

# 비대칭 FM합성방식을 이용한 피리 소리의 합성

변중배, 조상진, 정의필  
울산대학교 컴퓨터정보통신공학부

## Sound Synthesis of Piri by Asymmetric Frequency Modulation

Joongbae Pyoun, Sangjin Cho, Uipil Chong  
School of Computer Engineering and Information Technology, University of Ulsan

### 요 약

FM(Frequency Modulation) 음 합성방식은 오랫동안 연구되어 왔고 여러 가지 효과를 주기에 유용하고 비교적 낮은 사양으로 높은 수준의 배음을 합성할 수 있지만 그 응용분야가 대부분이 서양악기 위주의 연구였다. 이에 본 논문에서는 국악 관악기인 피리를 주파수 영역에서 저주파 영역과 고주파 영역으로 나누어 분석하고 이 결과를 이용하여 FM 파라미터를 추출하고 비대칭 FM합성방식으로 1차적인 소리를 합성하였다. 분석된 저주파 영역과 고주파 영역의 특성을 각각의 역 필터링을 위한 2개의 필터를 설계하여 이를 다시 합성된 소리를 통과시켜 두 소리를 합산함으로써 더욱 원음과 유사한 소리를 합성할 수 있었다.

### I. 서 론

소리 합성방식은 가산합성, 감산합성, FM 합성, 물리적 모델링 등 많은 방식들이 개발되었다. 이 중 FM 합성방식은 John M. Chowning이 1973년에 제시한 방식으로써 금관악기를 중심으로 한 서양악기 위주로 많은 연구가 진행되었다. 반면에 국악기와 관련된 연구는 서양악기에 비해 미비한 수준이다.

이에 본 논문에서는 대표적인 국악 관악기인 피리소리를 비대칭 FM 합성방식을 이용하여 구현하고자 한다.

이를 위해 본 논문에서는 피리의 원음을 분석해 파라미터를 추출하고 이 결과를 다중 캐리어 주파수 FM 합성과 비대칭 FM 합성에 적용하여 합성한다. 이 합성된 신호는 역 필터링을 통과하여 원음과 유사한 소리를 구현하게 된다.

### II. 본 론

#### 1. 피리

피리는 관악기의 총칭으로 사용되기도 하는데, 특정 악기를 지칭하는 음악 용어로는 대나무 관대에 겹서를 끼워 입에 물고 세로로 부는 관악기를 말한다. 피리는 중앙 아시아 지역에서 중국과 우리나라, 일본에 전래되어 제례

악, 궁중음악, 민간풍류, 민속음악 등 여러 장르의 음악에서 주선율을 담당한다.

피리는 음색변화가 다양하고 표현력이 넓어 널리 사용되고 있으며, 향피리, 당피리, 세피리로 분류된다. 향피리와 세피리는 시누대(산죽山竹)로 만들고, 당피리는 시누대보다 굵은 황죽이나 오죽을 쓴다.

향피리와 세피리는 구조나 제작법은 서로 같은데, 향피리는 궁중음악, 민속 합주 등에 사용되고, 가는 세피리는 줄풍류(현악기, 특히 거문고가 중심이 되는 풍류) 연주와 가곡의 반주에 사용된다. 음량이 큰 당피리는 당악 계열의 궁중음악과 종묘제례악에 편성된다[1].

#### 2. FM 합성(Frequency Modulation synthesis)

FM 합성은 FM 전파 통신 기술을 응용하여 단순한 음색을 가청주파수 영역에서 주파수 변조를 통해 복잡한 음색으로 합성하는 방식으로 비브라토, 트레몰로 등의 효과를 적용하기 용이하고 비교적 낮은 사양으로 높은 수준의 배음 구조를 표현할 수 있다[2]. 예를 들어 20의 배음 구조를 갖는 소리가 있다고 가정하면 가산합성의 경우 20개의 오실레이터(oscillator)가 필요하지만 FM합성의 경우 2개의 오실레이터만 있으면 구현이 가능하다. 대표적인 FM 신디사이저로는 야마하(YAMAHA)사의 DX7이 있다.

FM 합성방식을 수식적으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$x(t) = A(t) \sin(\omega_c t + I(t) \sin(\omega_m t)) \quad (1)$$

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

$J_n$  은  $n$ 차 1종 베셀 함수(Bessel functions of the first kind and  $n$ th order),  $\omega_c$ 는 캐리어(Carrier) 주파수,  $\omega_m$ 는 모듈레이터(Modulator) 주파수,  $A(t)$ 는 시간에 따른 음량의 변화,  $I(t)$ 는 시간에 따른 FM 인덱스의 변화이다.

