

가상 음향 공간 구현에 관한 연구

*윤재연 **박준선 ***김충식 ****진용욱
*통일부 **방송위원회 *** (주)KT ****경희대
*dicdo@chol.com

A Study reverberation of Virtual Acoustic Space

*Yoon, Jae-Yeun **Park, Jun-Sun ***Kim, Chung-Suk ****Jin, Yong-Ok
*Ministry of Unification **Korean Broadcasting Commission ***KT ****Kyung
Hee University

본 논문에서는 기존에 제안된 가상음향공간 모델에서 문제점으로 대두된 음향특성을 개선한 새로운 모델을 제안하였다. 제안된 가상음향효과기는 초기 잔향을 위하여 *teped delay line*을 사용하여 초기반사음 재현에 충실하도록 하였고, 후기 잔향을 위하여 *nesed allpass delay line*을 이용하여 잔향 밀도를 높이도록 고안되었다. 각 *delay line*의 지연 시간을 조절하여 가장 좋은 잔향 효과를 갖도록 계수 값들을 추출하였으며, 제안한 알고리즘을 일반 범용 DSP를 이용하여 구현하였으며, 실험 고찰을 통하여 기존에 제시된 모델에서의 임펄스성음에 대한 비선형적인 거친 응답과 *frequency* 영역에서 고르고 평탄한 잔향 밀도가 개선되어 보다 더 좋은 효과를 보임을 확인하였다.

제 1 장 서론

최근 디지털 기술의 발달에 따라 Digital Audio Signal 기술에서는 음향에 대한 청취자의 다양성과 좋은 음향 특성을 가진 Concert Hall과 같은 공간성을 부여하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다[2,3...7,21]. 작은 공간에서의 음은 발생과 동시에 소멸이 되어 버리지만 커다란 콘서트홀에서는 좀 더 오랫동안 발생된 음의 잔향이 유지되며, 아름다운 하모닉을 생성한다. 우리는 신호 처리 기술을 적용하여 작은 공간에서도 가상의 공간처럼 콘서트홀에서와 같은 다양한 음향 특성의 음을 들을 수 있도록 하는 것이다. 즉 가상 음향 공간은 직접적으로 청취자가 경험 할 수 없는 음향공간을 청취자에게 제공하는 콘서트 홀 모델링 과정이라고 볼 수 있다.

디지털 형태의 음향기의 구조는 초기 M.R.schroeder에 의해 제시되었으며[6], 그 기본적인 (building block)구조는 Tap Delay FIR Filter와 Comb Filter 그리고 Cascade Allpass Filter로 구성되었다. 그러나 이러한 구조는 음에 colorless 특성이 나타나며 임펄스성 음(드럼 같은 beat있는 음)에 대해서는 음이 불규칙하고 기복이 심한 감쇠현상을 갖고 있다. James A.Moorer는 이러한 Schroeder의 기본 구조에 Comb Filter 부분에 Loop Feedback으로서 Lowpass Filter를 추가하여 에코의 밀도를 높이고 공기 흡수에 대한 주파수 응답을 시뮬레이션 하였고, 룸(Room)과 홀(Hall)의 초기 에코응답을 Tapped Delay Line을 사용하여 시뮬레이션 하였다[13]. Moor의 모델은 Schroeder의 모델보다 더 좋은 홀을 시뮬레이션 할 수 있었으나, 임펄스성 음에 대해

선 거친 응답을 보였다. 긴 음향잔향 시간을 갖는 큰 홀의 시뮬레이션에는 Feedback의 증가로 인하여 금속성 잡음을 수반하였다. 이 후 가드너는 효율적이고 좋은 음향 특성을 가진 Reverberation을 설계하기 위해 Allpass Filter를 직렬 연결한 Nested Allpass filter-구조를 제안하였다[19]. 지금까지의 가상 음향공간의 구현에서는 현재 두 가지 주요 결점을 가지고 있다.

첫째로 진폭 주파수 응답(Amplitude Frequency Response)이 비선형적이다. 사실 이러한 응답 특성은 선형적이지 않으므로 불쾌한 소리를 생성하게 된다. 특히 Beat가 강한 음에서 심하게 나타나게 된다.

둘째 에코 밀도(Echo Density)가 실제 음향 공간의 에코 밀도에 비해 너무 낮다. 이 현상으로 말미암아 소리가 불안정 하게 되고 특히 이는 짧은 과도 기간에는 더 심하게 된다.

따라서 본 연구에서는 가상 음향 공간을 구현하기 위한 새로운 알고리즘을 제시하고 범용 DSP를 이용하여 새로운 알고리즘의 성능을 비교 평가하여 좋은 효과가 있음을 확인하였다.

제2장 음향의 일반적인 특성

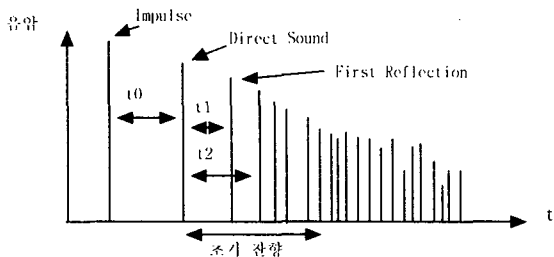
가. 실내 음향의 구조

음압이 거리 r 에 반비례하여 변화하는 환경을 자유공간(*free-field*)이라 부른다. 음원을 충분히 작다고 가정하여 하나의 점(*point*)으로 보고, 이 음원이 반사체에서 떨어져 있다고 가정하면, 이때 음파는 음원으로부터 흘러나와 반대 방향으로 발산하게 된다. 자유공간에서의 음압은 거리 r 에 반비례한다. 그러므로 음압 p 는 거리 r

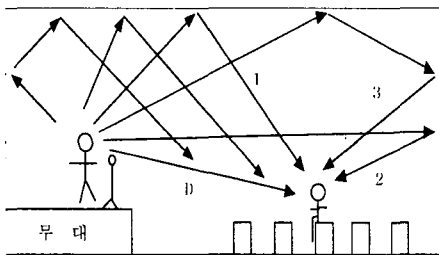
이 2배가 될 때 절반 값으로 떨어진다. 이를 데시벨로 환산하며, 거리 r이 2배씩 늘어날 때 마다 음압은 5dB씩 감소한다. 보통 실내에서는 이 자유공간의 조건이 성립되지 않으며, 이를 위해서는 음의 반사가 일어나지 않는 무향실(anechoic room)을 따로 꾸며야 한다.

