

# 표준셀 라이브러리를 사용한 FM 악기음합성기 설계

## FM Sound synthesizer Design using the Standard Cell Library

홍 현 석\*, 조 위 덕\*

(Hyeon Seong Hong, We Duke Cho)

### 요 약

FM방식의 악기음원합성은 해당 악기의 음색과 음정에 맞는 FM의 기본 주파수와 변조 계수를 정하여 신호 파형을 생성하는 것으로, 다른 가, 감산방식 또는 PCM방식 등에 비해 비교적 간단한 구조로 다양한 악기음원합성이 가능하다. 따라서 현재 사용되고 있는 개인용 컴퓨터에 부착되는 사운드합성 카드에는 FM방식 음원합성기술이 적용되고 있다. 본 논문에서는 FM방식 음원합성기술을 이용하여 실시간 악기음원합성이 가능한 논리회로를 설계하는데 관한 연구를 기술한다.

본 연구에서는 소프트웨어 프로그래밍에 의해 FM방식 음원합성기의 구조를 설계하고 주요 블록의 최적 변수 값을 실험하였다. 논리회로 설계 및 회로검증은 향후 주문형반도체(ASIC: Application Specific Integrated Circuit) 제작을 위해 기존의 표준셀 라이브러리와 주문형반도체 전용 설계시스템을 사용하였다. 회로검증 결과는 간이 평가보드를 제작하고 PC와 접속시켜 생성된 악기음을 직접듣는 주관적 평가방법으로 최종 확인하였다.

### ABSTRACT

The FM method used in musical sound synthesis creates sound signals with the timbre and the interval of a musical instrument by determining fundamental frequency and modulation parameters of FM. By this method musical synthesis is possible with relatively simple structure comparing with other methods such as additive, subtractive or PCM method.

In this paper we studied the design circuit being able to generate real time musical sound of FM synthesis method. And the structure of FM sound synthesis was designed and the optimum parameter values of its principle block were tested using S/W simulation programming. To design and verify the logic circuit, the existing standard cell library and a specific design system of ASIC(Application Specific Integrated Circuit) are used for preparing the ASIC fabrication. The operation of designed sound synthesis circuit is finally verified by the subjective evaluating method hearing the synthesized sound by using self-made simple evaluating board which is attached with PC.

### I. 서 론

전기적 신호를 합성하여 악기의 음원 생성법은 20

세기에 들어와서 주로 전자악기의 발달과 함께 연구되어 왔고, 이 중 대표적인 음원합성 이론은 가산합성(additive synthesis), 감산 합성(subtractive synthesis), PCM(Pulse Code Modulation) 방식과 FM(Frequency Modulation) 방식[1,2]을 들 수 있다. 가산 합성 방식은 복수 개의 정현파를 합하여 음

\*전자부품 종합기술 연구소  
접수일자: 1992년 11월 12일

원을 생성하는 방식으로, 한 개의 정현파 발진기가 한 개의 배음을 생성하므로 복잡한 파형을 구성하여 음원을 생성하기 위해서는 여러 개의 정현파 발진기가 필요한 단점이 있다. 일반적으로 이 방식을 적용한 전자악기는 64-255개까지의 배음을 생성할 수 있도록 되어 있고, 음원생성은 이러한 정현파 발진기의 크기를 조절함으로써 이루어진다. 감산 합성법은 아날로그 전자악기에서 많이 사용되는 방식으로, 복잡한 기본 파형에서 단계적으로 필터의 계수를 조절하여 음의 특정 성분을 제거하여 음원을 합성하는 방식이다. PCM방식은 디지털 기록 방식과 동일한 방식으로, 악기의 음(파형)을 디지털 신호화한 데이터로 메모리에 기억시키고 음원을 재생하는 방식으로 많은 메모리를 필요로 하는 단점이 있다. 일반적으로 PCM 방식은 메모리에서 읽은 음원 데이터를 필터를 사용하여 음색을 가공하고, 증폭기를 이용하여 음량을 조절한다. FM 음원 방식[1,3,4]은 비선형 음원 방식 중 대표적인 방식으로 변조에 의하여 고주파 성분을 만드는 방식이다. 이 방식은 70년대 미국 Stanford 대학의 John Chowning, Moorer 등이 개발한 방식으로, 비교적 간단한 회로를 사용하여 높은 고주파 성분을 포함하는 파형을 만들 수 있으며, 다양한 악기 음원을 생성하는데 필요한 변수가 적으므로 메모리도 적게 드는 특징이 있다.

최근 PC 및 멀티미디어의 대중화로 FM 음원 방식의 PC용 사운드 카드가 상용화되어 있다. 그런데 음원 생성용 IC는 대부분 일본에서 개발된 것으로 특히 야마하 주식회사의 YM3812와 YMF262[5,6,7]가 널리 사용되고 있으며, 국내에서는 외국의 부품을 이용한 보드의 개발에 그치고 있고, 핵심 부품인 음원합성에 관한 연구도 미비한 상태이다. 특히 국내의 일부 가전, 악기, 반도체 회사들이 개발하고 있는 음원합성용 IC는 PCM 방식을 적용한 것으로 전자 악기에 주로 사용되며, PC의 사운드 카드에 주로 사용되는 FM 방식에 관해서는 현재까지 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있다. 한편 일본 업체에서 개발한 FM 방식의 음원 IC의 대만 복제품이 국내에서 상당히 유통되고 있어 일본과의 새로운 특허 분쟁의 조짐도 나타나고 있다.

