

모바일 기기에서의 다중 진동 신호 피드백

(Multiple Vibration Signal Feedback for Mobile Devices)

유용재*, 황인욱*, 서종만*, 최승문*
(Yongjae Yoo, Inwook Hwang, Jongman Seo, Seungmoon Choi)

요약

본 논문에서는 모바일 기기에서 사용자 경험의 향상을 위해 다중 진동신호를 활용하는 연구로, 포항공과대학교 햅틱스 및 가상현실 연구실의 '다중 진동자를 사용한 촉각 흐름'과 '실시간 이중 채널 촉각 음악 재생기'의 연구 현황을 소개한다. '다중 진동자를 사용한 촉각 흐름'은 여러 개의 진동자를 사용하여 흐르는 듯한 진동을 생성함으로써 다수의 구분 가능한 진동 신호를 제공할 수 있으며 이를 통한 정보 전달력의 향상을 도모할 수 있다. '실시간 이중 채널 촉각 음악 재생기'는 음악적 신호를 진동 신호로 변환하여 제공함으로써 사용자들로 하여금 더 나은 경험을 제공할 수 있다. 이러한 사례들은 향후 예상되는 모바일 기기에서의 더 많은 정보 전달과 더 나은 사용자 경험에 대한 요구를 충족시키기 위한 좋은 예가 될 수 있을 것으로 기대된다.

■ 중심어 : | 진동 피드백 | 모바일 기기 | 정보 전달 | 모바일 상호작용 |

Abstract

In this paper, we introduce the approaches that aim to improve user experience in mobile devices by the use of multiple vibration signal feedback, conducted by Haptics and Virtual Reality laboratory at POSTECH. We introduce current progresses of our 'Vibrotactile flow using multiple vibration actuators' and 'Real-time dual-channel haptic music player.' The 'Vibrotactile flow using multiple vibration actuators' produces vibrotactile flow sensations by using multiple actuators and that improves the information transfer on mobile devices. The 'Real-time dual-channel haptic music player' generates vibrotactile sensation by transforming auditory signal, which improves the user experience of mobile devices. These approaches can be good examples to fulfill the demands of better information transfer capability and user experience on mobile devices.

■ keyword : | Vibrotactile Feedback | Mobile Device | Information Transfer | Mobile Interaction |

1. 서론

최근 몇 년간의 스마트 폰을 비롯한 태블릿 등 각종 휴대단말 기기들의 폭발적인 성장으로 인하여, 오늘날 모바일 환경은 과거와 비교할 수 없을 정도로 폭넓은 분야에서 활용되며 높은 수준의 정보 전달 능력을 필요로 하게 되었다. 그러나 모바일 하드웨어들의 비약적인 발전에 비하여 정보 전달 및 상호 작용 방식의 개선은 아직 이에 미치지 못하고 있어 다양하고 복잡해진 응용 분야에서 사용자의 정보 전달 수요를 더 이상 충족시키기 힘든 상황에 다다랐다고 할 수 있다.

이를 극복하기 위해 최근 다양한 감각 기관 경로를 통하여 사

용자에게 정보를 전달하고자 하는 시도가 다양하게 이루어졌다. 특히, 기존에 시각과 청각에 비해 널리 사용되지 않았던 촉각 자극을 이용하여 정보를 전달하기 위한 시도가 활발하게 이루어지고 있다 [1][2].

촉각은 시각이나 청각에 비하여 정보 전달 능력은 다소 부족하다는 단점이 있으나, 정보 전달이 접촉점에서만 이루어지게 되므로 개인화에 적합하며, 이미 사용되고 있는 다른 감각에 대한 주의 집중을 흐트러뜨리지 않고 정보를 전달할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 개인화된 알림 기능에 사용되거나, 시각과 청각을 통한 정보 전달의 보조, 강화, 항공기 또는 자동차 운전과 같이 시각과 청각이 모두 사용되는 상황에서 추가적인 정보 전달을 위한 수단으로서의 활용이 연구되어 왔다 [3].

* 정회원, 포항공과대학교 컴퓨터공학과

본 연구는 지식경제부 대학IT연구센터 (No. NIPA-2012-H0301-12-3005) 의 지원과 교육과학기술부의 도약연구지원사업(No. 2012-0006267) 및 기초과학연구실 지원사업(No. 2012-0008835)의 지원을 받아 수행되었음.