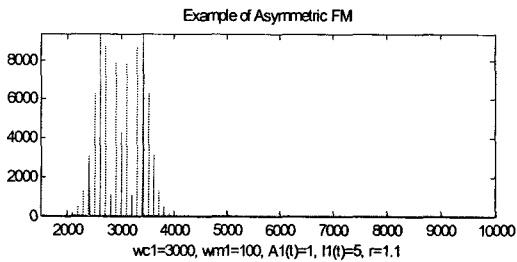


그림 1 FM 합성

1) 비대칭 FM합성(Asymmetrical FM Synthesis)

일반적인 FM 합성방식의 경우 그림 1과 같이 캐리어 주파수를 중심으로 모듈레이터 주파수만큼 간격이 벌어진 좌우 대칭형이 된다. 그러나 대부분의 실제 악기의 경우 좌우 비대칭형이다. 식 (2)는 비대칭 FM 합성을 수식적으로 표현한 것이다.

$$x(t) = A(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} r^n J_n(I(t)) \sin(\omega_c + n\omega_m)$$

$$= A(t) e^{\frac{I(t)}{2} (r - \frac{1}{r}) \cos(\omega_m t)} \sin(\omega_c t + \frac{I(t)}{2} (r - \frac{1}{r}) \sin(\omega_m t)) \quad (2)$$

비대칭 FM합성은 식 (2)의 독립된 파라미터  $r$ 을 추가하여 합성함으로써 실제 악기와 가까운 합성음을 구현할 수 있다[3]. 그림 2는 그림 1과 동일한 조건에서  $r$ 을 1.1로 주었을 경우이다.

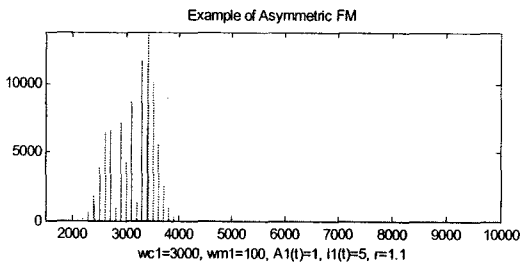


그림 2 비대칭 FM 합성

2) 다중 캐리어 FM합성(Multiple-Carrier FM synthesis)

이 합성방식은 두 개 이상의 캐리어를 이용하여 각각의 FM 합성을 한 후 모든 결과 값을 더하는 방식으로써 각 구역별로 배음 간 독립된 감쇠 시간을 갖기 때문에 고주파수 영역에서의 빠른 감쇠 시간 등을 임의로 조절할 수 있어 사람 음성이나 고전적인 악기의 특성을 표현할 수 있다[2]. 식 3은 다중 캐리어 FM합성을 수식적으로 표현한 것이다.

$$x(t) = A_1(t) \sin(\omega_{c1} t + I_1(t) \sin(\omega_m t)) + A_2(t) \sin(\omega_{c2} t + I_2(t) \sin(\omega_m t)) + A_3(t) \sin(\omega_{c3} t + I_3(t) \sin(\omega_m t)) + \dots + A_k(t) \sin(\omega_{ck} t + I_k(t) \sin(\omega_m t)) \quad (3)$$

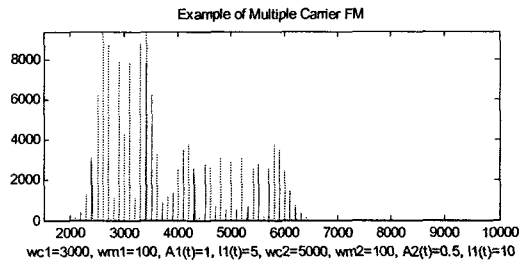


그림 3 다중 캐리어 FM합성

III. 피리 소리 분석

피리는 그림 4와 같이 기본주파수의 정수 배음 구조를 갖고 있어 FM 합성의 특성과 유사하지만 베셀함수의 특성만으로는 구현하기가 힘들다. 따라서 주파수를 저주파 영역과 고주파 영역으로 나누고 각각을 따로 분석했다. 저주파 영역은 에너지의 대부분을 포함하는 것으로 최대 배음성분과의 차가 20dB 이내인 배음들 중에서 가장 주파수가 높은 배음까지이고 그 이후의 배음은 고주파 영역으로 처리하였다. 그림 4의 경우 첫 번째부터 5번째 배음성분까지의 영역이 저주파 영역이고, 6번째부터 최대 주파수까지의 영역이 고주파 영역이다.

