

## Adaptive Waveguide를 이용한 효과음 전용 Processor의 후기 잔향효과를 개선하기 위한 연구

正會員 丘 在 乙\*, 正會員 方 孝 昌\*\*, 正會員 李 大 寧\*\*\*, 正會員 金 元 厚\*\*

An Improvement of Subsequent Reverberation Effect in Sound Effect Processor by Adaptive Waveguide

Jae Ul Koo\*, Hyo Chang Pang\*\*, Dae Young Lee\*\*\*, Won Hoo Kim\*\* Regular Members

### 要 約

본 논문은 원음(Original sound)에 잔향현상을 추가하는 Digital signal processor 설계의 알고리즘 구축을 위한 기본연구로서 전기적인 방법으로 recording 되거나 합성에 의해서 만들어진 audio 신호를 컴퓨터 음악에서 널리 쓰이는 이론을 이용하여 음질을 향상시키는데 목적이 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 후기잔향(subsequent reverberation) 부분을 강화하기 위하여 새로운 형태의 waveguide 방식을 제안하였다. 이는 multiple feedback loop를 사용하는 것보다 memory size를 1/2이상 줄일 수 있었고 multiple feedback loop가 가지고 있던 주파수 응답특성의 불규칙한 현상이 현저히 개선됨을 알 수 있다.

### ABSTRACT

This paper shows how to enhance the audio sound quality recorded in electric method. To evaluate this aim in DSP, the algorithm obtained by adding the reverberant effect to original audio signal is studied by using a new waveguide. This method utilizes the adaptive coefficients to enhance subsequent reverberant and reduce the memory size in half to the multiple feedback loop method, and the uncomfortable sound characteristic due to the sharp frequency response is improved remarkably.

\* (株) 和音素

Hwa Eum So Co., Ltd.

\*\* 韓國航空大學校 航空電子工學科

Dept. of Avionics, Hankuk Aviation University

\*\*\* 三星電子 (株) 通信開發室

Communication System R&D Center, Samsung  
Electronics Co., Ltd.

論文番號 : 94218

接受日字 : 1994年 8月 22日

I. 서론

자연의 소리가 실내에서 발생되면 이는 각 벽면을 반사하면서 소리의 방향이 바뀌고 동시에 새로운 소리를 발생시켜 소리의 질을 높여 인간이 듣기에 편하게 해주거나 혹은 원소리와 반사된 소리들이 뒤엉켜 소리 자체를 인식할 수 없게 만들 수 있다.<sup>(1),(2)</sup> 또한 실내에서 source로 부터 소리를 발생시킨 후 갑자기 발성을 중지해도 소리가 일순간에 없어지는 것이 아니라 서서히 감소되면서 어느 정도 시간이 지나면 완전히 사라지게 된다. 이와같이 소리가 colorful하게 되거나 소리를 중지해도 여전히 약간의 소리가 남아 있는 현상을 잔향(reverberation)이라 한다.<sup>(3),(4)</sup>

이러한 잔향은 특히 concert hall에서 실제 악기를 연주하는 음악가들에게는 매우 중요하며 computer와 반도체 기술의 발전으로 인하여 이러한 concert hall의 효과를 일반 실내에서도 구현가능하게 되었으며 이를 가능하게 만든 것이 바로 effect processor이다.<sup>(5)</sup>

따라서 본 연구에서는 digital effect processor에서 가장 중요하고 기본이 되는 reverberation effect를<sup>(6)</sup> 구현하기 위하여 새로운 waveguide를 제안하였고 J.A Moor와 Schroeder가 제안한 방법들보다 계산량을 현저하게 감소시켜 약 1000gate의 control logic과 50\*16개의 register 및 2's com-

plement multiplier 16\*16 2개만 가지고도 충분히 구현가능함을 볼 수 있었다. 또한 본 waveguide를 약간만 수정하면 chorus, flanging, tremolo Q-sound, 돌비 effect등의 음악적인 효과를 간단히 구현할 수 있다.

