

---

# 모바일 기기용 실시간 이중 채널 진동 촉감 음악 재생기

## Dual-band Vibrotactile Music Player for Real-time Playback in Mobile Devices

황인욱, Inwook Hwang\*, 최승문 Seungmoon Choi\*\* 정문채 Moonchae Joung\*\*\*,  
김선욱 Sunwook Kim\*\*\*, 황경훈 Kyunghun Hwang\*\*\*, 사재천 Jaecheon Sa\*\*\*

---

**요약** 본 논문에서는 음악 재생이 가능한 모바일 기기에서 사용자에게 보다 향상된 경험을 제공하기 위해 음악을 진동으로 재생하는 ‘촉감 음악 재생기’의 구현을 소개한다. 구현된 ‘촉감 음악 재생기’는 기존의 구현 사례와 달리 새로 개발된 이중 채널 진동자가 사용되어 음악의 저음과 고음 신호에 대해 구분되는 느낌을 전달할 수 있다. 또한 진동의 인지적 측면이 고려되었으며 ‘햅틱 이퀄라이저’ 기능의 구현으로 음악의 장르에 따라 세분화된 고음 영역의 신호 세기를 조절하여 음악에 어울리는 느낌의 진동을 실시간으로 표현할 수 있다.

**Abstract** We introduce our implementation of ‘vibrotactile music player’ that renders music into vibration feedback to present more improved user experience in a mobile music player device. Our ‘vibrotactile music player’ have several distinguished features, such as: use of the Dual-Mode Actuator (DMA) to distinguished rendering of bass and treble signal, real-time computation and rendering of vibration signal, considerations on vibration perception characteristics, and introduction of ‘haptic equalizer’ to emphasize the feeling of different music genres.

**핵심어:** *Vibrotactile feedback, Multi-modal interaction, Haptic perception, Vibration actuator*

---

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 도약연구지원사업(No. 2010-0018454)과 기초연구실육성사업(No. 2010-0019523) 및 정부(지식경제부)의 재원으로 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(No. NIPA-2010-C1090-1011-0008)의 지원을 받아 수행된 연구임.

\*주저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 HVR 연구실 석박사 통합과정 e-mail: inux@postech.ac.kr

\*\*교신저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수 e-mail: choism@postech.ac.kr

\*\*\*공동저자 : LG 전자 D&S 연구소 e-mail: mc.joung@lge.com, suns.kim@lge.com, kyunghun\_hwang@lge.com, jaecheon.sa@lge.com

## 1. 서론

사용자에게 향상된 경험의 제공과 작업성능 향상을 위한 방법으로 다중의 감각기관을 이용하는 정보 전달이 널리 사용되고 있다. 특히 촉감을 이용하는 정보전달 방법은 휴대전화를 비롯한 다양한 기기의 사용자 인터페이스나 게임에서의 특수효과, 운전자 정보시스템 등에서 그 사용의 폭을 넓혀가고 있다.

음악이나 영화의 감상에서도 진동과 같은 촉감 자극을 통해 사용자에게 몰입감을 제공하려는 시도가 존재하였다. Immersion 사에서 개발한 'TouchSense Player'는 그 대표적인 예로, 이동단말기에서 악보를 가지고 있는 미디어 음원을 진동으로 재생하는 기능을 가지고 있다. 또한 현재 상용화된 체험형 헤드폰 등은 음악에서 저음 영역의 세기를 진동으로 표현하는 방법으로 작은 스피커로 표현하기 어려운 우퍼의 느낌을 제공하였다. 그러나 이러한 사례에서는 진동의 인지적인 면에 대한 고려가 부족하였고 진동 생성 방식이 음악 신호 크기의 단순 변환이거나 저음의 재생에 치중된 면이 있었다.

본 연구에서는 이동 단말기를 위해 새로 개발한 이중의 중첩된 주파수 성분의 생성이 가능한 진동자를 이용하여 악보를 포함하지 않는 음원으로부터 실시간으로 음악을 진동으로 생성, 재생하는 '촉감 음악 재생기'를 구현하였다.

## 2. 본론

촉감 음악 재생기는 크게 이중 채널 진동자가 중심이 되는 하드웨어 부분과 음악으로부터 진동자로의 입력 신호를 생성하는 소프트웨어 부분으로 나뉠 수 있다.

