

# FM 방식의 디지털 악기음 합성을 위한 소프트웨어 시뮬레이터 및 파라미터 추출 알고리즘 개발

## (Development of Parameter Extraction Algorithm and Software Simulator For a Digital Music FM Synthesis)

周俊烈\*, 李汶珩\*, 金基斗\*, 洪賢碩\*\*, 趙威德\*\*

(Joon Yul Joo, Moon Hyoung Lee, Ki Doo Kim,  
Hyeon Seog Hong and We Duke Cho)

### 要約

본 논문에서는 먼저 FM 방식을 이용한 악기음을 합성하고자 C 언어를 사용하여 악기음 합성용 소프트웨어 시뮬레이터(software simulator)를 개발하고, 이 시뮬레이터를 이용하여 악기음으로 평가할 수 있는 파라미터의 대략적 범위를 얻어 파라미터 추출을 위한 알고리즘에 적용한다. 또한 FM 방식에 의한 악기음을 합성하기 위하여 필요한 파라미터를 기준되는 악기음의 데이터로부터 시간영역에서의 파형 분석 및 주파수영역에서의 FFT를 이용한 스펙트럼 분석을 통하여 추출할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 끝으로 본 논문에서는 제시한 파라미터 추출 알고리즘을 사용하여 몇 가지 악기에 해당하는 파라미터들을 추출하고, 추출된 파라미터들을 앞서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터에 적용하여 합성된 악기음을 분석 및 평가한다. 합성음의 평가는 합성된 악기음을 직접 듣는 주관적 방법외에, 평가를 보다 객관적이고 공학적으로 행하기 위하여 파라미터 추출시 기준으로 사용한 악기음과 이것으로부터 추출된 파라미터에 의해 FM 합성된 악기음을 시간영역 및 주파수영역에서 비교 분석하였다.

### Abstract

In this paper we develop the software simulator written in a C language for a frequency modulation synthesis and the approximate range of parameters, for a musically satisfactory timbre, obtained by using the software simulator will be applied to develop an algorithm for parameter extraction. For a frequency modulation synthesis, we also develop an algorithm for parameter extraction through waveform analysis in the time domain as well as spectrum analysis using a FFT in the frequency domain. To verify the validity of the developed algorithm as well as software simulator experimentally, we extract parameters for the several music instruments using the suggested algorithm and analyze the synthesized sound by applying the parameters to the software simulator. The evaluation of the synthesized sound is first done by listening the sound directly as a subjective testing. Secondly, to evaluate the synthesized sound objectively with an engineering sense, we compare the synthesized sound with an original one in a time domain and a frequency domain.

### 1. 서론

\* 正會員, 國民大學校 電子工學科,

(Dept. of Elec. Eng., Kookmin Univ.)

\*\* 正會員, 電子部品綜合技術研究所

(Korea Electronics Technology Institute)

接受日字 : 1993年 7月 16日

악기음을 생성하고 합성하는 방법은 디지털 신호처리 기술의 한 응용분야로 지금까지 악기음을 합성하기 위하여 사용되어온 방식은 가산합성(additive synthesis), 감산합성(subtractive synthesis),

PCM(pulse code modulation) 및 FM(frequency modulation)의 4가지 방식이 존재한다.<sup>[3-5]</sup> 요즈음 컴퓨터 사운드 카드에서 많이 사용되는 FM 방식은 1973년 미국 Stanford 대학의 John Chowning에 의해 처음 연구되었고<sup>[3-5]</sup>, 1980년대 중반 야마하(Yamaha) 및 Digital Keyboards 회사에서 상업용 악기음 IC를 개발함으로써 많이 보급된 방식이다.<sup>[5]</sup> 본 방식은 주파수를 변조시키므로써 다양한 스펙트럼을 만들어 실제에 가까운 악기음을 생성하는데, 다른 방식에 비하여 비교적 계산량이 적게 요구되며, 회로 구성이 또한 간단하고 여러 악기음을 만드는데 필요한 파라미터의 수가 적어 메모리를 적게 차지하는 등 효율적이다.

본 논문에서는 먼저 FM 방식을 이용한 악기음 합성하기 위하여 C 언어를 사용하여 악기음 합성용 소프트웨어 시뮬레이터를 개발하고, 이 시뮬레이터를 이용하여 악기음으로 평가할 수 있는 파라미터의 대략적 범위를 얻어 파라미터 추출을 위한 알고리즘에 적용한다. FM 방식을 이용하여 악기음을 합성하기 위해서는 각 악기에 적합한 파라미터가 필요하므로, PCM 방식으로 저장된 악기음 데이터를 시간영역에서의 파형 분석 및 주파수영역에서의 FFT(fast Fourier transform)를 이용한 스펙트럼 분석을 거쳐 필요한 파라미터들을 추출한다. 마지막으로 본 논문에서는 제시한 파라미터 추출 알고리즘을 사용하여 몇가지 악기에 해당하는 파라미터를 추출하고, 추출된 파라미터들을 앞서 개발한 소프트웨어 시뮬레이터에 적용하여 합성된 악기음을 분석 및 평가한다.

## II. FM 방식의 악기음 합성 기본이론

FM 방식은 변조기(modulator)에 의해서 반송기(carrier)의 주파수를 변화시켜 고조파 성분 뿐만 아니라 비고조파 성분을 포함하는 파형을 생성하므로써 다양한 악기음을 만드는데 사용된다. 이 방식은 비교적 계산량이 적으며 회로 구성이 간단하고, 여러 악기음을 만드는데 필요한 파라미터의 수가 적어 메모리를 적게 차지하는 효율적인 방식이다. FM 방식을 표현하는 기본식은 다음과 같다.<sup>[3-5]</sup>

$$F(t) = A \sin[\omega_c t + I \sin(\omega_m t)] \quad (1a)$$

$$= A \sin \left[ \omega_c t + \frac{\Delta \omega}{\omega_m} \sin(\omega_m t) \right] \quad (1b)$$

여기서

A: 최대진폭크기, I: 변조지수, t: 시간

$\omega_c$ : 반송파 각주파수,  $\omega_m$ : 변조파 각주파수,

$\Delta \omega$ : 최대 각주파수 편이

FM 방식에 의한 악기음 합성시 음색을 결정하는 중요한 파라미터인 최대진폭 A 값과 변조지수 I 값은 시간에 따라 변하므로 A(t)와 I(t)로 각각 바꾸어, 식(1)을 다시 쓰면

$$F(t) = A(t) \sin [\omega_c t + I(t) \sin(\omega_m t)] \quad (2)$$

로 표현된다. 반송파 및 sideband 주파수에서의 진폭은 n차 Bessel함수,  $J_n(I(t))$ 로 표현 가능하므로, 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = A(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(I(t)) \sin(\omega_c t + n \omega_m t) \quad (3a)$$

$$= A(t) \left\{ J_0(I(t)) \sin \omega_c t + J_1(I(t)) \left[ \sin(\omega_c + \omega_m)t - \sin(\omega_c - \omega_m)t \right] \right. \\ \left. + J_2(I(t)) \left[ \sin(\omega_c + 2\omega_m)t + \sin(\omega_c - 2\omega_m)t \right] + \dots \right\} \quad (3b)$$

식 (3)에서 변조지수 I(t)는 악기음의 동적 스펙트럼(dynamic spectrum)을 결정한다. 즉, 변조지수 I(t)가 시간에 따라 증가하면 전체 대역폭은 증가하고 임의의 주파수에 해당하는 진폭은 주어진 변조지수 영역에서의 Bessel 함수의 기울기에 따라 감소 혹은 증가한다.<sup>[3,5]</sup> 또한 각 주파수의 성분은  $\omega_c$ ,  $\omega_c + \omega_m$ ,  $\omega_c - \omega_m$ ,  $\omega_c + 2\omega_m$ ,  $\omega_c - 2\omega_m \dots$  으로 전개된다. 대체적으로 악기 파형의 주파수 성분은 기본주파수와 기본주파수의 배수인 고조파들로 구성되기 때문에  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비가 보통 정수비가 되도록 조정해야 한다. 한편 정수비가 되지 않을 경우 타악기와 같이 비고조파 성분으로 구성되는 악기 소리를 만들 수 있다.