II. 본론

2.1 자연적인 잔향

청취자가 자연음을 들을 때 실제 발생할 수 있는 상황설정은 그림 1과 같으며 이를 sound field적인 입장에서 볼 때는 그림 2와 같은 field가 생성됨을 알 수 있다.<sup>(7)</sup> 따라서 이러한 조건에서의 원음 잔향시간(reverberation time)은 소리크기가 60dB 떨어지는 시간까지를 말하며 이를 RT혹은 T60이라 말한다.<sup>(3)</sup>

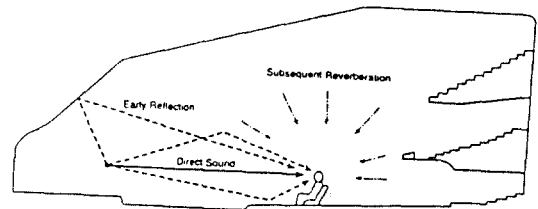


그림 1. Concert hall의 실제 상황도  
Fig. 1. Real condition of concert hall

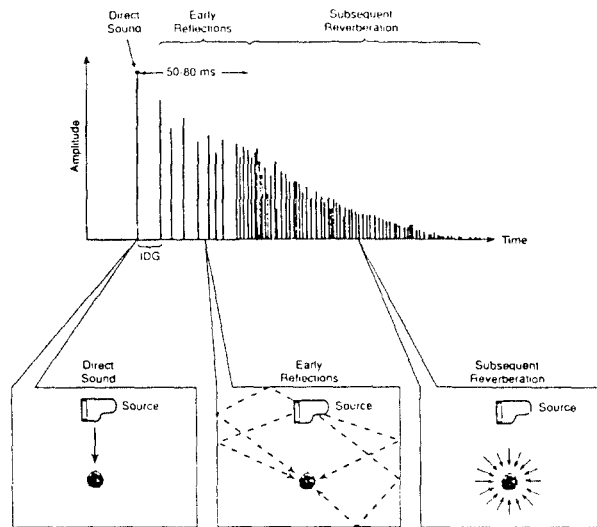


그림 2. 잔향 음장의 기본 구조도  
Fig. 2. Basic architecture of reverberation field

그러나 60dB 떨어지는 시간은 정확히 측정하는 것이 곤란하기 때문에 이의 감쇄곡선이 직선이라는 데 착안하여 30dB 떨어진 시간의 2배를 잔향시간이라 정하였다. 따라서 잔향시간을 산출하는 기본 식은 다음과 같다.<sup>(8), (9)</sup>

$$RT60 = K \cdot \text{Volume} / AVs \quad (1)$$

AVs : Average absorption, k : 온도 비례 상수

## 2.2 Wave-guide의 원리

어떤 물체든 두드리거나 뿜기면 자연발생음을 내며 음악적으로 유용한 악기는 다음 효과중 한가지 이상에 의존한다.

- (1) Pitch가 분명한 음을 발생하는 특정한 형태 그 중에서도 피아노나 dulcimer처럼 가늘고 긴 현으로 된 것.
- (2) 고탄력적인 금속과 같은 재질과 비탄력적인 나무, 플라스틱, 가죽 등의 재질로 만들어진 악기는 각각 오래 지속되는 음과 비교적 짧고 둔한 음에 이용된다.
- (3) 작고 가벼운 혹은 탄성이 있는 물체나 장력이 높은 물체는 pitch의 음을 낸다.
- (4) 넓은 표면적을 갖고나 공명기둥은 에너지가 큰 음을 낸다.

이와 같이 음발생원인에는 여러 형태를 가지나 이는 에너지의 연속적인 공급을 원하며 이를 위하여 악기에서는 두 가지 방법을 이용한다. 즉 (1)현을 활로 쳐는 과정에서 소모되는 일, (2) 좁은 구멍을 통하여 일정한 기류를 예리한 날에 입사시키거나 또는 유연한 lead나 입술을 지나도록 할 때 수행되는 일이며 만일 전기적인 발진기를 이용한다면 연속음을 내는 세 번째 방법은 전기적인 에너지의 공급이다. 이러한 에너지를 인위적으로 만들기 위하여 수학적인 모델링 방식의 적용으로 음을 만들어내는 방법중 하나를 waveguide라 하며 이러한 에너지 생성의 원리를 응용하여 실내에서 발생하는 음의 각 벽면반사 에너지를 하나의 waveguide를 설정하여 구현해 냄으로써 전기적인 방법에 의해 잔향효과를 얻을 수 있다.