직접 음(Direct Sound)은 보통 0.002초에서 0.2초(20~200ms)안에 청취자에게 도달된다. 잠시 후 같은 음이 벽이나 천장 등의 표면에 반사되어 청취자에게 도달된다. 그림 2.1에서처럼 이러한 반사음들은 다양한 시간 t1, t2, t3...로 지연되어 청취자에게 도달하게 된다. 이때 직접 음이 50ms 이내에 들리는 첫 번째 반사 음파들을 초기 잔향(early sound)이라 부른다.

잔향의 증가와 감쇄는 그림 2.1에 나타내었다.



(그림 2.1 임펄스 음에 대한 직접 음과 반사음의 시간 축에서의 파형)



D : 직접음의 경로 1, 2, 3 : 초기 잔향 경로
(그림 2.2 홀에서의 음의 경로)

나. 잔향

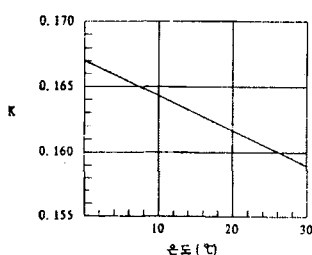
1) 잔향 시간(RT: Reverberation Time)

실내 음향 특성을 나타내는 물리량으로서 잔향 시간은 가장 기본적인 양으로 잔향시간의 산출은 sabin에 의해 정의가 되었다.

Sabin의 잔향시간을 산출하는 기본식은 다음과 같다.

$$RT_{60} = K * Volume / Area \text{ -----(2.1)}$$

여기서 K는 온도에 연관된 비례상수로서 이를 그림 2.3에 나타내었다.



(그림 2.3 온도와 비례상수 K의 관계그래프)

S를 실내의 표면적이라 하고 평균 흡음률 라 하면 흡입

력(absorption power) A는 다음과 같다.

$$A = S * \alpha \text{ (m}^2 \text{) -----(2.2)}$$

단음을 발생 후 음압이 60dB 떨어지기까지의 시간을 잔향 시간이라 정의하였다(이를 RT 혹은 RT60 이라 한다).

2) 초기 반사음

IDT(Initial Delay Time : Δt1)는 홀의 친밀감을 나타내는 물리량으로서 Beranek에 의해 처음 제안되었으며, 다음 2.3식으로 정의된다[10].

$$\Delta t = \frac{d_1 - d_0}{C} \text{ -----(2.3)}$$

여기서 d1는 1차 반사음의 경로, d0는 음원과 청취자와의 거리이며, C는 음속이다. Beranek는 20ms 이하의 초기 반사음이 친밀감을 준다고 주장하고 있다. 이러한 초기 반사음의 최적 지연시간은 음원에 따라 다르며, 음원의 자기 상관함수(autocorrelation function)로 구할 수 있다. 무향실내(15×16)에서 직접음에 대해 단일 반사음의 지연시간을 6~250ms 변화시키면서 청감 테스트한 결과 청감이 최대가 되는 지연시간은 음악에 따라 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 모델링 하는데 있어서 신호처리 기법을 이용하여 초기 반사음을 적절히 증가 시킬 필요가 있으며, 이러한 초기잔향은 신호처리 기법을 이용하여 훌륭하게 재현이 가능하다.

3) 공간적 파라미터

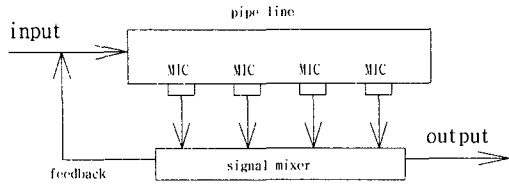
공간적 파라미터는 음장의 확산감(또는 공간감)과 관계되는 것으로 실내음향의 주관평가에 있어서 중요한 파라미터가 된다. 옆방향으로 부터 도래하는 초기 반사음은 청감상 공간 인상(spatial impression)에 영향을 주는 성질이 있으며, 음향적으로 중요한 파라미터가 된다. 측방 반사음(Lateral Efficiency)는 0ms부터 80ms까지의 에너지와 25~80ms 사이의 도래하는 측방반사음(Lateral Reflection) 에너지와의 비로 정의된다[12].

다. 가상 음향 공간 발생기의 일반적 구조

1) 파이프지연선(pipe delay line)을 이용한 잔향발생기

지름 1인치 또는 그 이상 그리고 길이가 9~30 미터인 파이프를 가지고 잔향발생기를 만들 수 있다. 초기에는 이러한 시스템은 지름이 수십 미터인 파이프를 둘둘 감고 지연시간을 얻기 위해 8미터 간격으로 마이크로폰을 놓는 형태를 취하였다. 혼 타입 스피커 드라이브 유닛을 사용하여 소리를 파이프 한쪽 끝으로 유입시킨다. 15미터의 위치에서 지연은 1/20초가 되고 30미터에선 1/10초가 된다. 이러한 방법의 단점은 파이프라인이 길고, 고주파 성분이 크게 손실된다는 점과 많은 수의 마이크와 증폭기가 신호 수신단측에 필요하다는 점이다. 잔향

시간이 짧기 때문에 마이크로폰에 잡힌 신호는 다시 음원 방향으로 피드백 시켜야하며 이로 인해 결과적으로 다중화된 지연음이 만들어진다. 15미터 파이프의 경우 5KHz에서의 손실은 23dB이고 30미터의 경우에는 45dB에 이른다. 이러한 이유 때문에 이 시스템은 더 이상 쓰이지 않는다. 그림 2.7에 이의 형태를 보인다.



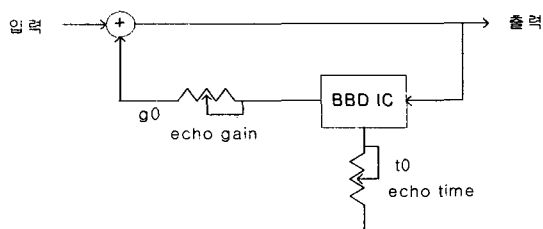
(그림 2.7 pipe delay line을 이용한 기구적 잔향 시스템)

2) 코일 스프링(coil spring)을 이용한 잔향발생기

코일 스프링을 이용한 잔향 발생 유닛은 보통 전기기타에 많이 쓰이며, 코일 스프링에 인가된 음의 스프링 진동에 의해 잔향을 생성한다. 이 coil spring은 기계적인 요소가 포함된 것으로서 30cm 길이의 스프링에 의한 음이 진동으로 잔향을 생성하며, 길이가 짧은 spring은 metallic 잔향을 발생시키며, 외부의 충격에 심한 왜곡 현상을 보인다.