본 연구에서는 음원합성 방식 중, FM방식을 이용한 음원합성용 알고리즘을 연구 및 분석하고, 이를 기반으로 FM 방식을 이용한음원생성 알고리즘의 실시간 동작을 위한 논리회로를 표준셀 라이브러리를 사용하여 설계하고 CAD 장비를 이용하여 1차 검증

을 수행하며, 논리회로 시뮬레이터를 동작시켜 얻은 사운드 데이터를 PC로 전송하여 PC에서 동작하는 간이 평가보드를 통하여 2차 검증을 수행하여, 설계된 논리회로가 올바른 FM 음원을 합성함을 확인하였다.

## II. FM 음원합성 알고리즘

악기의 파형 특성을 살펴보면 음정을 결정하는 기초음인 높은 주파수 성분의 배음인 고주파를 포함하는 주기적 함수이다. 여기서 기본파와 고주파 성분의 시간적인 변화가 악기의 음색을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 따라서 음악적 소리를 생성하기 위해서는 각 악기에 해당하는 한 주기 파형(기본파성분+고주파성분)이 있어야 하고 이 파형의 각 성분을 시간적인 변화에 따라 조절할 수 있어야 한다.

FM 음원합성이란 변조기에 의해서 반송파의 주파수를 변화시켜 복잡한 고주파 성분을 생성하는 방식[1,4]으로, 비교적 적은 연산과 변수로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} FM(t) &= A \sin[\omega_c t + I \sin(\omega_m t)] \\ &= A \sin[\omega_c t + \frac{\Delta \omega}{\omega_m} \sin(\omega_m t)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$A$  : peak amplitude

$\omega_c$  : carrier angular frequency(= $2\pi f_c$ )

$\omega_m$  : modulating angular frequency(= $2\pi f_m$ )

$I$  : modulation index

$t$  : time

$\Delta \omega$  : peak deviation

이고 음색을 결정하는 중요한 변수인 최고 진폭  $A$  값과 FM 변조 지수  $I$  값은 일반적으로 시간에 대한 함수이다. 즉  $A$ 는  $A(t)$ 로  $I$ 는  $I(t)$ 로 표현하여 식(1)은

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

가 된다. 왜냐하면 자연음(natural sound)을 구현하기 위해서 각 악기의 음량은 시간에 따라 각각의 특성에 맞게 변화되어야 하기 때문이다. 반송파 및 sideband 주파수에서의 진폭은  $n$ 차 Bessel 함수,  $J_n$

(1)로 표현 가능하므로, 기본 정의식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$FM(t) = A(t) \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(I(t)) \sin(\omega_c t + n\omega_m t) \quad (3)$$

식 (3)에서 변조 지수 I는 음원의 동적 스펙트럼(dynamic spectrum)을 결정한다. 즉 반송, 변조 주파수 정수인 경우, 변조 지수 I에 따른 스펙트럼을 나타내는 그림 1에서 I가 영에서부터 증가하면 파형은 순수한 정현파에서 고주파 성분을 포함한다. 이는 반송파의 에너지가 전체 대역으로 분산됨을 의미한다.

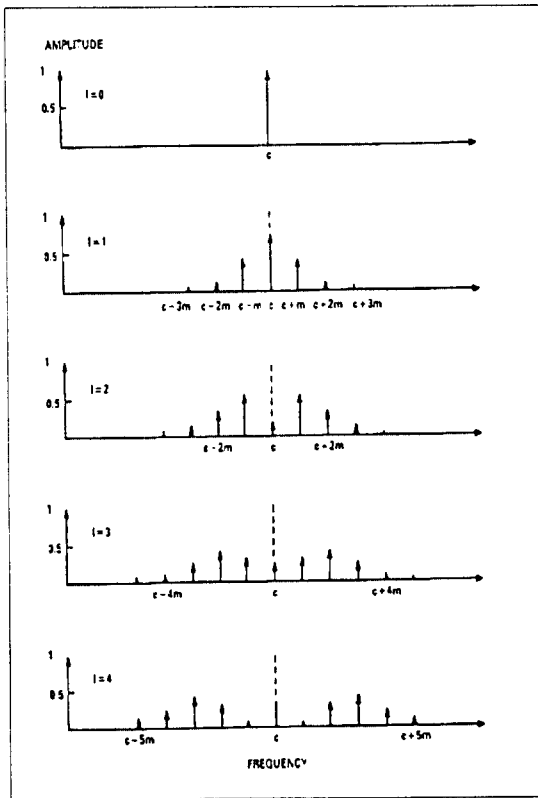


그림 1. 변조 지수 I에 따른 FM 악기음의 스펙트럼(I=0, 1, 2, 3, 4)

Fig 1. The FM sound spectrum with the modulation index, I. (I=0, 1, 2, 3, 4)

### III. FM 음원합성의 구성

FM 음원합성기의 구성은 기본음발생기(basic sound generator:BSG)가 기본 구조를 이루고 있고 몇 개의 기본음발생기를 조합하여 악기 음원을 생성

한다. 기본음발생기는 정현파를 생성을 위해 내부에 정현파 데이터 테이블이 있고, 이 테이블에서 수치를 읽어 신호 처리를 함으로써 정현파를 생성하는 기본 cell이다. 한편 음정은 정현파 테이블 데이터의 읽는 순서 조정에 의해 변경된다. 기본음발생기는 크게 변조기와 반송기로 나누어진다. 반송기는 앞단의 기본음발생기로부터 출력을 받아 최종 음을 생성하고, 변조기는 그 출력이 다음 기본음발생기로 전송한다. FM 방식은 기본적으로 이 변조기와 반송기로 그림 2와 같이 구성된다.[2]