## 2.3 Feedback loop를 이용한 잔향기

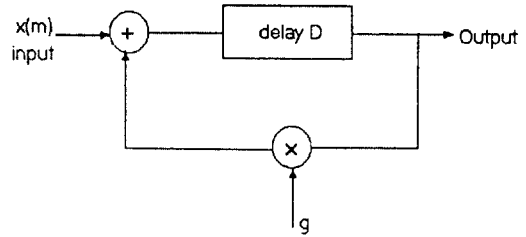


그림 3. 콤 필터  
Fig. 3. Comb filter

그림 3과 같은 feedback loop에서 impulse를 입력시켰을 때 전달함수는 다음과 같다.

$$h(n) = u(n-D) + gu(n-2D) + g^2u(n-3D) + \dots \quad (2)$$

$$H(Z) = \frac{Z^{-D}}{1 - gZ^{-D}} \quad (3)$$

$Z = e^{j\omega}$ 를 대입하고 magnitude를 구하면

$$|H(e^{j\omega})| = \frac{1}{\sqrt{1 - 2g\cos\omega D + g^2}} \quad (4)$$

따라서 전달함수  $H(e^{j\omega})$ 에서 최대 최소를 구해보면

$$\text{Minimum : } \omega D = (2n+1)\pi \quad (5)$$

즉,  $\sqrt{1 + 2g + g^2} = 1 + g \quad (6)$

$$|H_{\min}| = \frac{1}{1+g} \quad (7)$$

$$\text{Maximum : } \omega D = 2n\pi \quad (8)$$

$$\sqrt{1 - 2g + g^2} = 1 - g \quad (9)$$

$$|H_{\max}| = \frac{1}{1-g} \quad (10)$$

$$\frac{H_{\max}}{H_{\min}} = \frac{1+g}{1-g} \quad (11)$$

여기서 만일 loop gain이 0.7( $\approx -3\text{dB}$ )라면 comb filter의 주파수 변화  $\frac{H_{\max}}{H_{\min}} = 1 + \frac{0.7}{1-0.7} = 5.666 = 15\text{dB}$

의 범위 내에서 변화하여 이의 주파수 변화 형태를 그림 4에 나타내었다.

따라서 이러한 comb filter의 잔향시간은 sound open loop를 한번 지날 때마다 decay가  $-20\log|g|\text{dB}$ 이므로

$$RT60 = [60 / (-20\log|g|)] \cdot D \quad (12)$$

로 구해진다.

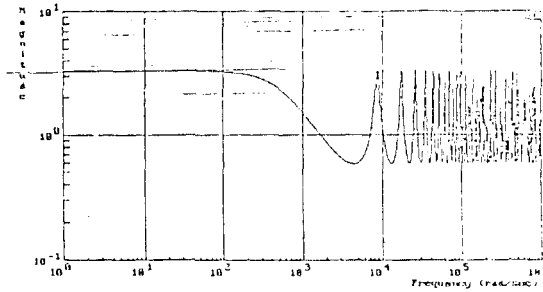


그림 4. 콤 필터의 주파수 특성 곡선  
Fig. 4. Frequency characteristics curve of comb filter

### 2.4 단순한 waveguide 이용

그림 2에서 나타난 후기잔향(subsequent reverberation) 효과를 내기 위해서 그림 3을 응용한 waveguide를 그림 5에 나타내었다.

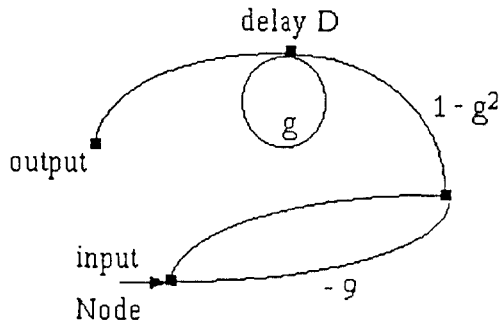


그림 5. 단순한 웨이브가이드  
Fig. 5. simplified waveguide

$$\begin{aligned} \text{출력 } y(n) &= -gx(n) + (1-g^2)gy(n-D) + (1-g^2)x(n-D) \\ &= -gx(n) + (1-g^2)[x(n-D) + gy(n-D)] \end{aligned} \quad (13)$$