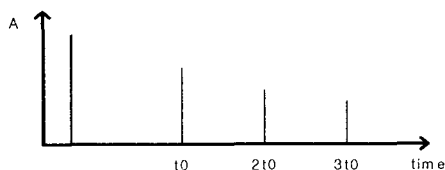
3) BBD IC를 이용한 에코 발생기

에코의 가장 뚜렷한 물리적인 현상은 산 정상에서 하나의 임펄스(Impulse)성 합성을 외쳤을 때 수초 후 접하게 되는 입체적 반향음인 산울림에서 찾을 수 있다. 가요반주기, 음향 시스템에 사용되는 종래의 에코 발생기는 원 신호에 원 신호를 일정한 시간만큼 BBD IC를 이용 지연시켜 원 신호에 더하는 구조로 되어 있다. 그림 2.8에 이의 구조를 보인다.



(그림 2.8 BBD IC를 이용한 에코 발생기 구조)

이 구조는 mono의 입력을 받아 mono의 출력 response를 생성한다.



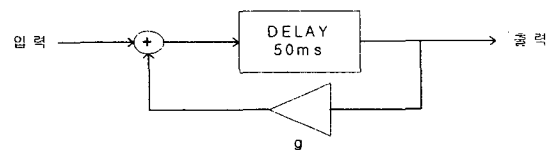
(그림 2.9 임펄스 response 출력 파형)

그림 2.9는 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.

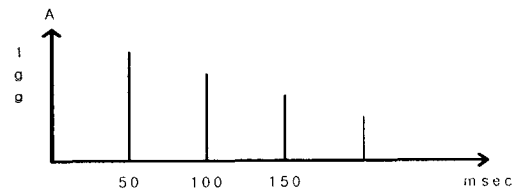
위의 구성은 단순히 원 신호를 feed-back 시켜 원 신호에 합성한 단순한 아날로그 mono 에코 pattern만 생성하며, BBD IC를 사용하므로 메모리의 한계로 에코 시간이 짧다. 이 회로는 아날로그적인 구성으로 여러가지 효과 패턴을 같이 구성 시 system 구성이 방대하며, 회로적인 잡음과 외부 잡음에 취약한 단점이 있다.

4) 디지털 잔향 시스템의 알고리즘

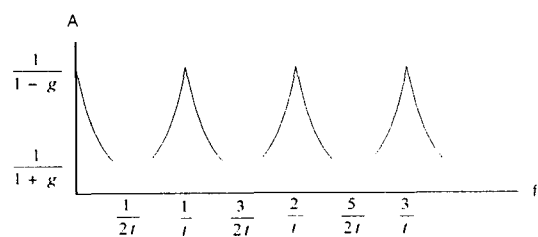
디지털 신호처리를 이용한 잔향 시뮬레이션에서의 초기의 노력은 Hall의 에코 응답을 흉내 내기 위하여 이에 적절한 디지털 필터를 설계하는 것에 집중되었으며, 실제의 홀과 디지털 필터 operation으로 구현한 음이 지각적으로 유사하다는 것에 착안을 하여 슈로더는 처음으로 디지털 잔향 system을 고안을 하게 되었다[6]. 슈로더는 잔향의 구성이 초기 잔향과 후기 잔향으로 구성된다고 보았으며, 초기 잔향을 modeling하기 위해 FIR 필터와 Comb 필터로 구성하였으며, 후기 잔향은 all-pass filter를 직렬로 연결하는 구조를 제안하였다. 여기서는 delay를 feedback시킨 comb 필터를 다음과 같이 도시한다.



(그림 2.10 comb filter)

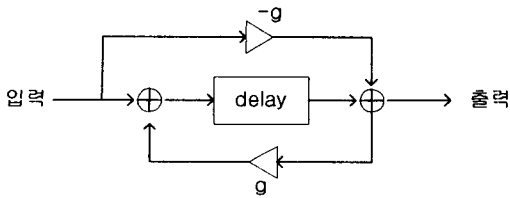


(그림 2.11 comb filter의 impulse response)

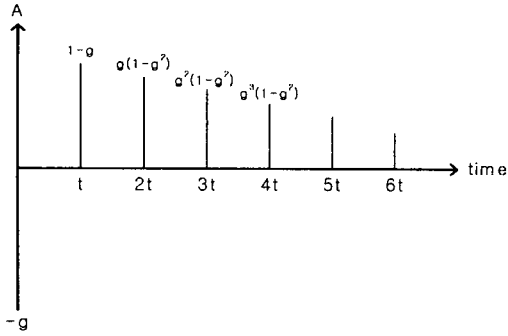


(그림 2.12 comb 필터의 amplitude response)

이 comb 필터의 시간 영역에서의 임펄스응답은 지수 함수적으로 감쇄하는 펄스의 열로 이루어지므로 이 comb 필터의 응답은 두 벽면 사이의 반향과 뒷 벽면에서의 반향의 평면파를 구현할 수 있었다. 이 comb 필터의 주파수 응답은 각 pole의 위치에서 최대이며 pole들의 사이에서는 최소로 나타난다. 후기잔향용 allpass 필터는 comb 필터에 feedforward path를 더 갖는 구조로 구성되어 있다.



(그림 2.15 all-pass filter)



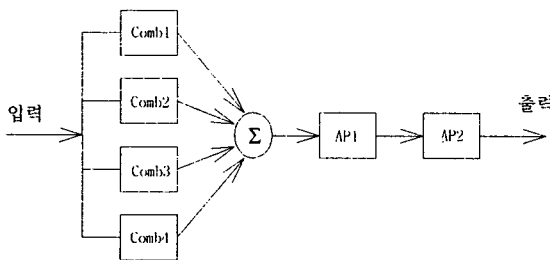
(그림 2.16 all-pass filter의 impulse 응답)

이 allpass 필터는 주파수 영역에서 zero pole의 작용에 의해 사라지므로 평탄한 주파수 응답을 갖는다. 아무튼 allpass 필터는 신호의 위상에 영향을 주게 되어 비선형적인 주파수 특성을 갖게 된다.

제3장 가상 음향 공간 구현을 위한 알고리즘

가. 슈로더의 모델

슈로더의 잔향 시스템은 4개의 comb 필터와 2개의 allpass 필터가 직렬 연결되어 있다. 그 구성은 그림 3.1 과 같이 보인다.