### 2.1 이중 채널 진동자 (Dual-Mode Actuator, DMA)

이중 채널 진동자 (Dual-Mode Actuator; DMA)는 최근 터치스크린이 포함된 휴대단말기에 많이 내장되고 있는 선형 공진 진동자 (Linear Resonance Actuator; LRA)의 재생 가능 주파수가 단일 대역으로 매우 좁은 단점을 극복하기 위해 개발된 진동자이다. DMA는 1개의 무계추-스프링 구조로 구성된 LRA와는 달리, 그림 1의 좌측과 같이 각각 다른 공진 주파수를 가지는 두 쌍의 무계추-스프링 구조를 가지고 있어 두 주파수 성분이 혼합된 진동을 생성할 수 있다. DMA의 두 진동 주파수는 간격이 넓을수록 두 성분이 분명하게 구분되나 이동단말 기기에 내장되는 특성상 진동자의 크기와 소모전력 등에 의해 보다 낮은 주파수의 선택이 제약된다. 따라서 현재의 구현에서 157 Hz와 243 Hz로 되어 있다. DMA는 LRA와 같은 구동 원리를 가지기 때문에 LRA와 마찬가지로 출력되는 진동 가속도와 주파수가 독립적이나, 두 개로 나뉜진 매우 좁은 동작가능 주파수 대역을 가진다.

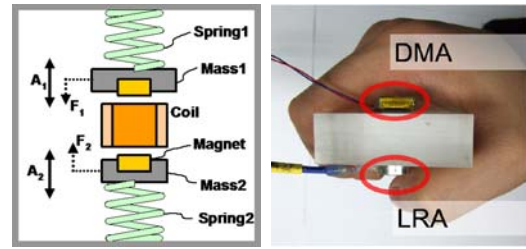


그림 1 (좌측) 이중 채널 진동자 (Dual-Mode Actuator; DMA)의 내부 구조, (우측) 아크릭 모형에 장착된 이중 채널 진동자 (DMA)와 선형 공진 진동자 (LRA)

### 2.2 소프트웨어

본 연구에서 구현한 진동 음악 재생기의 소프트웨어 구조는 그림 2에 나타내었다. 먼저 사용자가 선택한 음악 파일은 매 순간 음악의 세기 정보를 포함하는 데이터의 순열로 변환된다. 이 중에서 현재 재생될 부분을 포함하는 50~100 ms 길이의 조각이 나뉘어져 FFT를 수행한다. FFT를 거쳐 주파수 상에서의 세기로 변환된 신호는 200 Hz를 기준으로 Bass (저음)와 Treble (고음)으로 나누어지며 고음 부분은 다시 200~6400 Hz의 대역이 5 옥타브로 나누어진다. 나누어진 각각의 5개의 세부 주파수 대역에서는 각 주파수 성분 크기의 합으로 그 대역을 대표하는 하나의 크기 값을 가지게 된다. 다음 단계인 햅틱 이퀄라이저에서는 5개의 세부 주파수 대역에 대해 각각의 가중치를 가지고 가중 합으로 고음 대역 전체의 신호 세기를 계산한다. 각 대역의 가중치는 음악 장르별로 기존 음악 프로그램 (jetAudio, Cowon Inc.)의 이퀄라이저에 사용되는 값을 각 장르에서 특징적인 악기의 주파수 대역에 따라 일부 수정하여 설정되었으며 표 1에 이 값을 표시하였다.

저음의 세기와 햅틱 이퀄라이저에서 계산된 고음 세기는 물리적 음악 신호의 세기이므로 이를 인지적으로 같은 크기의 진동 신호로 재생하기 위해서는 감각 기관의 차이에 따른 단위의 변환 과정이 필요하다. 먼저 음악 신호의 물리적 세기를 인지적 세기로 변환하기 위해 Stevens의 지수법칙을 적용하였으며 3 kHz 소리에 대한 상수인 0.67이 지수로 적용되었고 적절한 크기로의 조절을 위해 1/200이 계산된 인지강도에 곱해졌다.

또한 소리의 분포가 한 주파수 대역에 집중되어 있을 때 더 분명하게 들리는 것을 진동에서도 표현하기 위해 고음의 인지강도  $A_{treble}$ 이  $A_{threshold}$ 보다 작을 때에는 각 세부 주파수 대역의 에너지인  $E_i(n)$ 과 햅틱 이퀄라이저에서의 가중치인  $w_i$ 에 따라 고음의 인지강도에 수식 (1)과 같은  $g(n)$ 이 가중치로 곱해졌다.

$$g(n) = \frac{A_{threshold} - A_{treble}}{A_{threshold}} \frac{w_{max} E_{max}(n)}{\sum_{i=1}^5 w_i E_i(n)} \quad (1)$$