이의 impulse response는  $h(n) = -gu(n) + (1-g^2)[u(n-D) + gu(n-2D) + \dots]$  (14)

$$\begin{aligned} H(Z) &= (1-g^2) \frac{Z^{-D}}{1-gZ^{-D}} \quad (15) \\ &= \frac{g-Z^{-D}}{gZ^{-D}-1} = Z^{-D} \frac{gZ^D-1}{gZ^D-1} \\ Z &= e^{j\omega} \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H(e^{j\omega}) &= e^{-j\omega D} \frac{ge^{j\omega D}-1}{ge^{-j\omega D}-1} \\ |e^{-j\omega D}| &= 1 \text{ 이고 } \left| \frac{ge^{j\omega D}-1}{ge^{-j\omega D}-1} \right| = 1 \text{ 이므로} \end{aligned}$$

모든 주파수에 대해서  $|H(e^{j\omega})|=1$ 이므로 all pass filter 형태를 취한다.

### 2.5 새로운 waveguide 제안

앞절에서 언급한 feedback loop와 all-pass 특성을 갖는 waveguide는 여러 단을 병렬로 연결하거나 직렬로 연결했을 경우에 주파수 특성이 평탄하지 않았고 잔향이 자연스럽게 없었다.<sup>(10)</sup> 특히 attenuation coefficient와 delay buffer size의 적절한 선택이 어려웠으며 일부 feedback되는 소리가 원래음과 혼합되어 high frequency 성분이 많이 섞여 들었다.

따라서 이러한 결점을 보완하기 위해서 feedback loop에 간단한 low-pass 특성을 추가시킨 waveguide를 제안하여 실험결과 buffer size의 선택이 수월했고 잡음처럼 들리는 high frequency 성분을 제거할 수 있으며 이의 block도가 그림 6이다.

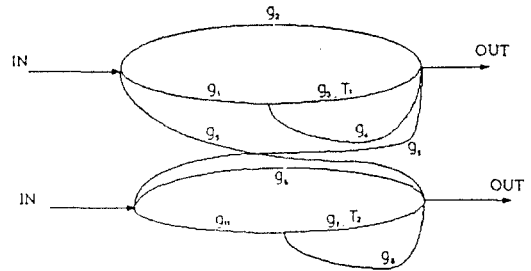


그림 6. 변화 가능한 웨이브가이드  
Fig. 6. Adaptive waveguide

$$\text{loop gain} = g_3 g_4 Z^{-D} \quad (17)$$

$$\text{forward gain} = g_2 g_1 g_3 Z^{-D} \quad (18)$$

$$H(Z) = \frac{g_2 - g_2 g_3 g_4 Z^{-D} + g_1 g_3 Z^{-D}}{1 - g_3 g_4 Z^{-D}} \quad (19)$$

여기서  $g_2$ 항은 직접발생음을 표시하여 음원으로 부터의 direct sound를 의미하며  $g_2 g_3$ 항은 첫번째 반사음과 직접음과의 상쇄 관계를 표시하고  $g_2 g_3 g_4$ 항은 집접음과 첫번째 반사음과 이로 인한 반복음을 의미한다. 즉 이는 후기 잔향효과를 충분히 나타낼 수 있는 에너지를 공급해 준다. 여기서 분모항은 음간의 간섭으로 인해 소멸되는 항을 표시하며  $g_3$ 와  $g_4$ 의 적절한

조화에 의해서 불필요한 고음성분을 줄여 저역통과 필터 효과를 자연스럽게 얻을 수 있다.

만일  $g_1=0.5999$ ,  $g_2=-0.87$ ,  $g_3=0.97$ ,  $g_4=1.09$

라면 이때 주파수 특성곡선은 그림 7과 같으며 주파수의 끝이 불룩한 형태를 취함을 볼 수 있다. 이는 그

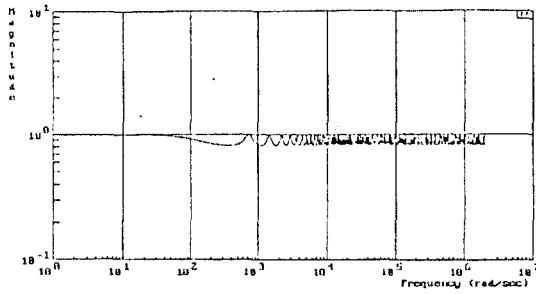


그림 7.  $g_1=0.599$ 일때의 주파수 특성 곡선  
Fig. 7. Frequency characteristics curve in case of  $g_1=0.599$

림 4에서 나타난 반대 위상의 향으로 인해서 주파수간의 간섭 현상이 상쇄되어 반사음과 직접음 및 후기 잔향음간의 충돌현상이 분쇄되어(diffusion 현상) 음질 실험시 사람의 귀에 부드럽고 웅장한 배경음을 생성시켜 준다.