그림 4에서 저주파 영역의 경우 1번 >> 3번 > 4번 > 5번 > 2번의 크기로 구성되어 있으며, 고주파 영역은 그림 5와 같이 몇 개의 대역으로 나누어 분석할 수 있다. 첫 번째 대역과 세 번째 대역은 전체적으로 저주파 대역의 크기가 크고 고주파 대역으로 갈수록 크기가 작아지는 것을 알 수 있다. 반면에 두 번째 대역은 전체적으로 저주파 대역의 크기가 크고 고주파 대역의 크기가 작지만 22번째 배음을 중심으로 좌우에 비교적 크기가 큰 배음 성분이 분포하고 있다.

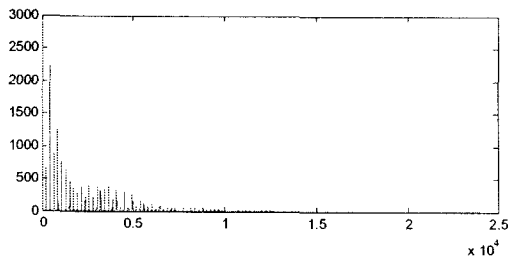


그림 4 피리 소리(A4)의 스펙트럼

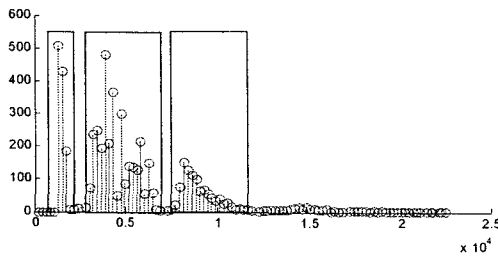


그림 5 저주파 영역의 스펙트럼

#### IV. 피리 소리 합성

##### 1. FM 파라미터 결정

피리 소리는 그림 6에서와 같이 원음의 기본주파수를 구하고 스펙트럼의 저주파 영역과 고주파 영역으로 나누어 각각의 배음 구조를 계산한다.

각 파라미터의 정의는  $\omega_{c1}$ 에 기본 주파수를  $\omega_{c2}$ 에는 기본 주파수의 정수배(25배)를 넣고  $\omega_{m1}$ 과  $\omega_{m2}$ 에 배음 간의 간격을 넣음으로써 배음 구조를 갖게 한다. 피리의 음량의 크기는 취구를 부는 힘에 의해 결정되므로  $A_1(t)$ 와  $A_2(t)$ 의 크기를 1로 고정시켜 계속 같은 힘으로 분다고 가정했다. 저주파 영역의  $I_1(t)$ ,  $r_1$  파라미터는 원음을 저주파 대역 통과 필터(Low-pass filter)를 통과시킨 후의 스펙트럼의 크기 비를 이용하여서 구하였다. 이를 위해 10차 버터워스 필터(Butterworth Filter)를 사용했다[4][5]. 그림 7은 버터워스 저주파 대역 통과 필터의 특성이다. 고주파 영역의 경우  $\omega_{c2}$ 의 값을 중심으로 피리 소리가 나타 낼 수 있는 최대 주파수까지 허용할 수 있도록  $I_2(t)$ ,  $r_2$ 를 조절했다.

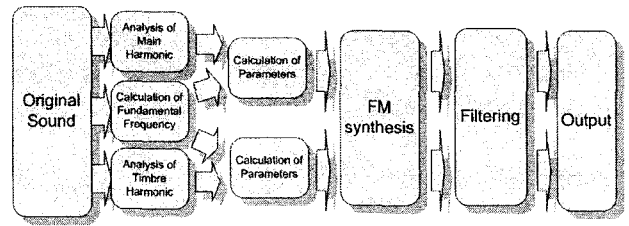


그림 6 전체 프로세스 과정

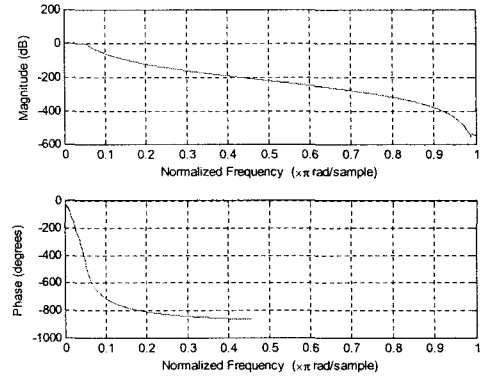


그림 7 버터워스 저주파 대역 통과 필터 특성

##### 2. 필터 특성

전 단계에서 구해진 파라미터를 이용하여 각각을 FM 합성을 하고 저주파 영역과 고주파 영역의 특성을 살린 필터를 통과시킨 결과를 합산함으로써 원음과 유사한 소리를 합성할 수 있었다. 저주파 영역에서 사용한 필터는 원음을 저주파 대역 통과 필터를 통과시켜 5번 배음까지만 통과 시키고 이를 역 필터링을 통해서 특성을 추출한다[5][6]. 반면에 고주파 영역은 원음을 고주파 대역 통과 필터를 통과시켜 6번 배음부터 최대 주파수까지 통과시킨 후 이를 역 필터링을 통해 특성을 추출한다. 그림 8과 그림 9는 저주파 영역과 고주파 영역의 효과를 높이기 위한 필터의 특성이다.