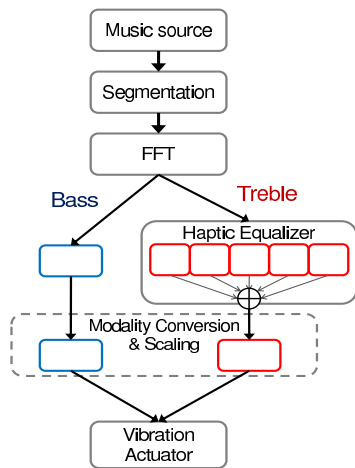


그림 2 진동 음악 재생기의 소프트웨어 구조 및 데이터 흐름

표 1 햅틱 이퀄라이저의 장르 및 주파수 대역별 가중치

장르/주파수 (kHz)	0.2-0.4	0.4-0.8	0.8-1.6	1.6-3.2	3.2-6.4
락	0.25	0.15	0.12	0.18	0.30
댄스	0.25	0.15	0.15	0.20	0.25
클래식	0.25	0.20	0.15	0.15	0.25
발라드	0.05	0.15	0.70	0.05	0.05

본 연구에서는 분리되어 계산된 저음과 고음의 구별되는 표현을 위해 두 대역의 계산된 인지강도를 비교하여 고음이 큰 경우에는 DMA 의 243 Hz 생성 부분만을 구동하고 저음이 큰 경우에는 DMA 의 243 Hz 와 157 Hz 생성부분을 모두 구동하여 두 주파수가 합쳐진 거친 느낌의 진동을 생성하였다. 두 주파수가 중첩되는 경우에는 인지적으로 낮은 주파수의 진동과 유사한 느낌을 전달하고, 그 인지강도가 단일 주파수 진동의 0.8 배 정도임이 사전 실험을 통해 측정되었으므로 이를 고려하여 진동자로의 입력 신호 레벨을 계산하였다. 그림 3 은 실제 243 Hz 와 157 Hz 신호의 인지강도로 표현된 진동자의 구동 레벨을 나타내고 있다.

계산된 진동의 인지적 크기를 진동자에서 생성할 진동가속도로 변환하기 위해서는 Ryu 등이 측정한 모바일 기기에서의 진동의 인지강도 변환식이 적용되었다 [1]. 실제 진동자에 가해지는 구동전압은 DMA 의 입력전압에 대한 응답 가속도의 선형성 데이터에 기반하여 의도하는 인지강도에 맞는 진동 가속도를 출력할 수 있도록 계산되었다.

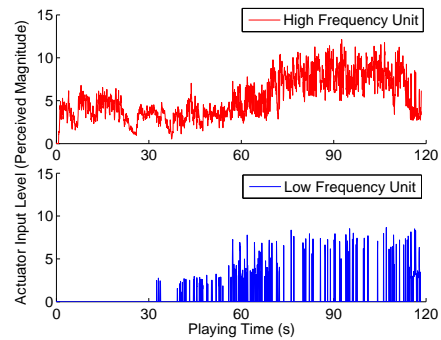


그림 3 이중 채널 진동자를 이용한 음악의 구동 예 (시간에 따른 인지강도 레벨 변화)

## 2.2 구현

소프트웨어 코드는 MS Visual C++ 2008 과 Audiere 1.9.4, FFTW 3.2.2 라이브러리를 사용하여 구현되었으며 3GHz Intel Core 2 Duo CPU 를 사용한 PC 에서 50 ms 의 음악 조각으로부터 진동 신호를 계산해내는 데에 0.3 ms 가 소요되었다. 이동단말 개발환경으로의 전환은 아직 이루어지지 않았으나 최근 1 GHz CPU 가 사용되고 있는 스마트폰의 성능을 고려할 때 실시간 처리가 충분히 가능할 것으로 보인다.

몇 가지 음악을 이용한 실험 결과 음악의 강약 변화가 진동으로 잘 표현되었으며 저음과 고음 신호에 대해서는 서로 구분되는 느낌을 사용자가 받을 수 있었고 특히 주파수의 중첩을 이용한 저음 표현은 기존 단일 주파수를 생성하는 진동자와는 다른 느낌을 전달해 주었다.

## 4. 결론

본 논문에서는 선형 공진 진동자에 기반하여 새로 개발한 이중의 중첩된 주파수 재생이 가능한 진동자를 이용하여 실시간으로 음악을 진동으로 재생하는 ‘촉감 음악 재생기’ 를 구현하였다. 본 연구에서는 음악의 진동 변환 과정에서 사람의 진동 인지 특성을 고려하였고 저음과 고음의 표현 방법을 분리하여 풍부하면서도 분명한 느낌을 전달하도록 하였다. 향후 연구로는 이동단말 환경에서 크게 제약을 받는 전력소모의 최적화 및 사람의 주목성 이론에 기반한 음원으로부터의 진동추출 알고리즘 개선이 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] Jonghyun Ryu, Jaehoon Jung, and Seungmoon Choi, “Perceived Magnitudes of Vibrations Transmitted Through Mobile Device,” In Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, pp. 139-140, 2008.