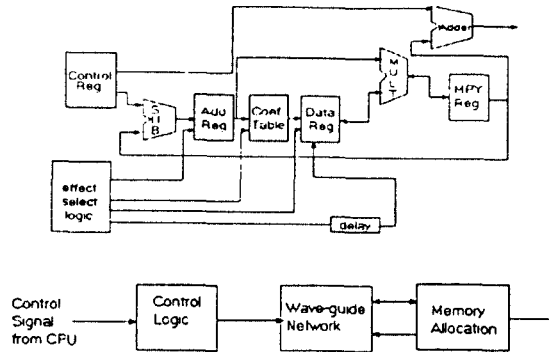
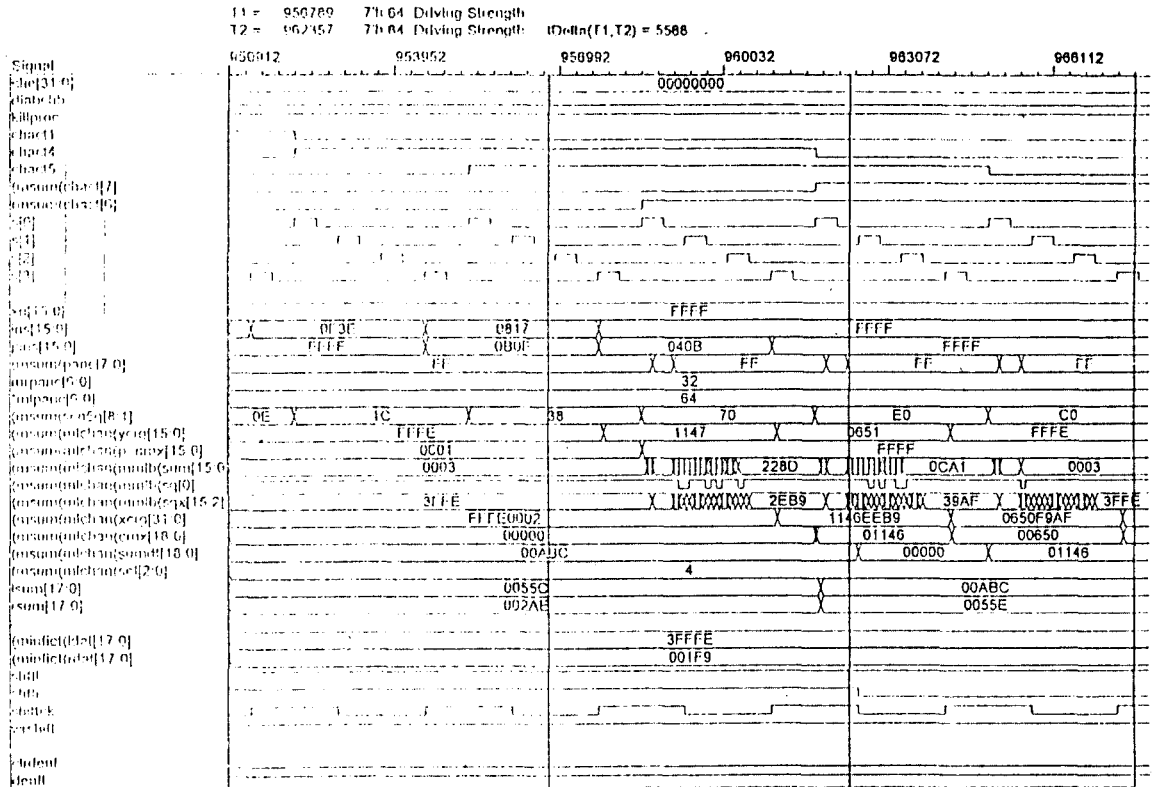


그림 8. 논리 블록도  
Fig. 8. Logic diagram



이를 logic으로 구현하면 그림 8과 같고 이의 simulation timing diagram은 그림 9에 나타내었다.