(그림 3.1 Schroeder digital reverberator)

Parameter	Comb1	Comb2	Comb3	Comb4	AP1	AP2
Delay (ms)	29.7	37.1	41.1	43.7	5	1.7

(표 3.1 Medium-sized concert hall을 위한 Parameter)

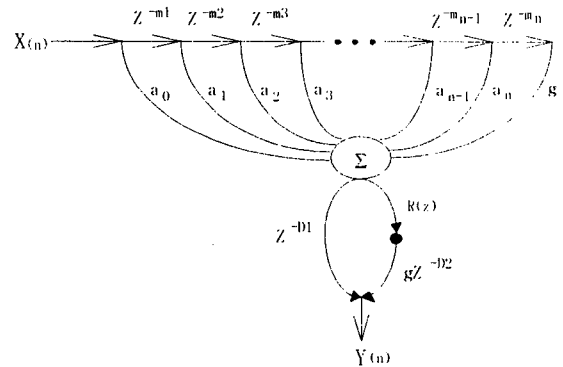
여기서 comb gain은 희망하는 잔향 시간에 따라 결정이 된다. 이러한 병렬로 접속한 comb 필터의 기본적인 생각은 주파수 영역에서 홀의 벽면 사이에서 발생하는 에코들을 시뮬레이션 하기 위함이며, comb 필터에 의해

생성되는 진폭 peak에 의해 일반적인 홀 모델을 적절히 시뮬레이션 할 수 있었다. 이러한 병렬 접속된 comb 필터들은 실질적인 확산 반향에 섞여있는 반사음들을 충분히 표현해내지 못했다. 사실 이 필터들은 일정한 비율로 에코 패턴들을 갖고 있었으나 다양한 음향공간을 시뮬레이션을 하기에는 한계가 있었다. 여기서 에코의 밀도를 증가시키고 후기잔향을 모델링 하기위해 comb 필터의 출력을 직렬로 연결한 allpass 필터에 다시 공급을 하였다.

각각의 allpass 필터는 에코의 수를 증가시켜 다층 음을 갖게 된다. 하지만 allpass 필터의 평탄한 주파수 응답 특성에 의해 음색을 갖게 하여 지연시간이 짧아질 경우로보듯한 음을 생성하는 단점이 있다. 시간이 지남에 따라 잔향에 대한 연구는 눈부신 발전을 하여 처음 제안된 슈로더의 잔향효과기는 오늘날에는 충분하지 못했으며, 임펄스성 음(드럼 같은 beat 있는 음)에 대해서는 울퉁불퉁하고 기복이 심한 감쇠 특성으로 좋지 못한 잔향효과 응답 특성을 갖는 치명적인 단점이 발견되었다.

나. 모어리의 모델

Moorer는 처음 잔향기를 제안한 슈로더의 기본 구조의 comb 필터의 loop feedback에 Low-pass-filter를 추가하여 잔향의 밀도를 높이고 공기 흡수에 대한 주파수 응답을 시뮬레이션 하였고, 음악홀에서의 초기 잔향음을 구현하기 위하여 taped delay line을 사용하여 시뮬레이션 하였다.



(그림 3.2 James.A.Moorer의 6 comb filter, 1 allpass Filter reverberator)

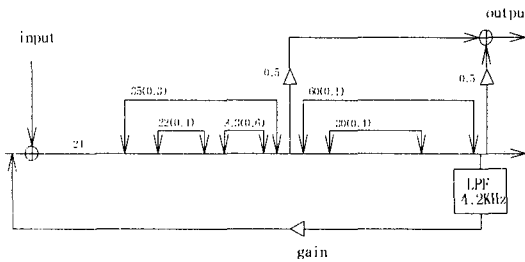
Moorer의 음향효과기 모델은 는 슈로더의 모델보다 더 좋은 음악홀을 시뮬레이션 할 수 가 있었으나 임펄스성 음에 대해선 거친 응답을 보인 것은 동일하였다. 긴 잔향 시간을 갖는 큰 홀을 시뮬레이션 시에는 feedback의 증가로 위상의 비선형적인 외곡으로 인하여 급속성잡음이 생성됨을 알았고, 최적의 지연시간을 찾아내는데 많은 시간을 보내야 했다.

다. 가드너의 모델

모어리의 reverberator 모델은 잔향밀도를 증가시키는

것에는 효과적이었으나 임펄스 음에 대한 평탄하지 못한 응답특성을 생성하는 단점이 있었다.

가드너는 이러한 단점을 보완한 효율적이고 좋은 음향특성을 가진 reverberation 모델을 설계하기 위해 white noise가 random한 위상차를 가지지만 평탄한 진폭 응답특성을 가지는 것에 착안하여 직렬 연결한 allpass filter안에 delay time이 다른 allpass filter 사용 할것을 제안하였다. 가드너가 제안한 nested allpass filter를 직렬 연결한 reverberation의 구조를 그림 3.3과 같이 도시한다.



(그림 3.3 가드너의 small room reverberator)

가드너의 reverberator는 후기 확산 잔향을 많이 수반하는 음악홀의 reverberator에 좋은 효과를 나타내었으나 긴 잔향 시간을 갖고 초기 잔향음이 많은 대형 홀에 대한 모델에서는 적합하지 않음을 보였다. 또한 샘플정보를 저장하기 위한 많은 메모리가 필요하며 작은 홀에서 큰 홀로 전환 시 알고리즘의 구조와 출력 node를 바꾸어야 하는 구현상의 어려움이 있었다.

초기 잔향밀도가 많이 요구되는 큰 연주홀과 스타디움 등의 모델링에는 가드너의 모델은 초기잔향밀도의 부족으로 구현상에 어려움이 많았으며, 초기잔향을 구현하기 위해 nested allpass filter의 직렬구조만으로는 구현이 어렵고 후기잔향을 모델에 하기에 적합함을 알게 되었다.

지금까지의 디지털 인공잔향(artificial reverberation)은 현재 두 가지 주요 결점을 가지고 있음을 연구되었다.

- o 진폭 주파수 응답(amplitude frequency response)이 평탄하지 않았다. 사실 이 응답은 평탄하지 않아 불쾌한 음을 생성을 하였다. 특히 beat가 강한 음에서 심하다.
- o 에코 밀도(echo density)(예 : single pulse 입력시 reverberation의 출력에 있어서 초당 echo의 수)가 실제 음악홀의 잔향 밀도에 비해 너무 낮다.