음의 3대요소인 음정, 음색, 음량의 관점에서 FM 방식을 해석하면, 음정은  $\omega_c$ 의 값에 의하여 결정되며 음색은  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비 그리고 변조지수 I(t)와 악기음 출력 A(t) 값을 조절하여 변화시킬 수 있고, 음량은 악기음 출력 A(t)의 크기에 의하여 결정된다. 또한 FM 방식에서는 미세한 음색의 변화를 주기 위해 음정을 시간에 따라 미세하게 변화시키는 비브라토(vibrato) 및 음량을 시간에 따라 미세하게 변화시키는 트레몰로(tremolo) 기법이 사용된다. III장에서부터 자주 언급되는 FM 방식의 악기음 합성시 음색에 영향을 미치는 파라미터들은 반송 주파수와 변조 주파수의 비인  $\omega_c : \omega_m$ , 반송기 출력의 진폭변화를 나타내는 A(t), 변조기 출력의 진폭변화를 보여주는 I(t), 그리고 비브라토 및 트레몰로에 관계되는 값들이다.

### Ⅲ. FM 방식의 악기음 합성을 위한 소프트웨어 시뮬레이터

FM 방식을 이용하여 악기음을 합성하고자 매킨토시(Macintosh) 컴퓨터에서<sup>[8,9]</sup> C 언어와 Assembly 언어를 사용하여 소프트웨어 시뮬레이터(software simulator)를 개발하였다. 본 시뮬레이터는 IV장에 기술된 바와 같이 파라미터의 대략적 범위를 실험적으로 결정하기 위해 사용되고, 또한 제한된 추출 알고리즘에 의하여 추출된 파라미터들이 FM 합성 악기음에 미치는 영향을 분석한다. 동작 알고리즘의 주된 특징은 ASIC(Application Specific Integrated Circuit) 설계에 대비하여 하드웨어 구현이 용이하도록 한 점이다. 한 예로 컴퓨터 프로그램에서 직접 sine 함수를 사용하지 않고 테이블참조 방식이나 recursive 방식을 도입하여 sine 값을 계산하였으며, 또한 모든 데이터를 고정 소숫점으로 표현하였다. 악기음의 샘플링(sampling) 주파수는 7kHz, 11kHz, 22kHz, 44kHz, 50kHz 중에서 선택하고, 데이터의 해상도는 8 비트(bit) 혹은 16 비트 중에서 선택이 가능하도록 하였다.

FM 방식에 의한 악기음 합성의 기본식인 식 (2)에 식 (4)로 표현된 비브라토 항과 식 (5)로 표현된 트레몰로 항을 추가하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$F_{vib}(t) = D_{vib} \sin \omega_{vib} t \tag{4}$$

여기서  $D_{vib}$ 는 비브라토 depth를 의미한다.

$$F_{tre}(t) = O_{tre} + D_{tre} \sin \omega_{tre} t \tag{5}$$

여기서  $O_{tre}$ 와  $D_{tre}$ 는 각각 트레몰로 offset과 depth를 나타낸다.

$$F(t) = A(t) \sin(\omega_c t + F_{vib}(t) + I(t) \sin(\omega_{mt})) F_{tre}(t) \tag{6}$$

식 (6)을 구현하기 위하여 그림 1에 보인 바와 같은 기본음 발생기(Basic Sound Generator)를 정의한다.

엔벨로프 발생기(envelope generator), 위상 발생기(phase generator), 정현파 발생기(sine wave generator) 등으로 이루어진 기본음 발생기는 외부와 위상 입력(phase input)단 및 출력단으로 연결되며, 샘플링 시간 단위로 동작하도록 구성하였다. 특히 위상 발생기, 정현파 발생기, 엔벨로프 발생기 등의 동작 알고리즘은 ASIC 설계에 대비하여 하드웨어

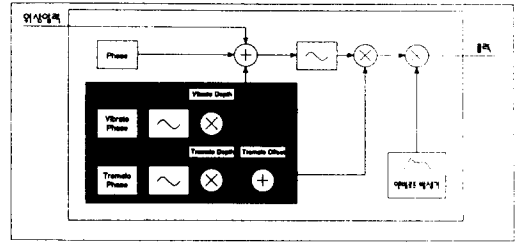


그림 1. 기본음 발생기의 내부구조

Fig. 1. Internal structure of a basic sound generator.

구현이 용이하도록 개발하였다. FM 방식을 이용한 악기음 합성은 두개의 기본음 발생기를 직렬로 연결하여 구현할 수 있다. 이때 앞 단의 기본음 발생기는 변조기로 작용하고 뒷 단은 반송기로 작용하게 되어 식 (6)과 같은 악기음의 합성이 가능하다.

#### 1. 위상 발생기

위상 발생기는 테이블 참조(table look-up) 방식을 이용한 정현파 발생기에 사용되는 위상을 발생시키는 역할을 한다. 위상  $\phi$ 는 음의 높이를 결정하는 값  $\omega$  ( $= 2\pi f$ )와 샘플링 주파수  $f_s$ 에 의해 변화하는 값  $t$ 의 곱으로 표현된다. 한 음이 유지되는 동안  $\omega$ 의 값은 일정하므로 위상값의 계산을 식 (7)과 같이 위상증분  $\Delta\phi$ 을 사용하여 표현하면 매 샘플링 시간마다 한번의 덧셈만으로 위상값을 얻을 수 있다.

$$\phi \leftarrow \phi + \Delta\phi \tag{7a}$$

여기서

$$\Delta\phi = 2\pi f / f_s \tag{7b}$$

위와 같이 모든 음의 높이를 위상증분  $\Delta\phi$ 으로써 지정하는 방법 외에, 한 옥타브(octave)에만 한정하여 음의 높이를 위상증분  $\Delta\phi_1$ 으로써 지정하고 따로 옥타브 정보를 두어 음의 높이를 조정하는 것도 가능하다. 옥타브가 배로 증가할 때 마다 음의 높이는 두배가 되므로 위상의 계산식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi \leftarrow \phi + \Delta\phi_1 * 2^{oct} \tag{8}$$

여기서

$\Delta\phi_1$  : 한개의 옥타브에 한정된 위상 증분  
oct : 옥타브

정현파 발생기의 입력으로 사용되는 위상 값을  $0 \leq \phi < 2\pi$ 의 범위 안에 있도록 하기 위해, 위상증분의 계산을 식 (7b)와 같이 수행하는 대신 참조 테이블의 데이터 갯수에 따라 식 (9)와 같이 조정한다면  $2\pi$ 의 범위를 벗어나는 위상을 자동으로 범위안에 들어오게 할 수 있다.

$$\Delta \phi_2 = 2^n * f / f_c \tag{9}$$

여기서 n은 테이블의 데이터를 지정하는 번지수의 비트수를 나타낸다. 예를 들어 참조 테이블의 총 데이터 갯수가 4,096개(n=12)라면, 라디안(radian)으로 0인 위상은 번지수 0으로, 라디안으로  $\pi$ 인 위상은 번지수 2,048로 각기 대응된다. 계산상으로  $3\pi$ 처럼 위상 값이 참조 테이블의 번지수 범위를 벗어날 경우에도, 정수부분에서 하위 n개의 비트만을 취하게 되면 위상 값  $\pi$ 를 지정하는 번지수와 동일한 2,048이 된다. 한편 FM 방식에서 반송 주파수  $\omega_c$ 와 변조 주파수  $\omega_m$ 의 비가 정수비가 될 경우, 즉  $\omega_c / \omega_m = N_1 / N_2$ 에서  $N_1$ 과  $N_2$ 가 정수일 경우, 다양한 고조파가 발생한다.<sup>3</sup> 따라서  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 최대 공약수를 고정 주파수로 설정하고, 반송기와 변조기 모두 고정 주파수의 정수배 주파수를 사용하도록 구성하였다.

### 2. 정현파 발생기

정현파 발생기는 변조용 및 반송용 정현파의 발생뿐만 아니라, 음정을 시간에 따라 미세하게 변화시키기 위한 비브라토 및 음량에 주기적 떨림 효과를 내기 위한 트레몰로를 발생시키기 위하여 사용된다. 정현파를 만들어내기 위하여 테이블참조 방식과 recursive 방식을 도입하고, 각각의 특성을 논한뒤 요구에 적합한 방식을 선택한다. 정현파에는 sine과 cosine 두가지 파형이 존재하나, 본 방식을 수행하는데 차이점이 없으므로 편의상 sine을 택한다.

#### 1) 테이블 참조 방식

테이블 참조 방식은 미리 계산된 정현파의 값을 테이블 형태로 저장해 놓고 입력된 위상에 상응하는 정현파의 값을 구하는 방식이다. 그림 2는 본 방식에 의한 정현파 발생기를 보여준다.

