 채취할 경우 음원과 마이크로폰 사이, 마이크로폰과 A/D 컨버터 전송로간의 노이즈를 간과할 수 없다. 그러나 CD/DVD 디스크는 최상의 조건을 갖춘 무음향실에서 또 최단거리 전송로의 조건하에서 음원을 채취한 것이므로 상대적으로 노이즈에 강하다고 할 수 있다.
- 실험과정에서 소요되는 비용과 음원 채취과정에서 걸리는 시간을 크게 단축을 할 수 있다.

청취 평가에 사용된 음원은 한국음향연구소에서 만든 표준화된 음원 청취 측정용 CD음원<sup>[6]</sup>을 사용하였다.

청음평가는 ITU-R의 기준에 따라 청음평가용 음원은 무향실에서 녹음된 플루트(A)와 드럼(B) 그리고 동요(C)를 사용하였으며, 청취 순서는 1(슈로더 모델), 2(모어러 모델), 3(가드너 모델), 4(제한된 모델)를 정하여 2초 간격으로 청취하도록 하였다.

표 5. 청취 평가 비교  
Table 5. Compare listening evaluation

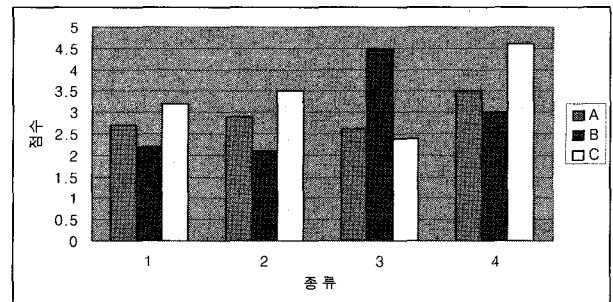


표 5의 실험결과로부터 불연속적인 원음 B에 대해 잔향 모델 1, 2 번은 잔향의 자연스러움(부드러움)에 대한 점수가 3, 4번에 비교하여 현저히 낮음을 알 수 있다.

이로부터 B와 같은 시간상에서 끊어져서 들리는 원음의 경우 지금까지 보편적으로 사용되는 빗형 알고리즘 구조로

비선형적인 에코를 생성을 하고 있음을 알 수 있었고, 3번이 비교적 좋게 나온 것은 빗형 필터를 사용하지 않아서이며, 또한 측면 반사음이 부족하다는 것을 알 수 있다. 3번은 잔향이 풍부하나 측면반사음이 적어 전체적으로 잔향시간이 짧으며, 잔향 밀도가 낮은 것으로 관찰 되었다. 4번 잔향기는 측면반사음을 확보할 수 있어 명료도가 높고 잔향밀도가 충분하여 부드러운 잔향특성을 얻어 선호도가 높은 것으로 관찰되었다.

### Ⅶ. 결 론

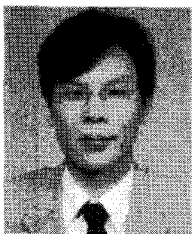
본 논문에서 기존의 구조를 개선한 새로운 디지털 잔향 알고리즘을 제안하였다. 제안된 구조에서는 초기 잔향 밀도의 증대와 직렬연결 전역통과필터의 급속성 음색변화특성을 개선한 등지형 전역통과필터로 구성하였다.

각 잔향기를 실시간 구현하여 관찰하였고, 제안된 알고리즘 구조는 기존 잔향기 구조에 비해 임펄스성 음에 대해 선형적인 잔향을 생성하고, 피드백 신호의 증가에 따른 음색변화로 생성되지 않았다. 잔향특성의 구현에 있어서 제안된 알고리즘은 스트링 악기, 관악기, 리드악기의 잔향 특성에 좋음이 관찰되었으나, 드럼에서는 본 제안구조가 아직 미흡함이 관찰되어, 본 제안구조를 적용함에 있어 음악의 형태에 따라 적용해야 함이 관찰되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] W.C Sabine, "Collected papers on Acoustics" Cambridge Harvard Univ Press(1927)
- [2] M.R.Schroder & B.F.Logan,"Colorless Artificial Reverbration", J.Audio Eng. Soc.,vol.9, no.3, pp.192-, July 1961
- [3] M.R.Schroder,"Natural Sounding Artificial Reverberation", J. Audio Eng. Soc. vol.10, no.3, pp219-223, July 1962
- [4] M.R.Schroeder, "New method of measuring reverberation time" J Acoust Soc. Am. 37, 409-37 (1965)
- [5] M.R.Schroder,"Digital Simulation Of Sound Transmission in Reverberate Spaces", J.Acoust. Soc. Amer, vol. 47,no.2, pp 424-431 (part1), Feb 1970
- [6] M.R.Schroder,"Computer Models for Concert Hall Acoustics", A.J.P.,vol.41,pp.461-471, April 1973.
- [7] J.A.Moorer,"About this Reverberation Business", Computer Music J.vol3 no.2, pp.13-28, 1970.
- [8] W.G. Gardner. "The Virtual Acoustic Room" Master'S Thesis. Massachusetts Institute Of Technology. 1992.
- [9] Blesser.B and Kaytes.J "Digital Processing in Audio Signals". In A.Oppenheim(ed.), Application of Digital Signal Processing. Englewood Cliffs,N.J. : Prentice- Hall, 1978.
- [10] B.Friedlander and J.O.Smith, "Analysis and Performance Evaluation of an Adaptive Notch Filter", IEEE trans. on Info. Theory,vol. IT-30, pp.283-295, March 1984.
- [11] J.O,Smith, "Introduction to Digital Filter Theory", In J.Strawn, ed., Digital Audio Signal Processing: An Anthology. Willian Kaufmann,Inc., 1985.
- [12] 강성훈 "음향시스템 이론 및 설계", 기전연구사 pp.607-611, 2001
- [13] 김익형, 정의필 "웨이블릿을 이용한 입체음향의 확산감 제어", 신호처리·시스템학회 Vol4 No4, 2003
- [14] Riitta. Vaananen, "3-D audio and virtual acoustics", tampere university od technology, ppt. 2005
- [15] Julius O. smith III, "physical audio signal processing", CCRMA, stanford university, 2006

### 저 자 소 개



윤재연

- 1988년 2월 : 조선대학교 전자공학과(공학사)
- 1995년 8월 : 한양대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 2003년 2월 : 경희대학교 대학원 정보통신망관리학과(공학박사 수료)
- 1994년 7월 ~ 1999년 2월 : 대우반도체 연구소 주임연구원
- 2000년 12월 ~ 2004년 12월 : 쌍용정보통신 방송사업팀
- 2004년 12월 ~ 현재 : 통일부 남북경협본부 사무관
- 주관심분야 : 디지털신호처리, 방송기술

---

 저 자 소 개
 

---

**박 준 선**

- 2004년 3월 : 경희대학교 정보통신대학원 (공학박사 수료)
- 2000년 6월 ~ 현재 : 한국방송위원회 기술정책부 부장
- 주관심분야 : 디지털방송기술, IPTV

**진 용 욱**

- 1968년 2월 : 연세대학교 전기공학과(공학사)
- 1975년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1981년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1993년 ~ 1994년 : 한국음향공학회 회장
- 1992년 ~ 2002년 : 한국어정보학회 회장
- 1979년 ~ 현재 : 경희대학교 정보통신대학원 교수
- 주관심분야 : 인지통신, 언어인식처리, 방송공학