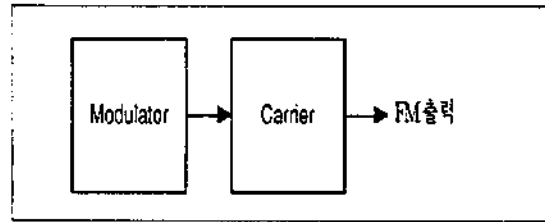


그림 2. 일반적인 FM 합성 기본 구성

Fig 2. Basic structure of the general FM Sound synthesizer

2개 이상의 기본음발생기로 구성되어 있을 경우 (이를 직렬로 연결하였다면) 최종 기본음발생기를 반송기라고 하며 그 이전의 모든 기본음발생기를 변조기라 한다. FM 방식은 변조기의 출력 파형이 반송기에 입력되어 변조된 최종 파형을 출력하므로 단순 정현파에서 여러 가지의 배음을 띠는 복잡한 파형을 생성한다. FM 방식에서는 각각의 기본음발생기 음량을 조정하여 최종 악기음의 음색 및 음량을 조정한다. 즉 반송기의 음량을 조정함으로써 전체 음의 음량을 조정하게 되고, 변조기의 음량을 조정하게 되면 다른 효과가 나타난다. 왜냐하면 변조기의 출력은 반송기의 입력으로 이어지기 때문에 그 음량의 크기는 반송기 출력의 변조율에 반영되어 전체의 음색에 영향을 끼치게 되기 때문이다. 즉 변조기 출력 값이 0일 경우 반송기는 순수한 정현파 발생기가 되며, 변조기의 출력이 최대일 경우 반송기의 출력은 변조된다. 즉 반송기 음량의 시간적 포락선 변화는 악기의 음량을 결정하며, 변조기 음량의 포락선 변화는 음색을 결정하는 기본 요소가 된다. 음량의 시간적 변화를 나타내는 포락선 모델은 그림 3과 같이 구성하였다. 포락선 모델은 악기 음원의 생성시 초기 0값에서 일정 비율로 증가, 감소하여 안정 상태에 도달하며, 소멸시 안정 상태에서 일정 비율로 감소하여, 변조기에

서는 주파수 변조(음색)가 반송기에서는 음량의 변화가 나타난다.

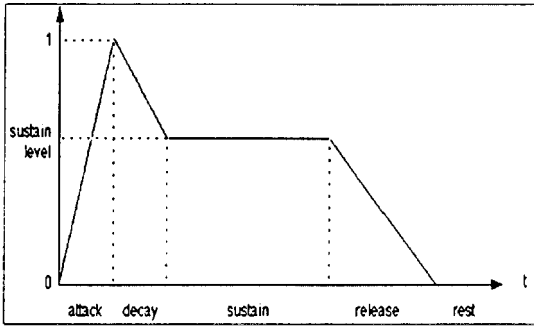


그림 3.FM 악기음 합성기의 포락선 모델  
Fig 3.Envelope model for the FM sound synthesis

FM 방식에서 기본적인 악기 음색은 변조기의 포락선으로 조정한다. 그러나 반송파 주파수에 대한 변조기 주파수의 비로 조정도 가능하다. 즉 변조기 주파수가 클 경우 악기음은 맑은 소리가 난다. 그러나 주파수 비로는 음색의 시간적인 변화는 일어나지 않는다.

음정의 미세한 범위의 주기적인 변화 시 나타나는 vibrato와 음량의 변화로 나타나는 tremolo 현상이 악기에서 나타나고, FM 방식의 경우 20Hz 이하의 LFO(Low Frequency Oscillator)에 의해 각 기본음 발생기의 출력 주파수를 주기적으로 변화시켜 tremolo 효과를 실현하였다. 이상의 기능을 포함한 FM 음원합성을 위해 본 연구에서는 구성한 기본음 발생기의 내부 구조는 그림 4에 나타내었다. 기본음 발생기의 동작은 변조를 위한 전단의 위상 입력(phase input)과, 기본 주파수와 시간에 의한 위상

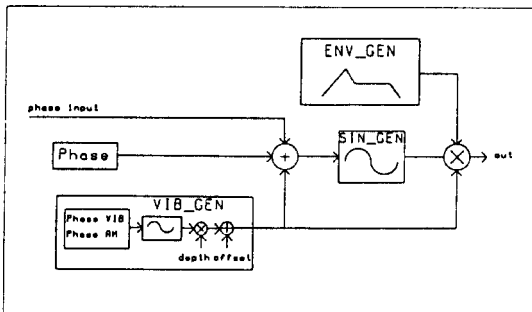


그림 4.설계된 기본음발생기의 내부 구조  
Fig 4. The simplified block diagram of the designed basic sound generator(BSG)

(phase :  $\omega_{ct}$ ,  $\omega_{mt}$ )이 가산되고 출력은 정현파 발생기(SIN.GEN)을 통해 정현파 값으로 변환된다. 정현파 값은 시간에 따른 포락선 발생기(VIB.GEN)의 출력 값과 승산되어 기본음원(out)을 생성한다. 또한 효과 발생기(VIB.GEN)는 LFO에 의해 생성된 저주파 정현파를 승산기를 통해 크기를 줄이고 가산기를 통해 기준 값을 변경하여 가산기와 승산기로 출력하여 vibrato와 tremolo 효과를 발생시킨다.

그림 4의 기본음발생기를 순서적으로 2단 연결하여 그림 2의 FM합성기를 구성하였고, 이때 변조기의 위상 입력은 영으로 고정하고 반송기의 위상 입력은 변조기의 출력이 연결된다.

IV. 논리회로 설계 및 검증

FM 음원합성용 논리회로의 설계 및 검증을 위한 개발 환경은 그림 5와 같이 HP Apollo Work-station 에 Mentor GR.사의 ASIC 개발용 소프트웨어인 NETED, SYMED, QuickSim 등을 이용하였고[15, 16,17], 향후 ASIC을 위하여 standard cell library를 사용하여 설계를 수행하였다. 설계된 논리회로의 최종 검증을 위하여 PC 접속용 평가보드를 자체 제작하여, 논리회로의 시뮬레이션을 통하여 얻은 사운드 데이터를 PC로 전송하여 평가보드를 통한 최종 악기 합성음을 검증하는 방식으로 전체 개발 환경을 구축 하였다.