한 예로 위상값( $\phi = \pi / 2$ )을 고정 소숫점(fixed point)으로 표현하여 sine 테이블의 번지수를 구하는 과정을 간단히 언급하면 다음과 같다. 그림 3은 sine 테이블의 데이터 갯수가 1,024개(n=10)일 때 위상값으로부터 테이블의 번지수를 추출하는 과정을 보여준다. 위상은 0부터  $2\pi$ 까지의 값을 취할 수 있으므로 정수 부분에서 3비트를 취하고 소수부분에서 나머지

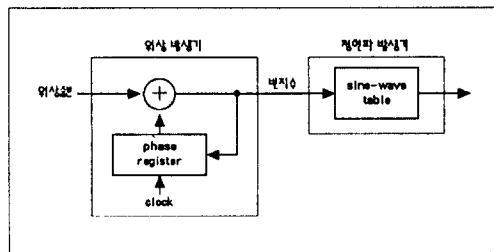


그림 2. 테이블 참조 방식에 의한 정현파 발생기  
Fig. 2. Sine wave generator using the table look-up method.

7비트를 취해 모두 10비트의 sine 테이블 번지수를 얻는다. 소수 8번째 비트를 반올림하여 테이블의 번지수에 사용하면 더 나은 결과를 얻을 수 있다.<sup>4</sup> 한편 다음과 같은 sine 파형의 대칭 특성을 이용하면 sine 테이블을 더욱 효율적으로 사용할 수 있다. 즉 위상  $\phi$ 의 범위가 0에서  $\pi / 2$ 까지의 테이블 값만으로 충분하다.

$$\sin(\phi) = -\sin(2\pi - \phi), \sin(\phi) = \sin(\pi - \phi) \tag{10}$$

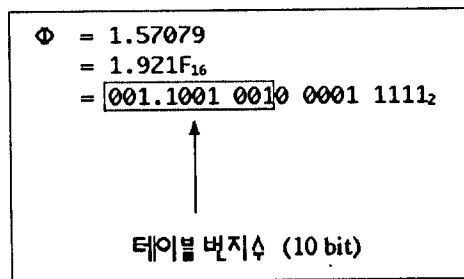


그림 3. 위상값으로부터 정현파 테이블의 번지수 설정  
Fig. 3. Extracting the address of sine table from phase value.

#### 2) Recursive 방식

Recursive 방식은 식 (11)과 식 (12)로 각각 표현된 sine의 덧셈정리와 cosine의 덧셈정리로 부터 구한 식 (13)에 의해 sine 값을 반복적으로 계산하는 방식이다. 본 방식을 실행하기 위한 회로는 그림 4와 같이 매우 간단하다.<sup>5</sup>

단 한번의 곱셈과 단 한번의 덧셈만으로 sine 값을 정확하게 계산할 수 있고, 현재의 값을 구하기 위해 이전 값을 두개만 기억하면 되므로 메모리를 크게 절약할 수 있다.

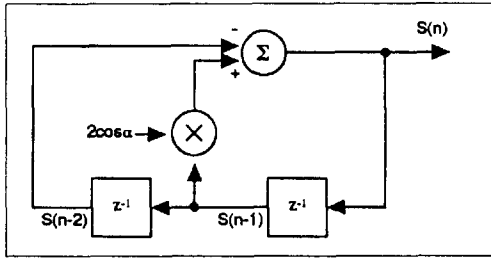


그림 4. 매 위상증분마다 단 한번의 곱셈이 요구되는 반복적인 정현파 발생기

Fig. 4. Recursive sine-wave generator with only one multiplication per cycle.

$$C(n+1) = C(n)\cos\alpha - S(n)\sin\alpha \quad (11)$$

$$S(n+1) = C(n)\sin\alpha + S(n)\cos\alpha \quad (12)$$

여기서  $\alpha$  는 위상 증분을 나타내고,  $S(n)$ 과  $C(n)$ 는 각각  $\sin(n\alpha)$ 와  $\cos(n\alpha)$ 를 의미한다.

$$S(n) = 2\cos\alpha S(n-1) - S(n-2) \quad (13)$$

FM 방식에 의한 악기음 합성에서 반송파는 변조파와 비브라토의 영향으로 위상의 증분인  $\alpha$  값이 일정하지 않으므로 recursive 방식을 사용할 수 없다. 반면에 변조파나 비브라토 및 트레몰로 효과를 위한 파형의 경우 위상이 외부의 영향을 받지 않고 선형적으로 변화하므로, 즉 위상증분이 일정하기 때문에, recursive 방식을 사용하면 계산 속도, 회로 구성 및 메모리 용량면에서 매우 효율적이다. 그러나 비브라토 및 트레몰로 효과를 내기 위해 각각 약 6.4Hz와 약 3.7Hz의 비교적 낮은 주파수의 정현파가 요구되므로 위상증분 값이 작아져 한 주기의 정현파를 생성하기 위해서는 많은 반복연산이 필요하게 된다. Recursive 방식은 연산 횟수가 늘어나면 그만큼 오차도 누적되기 때문에 오차가 설정된 범위를 벗어나

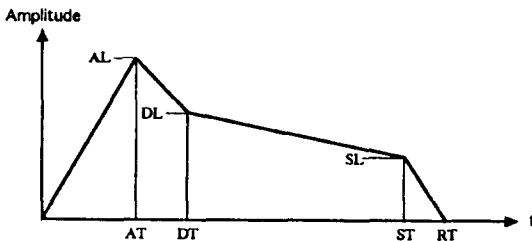


그림 5. 5개의 직선 구간으로 근사화 시킨 엔벨로프  
Fig. 5. Envelope approximated by 5 line segments.

지 않도록 연산 비트수를 늘려 정확한 계산을 할 필요가 있다.

### 3. 엔벨로프 발생기

그림 5는 식 (2)에서의  $A(t)$  (혹은  $I(t)$ ) 값을 5개의 구간에서 직선으로 근사화시킨 엔벨로프를 보여주며, 이것은 엔벨로프 발생기에 의하여 생성된다.<sup>10,12</sup>

엔벨로프를 결정하는 파라미터들의 정의는 다음과 같다.

- AL(attack level) : 엔벨로프의 최대 진폭값
- DL(decay level) : decay 상태가 끝나는 시간에서의 진폭값
- SL(sustain level) : sustain 상태가 끝나는 시간에서의 진폭값
- AT(attack time) : attack 레벨에서의 시간
- DT(decay time) : decay 상태가 끝나는 시간
- ST(sustain time) : sustain 상태가 끝나는 시간 (= key off 시간)
- RT(release time) : 엔벨로프의 최종 소멸시간

## IV. 파라미터의 추출 알고리즘

1. 예비실험에 의한 파라미터의 대략적 범위 결정  
먼저 체계적 추출 알고리즘을 기술하기 앞서 Ⅲ장에서 소프트웨어 시뮬레이터를 사용하여 공학적 판단이 다소 결여된 파라미터의 대략적 범위를 실험적으로 알아낸다. 파라미터들의 영향을 조사하기 위하여 지정한 파라미터를 제외한 나머지 값들을 고정시키고, 선정된 파라미터의 값을 변화시켜 가면서 각 파라미터에 따른 영향을 실험적으로 조사하였다. 방법은 시간영역에서의 파형 및 주파수영역에서의 스펙트럼을 분석하고, 소리를 직접 들어 주관적으로 판단하였다. 실험에서 사용한 반송 주파수  $f_c (= \omega_c / 2\pi)$ 는 440Hz로 음악에서 기본이 되는  $A_4$  음을 사용하였다. 한편 그림 6, 7은 Ⅲ장에서 소프트웨어 시뮬레이터를 통한 시뮬레이션 결과이다. 이 결과를 그림으로 나타내기 위하여 매킨토시 컴퓨터의 Photoshop 및 SoundEdit 기능을 이용하였다.

1)  $\omega$  와  $\omega_m$ 의 비에 따른 영향  
변조지수 I를 상수 ( $I=2.0$ )로 고정시키고,  $\omega$  와  $\omega_m$ 의 비를 4가지로 변화시켜 실험하였으며 결과는 그림 6과 같다.  $\omega$  와  $\omega_m$ 의 비가 커지면 각 고조파 성분은 높은 주파수에 위치하여 음색이 날카로워진다. 그림 6(a)와 같이  $\omega$  와  $\omega_m$ 의 비가 적은 경우는 낮고 무거운 음색이 나지만, 비가 1:4인 그림 6(d)의 경우는 악기음 소리로 평가하기가 다소 어려워진다.