제4장 제안한 가상공간 구현을 위한 알고리즘

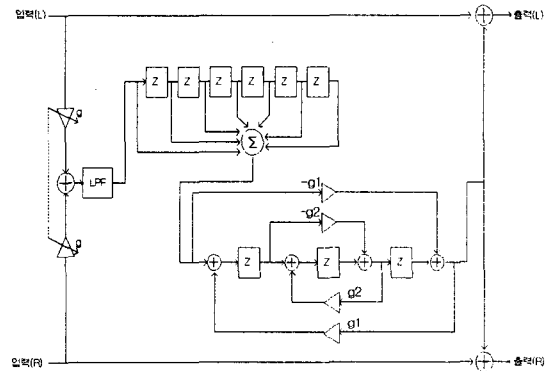
슈로더의 탭(comb) 잔향 모델로부터 현재까지 제안된 잔향 모델들을 모두 구현을 하여 시험하여 보았으나, 음악홀의 실질적인 현장에서 경험하는 다양한 잔향 효과음을 충분히 구현 할 수 있는 잔향 효과기는 질적,양적으로 부족한 상태임을 고찰할 수 있었다.

음악 홀에서 경험하는 여러 가지 인상적인(감성적인 부

분 포함) 효과를 충분히 구현할 수 있는 잔향 모델은 질적, 양적으로 아직 부족한 상태이며, 지금까지의 각 실내의 음향의 파라미터 추출과 같은 연구는 종래에 비하여 처리 정보량이 늘어 날뿐으로 실내의 물리적인 특징인 잔향시간, IACC, 잔향의 주파수 특성들을 잘 구현할 수 있는 다음과 같은 잔향기의 모델 구조를 제안한다.

가. 제안 알고리즘 모델

현재까지의 제안된 모델에서 가드너의 모델은 초기잔향을 모델하기에는 적절하지 못하나 후기잔향 모델에는 최적임을 고찰할 수 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위해 가드너의 모델에 모어러의 모델은 초기잔향에 가장 적합을 보였다. 이러한 두가지 모델의 장점을 살려 가드너의 모델에 초기잔향을 보완할 수 있도록 Taped delay 라인을 추가하는 복합구조를 아래와 같이 제안하였으며, 각 실내의 음향의 파라미터 추출을 통하여 실내의 물리적인 특성은 가장 적절히 구현할 수 있는 지연시간과 계수 값을 찾으려는 노력을 하기로 하였다.



(그림 4.1 제안한 알고리즘 구조)

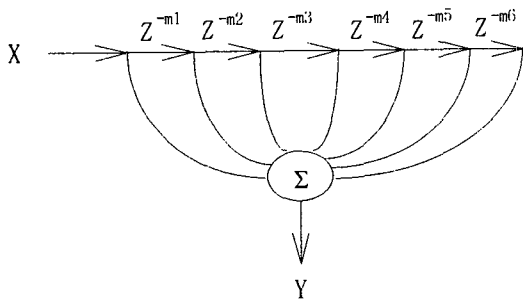
본 알고리즘에서 LPF의 역할은 물리현상에서 공기(air), 습도, 반사체의 흡입과 반사에 의한 감쇄를 모델링을 하기 위함이며, 반사체의 특성에 따라 반향음의 내역폭이 감소함을 적은 tap 수가 필요한 2pole digital IIR filter로 설계하였다. 반사체의 흡수 계수가 크면 IIR의 stop band 주파수는 낮아진다. 반면 반사체의 흡수 계수가 크면 IIR의 stop band 주파수는 낮아진다. 반면 반사체의 거리가 가까우며, 흡수계수가 적고 반사 계수가 크다면 이 IIR 필터의 stop band의 주파수는 높아지게 설계하였다(최대 15KHz).

초기 반향음(Lateral Reflection 포함)을 모델링은 긴 잔향 특성을 살리기 위해서는 슈로더의 comb 필터는 잔향 밀도는 높일 수 있었으나 한계가 있는 것으로 밝혀졌고, 이를 보완하기 위하여 모어러가 제안한 FIR 필터 구조 갖는 7개의 tap delay line으로 구성하였다.

후기 잔향은 잔향의 시간은 짧으나 잔향 밀도의 향상이 요구되어 잔향 밀도를 높이기 위해서 가드너의 Nested Allpass filter로 구성하였다.

나. 초기 반향음 구현 FIR delay Line

초기 측방 반향음(Lateral Reflection)을 모델링하기 위해 7개의 Taped delay line FIR 구조로 구성하였다.



(그림47 Sample Delay Line을 이용한 FIR의 구조)

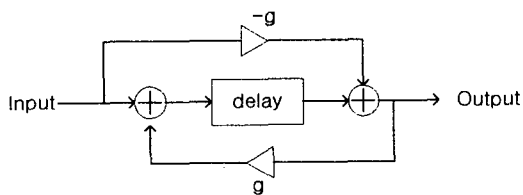
그러나 모어리의 comb 필터의 후단에 적용한 피드백과 all pass 구조는 제거를 하여 단순화 시켰다.

최근에 메모리 기술의 발달로 메모리의 가격의 저하와 용량의 증대로 인하여 각 delay line을 증가할 수 있어서 큰 콘서트홀을 모델링하기에 적합하였다.

다. 후기 잔향을 위한 modified nested allpass 구조

효율적이고 좋은 음향특성을 가진 후기확산잔향을 모델링하기 위해 임펄스 응답이 감쇄 noise sequence와 유사한 선형 시스템을 설계하는 것이며 white noise가 random한 위상차를 가지지만 평탄한 진폭응답특성을 가지기 때문에 allpass filter의 사용이 가장 적합하다.

슈로더의 잔향기 모델 같이 allpass 필터들을 직렬로 사용하기 보다는 본 연구에서는 실제 실내에서와 같이 에코의 지수 함수적 감쇄를 이어지도록 하는 방법을 선택하였다. 이러한 해결책은 allpass 필터를 다른 allpass 필터의 지연 요소에 집어넣어 피드백 시키는 것으로 다음의 플로우 다이어그램을 보인다.