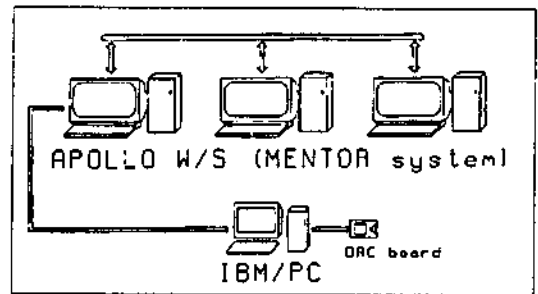


그림 5.개발 환경 구성도  
Fig 5.Development environment for the FM sound synthesizer emulating

실시간 음원생성을 위한 논리회로는 입력 클럭이 10MHz로 동작시 FM 연산에 의한 출력 데이터의 표준화 주파수가 50kHz가 되도록 설계하였다. 이는 실제 가청 주파수(20Hz-20kHz)의 2배 이상으로 섬세한 음을

충분히 표현할 수 있는 데이터 발생 속도이다. 논리 회로는 크게 데이터 경로부와 제어부로 구성하였고, 데이터 경로부는 그림 4 기본음발진기의 논리적 연산 기능을 구현하였으며, 회로를 최적화시키기 위해서 변조부와 반송부가 공용으로 순차적 연산을 수행하도록 그림 6과 같이 설계하였다. 즉 그림 4의 위상 생성부는 전체 블록도(그림 6)의 좌측 REG-ARRAY에서 ADDER까지 부분이고, ENV-GEN 블록은 그림 9, SIN-GEN 블록은 그림 8, VIB-GEN블록은 그림 10에 해당된다.

제어부는 데이터 경로부의 신호의 흐름, 즉 연산 순서를 조절하는 제어 신호를 생성하도록 설계하였고, 여러 악기 음을 동시에 생성할 수 있는 구조로 설계하여, 향후 데이터 경로부의 악기 당 레지스터의 확장으로 여러 악기 음원의 동시 발생을 가능하도록

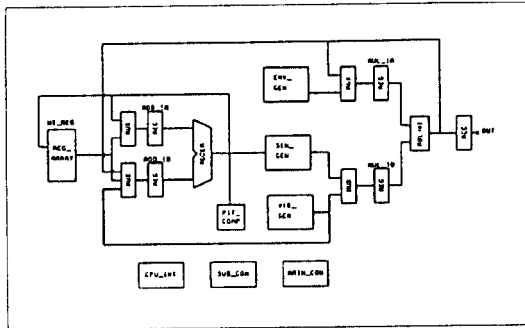


그림 6. 전체 블록도

Fig 6. Overall block diagram of the designed FM sound synthesizer

하였다. 주요 블록은 음정 주파수에 관련된 데이터를 저장하는 WT-REG 블록, 식(1)의  $\omega_{ct}$ ,  $\omega_{mt}$ 를 계산하기 위한 덧셈기인 ADDER 블록, 이들 값의 구간 정돈을 위해  $2\pi$ 값과 비교기인 PIT\_COMP 블록, 정현 함수 값을 계산하는 SIN\_GEN 블록, 악기의 시간적 변화 특성을 나타내기 위한 ENV\_GEN 블록, 정현파 값과 포락선 값등의 곱셈을 수행하는 승산기, 외부에 접속될 CPU와의 데이터 전송을 위한 CPU-INT 블록, 연산기(가산기, 승산기)의 공유를 위한 선택기(multiplexer)와 레지스터를 연산기의 입력부에 위치하도록 데이터 흐름부를 구성하였다. 한편 제어부는 FM 연산식의 주요 제어신호를 생성하는 MAIN-COM 블록과 이에 따르는 제어 블록인 SUB-CON으로 구성하였다.

FM 방식 음원을 생성하기 위한 본 회로의 동작 순서는 그림 7과 같다. 여기서 왼쪽의 숫자는 클럭 숫자로 FM 사운드의 생성에는 12개의 클럭이 소요됨을 알 수 있다. 각각의 클럭에 따라서 데이터 경로부의 레지스터들은 적절한 값들을 취하며 클럭 1에서 6까지는 변조부의 연산을, 7에서 12까지는 반송부의 연산을 수행하여, 클럭 12에서 ACC 블록의 레지스터