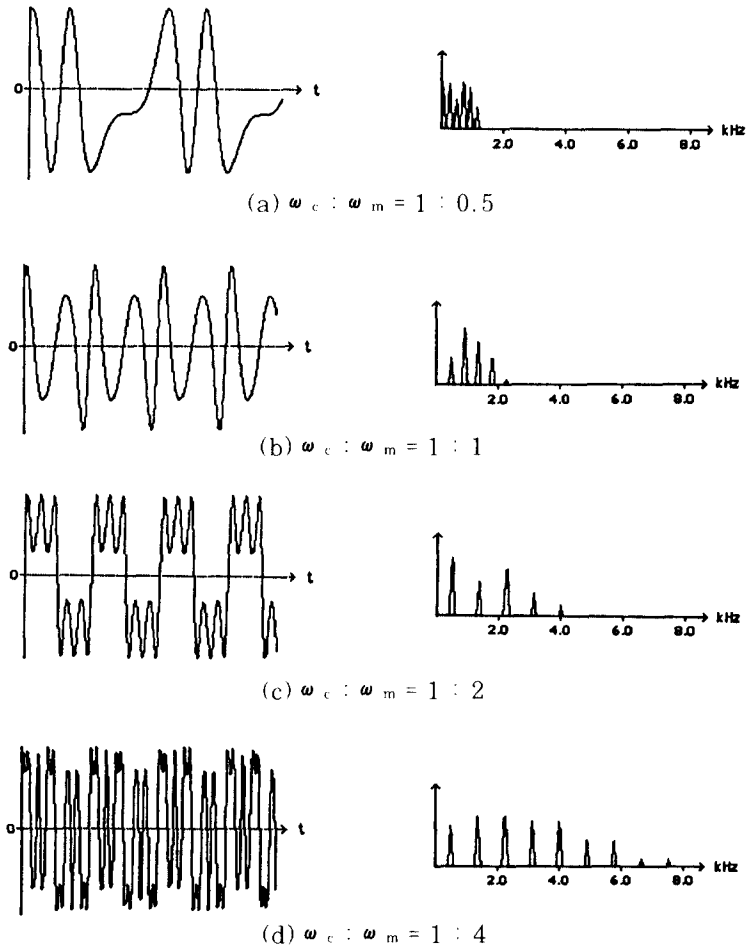


그림 6. 반송주파수  $\omega_c$ 와 변조주파수  $\omega_m$ 의 여러가지 비에 따른 파형 및 스펙트럼  
 Fig. 6. Waveform and spectrum for various ratios of the carrier to the modulating frequency.

실험을 통해  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비는 1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3 정도가 적합한 것으로 나타났다.

2) 변조지수 I(t)의 변화에 따른 영향

그림 7은  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비를 1:1로 고정시키고 변조지수 I의 값을 0.5에서 5까지 변화시켜 실험한 결과를 보여준다. I 값이 크면 변조율이 큰 경우이므로 파형은 많은 고조파 성분을 포함하게 되며 소리는 높은 음으로 변화된다. 그러나  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비에 따른 실험에서 그 비가 커질 경우 발생하는 음색과는 다르게 안정된 밝고 높은 음이 난다. 반대로 I 값이 작은 경우는 음이 낮고 어두운 음색이 나타난다. 즉 변조지수 I 값을 시간에 따라 적절히 조절하면 원하는 음색을 만들수 있다. 실험에서 얻은 I 값의 적합한 범위는 다음과 같으며 이 범위들은 주관적인 평가로 채택된

값들이다.

$\omega_c : \omega_m = 1 : 0.5$ 인 경우  $I < 1.5$ .

$\omega_c : \omega_m = 1 : 1$ 인 경우  $I < 4.5$

$\omega_c : \omega_m = 1 : 2$ 인 경우  $I < 3.5$ .

$\omega_c : \omega_m = 1 : 3$ 인 경우  $I < 2.5$

3) 반송기 출력의 진폭 변화 A(t)에 의한 영향

식 (2)에서 반송기의 출력은 A(t) 항과 곱해지는 데, 이 A(t)의 값이 악기음 출력의 엔벨로프를 형성하는 파라미터를 결정한다. 이것은 악기음의 출력 크기를 시간에 따라 변화시키는 파라미터로서 자연적인 악기소리의 크기 변화를 느끼게 해주며, 악기 파형을 전체 시간영역에서 해석하므로써 각 악기의 특징에 맞는 A(t)의 파라미터 값을 쉽게 얻을 수 있다.

4) 비브라토 및 트레몰로의 영향

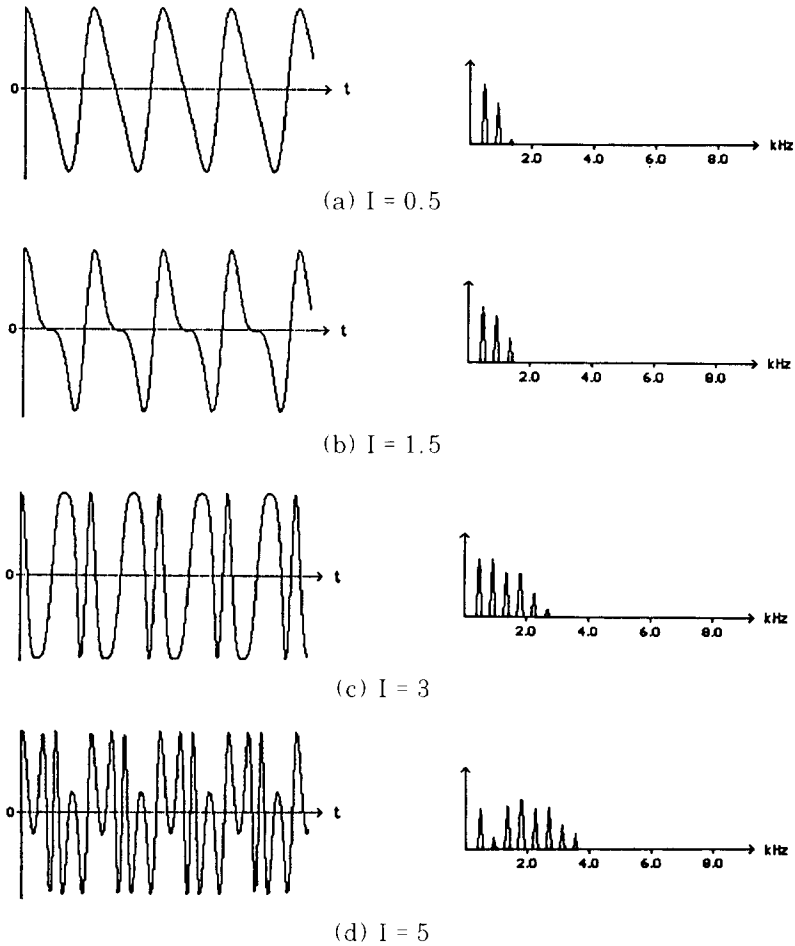


그림 7. 여러가지 변조지수  $I$ 에 따른 파형 및 스펙트럼

Fig. 7. Waveform and spectrum for various values of modulation index  $I$ .

비브라토 및 트레몰로는 보다 더 자연적인 악기에 접근하기 위해 첨가되는 파라미터로서 연주자의 기교에 따라 약간씩 변화하는 값이므로 악기마다 고정된 값은 없지만 보통 3~7Hz 정도의 낮은 주파수로 변화됨을 실험적으로 얻을 수 있다. 비브라토는 음정의 미세한 시간적 변화이므로 FFT를 통한 스펙트럼 결과로는 확인하기 어렵고, 소리를 직접 듣는 방법으로 약 7Hz 정도 변화시키므로써 실제 악기에 가까운 음을 만들 수 있다. 트레몰로는 음량의 미세한 시간적 변화로 시간영역에서 파형의 변화를 확인할 수 있지만(그림 11~12 참조), 보다 좋은 방법은 여러 파라미터들에 대해 직접 들어 평가하는 것이다. 기준 음량에 대해 트레몰로에 의한 변화는 약  $\pm 8\%$  정도가 적절하며, 약 4Hz 정도의 변화로 자연적인 트레몰로 효과를 얻을 수 있다.

## 2. 파형 분석 및 스펙트럼 분석에 의한 파라미터 추출

FM 방식에서 필요한 파라미터 값을 추출하기 위하여 PCM 방식으로 저장된 악기의 파형 데이터에 대하여 시간영역에서의 파형 분석 및 주파수영역에서의 FFT를 이용한 스펙트럼 분석을 행한다.  $A(t)$ 를 구성하는 파라미터들은 음량의 시간적 변화를 결정하므로 시간영역에서 악기음 파형의 엔벨로프를 검출하므로써 추출할 수 있다. 변조지수  $I(t)$ 를 구성하는 파라미터들은 악기음의 스펙트럼 변화를 결정하는데,  $I(t)$  값이 시간에 따라 증가하면 전체 대역폭은 증가하고 임의의 주파수에 해당하는 진폭은 주어진 변조지수 영역에서의 Bessel 함수의 기울기에 따라 감소 혹은 증가한다. 이러한 특징에 근거하여 악기음 파형을 주파수영역에서 분석하면  $I(t)$ 를 구성하는 파라미

터 값을 추출할 수 있다. 비브라토 및 트레몰로 효과를 결정짓는 파라미터는 연주자의 감정에 따른 악기음의 미세한 변화를 나타내므로, 실험을 통해 적절한 값을 추출한다.