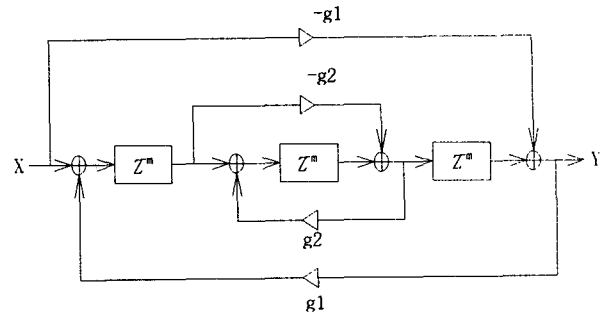


(그림4.8 allpass flow diagram)

comb 필터를 nested 또는 cascade하는 것도 가능할지 모르나 응답은 주파수 공명현상을 보이며 안정도가 문제가 될 것이며, 시스템이 allpass이기 때문에 음색에 생동감이 없다고 생각하는 것은 잘못이다. 장기적으로는 allpass filter 시스템이 모든 주파수를 똑같이 통과시키는 하지만 delay time이 짧을때는 우리의 귀에 의해 수행되는 단시간 주파수 분석은 순간적인 coloration을 감지할 수 있기 때문에 allpass 시스템이 로보틱한 소리인 metallic ring을 가질 수 있다.

출력되는 에코의 숫자는 시간에 따라 증가를 하며, 따라

서 임펄스성 음을 입력 시 "프쉬쉬"(혹은 다른 지연과 이득을 선택하면 "브즈즈")로 바뀌게 된다. 아래 그림 4.9와 같이 nested allpass delay line의 구조를 도시한다.

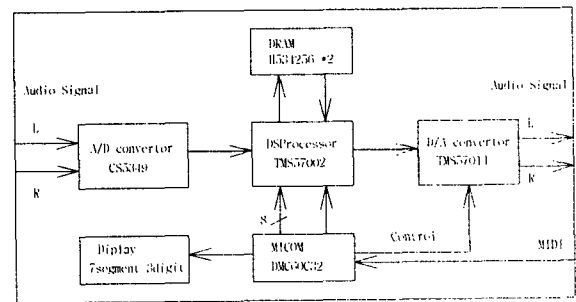


(그림 4.9 nested allpass delay line의 구조)

제5장 각 모델의 구현을 위한 실험

가. 가상음향 잔향 시스템의 구성

위에서 언급한 각 모델의 잔향 알고리즘의 구현을 위하여 아래와 같은 실험시스템을 제작하여 각 알고리즘의 구현하여 비교 평가를 통하여 검증은 실시하였다.



(그림 5.1 실험 시스템의 블록 다이어그램)

1) 마이크로 컨트롤러

마이크로 컨트롤러(인텔80C51/60C32)는 각 알고리즘의 여러 가지 파라미터와 이득들을 가변하기 위한 신호를 송수신하며, 디지털 신호처리기(DSP) TMS57002의 실행 코드를 Down Load하고 제어하는데 사용되었다. 디스플레이 LED 디스플레이는 각각의 잔향효과와 조작과 모니터링을 도모하였다. 이 마이크로컨트롤러를 통하여 실시간으로 각각의 지연시간과 이득 값들을 변화시켜 잔향효과들을 시험할 수가 있었다.

2) 범용 DSP 처리기

디지털 신호처리를 프로세서인 TI(Texas Instruments)사의 TMS57002는 Fixed Point 24×32 Bit=57Bit MAC와 32×32=32Bit Adder로 되어 있어 최상의 Resolution과 여유있는 Overhead를 보유한 DSP 칩이며, 500Tap 이상의 FIR 필터를 구현 가능하다. 또한 4개의 Data BUS를 갖춘 Harvard Architecture로 2개의 명령을 동시에 병렬로 수행이 가능하여 선정을 하여 시험을 진행하였다. A/D, D/A또는 기타 주변 logic과의 data 전송을 위한 일반적인 직렬전송과 I²S의 형태로 전송이 가능한 2쌍의 I/O

port를 갖추고 있는 제품을 골라 사용하였다. Host interface를 위한 병렬 8 BIT port는 DSP가 실행 중에도 계수 값을 Download가 가능하여 각각의 필터의 파라미터를 변경 할 수 있어 여러 가지로 실험을 가변적으로 할 수 가 있었다.

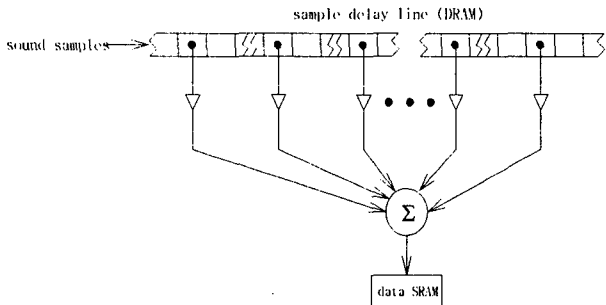
표 5.1 DSP TMS57002의 주요 사양

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

나. 알고리즘의 구현

1) 초기 측방 반향음(Lateral Reflection) 구현

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



(그림 56 샘플 딜레이 라인을 이용한 Tap FIR 필터의 구현)

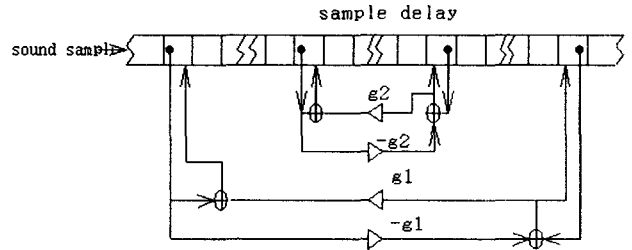
그리고 모두 합산한 값은 다음 신호로 전달하기위해 다시 DRAM에 저장하여 DRAM의 어드레스를 참조하는 방식으로 구현 하였다.

2) modified nested allpass 필터의 구현

그림 4.9의 구조는 아래 그림 5.7에 보인바와 같이 샘플 지연라인에 operator들을 붙임으로써 쉽게 구현할 수 있었다.

아래의 다이어그램에서 -g를 통과한 feed forward multiply accumulator는 feed back 계산 이전에 계산이 이루어진다. 계산이 완료된 후에 지연 라인에 있는 샘플들은 오른쪽으로 한 위치씩 옮겨지고 처리는 계속이루어지는 구조이다. 그러므로 좌측에서 들어오는 샘플들은 allpass 필터 처리되고 우측으로 출력이 된다.

실제로 구현함에 있어서 메모리의 샘플레이터들은 움직이지 않고 대신에 메모리 포인터(어드레스)의 조작으로 똑같은 효과를 내게 된다. Nested allpass 필터는 allpass 필터의 샘플 지연라인 안에 allpass 필터 operator를 삽입하여 아래와 같이 구성을 한다. 이 Nested allpass 필터의 구성을 다음과 같이 도시한다.