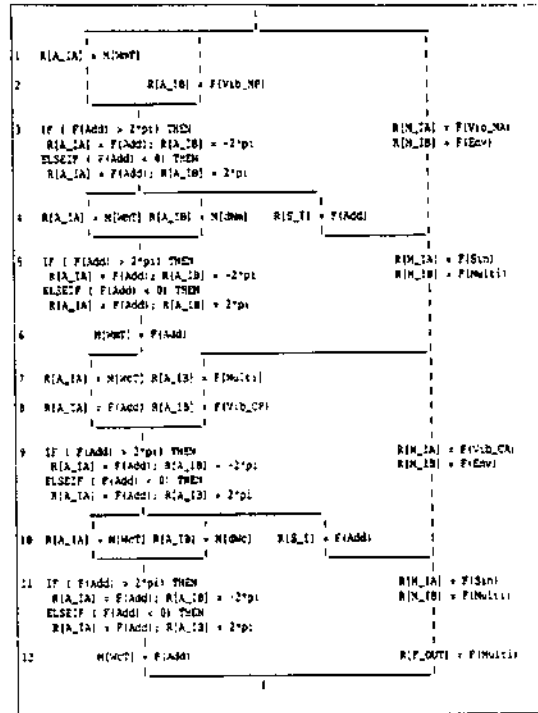


그림 7. 전체 회로 동작 순서

Fig 7. Operation sequence of the overall logic circuit

표 1. 입/출력 신호 및 특성 설명

Table 1. I/O signal names and characteristics

번호	이름	I/O	특성	설명
1	REN	IN	Low active	회로 전체의 reset신호
2	CLK	IN		10MHz의 시스템 clock신호
3	AO	IN		Low: 내부 register의 주소 선택 High: 내부 register의 데이터 선택
4	CSN	IN	Low active	내부 register의 선택 신호
5	DATA(7:0)	Bi		내부 register의 데이터 교환용 bus
6	IOWN	IN	Low active	내부 register의 write 신호
7	OUT(9:0)	OUT		사운드 출력 데이터 신호
8	TEST	IN	Low active	내부회로동작의 고속 check용 신호

R[F-OUT]은  $A(t) \cdot \sin(\omega_c t + I(t) \cdot (\omega_m t))$ 의 FM 연산 값을 출력하게 된다. 여기서 레지스터들이 하나의 클럭에 대하여 최대 3개까지 동시에 동작하도록 병렬 처리하여 전체적인 연산의 속도를 향상시켰다. 전체 논리회로의 입/출력 신호는 모두 24개이고, 이는 표 1에 나타내었다.

그림 6의 주요 부분 블록의 기능은 다음과 같다. WT.REG 블록은 위상 연산을 위해 사운드의 음정을 결정하는 주파수에 관계되는  $\omega_c T$ .REG,  $\omega_m T$ .REG,  $DP_c T$ .REG,  $DP_m T$ .REG의 16bit 레지스터로 구성되어 있다.  $DP_c T$ .REG와  $DP_m T$ .REG에는 음정에 따른 증분이 CPU로부터 설정되고,  $\omega_c T$ .REG,와  $\omega_m T$ .REG는 FM 방식 연산중 정현파 테이블의 입력 값으로 사용되고 식 (4), (5)와 같이 가산기를 통해 그림 7의 클럭 6, 12마다 수정된다.

$$\omega_c T \text{ REG 값} = \text{과거 } \omega_c T \text{ REG 값} + DP_c T \text{ REG 값} \quad (4)$$

$$\omega_m T \text{ REG 값} = \text{과거 } \omega_m T \text{ REG 값} + DP_m T \text{ REG 값} \quad (5)$$

SIN.GEN 블록은 그림 8과 같이  $\omega t$ , 즉 위상을 입력으로 하여 정현파 값을 생성하며, 입력 값은  $-2\pi$ 에서  $2\pi$ 까지의 radian 값으로 제한된다. 한편 정현파 값의 생성은 ROM을 사용하여 수행하였고, ROM의 크기를 줄이기 위해 입력 범위를 0에서  $\pi/2$ 로 규정하였다. 이는 정현파 값이  $\pi/2$  마다의 대칭성을 이용한 것으로 대신 별도의 비교기, 덧셈기와 보수기 등의 논리회로가 추가하여  $-2\pi$ 에서  $2\pi$ 구간의 데이터를 0에서  $\pi/2$ 까지의 정현파 ROM을 읽을 수 있는 202개의 주소로 변환하였고 데이터는 9bit로 표기하였다.

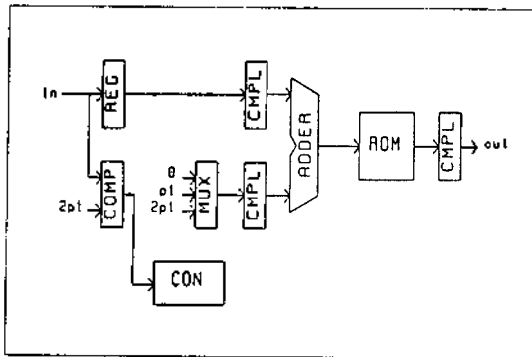


그림 8.SIN.GEN 블록도

Fig 8.Detailed block diagram for the SIN.GEN function

ROM은  $256 \cdot 9$ 의 크기를 갖는 compiled cell을 사용하였고 출력된 ROM의 정현파 데이터는 보수기를 거쳐 양/음의 값으로 변환되어 최종 출력된다. 정현파 ROM의 데이터 테이블은 Mentor GR, macro language를 사용하여 생성하였다.

ENV.GEN 블록은 반송부, 변조부 포락선의 시간적 변화를 조절하는 부분으로 그림 9와같이 설계하였다. ENV.REG에는 AR.REG, DR.REG, RR.REG 등의 증분용 레지스터와 AL.REG, SL.REG라는 level 비교용 레지스터가 포함되어 있고, 증분값 계산용 덧셈기와 각 구간 값의 비교용 비교기와 배분기 그리고 key on 신호제어부 등으로 구성된다. 그림 3의 포락선 생성을 위한 동작은 key on 신호에 의하여 시작되며, 사운드 생성 부분에 적절한 증분 레지스터의 선택에 의하여 포락선의 변화가 계속적으로 진행되고, 변화된 포락선 값은 각 구간의 level값과 비교되어 구간의 종결 여부를 결정하도록 되어 있다.