1) 시간영역에서의 파형 분석

시간영역에서의 파형분석을 통하여 반송기단 출력의 엔빌로프 변화인  $A(t)$ 를 결정하는 파라미터를 추출할 수 있다. 시간영역에서 매 샘플링 주파수( $=f_s$ )마다 악기음 데이터를 샘플링한 데이터로부터 엔빌로프를 추출하기 위해서는 먼저 저장된 각 악기음의 기본 주파수( $=f_0$ )를 알아야 한다. 기본주파수는 FFT를 이용한 스펙트럼 분석을 통하여 얻을 수 있는데, 자세한 내용은 주파수영역 분석에서 기술한다. 일단 기본 주파수를 알게 되면 엔빌로프를 구성하는 데이터 열은  $f_s/f_0$  크기만큼 반복되어 나온다. 따라서 먼저 악기음 데이터 중에서 최대 크기를 갖는 데이터의 위치를 찾고, 이 위치로부터  $f_s/f_0$  크기만큼 이동하면서 각 위치에서의 데이터 값을 구하면 악기음 출력의 엔빌로프를 얻게 된다. 이와같이 얻은 엔빌로프를 다음에 제시한 바와 같은 3가지 엔빌로프 유형중 한가지로 분류한다. 각 유형의 특징만을 제시하며 그 외의 것은 3.3절에서의 엔빌로프를 결정하는 파라미터의 정의에 준한다.

유형 1: 악기음 데이터의 최대값이 위치하는 시간이 전체 시간의 30% 미만인 경우로 주요 파라미터의 정의는 다음과 같다.

$$DL = SL = \text{최대값의 } 90\%$$

$$ST = \text{최대값의 } 70\% \text{에 해당하는 크기가 } DT \text{ 이후 처음으로 존재하는 시간}$$

유형 2: 악기음 데이터의 최대값이 위치하는 시간이 전체시간의 30% 이상인 경우로 주요 파라미터의 정의는 다음과 같다.

$$AL = DL = SL = \text{악기음의 최대값}$$

$$AT = DT = \text{최대값의 } 90\% \text{에 해당하는 크기가 처음으로 존재하는 시간}$$

$$ST = \text{최대값의 } 70\% \text{ 값이 위치하는 시간으로서 } DT \text{ 이후 가장 먼저 존재하는 시간}$$

유형 3: 음향악기중 피아노와 같이 건반이 눌러져 악기음이 발생한 후 시간에 따라 악기음의 크기가 점차 감소하는 경우에 사용되며, 유형 1, 2로 분류하기 전 먼저 조사를 한다.

유형 3으로 채택하는 기준은 다음과 같다. 먼저 전체 데이터를 5개의 그룹으로 나누고 각 그룹에서 최대값을 찾는다. 이때 각 그룹의 최대값 크기가 점차 감소하면 유형 3으로 분류하고, 주요 파라미터를 다음과 같이 정의한다.

$$AL = \text{첫 그룹의 최대값, } DL = \text{세번째 그룹의 최대값, } SL = 0$$

$$ST = RT = \text{악기음의 전체시간}$$

2) 주파수영역에서의 스펙트럼 분석

주파수영역에서의 스펙트럼 분석은 악기음의 기본 주파수를 찾고 변조단 출력의 엔빌로프를 구성하는  $I(t)$ 의 파라미터 및  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비를 추출하기 위함이다. 분석 과정은 먼저 악기음 데이터를 FFT로써 주파수 영역의 데이터로 변환시켜 기본주파수를 찾는다. 기본주파수를 알게 되면 각 고조파 성분의 크기를 얻을 수 있고, 기본파와 고조파 성분의 크기를 비교하면  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비를 구할 수 있다. 또한 각 고조파 성분 크기의 시간 변화를 조사하면  $I(t)$ 의 파라미터 추출이 가능하다.

가) 기본주파수의 추출: 먼저 악기음 데이터를 FFT로써 주파수영역의 데이터로 전환한다. FFT를 사용시 주파수 분해능이 우수해야 기본주파수를 추출하는데 오차가 적으므로 본 논문에서는 2048 FFT를 수행한다. 실제 악기음은 거의 주기적 함수에 가깝기 때문에 악기음 데이터를 주파수영역에서 살펴보면 기본주파수와 기본주파수의 배수가 되는 고조파가 존재한다. 기본주파수는 가장 낮은 주파수영역에 존재하는 주파수이지만 악기음 데이터는 완전한 주기함수가 아니며, 양자화 오차 등에 의해 많은 주파수 성분들을 포함한다. 따라서 오차로 인하여 존재하는 주파수 성분과 기본주파수 성분을 구분하기 위해 먼저 FFT 결과 중 가장 큰 값을 찾고, 이 값의 약 10% 이상되는 값만을 악기음의 주파수 성분으로 취한다.

나) 기본파 및 고조파 성분의 크기 추출: 일단 기본주파수를 찾아내면 기본주파수의 배수인 고조파를 쉽게 찾을 수 있다. 기본파 및 고조파 성분의 크기를 추출하는 이유는  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비 및  $I(t)$ 의 파라미터를 추출하기 위함이다.  $I(t)$ 의 파라미터를 추출하기 위해서는 일정 시간 간격으로 FFT 결과가 필요한데, 일단 기본주파수를 찾게 되면 고조파 성분은 기본주파수의 2배, 3배, ... 의 주파수에 존재하므로 많은 수의 FFT가 필요하지 않다. 한편 시간 간격 약 0.05초 이내에서는 시간과 주파수축에 대한 3차원 스펙트럼의 변화가 거의 없으므로, FFT를 수행하기 위한 데이터 사이의 간격은 다소 여유를 둔 0.01초로 한다. 따라서 본 알고리즘을 수행하기 위하여 0.01초 간격으로 512개의 악기음 데이터에 대하여 FFT를 수행하여 이미 알고 있는 기본주파수의 정수배에 해당하는 고조파 성분의 크기를 찾아낸다.

다)  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비 추출: 본 논문에서 고려한  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비는 편의상 4가지(1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3)



로, 4가지를 구분하기 위해서 기본파 및 고조파 성분의 크기를 비교한다. 기본주파수를  $f_0$ 라 할 경우  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비가  $1:n(n=1,2,3)$ 이라면  $f_0, (1+n)f_0, (1+2n)f_0, (1+3n)f_0, \dots$ 의 주파수 성분들이 존재하는데, 이것은 Bessel 함수로 표현된 식 (3)에 의하여 명백히 알 수 있다. 한편  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비가  $1:0.5$ 라면  $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0, \dots$ 의 주파수 성분중  $4f_0$ 에서의 크기만 아주 작게 되는데, 이것은  $4f_0$ 의 주파수 성분 크기를 결정하는 Bessel 함수의 값이  $I(1.5)$ 경우에 아주 작기 때문이다. 이러한 특징을 이용하면  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비를 구할 수 있다.

라)  $I(t)$ 의 파라미터 추출: 변조지수  $I(t)$ 를 구성하는 파라미터들은 악기음의 스펙트럼 변화를 결정하는데,  $I(t)$  값이 시간에 따라 증가하면 전체 대역폭은 증가하고 임의의 주파수에 해당하는 진폭은 주어진 변조지수 영역에서 Bessel 함수의 기울기에 따라 감소 혹은 증가한다. 이러한 특징을 이용하여 원하는  $I(t)$ 의 파라미터를 얻을 수 있다. 예를들어  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비가  $1:1$ 인 경우  $4f_0$ 에서의 진폭은  $I(4.9)$  범위에서  $I$ 의 값이 증가함에 따라 증가하는 특징을 가지고 있다. 이것은  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비가  $1:1$ 인 경우  $4f_0$ 에서의 진폭을 결정하는 Bessel 함수 ( $J_{3+J_3}$ )의 값이  $I(4.9)$  범위에서 증가하기 때문이다. 따라서 이 경우  $4f_0$ 에서의 진폭 변화로부터  $I(t)$ 의 엔빌로프를 얻을 수 있다. 다시 말해 기본파 및 각 고조파의 진폭을 구한후  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비가 결정되면, 해당하는  $I$  값의 변화와 대응되는 주파수 성분 크기의 시간에 따른 변화로부터  $I(t)$ 의 엔빌로프를 구한다.  $\omega_c$ 와  $\omega_m$ 의 비에 따른 4가지 경우에 대하여  $I$  값의 변화와 대응되는 주파수 성분 및 주파수 성분의 크기를 결정하는 Bessel 함수의 값을 정리하면 표1과 같다.