(그림 5.7 샘플딜레이 라인을 이용한 Nested allpass 필터의 수행)

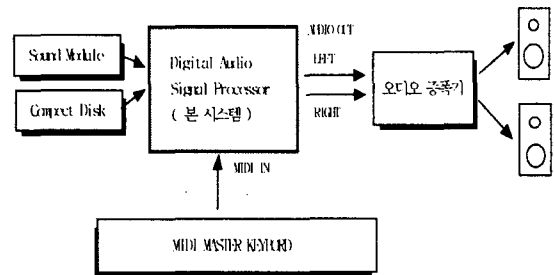
; Nested allpass 프로그램 예

```

LCAK 50
LACD D(1000) ; seting coefficient point
MAC D(100),C*+
NOPI
WRE D(1000),C*+ /SMHD ; store Sample
DRAM(1000)
LACD D(100)
MAC D(1000),C*+
NOPI
WRE D(100),C*+ /SMHD ; store Sample
DRAM(100)
;
LACD D(50) ; load data to ACC
MAC D(200),C*+
NOPI
WRE D(500),C*+ /SMHD ;store Sample dram(500)
LACD D(200) ; load sample data to ACC
MAC D(500),C*+
NOPI
WRE D(200),C*+ /SMHD ; store Sample Dram(200)
NOPI / DOMH 0 ; data out to D/A convertor
    
```

제6장 실험 및 고찰

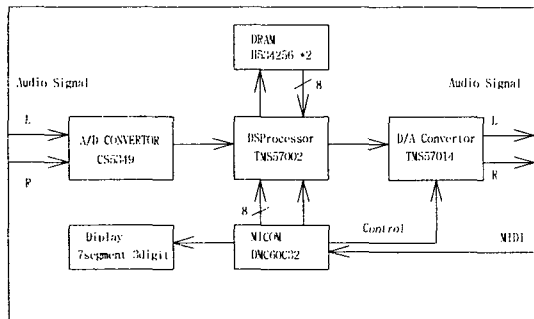
앞에서 기술한 본 알고리즘의 성능평가를 수행하기 위해 다음과 같이 시험 시스템을 구성하였다.



(그림 6.1 실험 시스템의 연결도)

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 방법으로 이러한 평가방법론에 따라 평가하기로 하고, 각 알고리즘에 대한 임펄스 응답을 구하여 10명의 청취자에게 청취평가를 하였다.



(그림 6.2 시스템 하드웨어 구성도)

먼저 임펄스 응답을 구하기 위해 본 시스템의 입력에 Tektronix FG5010 Programmable function generator의 500Hz의 임펄스성 구형파 출력을 인가하여 각각의 알고리즘을 구현한 본 시스템의 출력에 A/D 컨버터를 통해 출력된 데이터를 22.5KHz로 샘플링을 하여 컴퓨터 하드 디스크에 16 비트 정수로 저장을 하였다. 청취자를 통한 비교평가를 위해선 샘플링 레이트는 44.1KHz로 취하여 현재 가장 일반적인 CD/DVD 음질 수준으로 가청주파수인 22.05KHz까지 자연스런 음이 재현이 가능하도록 배려하였으며, 다양한 콘서트홀을 실현하기 위해 가장 일반적이고 음질이 충실한 CD에 수록되어 있는 음원을 사용하였다. CD 음원을 사용함으로써 다음과 같은 장점이 있었다.

- 가. 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 조건 하에서 음원을 채취한 것이므로 상대적으로 노이즈에 강하다고 할 수 있다.
- 나. 실험과정에서 소요되는 비용과 음원 채취과정에서 걸리는 시간을 크게 단축을 할 수 있다. 그러나 이 음원을 직접 사용할 때는 음원 녹음 중에 임의의 잔향이 섞여 있는 경우가 있다.
- 다. 또한 정확한 잔향 특성을 알아보기 위해 디지털 피아노의 출력을 사용하여 각 악에서 어떻게 반응하는지도 평가를 하였다. 디지털피아노는 악기별 한음씩 연주하여 악기에서의 원만한 잔향효과를 갖는지를 알아보는데 취적이다.

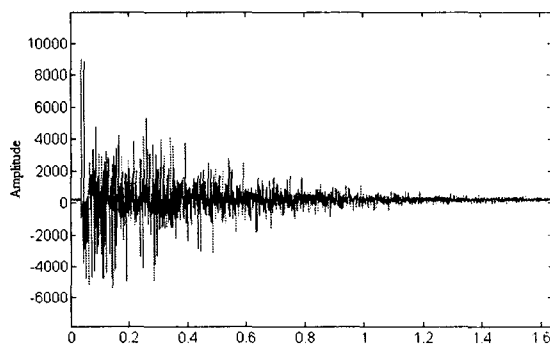
이런 잔향효과기의 적용이 음악감상과 디지털피아노 등의 악기에 가장 많이 적용이 될 것으로 가장 중점을 두고 실험을 하였다.

가. 슈로더 모델의 emulation 결과

슈로더의 comb delay line은 초기 반향을 잘 표현됨을

그림 6.1과 같이 좋은 응답을 보임을 알수 있었다.

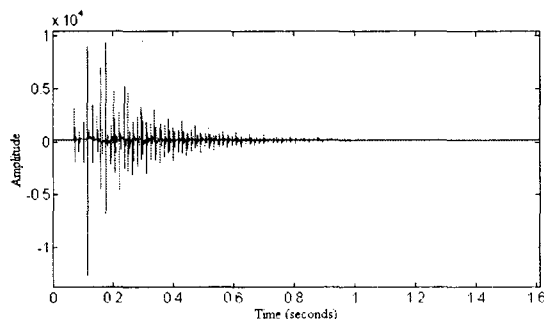
그러나 4개의 comb delay line에서 피드백되는 음에의하여 notch 현상같은 비선형적으로 음이 전달됨을 볼 수가 있었다.



(그림 6.1 슈로더의 임펄스 잔향 파형)

나. 가드너 모델의 emulation 결과

가드너의 allpass delay 모델은 작은 delay line으로 충분히 표현이 가능하여 메모리 사용이 효율적임을 구현상 알 수 있었으며, 상호 nested 되어 comb delay에서 보였던 비선형적인 응답은 없으며, 전체적으로 선형적인 응답을 보여주었다. 그러나 짧은 delay 라인으로 인하여 잔향 시간이 전체적으로 짧았으며, 각 delay line을 길게 위해 샘플플레이를 많이 주었을 때는 반향음이 너무 뚜렷해져 효과가 반감됨을 알수 있었다.