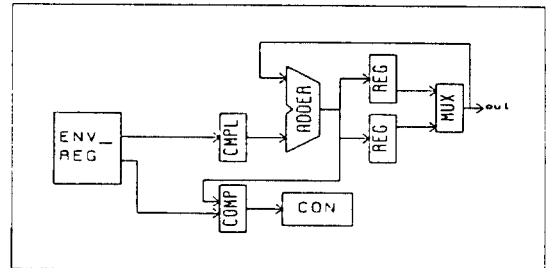


그림 9.ENV.GEN 블록도

Fig 9.Detailed block diagram for the ENV.GEN function

VIB.GEN 블록은 vibrato와 tremolo효과 발생을 위한 블록으로 그림 10과 같이 설계하였다. 50KHz 클럭을 사용하여 400분주의 저주파수 클럭( $125\text{Hz} \approx 7.8\text{Hz} \cdot 16\text{step}$ )을 생성하는 CLOCK.GEN, 위상의 변화를 나타내는 카운터, 16단계 해상도의 정현파를 발생시키는 WAVE.GEN, 출력 신호의 크기를 결정하기 위한 SHIFT, tremolo시의 기준 값을 조정하는 OFF-SET.CON과 제어부로 구성하였다.

SUB.COM 블록의 동작 여부를 결정하는 블록으로, 50KHz마다 MAIN.CON 블록이 동작하여 FM 연산을 한번 행하도록 제어하며 그 외의 시간에는 외부의 CPU에서 I/O 레지스터를 수정할 수 있도록 알려주는 기능을 갖고 있다. 블록의 구성은 향후 8개의 음원을 동시에 생성할 수 있도록 확장성을 고려하여

설계하였고, 악기 사운드의 key.on 레지스터 접근을 가능 하게하여 실제 동작의 효율을 높였다.

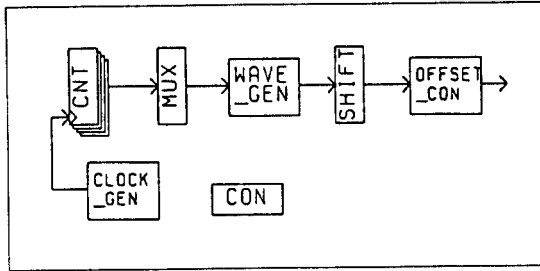


그림 10.VIB.GEN 블럭도

Fig 10.Detailed block diagram for the VIB.GEN function

MAIN.CON 블럭은 FM 방식의 사운드를 생성하기 위한 주요 제어 신호를 만드는 부분으로, 제어신호는 총 12개의 클럭에 따라 배분되어 발생되며, 각 단계별로 제어 신호들은 데이터 경로의 동작을 제어하여 12번째 클럭에서 FM 사운드를 생성하도록 구성하였다. 여기서 제어신호는 가능한 병렬로 발생하도록 하여 사운드 생성을 위한 소요 클럭 수를 최소화하였다. 클럭 단계별 제어신호 값은 표 2와 같다.

표 2.MAIN.CON 블럭의 제어신호 값

Table 2. Control signal of MAIN\_CON block

ADD_1A	ADD_1B	S	MUL_1A	MUL_1B	F	WT_REG	IOW_REG
1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0
4	1	1	0	1	1	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0
7	1	0	0	1	0	0	0
8	0	1	0	1	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0
10	1	1	0	1	0	0	0
11	0	1	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0

논리회로 시뮬레이터로 회로의 동작을 검증하기 위해서 입력 신호의 동작을 매크로의 형태로 기술할 수 있는 do file을 사용하였고, 본 회로의 시뮬레이션

에 사용된 레지스터의 값 지정용 iow.do란 파일은 그림 11과 같다. 여기서 『force /iown 1 200』은 /iown 신호를 1의 값으로 200 상대 시간에 지정함을 의미한다. 시뮬레이터 Quicksim에서 이 파일의 사용은 『do iow.do 00 ff』라고 기술한 경우 0번 레지스터에 ff란 값이 저장된다. 그러므로 이러한 do file의 효과적인 사용으로 입력신호 기술 파일의 크기를 줄이고, 동작의 검증을 도모하였다.

```

*****
#      IOW.do
#      usage : do icw.do add data
*****

force /cs_n 0
force /a0 0
force /data(7:0) ^$arg_1
force /iown 0 100
force /iown 1 200
force /cs_n 1 300
force /a0 x 300
force /data(7:0) xx 300
run 400

force /cs_n 0
force /a0 1
force /data(7:0) ^$arg_2
force /iown 0 100
force /iown 1 200
force /cs_n 1 300
force /a0 x 300
force /data(7:0) xx 300
run 400
    
```

그림 11.Mentor Graphics의 Quicksim을 이용한 효율적인 논리회로검증 프로그램

Fig 11.Efficient logic simulation program using Quicksim package of Mentor Graphics

시뮬레이션을 통한 일반적인 결과는 trace라는 파형 형태로 나타나며 이 결과를 분석함으로써 회로의 세부적인 동작을 검증하였고, trace 형태의 신호 결과 파형은 그림 12와 같다.

한편 음원생성용 회로는 클럭 신호에 따라서 FM 방식의 연산을 순차적으로 수행하므로, 클럭 신호가 변환된 후 연산 상태를 나타내는 제어신호 값을 인식하고 그 상태에서 검증해야 할 신호들의 값을 편리한 방법으로 변환하여 출력하는 제어 파일을 작성하여 시뮬레이터에서 동작시킨 결과는 그림 13과 같다.