이미 언급한  $A(t)$ 의 파라미터 추출 경우와 마찬가지로  $I(t)$ 의 엔빌로프를 적합한 유형으로 분류하는데 유형 1~3은  $A(t)$ 의 경우와 같고, 새로이 유형 4를

표 1.  $I$  값의 변화와 대응되는 주파수 성분 및 주파수 성분의 크기를 결정하는 Bessel 함수의 값

Table 1. Frequency components corresponding to the variation of  $I$  and Bessel function values for determining the magnitude at each frequency component.

$\omega_c$ 와 $\omega_m$ 의 주파수 비	$I$ 값의 변화와 대응되는 주파수 성분	주파수 성분의 크기를 결정하는 Bessel 함수의 값
1 : 0.5	$3f_0$	$J_3 - J_4$
1 : 1	$4f_0$	$J_3 + J_3$
1 : 2	$5f_0$	$J_2 - J_3$
1 : 3	$7f_0$	$J_2$

첨가한다. 유형 4는 악기음의 처음 위치에서부터 많은 고조파 성분이 존재하며 1의 값이 처음에 0이 아닌 경우에 적용된다. 유형 4에서 주요 파라미터의 정의는 다음과 같다.

AL = DL = SL = 악기음의 최대값.

AT = DT = 0

ST = 최대값의 70%에 해당하는 크기가 처음으로 존재하는 시간

### V. 파라미터 추출 및 시뮬레이션

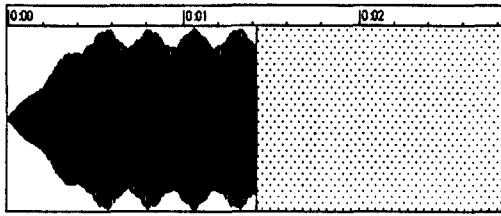
본 논문에서 대상 악기는 첼로, 트럼펫, 피아노이며, 로랜드 회사의 음원 모듈인 사운드 캠퍼스와 매킨토시 컴퓨터에서의 악기음 데이터를 기준으로 하였다. 이때 악기음의 분해능은 8 비트이고 샘플링 주파수는 11KHz이다. 3개의 악기음 데이터를 가지고 IV장에서 논의된 알고리즘에 의하여 파라미터를 추출하였으며, 그 결과는 표 2~4에 요약 정리되었다. 또한 추출한 파라미터를 사용하여 III장에서 논의된 FM 합성용 소프트웨어 시뮬레이터에 의하여 시뮬레이션하였다. 비브라토와 트레몰로에 관계되는 파라미터는 실험적인 값으로 트레몰로와 비브라토를 위해 각각 4Hz와 7Hz의 주파수를 사용하였다. 트레몰로의 깊이(depth)는 첼로의 경우 10%, 트럼펫의 경우 3%로 하였으며, 또한 트럼펫의 경우 비브라토를 고려하였다. 각 악기에 대한 시뮬레이션 결과는 매킨토시 컴퓨터의 Photoshop 및 SoundEdit 기능을 이용하여 그림 8~10에 나타냈다. 각각의 그림에서 (a)는 해당 악기음의 전체적 엔빌로프를 보여주며, (b)와 (c)는 각기 해당 악기음의 초기구간(attack region)과 안정구간(sustain region)에서의 파형을 확대한 그림이다. 각각의 그림 (a)에서 트레몰로에 의한 음량변화를 볼 수 있는데, 첼로의 경우 트레몰로 효과가 크게 나타나며, 트럼펫의 경우 트레몰로 효과가 적고 피아노의 경우 트레몰로 효과가 거의 없는 시뮬레이션 결과는 각 악기음의 특색으로부터 예상한 결과와 일치한다.

합성된 악기음의 평가는 먼저 공학적 검증이 다소 결여된 주관적 평가(subjective testing)로 행해졌으

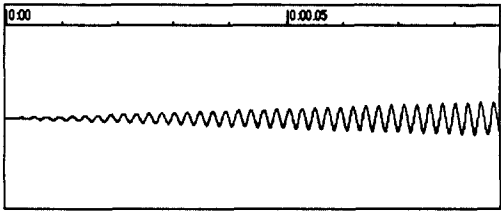
표 2. 첼로의 파라미터 값.

Table 2. Parameters of a cello.

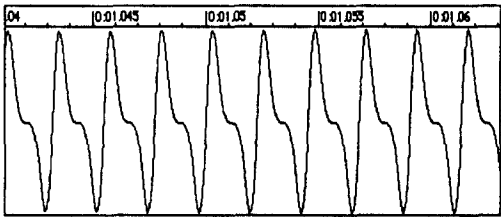
기본 주파수	130.4 Hz		$\omega_c$ 와 $\omega_m$ 의 비	1 : 0.5	
$A(t)$ 의 엔빌로프	유형 2		$I(t)$ 의 엔빌로프	유형 2	
AT	0.46 sec	AL 0.98	AT	0.47 sec	AL 1.0
DT	0.46 sec	DL 0.98	DT	0.47 sec	DL 1.0
ST	1.41 sec	SL 0.98	ST	1.38 sec	SL 1.0
RT	1.42 sec		RT	1.42 sec	



(a)



(b)



(c)

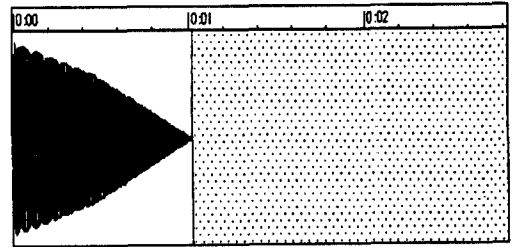
그림 8. 추출된 파라미터에 의해 합성된 첼로의 파형  
 (a) 전체구간 (b) 초기구간 (c) 안정구간  
 Fig. 8. Waveform of a cello synthesized by the parameters of Table 2.  
 (a) whole region, (b) attack region, (c) sustain region.

며, PCM 방식에 의한 음질보다는 이미 알려진 바와 같이 약간 음질이 떨어지나 각 악기의 독특한 특징을 쉽게 확인할 수 있었다. 평가를 보다 객관적이고 공학적으로 행하기 위하여 파라미터 추출시 기준으로 사용한 악기음과 이것으로부터 추출된 파라미터로 FM 합성한 악기음을 시간영역 및 주파수영역에서 비교 분석하였다. 시간영역에서의 파형분석을 통하여 얻은 파라미터인 반송기단 출력(A(t)) 파라미터의 추출 알고리즘 및 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 편의상 두 악기(첼로, 트럼펫)에 대한 기준 악기음의 파형과 시뮬레이션을 거친 합성음의 파형을 비교하였다. 그림 11은 첼로의 기준 악기음과 합성음의 파형 비교로서 (a)는 파라미터를 추출하기 위해 기준이 된

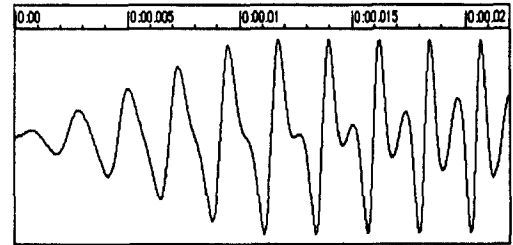
표 3. 피아노의 파라미터 값.

Table 3. Parameters of a piano.

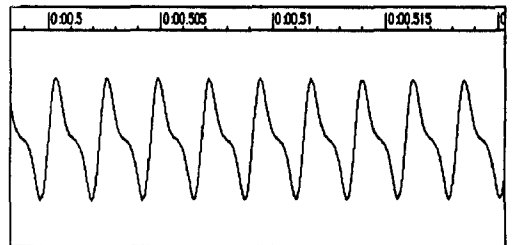
기본 주파수	260.8 Hz		$\omega_1$ 와 $\omega_2$ 의 비		1 : 1		
A(t)의 엔빌로프	유형 3		I(t)의 엔빌로프		유형 3		
AT	0.01 sec	AL	0.91	AT	0.02 sec	AL	1.7
DT	0.47 sec	DL	0.60	DT	0.23 sec	DL	1.1
ST	1.02 sec	SL	0.0	ST	1.02 sec	SL	0.5
RT	1.02 sec			RT	1.02 sec		



(a)



(b)



(c)

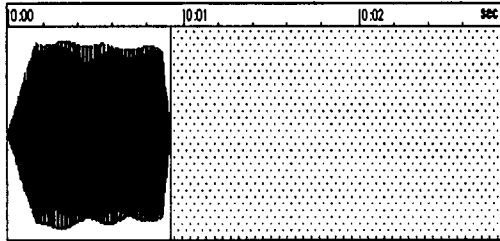
그림 9. 추출된 파라미터에 의해 합성된 피아노의 파형  
 (a) 전체구간 (b) 초기구간 (c) 안정구간  
 Fig. 9. Waveform of a piano synthesized by the parameters of Table 3.  
 (a) whole region, (b) attack region, (c) sustain region.