### III. Computer simulation

Computer simulation을 하기 위한 flow를 그림 10에 나타내었으며 early effect를 내기 위하여 FIR tap수는 5로 정하였다.<sup>(11)(12)</sup>

waveguide를 processor 설계시의 hardware 부당과 계산량의 축소 및 외부 buffer size등을 고려하여 4단의 multiple단을 사용하여 simulation하였다.

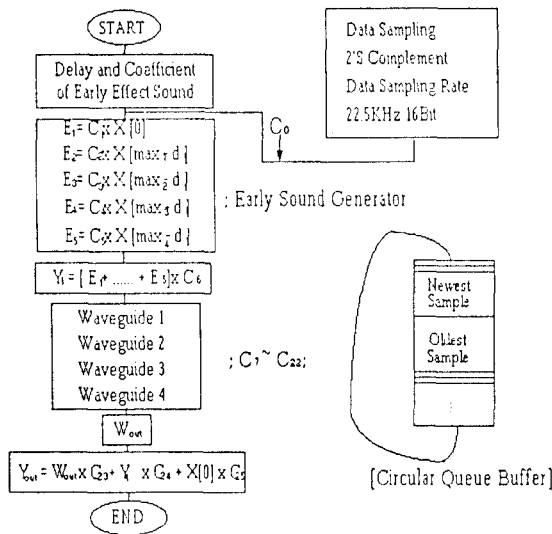


그림 10. 순서도  
Fig. 10. Flow chart

아래 그림 11에는  $g_1=1.093$ ,  $g_2=-0.875$ ,  $g_3=0.3499$ ,  $g_4=0.7249$ ,  $D=190$  일 때의 특성을 나타냈으며 그림 12에는  $g_1=1.0$ ,  $g_2=-1.0$ ,  $g_3=0.974$ ,  $g_4=0.6$ ,  $D=190$ 으로 set한 후 구한 주파수 특성 곡선이고 그림 13는 그림 11과 그림12에서  $D=1$ 로 했을 때 3가지 경우를 합해놓은 그림이다.

따라서 이와 같은 특성을 비교 판단해 볼 때 적절한 parameter 조합과 delay의 선택에 따라 주파수 성분을 조절할 수 있었고 반복된 청각 실험 결과 표 1과 같은 조건일 때 가장 임장 효과가 적절함을 느낄 수 있었다.

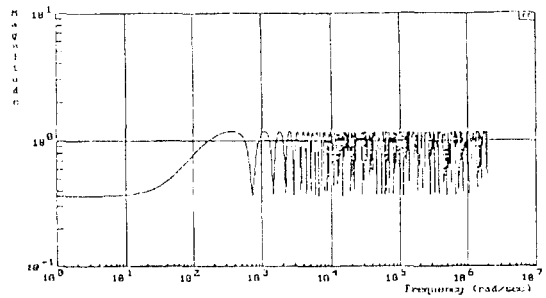


그림 11.  $g_1=1.093$ ,  $g_2=-0.875$  일때의 주파수 특성 곡선  
Fig. 11. Frequency characteristics curve in case  $g_1=1.093$ ,  $g_2=-0.875$

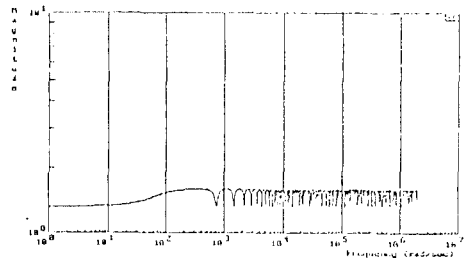


그림 12.  $g_1=1.0$ ,  $g_2=-1.0$  일때의 주파수 특성 곡선  
Fig. 12. Frequency characteristics curve in case  $g_1=1.0$ ,  $g_2=-1.0$

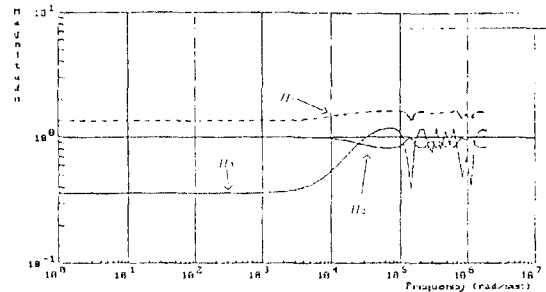


그림 13.  $D=1$ 로 했을 때의 주파수 특성 곡선(그림11, 그림12)  
Fig. 13. Frequency characteristics curve in case  $D=1$ (fig.12, fig.11)