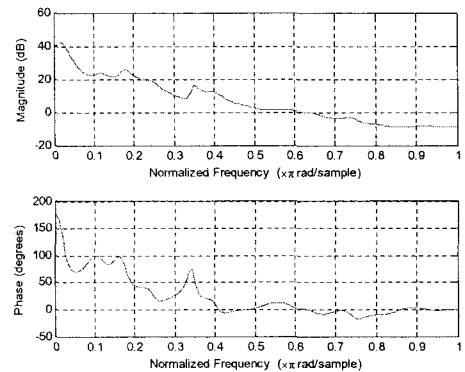


그림 8 저주파 영역 필터 특성

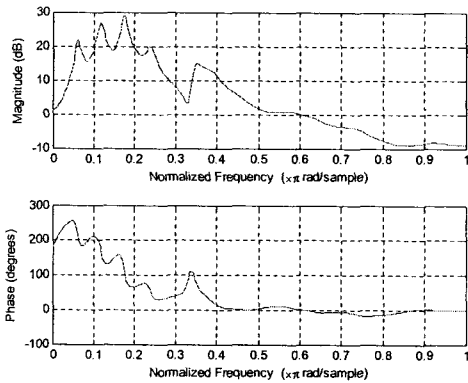


그림 9 고주파 영역 필터 특성

3. 고찰

그림 10에서처럼 합성된 소리는 2번 배음의 크기가 원음보다 2배정도 크고 고주파 영역의 크기 비가 저주파 대역보다는 중심주파수 대역의 크기가 더 커지는 문제점이 있다. 이는 필터링 과정에서 좁은 대역의 조절이 힘들고 최종 합산과정에서 저주파 영역과 고주파 영역이 서로 상쇄가 일어난 것으로 생각된다. 이를 위해 필터의 차수를 높이고 필터 계수를 추출하는 방법 등의 변화가 필요한 것으로 생각된다.

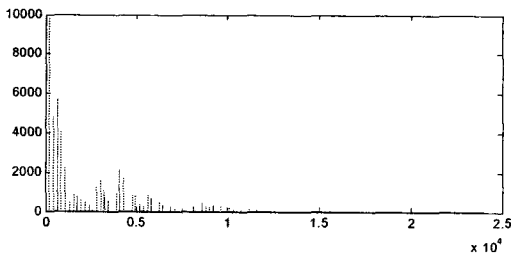


그림 10 합성된 소리

V. 결 론

FM 합성방식은 오랫동안 연구되어 왔지만 대부분이 서양악기를 대상으로 한 연구였다. 이에 본 논문에서는 대표적인 국악 관악기인 피리를 주파수 영역에서 저주파 영역과 고주파 영역으로 나누어 분석하고 이 결과를 이용하여 FM 파라미터와 필터 특성을 추출하여 비대칭 FM방식과 다중 캐리어 FM방식으로 합성했다. 저주파 영역과 고주파 영역의 특성을 표현하기 위하여, 원음을 저주파 대역 통과 필터와 고주파 대역 통과 필터를 통과시키고 이를 역 필터링을 한 결과를 통과시킴으로써 실제 피리 소리와 유사한 소리를 합성할 수 있었다. 향후과제는 원음과 합성된 소리의 차이가 발생하는 원인을 분석하여 그 오차를 줄일 수 있도록 연구가 필요하다. 또한 현재 연구 단계가 단음을 분석, 합성한 결과이므로 피리의 다양한 음을 분석하고, 합성하는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 국립국악원 국악사전, <http://www.ncktpa.go.kr/>
- [2] Curtis Roads, "The computer music tutorial", The MIT Press, 1996
- [3] Gan Seum-Lim B. Sc., "Digital Synthesis of Musical Sounds", <http://xenia.media.mit.edu/~gan/Gan/Education/NUS/Physics/MScThesis/>
- [4] Vinay K. Ingle, John G. Proakis, "MATLAB을 이용한 디지털 신호 처리", 시그마프레스(주), 1998
- [5] 김용수, "MATLAB 입문과 활용", 높이깊이, 2002
- [6] MATLAB Online Technical Documents, <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.html>