PCM 데이터의 파형을 보여주며, (b)는 (a)의 파형으로부터 추출된 파라미터에 의하여 합성된 파형을 보여준다. 기준 악기음 파형 (a)의 전체적 엔빌로프

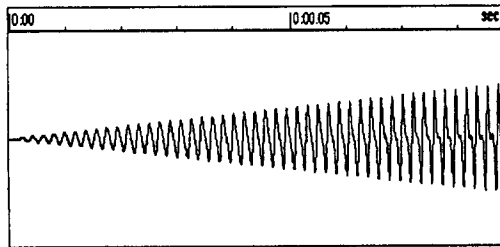
표 4. 트럼펫의 파라미터 값

Table 4. Parameters of a trumpet.

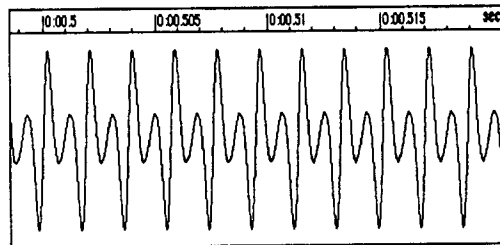
기본 주파수	521.6 Hz		$\omega_1$ 와 $\omega_2$ 의 비	1 : 1	
A(t)의 엔빌로프	유형 1		I(t)의 엔빌로프	유형 1	
AT	0.16 sec	AL	0.92	AT	0.12 sec
DT	0.87 sec	DL	0.82	DT	0.23 sec
ST	0.88 sec	SL	0.82	ST	0.58 sec
RT	0.93 sec			RT	1.01 sec



(a)



(b)



(c)

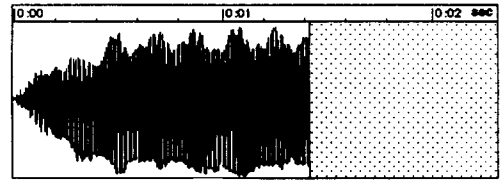
그림 10. 표 4에 주어진 파라미터에 의해 합성된 트럼펫의 파형

(a) 전체구간 (b) 초기구간 (c) 안정구간

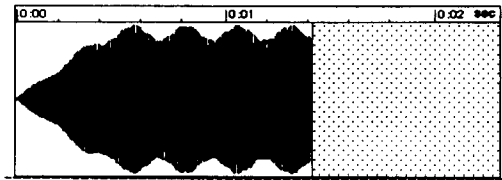
Fig. 10. Waveform of a trumpet synthesized by the parameters of Table 4.

(a) whole region, (b) attack region, (c) sustain region.

와 합성음 파형 (b)의 전체적 엔빌로프가 유사함을 알 수 있고, 또한 기준 악기음의 파형인 (a)와 비교하여 합성음 파형 (b)에서도 첼로의 독특한 트레블로



(a)



(b)

그림 11. 첼로의 기준 악기음과 합성음의 파형 비교  
(a) PCM 데이터로 구성된 기준 첼로음의 파형

(b) 추출된 파라미터에 의해 FM 방식으로 합성된 첼로음의 파형

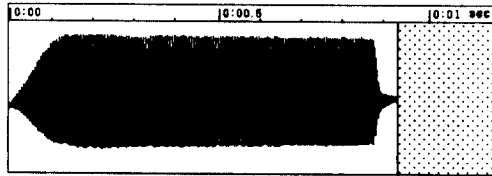
Fig. 11. Waveform comparison between original sound and synthesized sound of a cello.

(a) Waveform of the original sound based on PCM data.

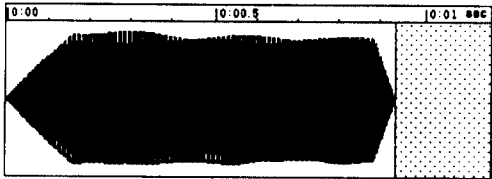
(b) Waveform of the FM synthesized sound.

를 확인할 수 있다. 마찬가지로 트럼펫의 기준 악기음과 합성음의 파형 비교를 보여주는 그림 12에서 기준음 파형 (a)의 전체적 엔빌로프와 합성음 파형 (b)의 전체적 엔빌로프가 유사함을 알 수 있다.

주파수영역에서의 스펙트럼 분석을 통하여 얻은 변조단 출력(I(t)) 파라미터의 추출 알고리즘 및 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 편의상 두 악기(트럼펫, 피아노)에 대한 스펙트럼 분석을 하였다. 그림 13(a)는 파라미터를 추출하기 위해 기준이 된 트럼펫음의 스펙트럼을 보여주며 그림 13(b)는 그림 13(a)의 파형에서 파라미터를 추출한 후, 추출된 파라미터로 합성된 트럼펫음의 스펙트럼을 보여준다. 두개의 스펙트럼을 비교하면 그림 13(a)에 나타난 기준 악기음 파형의 스펙트럼에서 기본주파수는 약 500Hz임을 확인할 수 있으며, 이것은 그림 13(b)의 합성음에 대한 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 그림 13(a)에서 기본주파수와 기본주파수의 2배, 3배, 4배, 5배의 주파수 성분이 모두 존재함을 볼 수 있는데 이



(a)



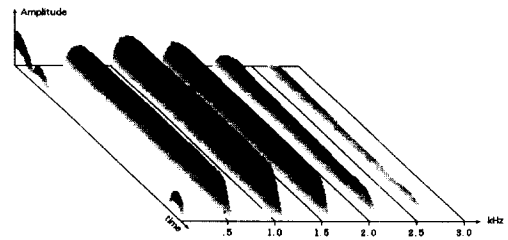
(b)

그림 12. 트럼펫의 기준 악기음과 합성음의 파형 비교  
(a) PCM 데이터로 구성된 기준 트럼펫음의 파형  
(b) 추출된 파라미터에 의해 FM 방식으로 합성된 트럼펫음의 파형

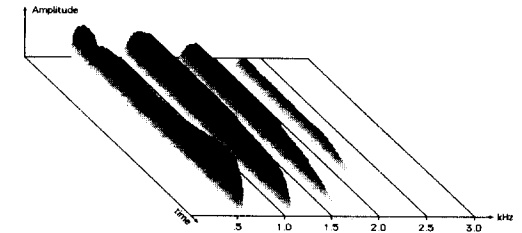
Fig. 12. Waveform comparison between original sound and synthesized sound of a trumpet.

- (a) Waveform of the original sound based on PCM data.
- (b) Waveform of the FM synthesized sound.

것은  $\omega_c$  와  $\omega_m$ 의 비가 1:1임을 의미하며, 그림 13 (b)의 합성음에 대한 스펙트럼에서 기본주파수의 5배에 해당하는 성분의 크기가 약간 작은 점을 제외하면 그림 13(a)와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 한편 그림 14(a)는 파라미터를 추출 하기 위해 기준이 된 피아노음의 스펙트럼을 보여주며 그림 14(b)는 그림 14(a)의 파형으로부터 추출된 파라미터에 의해 합성된 피아노음의 스펙트럼을 보여준다. 두 스펙트럼을 비교하면 기준 피아노 악기음의 스펙트럼을 보여주는 그림 14(a)에서 기본주파수는 약 250Hz임을 알 수 있으며, 이것은 그림 14(b)의 합성음에 대한 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 그림 14(a)에서 기준 피아노 악기음의 스펙트럼을 살펴보면 기본주파수외에 많은 고조파 성분들 (기본주파수의 2배, 3배, 4배...의 주파수 성분)이 존재하고, 또한 고조파 성분들의 크기가 시간에 지남에 따라 서서히 감소하는 특징을 찾아낼 수 있다. 이와 비교하여 합성음의 스펙트럼을



(a)



(b)

그림 13. 트럼펫의 기준 악기음과 합성음의 스펙트럼 비교

- (a) 기준 트럼펫음의 스펙트럼
- (b) 추출된 파라미터에 의해 FM 합성된 트럼펫음의 스펙트럼

Fig. 13. Spectrum comparison between original sound and synthesized sound of a trumpet.

- (a) Spectrum of the original sound based on PCM data.
- (b) Spectrum of the FM synthesized sound.