(그림 6.2 가드너의 임펄스 잔향 파형)

또한 슈로더 모델에 비하여 초기 반향음이 너무 부족함을 알 수 있었다. 그러나 관악기와 같은 섬세함 음색이 요구되는 플루트 같은 악기에는 최적의 잔향음을 제공할 수 있어 좋은 실험이었다.

다. 제안모델의 emulation 결과

본 연구에서 제안한 모델을 구현하기 위하여 7tap의 FIR 구조를 사용하고 이의 각 계수값은 표6.1을 적용하였다. 반사음을 모델링하기위해 FIR 구조 전에 IIR LPF를 적용하였으며, 여기에 적용한 LPF의 주파수 한계치를 표6.2와 같이 적용하였다.

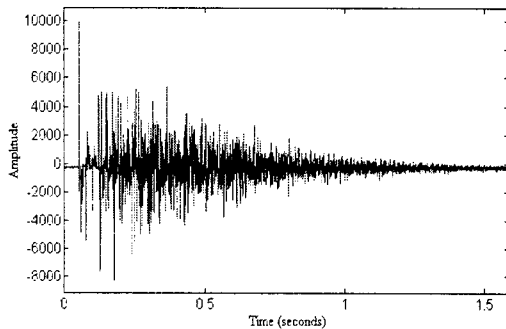
탭 수	지연 시간(ms)	계수(g)
0	19.9	0.818
1	35.4	0.635
2	38.9	0.719
3	41.4	0.267
4	69.9	0.242
5	74.1	0.181
6	79.7	0.167

(표.6.1 초기잔향 지연시간과 이득값)

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

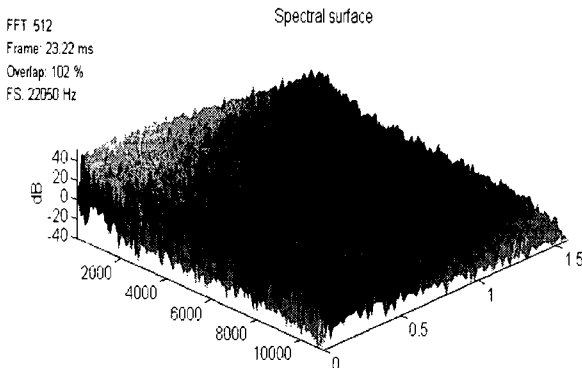
(각 홀에서의 잔향시간과 적용한 LPF의 주파수)

제안된 모델은 그림 6.3과 같이 초기 반향음을 잘 모델링을 하였으며, 슈로더의 모델에 비하여 더 선형적인 잔향 특성을 보였다. 후기 잔향 모델을 위해 적용한 nested allpass delay line은 전체적인 잔향 밀도를 높여주어 풍부한 음을 생성할 수가 있었다.



(그림 6.3 제안 모델의 임펄스 응답 파형)

우리는 좀더 정확한 응답특성을 알아보기 위하여 그림 6.4과 같이 주파수 응답 특성을 알아보았다. 여기에서도 allpass delay line은 주파수 영역에서 평탄한 진폭특성을 보여줄 수 있었다.



(그림 6.4 본 시스템의 3-D 임펄스 응답 파형)

본 연구에서 고품위 가상음향공간구현을 위한 새로운 디지털 잔향 알고리즘 모델을 제안하였다. 제안된 모델의 구조에서는 초기 잔향 밀도의 증대와 캐스케이드(cascade allpass filter)의 금속성 loop를 개선한 modified nested allpass filter를 사용하여 사용자 요구에 대응하여 손쉽게 디지털신호처리프로세서(DSP)에 다운로드 또는 계수 값을 변화시켜 여러 가지 좋은 갖는 홀을 실시간 구현할 수 있음을 보였고, 제시된 구조는 기존의 구조와 비교 평가하기 위해 TI DSP(TMS57002)를 사용 실시간 구현하여 슈로더, 모어러 그리고 가드너의 구조에 비해 임펄스 성음에 대해 선형적인 잔향을 생성하고 큰 콘서트홀을 모델링 시 잔향 시간의 증가를 위해 feedback loop 신호의 증가로 인한 금속성 잡음이 효과적으로 제거됨을 임펄스 응답 특성으로 확인을 하였으며, 홀의 음의 반사로 인한 주파수 응답 특성을 비교하기 위해 이 출력을 22.05KHz로 샘플링 취하여 FFT로 통해 도시한 결과 홀의 임펄스 주파수 응답과 유사함을 보여 훌륭하게 음악 홀을 재현함을 실증하였다. 또한 좋은 잔향과 디지털 필터링 구현에서 nested allpass 구조는 스트링 악기, 관악기, 리드악기의 잔향 특성에 좋은 반응을 보였으며, 이런 관악기에서는 본 모델이 가장 최적이라고는 볼수가 없었으며, 적용함에 있어 상황에 맞추어 적용해야함을 고찰할 수 있었다. 제안된 모델의 tap delay line과 nested allpass delay line 구조를 가변적으로 변화하여 다양한 물리적 현상들의 잔향과 콘서트홀을 실시간 처리하기 위한 좋은 모델임을 확인하였다.

참고 문헌

- [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 Reverbration", J.Audio Eng. Soc. vol.10,no.3,pp219-223,July 1962
- [4] K.Steiglitz, An Introduction to Discrete Systems, John Wiley and Sons,Inc. New York,1974.
- [5] Mar 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 Institutc Of Technology. 1992.

제 7장 결론

- [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] L. R. Rabiner and B. Gold, Theory and Application of digital signal processing, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1975.
- [12] J. O. Smith, "Introduction to Digital Filter Theory", In J. Strawn, ed., Digital Audio Signal Processing: An Anthology. Willian Kaufmann, Inc., 1985.
- [13] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time" J Acoust Soc. Am. 37, 409~37 (1965)
- [14] H. Kuttruff, "Nachhallmessungen nach dem Verfahren der Integrierten Impulsantwort", Acustica 1956~58 (1976/68)
- [15] 강성훈 "실내음향연구의 전망", 한국음향학회, 제8권 제2호, pp35~44, 1989.
- [16] Yong H. Lee, Don-Sung Oh, Sun I. Kim and Doo Soo Lee and, "A Real-Time Implementation of Virtual Acoustic Room by TMS57002 DSP Processor," ICSPAT '95, pp. 220-224, Boston U.S.A. Oct. 1995