이와같은 방법으로 시뮬레이션을 수행함으로써

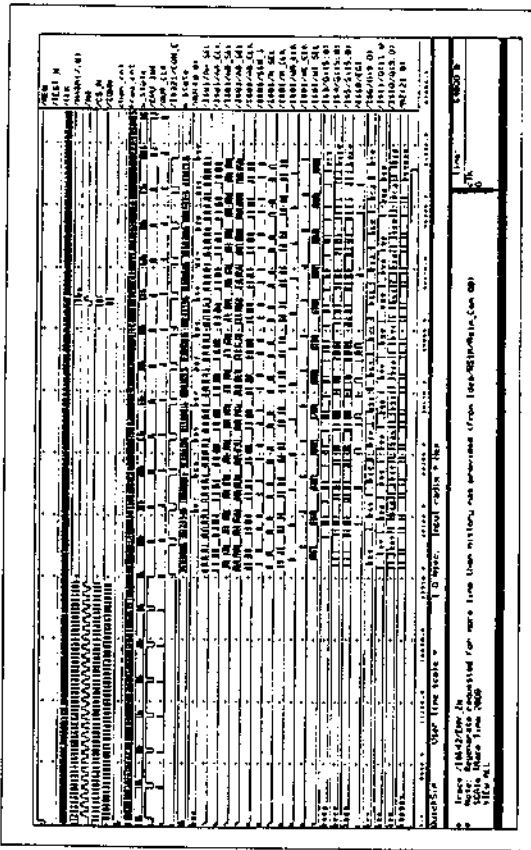


그림 12. 시뮬레이션 결과 파형  
 Fig 12. Various resultant waveforms of the logic circuit simulation

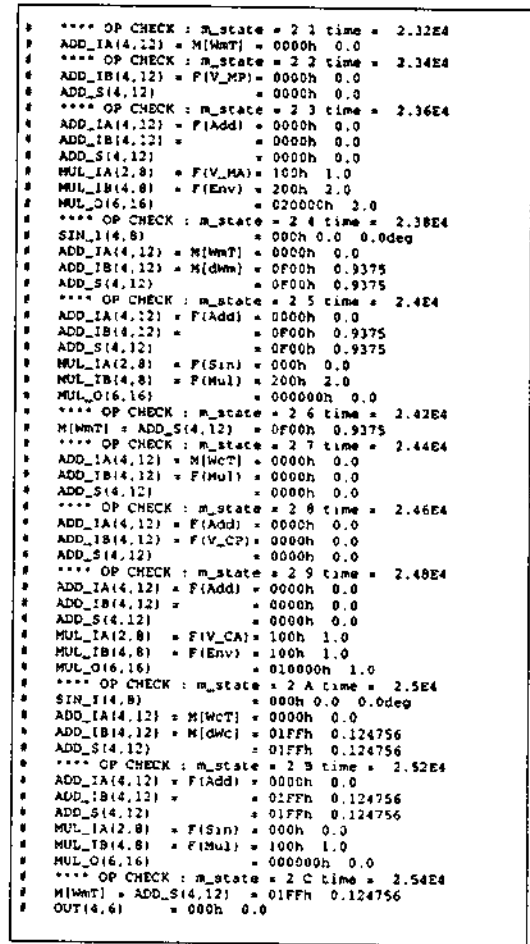


그림 13. 논리회로 검증결과를 보다 정확히 비교분석하기 위하여 사용된 조건부처 결과출력 형식  
 Fig 13. Conditional data format to analyze the logic simulation result more accurately

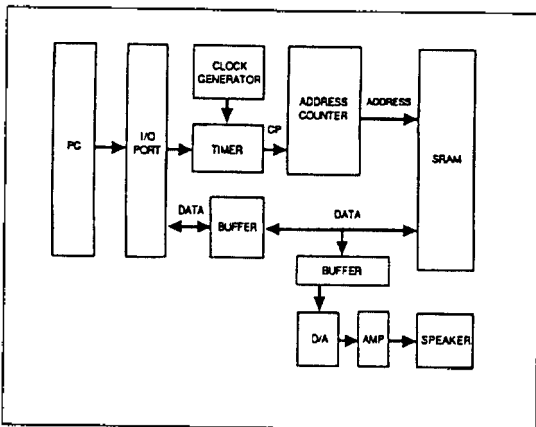


그림 14. 평가보드 Block Diagram  
 Fig 14. Block diagram of the evaluation board for checking the FM synthesized sound waveforms

FM 연산의 동작 결과를 효과적으로 검증할 수 있었다.

설계된 논리회로의 최종 검증은 Mentor GR.사의 QuickSim 시뮬레이터를 사용하여 실제 사운드 데이터를 생성하여 IBM/PC로 전송하고, 자체에서 제작한 그림 14의 같이 평가보드를 사용하여 실제 사운드를 들어봄으로써 검증을 수행하였다.

FM 음원합성 논리회로의 출력 데이터는 이전에 개발한 사운드용 모델링 소프트웨어 결과 데이터와 일치하였고, 평가보드에서 같은 소리를 발생하는 것을 확인함으로써, 음원합성 논리회로가 올바르게 설계되었음을 최종 검증하였다. Flute 악기의 시뮬레이션 변수와 결과 파형은 표 3과 그림 15와 같다.



표 3 Flute 악기음 구현을 위한 FM 악기음합성기의 내부  
주요 변수값

Table 3. Main parameter values of the designed FM  
sound synthesizer in the case of "FLUTE"

	Freq. (Hz)	Envelope model				Vibrato		Tremolo			
		T.L. (mS)	A.T. (mS)	D.T. (mS)	S.L. (mS)	R.T. (mS)	Freq. (Hz)	Scale	Freq. (Hz)	Scale	Offset
Modulator	440	2.5	2.9	128.3	0.09	8212	0	0	0	0	0
Carrier	440	1	46.3	1026	0.5	128	7.8	0.1	3.9	0.05	0.95