표 1. 가장 적절한 파라미터 선택  
Table 1. Selection of best parameter

	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	delay
1단	1.093	-0.875	0.474	0.7249	140(ms)
2단	1.093	-0.875	0.3499	0.724	70(ms)
3단	1.0	-1.0	0.974	0.6	50(ms)
4단	1.0	-0.3	0.349	0.5	20(ms)

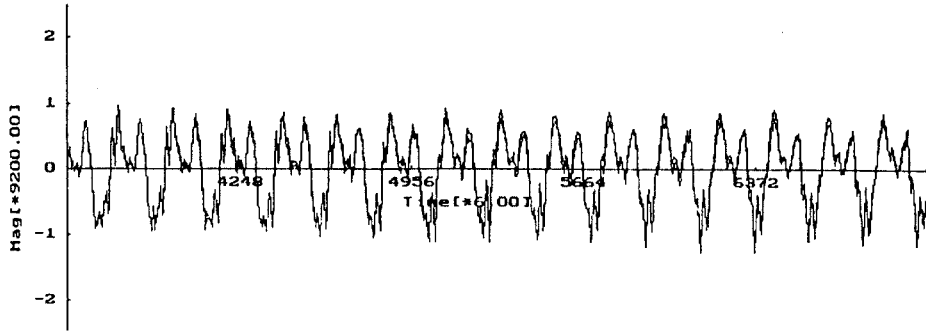


그림 14. 피아노의 시간축상의 파형 비교치  
Fig. 14. Waveform comparison of piano sound in time domain

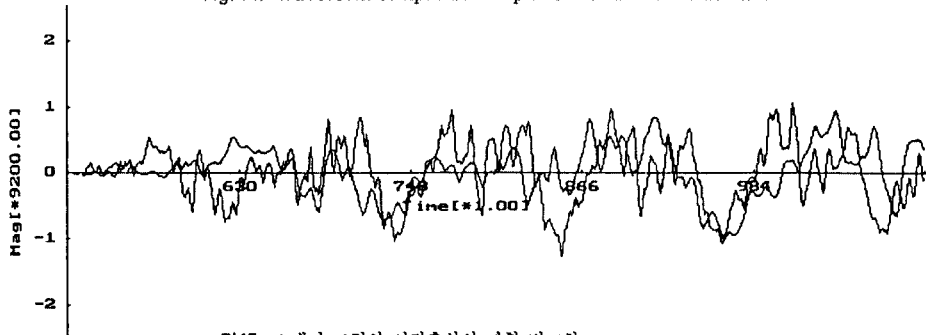


그림 15. 스네어 드럼의 시간축상의 파형 비교치  
Fig. 15. Waveform comparison of snare drum in time domain

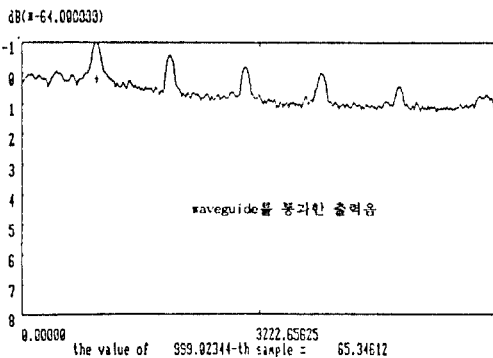
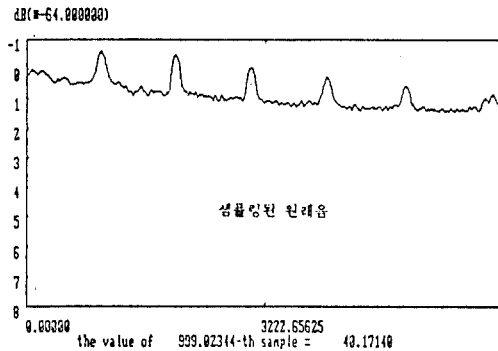


그림 16. 피아노음에 대한 주파수 스펙트럼  
Fig. 16. Frequency spectrum of piano sound

이와 같은 조건에서 아래 그림 14에는 실제 피아노 소리의 비교치를 시간축상에서 나타내었으며 그림 15에는 percussion sound 중에서 가장 소리의 변화가 random한 snare drum의 비교치를 나타내었다.