보여주는 그림 14(b)에서 각 고조파 성분들의 크기가 시간에 따라 서서히 감소하는 특징이 있으나 많은 고조파 성분들을 갖지 못하는 차이점을 발견할 수 있다. 만약 그림 14(a)에서와 같이 많은 고조파성분을 갖는 파형을 FM 방식으로 합성하기 위하여 변조지수 값을 크게하면 합성음의 대역폭이 커지므로 많은 고조파 성분을 갖는 파형을 만들 수 있다. 하지만 이러한 상태에서는 피아노음의 특징인 각 고조파 성분의 값이 시간에 따라 감소하는 특징을 만들 수 없다. 왜냐하면 변조지수가 큰 범위에서는 변조지수가 감소할 때 각 고조파 성분의 크기가 모두 감소하지 않고 Bessel 함수의 값에 따라 증가하는 주파수 성분도 존재하기 때문이다. 이러한 이유로 FM 방식을 사용하여 많은 고조파 성분들을 포함하는 피아노 악기음을 합성하기에 다소 어려움이 있음을 알 수 있다.

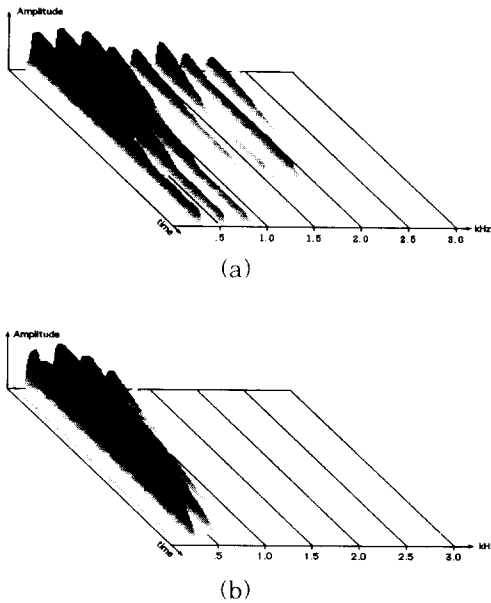


그림 14. 피아노의 기준 악기음과 합성음의 스펙트럼 비교

- (a) 기준 피아노음의 스펙트럼  
 (b) 추출된 파라미터에 의해 FM 합성된 피아노음의 스펙트럼

Fig. 14. Spectrum comparison between original sound and synthesized sound of a piano.

- (a) Spectrum of the original sound based on PCM data.  
 (b) Spectrum of the FM synthesized sound.

## VI. 결론

본 논문에서는 FM 방식을 이용한 악기음을 합성하고자 매킨토쉬 컴퓨터에서 C 언어를 사용하여 악기음 합성용 소프트웨어 시뮬레이터를 개발하였으며, 특히 기본음 발생기를 구성하고 있는 위상 발생기, 정현파 발생기, 엔빌로프 발생기, 비브라토 및 트레몰로 발생기 등의 알고리즘은 ASIC설계에 대비하여 하드웨어 구현이 용이하도록 개발하였다. 먼저 본 시뮬레이터를 이용하여 악기음으로 평가할 수 있는 파라미터의 대략적 범위를 얻어 파라미터 추출을 위한 알고리즘에 적용하였다. FM 방식을 이용한 악기음 합성 방법은 비교적 계산량이 적게 요구되며 회로구성 또한 간단하고, 여러 악기음을 만드는데 필요한

파라미터의 수가 적어 메모리를 적게 차지하는 효율적인 방식이지만 각 악기에 해당하는 정확한 파라미터를 얻을 수 없다면 원하는 악기음을 합성할 수 없다. 따라서 FM 방식에서 필요한 파라미터를 기준되는 악기음의 데이터로부터 시간영역에서의 파형 분석 및 주파수영역에서의 FFT를 이용한 스펙트럼 분석을 통하여 추출할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘을 사용하여 3가지 악기에 해당하는 파라미터들을 추출하였고, 추출된 파라미터들을 개발된 소프트웨어 시뮬레이터에 적용하여 합성된 악기음을 분석 및 평가하였다. 합성음을 직접 듣는 주관적 방법 외에, 평가를 보다 객관적이고 공학적으로 행하기 위하여 파라미터 추출시 기준으로 사용한 악기음과 이것으로부터 추출된 파라미터로 FM 합성된 악기음을 시간영역 및 주파수영역에서 비교 분석하므로써 파라미터 추출 알고리즘 및 소프트웨어 시뮬레이터의 유효성을 확인하였다.

앞으로의 연구 방향을 간단히 제시하면 다음과 같다. 본 논문에서는 주파수변조 합성음을 생성하고자 분해능 8비트, 샘플링 주파수 11KHz의 악기음 데이터를 사용하였는데, 보다 좋은 음질 즉 현재 상업용 악기음 IC 수준의 음질을 얻기 위해 16비트, 50KHz의 PCM 데이터로부터 파라미터를 추출하고자 하며, 또한 범용 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 실시간 주파수변조 악기음 합성기를 구현한 후 추출된 파라미터로 악기음을 합성하므로써 실시간 음악 연주를 통한 평가를 하고자 한다.

## 參考文獻

- [1] T.D. Rossing, The Science of Sound, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [2] 新井 純, The Theory of Synthesizer Operation, Rittor Music, 1988.
- [3] C. Roads and S. Strawn, Foundation of Computer Music, MIT press, 1985.
- [4] J.A. Moorer, "Signal processing aspects of computer music: A survey," Proceeding of The IEEE, vol. 65, no. 8, pp. 1108-1137, August 1977.
- [5] R.J. Higgins, Digital Signal Processing in VLSI, Prentice-Hall, 1990.
- [6] YM3812 Application Manual, Yamaha, 1990.
- [7] YMF262 Application Manual, Yamaha,

1991.  
 [8] Inside Macintosh IV. Addison Wesley Publishing Company, 1991.  
 [9] S. Knaster. How to Write Macintosh Software. Addison Wesley Publishing Company, 1992.  
 [10] United States Patent. "Electronic musical instrument with frequency modulation." Patent Number 5033352, July 1991.

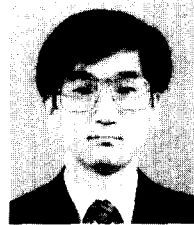
[11] United States Patent. "Envelope shape generator for tone signal control." Patent Number 4928569, May 1990.  
 [12] United States Patent. "Control waveform generating apparatus for an electronic musical instrument." Patent Number 4893539, January 1990.  
 [13] W.H. Beyer. CRC Standard Mathematical Tables, 27th Editions, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1984.

著 者 紹 介



周俊烈(準會員)

1968年 8月 10日生. 1991年 2月 국민대학교 전자공학과 졸업(학사). 1993年 8월 국민대학교 전자공학과 석사학위 취득. 1992年 6월~12월 전자부품종합기술연구소 위촉연구원. 1993年 9월~현재 국제전자공업주식회사 연구원. 주관심 분야는 디지털 신호처리, 멀티미디어 등임.



洪賢碩(準會員)

1961年 9月 26日生. 1984年 2월 연세대학교 전기공학과 졸업(학사). 1986年 2월 연세대학교 전기공학과 석사학위 취득. 1984年 5월~1988年 8월 삼성전자(주) 종합연구소. 1988年 9월~1991年 12월 금성 일렉트론(주) 우면연구소. 1992年 1월~1993年 10월 전자부품종합기술연구소 선임연구원. 1992年 3월~현재 한국과학기술원 정보 및 통신공학과 박사과정. 주관심 분야는 VLSI 설계 및 ASIC 설계 등임.



李汶瑛(準會員)

1968年 8월 15日生. 1992年 2월 국민대학교 전자공학과 졸업(학사). 1994년 2월 국민대학교 전자공학과 석사학위 취득. 1992年 6월~12월 전자부품종합기술연구소 위촉연구원. 1994年 3월~현재 삼성전자(주). 주관심 분야는 컴퓨터를 이용한 한글처리, 음성신호처리, 멀티미디어 등임.



趙威德(正會員)

1958年 11월 17日生. 1981年 2월 서강대학교 전자공학과 졸업(학사). 1983年 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사학위 취득. 1987年 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사학위 취득. 1983年 8월~1990年 3월 금성전기(주) 기술연구소 디지털 신호처리 연구실장. 1990年 4월~1991年 10월 생산기술연구원 HDTV 사업단 조교수. 1991年 11월~현재 전자부품종합기술연구소 선임연구원. 주관심 분야는 디지털 통신시스템, 디지털 통신 신호처리 기술, 디지털 이동통신 baseband 신호처리 chipset 설계 등임.

## — 著者紹介 —



金基斗(正會員)

1957年 12月 17日生. 1980年 2月  
서강대학교 전자공학과 졸업(학사).  
1988年 8月 The Pennsylvania  
State University 전자공학과 석  
사학위 취득. 1990年 12月 The  
Pennsylvania State University 전  
자공학과 박사학위 취득. 1980年 3月~1985年 12月  
국방과학연구소 연구원. 1991年 2月~현재 국민대학  
교 전자공학과 조교수. 주관심 분야는 디지털 신호처  
리, 디지털 통신, 견실제어 시스템 등임.