T.L. : Total Level : 전체파형 최고 진폭크기

A.T. : Attack Time : 초기파형 증가 구간

D.T. : Decay Time : 초기파형 감쇄구간

S.L. : Sustain Level : 중간파형 변조구간(sustain time)에서의 진폭크기

R.T. : Release Time : 최종파형 소멸 구간

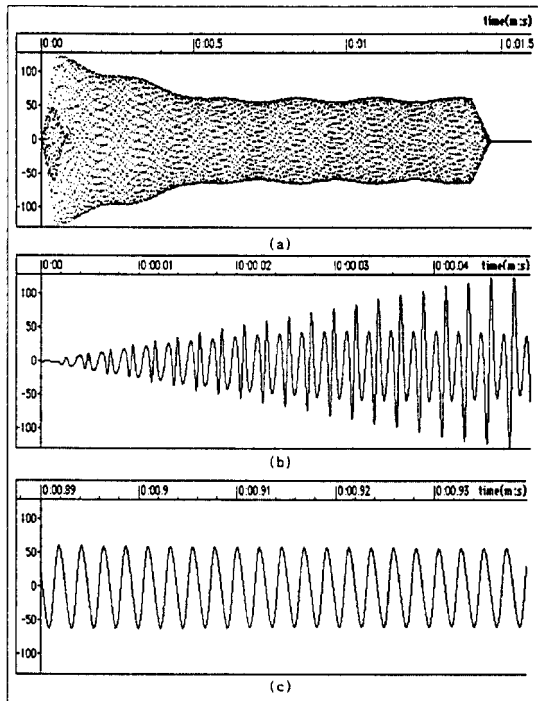


그림 15. 표 3에서 주어진 변수에 의해 합성된 Flute 악기음  
(a) 전체 악기음 파형(0-1.5Sec)  
(b) 초기파형 증가구간의 상세 파형(0.048Sec)  
(c) 중간파형 변조구간의 상세 파형(0.89-0.938Sec)  
Fig 15. Waveform of the Flute musical instrument  
synthesized by the given parameter values of  
Table 3

(a) Overall sound waveform(0-1.5Sec)

(b) Waveform for the attack time(0-0.048Sec)

(c) Waveform for sustain time (0.89-0.938Sec)

## V. 결 론

현재 FM 음원합성 방식은 다른 방식에 비하여 하드웨어 구현이 비교적 간단하므로 컴퓨터의 사운드 카드에 많이 적용되고 있다. 그러나 국내에서는 FM 방식의 체계적인 연구가 진행되고 있지 않고, 사운드 카드의 핵심 음원 IC는 전량 수입에 의존하고 있다. 한편 복제품에 관한 일본의 특허권 분쟁 조짐을 보이고 있어, 국내의 독자적인 설계 기술의 확보가 시급하다.

본 연구에서는 FM 음원합성 알고리즘을 이용하여 악기의 특성을 표현할 수 있는 합성기 구조를 설정하고, 이를 기반으로 실시간 음원합성용 논리회로를 standard cell library를 이용하여 설계하고 검증하였다.

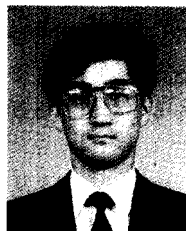
논리회로는 데이터 경로부와 제어부로 계층적으로 구성하였고, 회로의 최소화를 위하여 1개의 기본음발생기를 구성하여 반송기와 변조기의 연산을 12클럭에 수행하도록 설계하였다. 시뮬레이션 검증을 통해 올바른 FM 연산의 수행 및 음원 데이터의 생성을 확인하였다.

향후 개선된 형태의 음원합성기의 개발을 위해서는 복수 개의 변조기를 이용한 음색의 향상 및 포락선 모델의 다양화에 관한 연구가 계속되어야 할 것이고, 설계된 논리회로의 ASIC화를 통한 상용화로 외국의 IC 의존도를 탈피하여 국내 자립도를 높여야 한다.

## 참 고 문 헌

1. 新井純, THE THEORY OF SYNTHESIZER OPERATION, Rittor Music, 1988.
2. James Anderson Moorer, "Signal Processing Aspects of Computer Music: A survey," Proceeding of THE IEEE, August 1977.
3. C.Roads and S.Strawn, Foundation of Computer Music, MIT press, 1985.
4. R.J.Higgins, Digital Signal Processing in VLSI, Analog Device, 1990
5. YM3812 Application Maunual, YAMAHA, 1990
6. YMF262 Application Maunual, YAMAHA, 1991
7. YM2203 Application Maunual, YAMAHA,
8. 鈴木實, FM 음원 키보드(DX7) 철저연구. 音樂之友社, 昭和 59.
9. J.P.Palamin, "A method of generating and controlling musical asymmetrical spectra," Journal of the Audio engineering society September 1988.
10. United States Patent, "Electronic musical instrument with frequency modulation," Patent Number 5,033,352, July 1991.
11. United States Patent, "Electronic musical instrument using amplitude modulation with feedback loop," Patent Number 4,655,115, April 1987.
12. UnitedStates Patent, "Envelope shape generator for tone signal control," Patent Number 4,928,569, May 1990.
13. United States Patent, "Control waveform generating appratus for an electronic musical instrument," Patent number 4,893,539, January 1990.
14. Schematic Capture User's Manual, Mentor Graphics, 1989.
15. QuickSim User's Manual, Mentor Graphics, 1989.
16. QuickSim Family Reference Manual, Mentor Graphics, 1989.
17. Human Interface Macro Language Manual, Mentor Graphics, 1989.

## ▲홍 현 석



1984년 2월 : 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1986년 2월 : 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1984년 5월~1988년 8월 : 삼성전자(주) 종합연구소

1988년 9월~1991년 12월 : 금성 일렉트론(주) 우면연구소

1992년 1월~현재 : 전자부품종합기술연구소 전자회로연구실 선임연구원

## ▲조 위 덕



1981년 2월 : 서강대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1983년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)

1987년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)

1983년 8월~1990년 3월 : 금성전기(주) 기술연구소 디지털 신호처리 연구실장

1990년 4월~1991년 10월 : 생산기술연구원 HDTV 사업단 조교수

1991년 11월~현재 : 전자부품종합기술연구소 전자회로연구실 선임연구원