그림 16은 그림 14 피아노음의 원래음과 본 논문에서 제안된 waveguide를 통과한 데이터의 주파수 특성 분포를 보인 것이다. 먼저 원래음보다 잔향을 가한 음은 기본주파수 성분을 그대로 유지하면서 하모닉스의 모든 주파수 성분이 고르게 추가되어 어떤 특정한 주파수 성분의 왜곡 현상이 없는 것을 볼 수 있으며 이것은 본 waveguide의 주파수 특성의 영향이라 볼 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 잔향 시스템을 구현할 때 가장 효과음에 큰 영향을 미치는 후기잔향효과(subsequent reverberation effect)를 강화하기 위한 알고리즘 분석 및 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였고 이를 위하여 초기 잔향효과를 내기 위하여 FIR filter의 사용이 가장 적절하였으며 waveguide의 coefficient의 변화를 두

기 위한 각 node의 multiplication logic의 추가가 후기잔향 효과의 개선에 주요한 요인으로 작용하였다.

따라서 본 논문에서 제작된 잔향효과 전용 DSP는 청각 실험결과 NEC사와 YAMAHA사 등에서 제작되어 audio 용으로 유통되고 있는 processor에 비하여 손색이 없었으며 multiple한 waveguide의 추가로 더욱 풍부한 후기 잔향을 최소한의 buffer(SRAM)의 사용으로 구현 가능하였다.

또한 본 논문에서 제안한 알고리즘을 응용하면 돌비 효과용 processor와 surround효과 전용 processor의 설계에 기초가 되는 핵심 기술이 될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. W. C. Sabine, Collected Paper Acoustic, Cambridge Mass : Harvard Univ. press, 1992.
2. D. F. Steve, The Secrete of Analog and Digital Synthesis, Third Earth Production, NJ, 1986.
3. J. A. Moorer, Signal Processing of Computer Music : A Survey, Proceeding of The IEEE 65(8), pp.1108-37, 1977.
4. 구재을, 방효창, 윤홍서, 김원후, "효과음 처리를

위한 디지털 잔향 시스템에 관한 연구", 한국음향학회지 11권 6호, 1992.

5. Gray Davis And Ralph Jones, Sound Reinforcement, HANDBOOK YAMAHA, 1987.
6. M. R. Schroeder, Natural Sounding Artificial Reverberation, Journal of The Audio Engineering Society, Vol.10, pp.219-223, 1962.
7. W. C. Sabine, Collected Papers of Acoustic, Reprinted By Dover, NY, 1990.
8. D. R.Thomas, The Science of Sound, Addition, Wesly, 1990
9. M. T. Haoward, Audio Cyclopedia, Third Edition, SAMS, 1974.
10. Julius O.Smith Waveguide Filter Tutorial, ICMC Preceeding, 1987
11. L. L. Beranek, Music Acoustic and Architecture, NY, Wiely, 1990.
12. Haward Massey, Alex Noyes, And Daniel Shklair, A Synthetic's Guide to Acoustic, Ameco Publication, NY, 1987.



丘在乙 (Jae Ul Koo) 정회원

1983년 2월 : 한국항공대학교 통신공학과 졸업(공학사)  
 1986년 3월 : 공군장교 예편  
 1986년~1987년 : 큐닉스 컴퓨터 연구소  
 1988년 2월 : 연세대학교 대학원 전자과 졸업(공학석사)

1987년~1990년 : 한국과학기술원 전자음악 합성기술에 관한 연구 참여

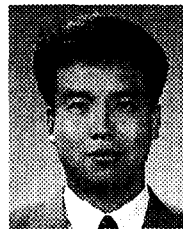
1990년~1993년 : 삼익악기 연구소

1991년~1993년 : 미국 Admos사, 프랑스 DREAM사

현재 : 한국항공대학 박사과정 중

(주) H. W. A Sound Source

\* 주관심분야 : Digital Audio singal Processing 및 멀티미디어 음원 전용 Processor설계



方孝昌 (Hyo Chang Pang) 정회원

현재 : 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과 박사과정  
 제19권 5호 참조



李大寧 (Dae Young Lee)

정회원

현재 : 삼성전자 통신연구소 수석연구원  
제 19권 4호 참조



金元厚 (Won Hoo Kim)

정회원

현재 : 한국항공대학교 항공전자공  
학과 교수  
제 19권 5호 참조