접수일자 : 2012년 11월 5일

수정일자 : 1차 2012년 11월 28일

게재확정일 : 2012년 12월 21일

교신저자 : 최승문, e-mail : choism@postech.ac.kr

모바일 기기에서의 촉각 자극의 연구는 초기에는 휴대 전화의 진동 벨과 같이 단순 정보를 전달하는 상황에서의 인식률을 높이고자 하는 방향으로 이루어졌으나, 최근 모바일 기기의 폭발적인 발전은 진동 피드백을 이용한 단순한 경보 및 알림 뿐만 아니라 이를 활용한 사용자 상호작용 및 멀티미디어에의 응용으로 나타나고 있다. 대표적으로, Brewster의 Tacton [4]과 MacLean의 Haptic Icon [5] 은 시각에서의 의미 전달 체계인 아이콘(icon)의 개념을 촉각에 적용시킨 사례이다. 촉각 아이콘은 특정한 촉각 신호 패턴으로 하여금 특정한 의미를 갖게 하여, 이를 상호 작용시에 재생함으로써 사용자에게 정보를 전달하는 역할을 한다. 또한 Chang과 O'Sullivan의 다기능 진동자 (multifunction transducer)를 사용한 진동 음악 재생기 [6] 는 모바일 기기에서 음악을 재생할 때, 음악 파형의 저음부를 진동자를 통하여 같이 재생함으로써 사용자로 하여금 향상된 사용 경험을 받을 수 있도록 한 사례이다.

그러나 이러한 사례들에도 불구하고, 아직까지 대부분의 촉각 자극은 단순한 단일 정현파 (sinusoid) 형태의 진동만이 사용되고 있다. 따라서 생성 및 구분 가능한 촉각 피드백의 종류는 제한될 수밖에 없으며 이로 인해 정보 전달 및 상호작용에서 필요로 하는 충분한 정보를 전달하지 못하고 있다. 뿐만 아니라, 사용자가 느끼는 진동의 느낌 또한 제한적이므로, 다양한 사용자의 감성적 욕구를 충족시키는 데 어려움이 있을 수밖에 없다.

이러한 문제를 극복하기 위해서는 촉각 자극의 다양화와, 이렇게 다양해진 촉각 자극을 어떻게 활용할 지에 대한 연구가 이루어져야 하며 이를 위하여 본 연구실에서는 모바일 기기에서의 소형 진동자를 사용한 다중 진동 피드백에 대한 연구를 수행하였다.

다중 진동 피드백이란 모바일 기기에서 두 개 이상의 진동이 동시에 재생되는 것을 의미하는데, 이는 한 개의 진동자에서 여러 단순 진동이 혼합된 중첩 진동의 파형을 재생하거나, 서로 다른 진동을 재생하는 두 개 이상의 진동자를 사용함으로써 구현할 수 있다. 이를 이용하면 다양한 세기와 주파수를 가지는 진동을 합성하거나, 시간차로 재생함으로써 맥놀이 (acoustic beat) 효과나 촉각 자극이 이동하는 듯한 효과를 발생시킬 수 있으며, 이는 앞서 언급한 단순 정현파 진동보다 더 풍부하고 다양한 느낌의 진동을 생성함으로써 사용자의 욕구 및 정보 전달 능력을 높일 수 있게 된다.

아래 본문에서는 인간의 진동 인지와 상용 진동자들의 특성을 간략하게 소개하고, 다중 진동 피드백의 활용 예시인 다중 진동자를 사용하여 진동이 물 흐르듯이 움직이는 느낌이 들도록 촉각 자극을 구현한 '촉각 흐름'에 관련된 연구 결과와, 하나의 진동자에 두 개의 진동 주파수를 중첩하여 발생시킨 중첩 진동을 이용한 '실시간 이중 채널 촉각 음악 재생기'의 사례를 소개하고 그 효용성에 대하여 기술하였다.

II. 본 론

1. 모바일 기기용 소형 진동자

모바일 기기에서 효과적으로 활용 가능한 다중 진동을 생성하기 위해서는 진동자의 표현 가능한 주파수 및 세기에 따라 생성할 수 있는 다중 진동 피드백의 특성이 크게 제한되므로 소형 진동자의 성능 및 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 절에서는 모바일 기기에서 사용가능한 진동자의 특성에 대한 간략한 내용만을 기술하며, 더 자세한 내용은 참조된 논문에서 더 상세하게 기술되어 있다 [7].

모바일 기기에서 사용되는 진동자는 크기, 전력소모, 진폭, 응답속도, 수명, 내충격성 등에서 엄격한 성능 조건을 만족해야 하며 현재 모바일 기기용으로 사용가능한 진동자로는 크게 편심모터 (Eccentric Rotating Mass, ERM), 선형 공진 진동자 (Linear Resonance Actuators, LRA), 압전 진동소자 (Piezoelectric actuator)등을 들 수 있다.

편심 모터는 모터의 회전축에 비대칭으로 무게를 가함으로써 모터가 회전하면서 발생하는 흔들림을 통하여 진동 자극을 생성해내는 진동자이다. 직류를 사용하기 때문에 제작과 구동이 간단하며 저렴하다. 또한 큰 진폭을 생성할 수 있다는 장점 또한 존재하므로 과거 대부분의 모바일 기기에 진동 알림 기능 제공을 위해 사용되었다. 그러나, 응답 시간이 늦고, 진폭과 주파수가 서로 의존적으로 연결되어 있어 독립적으로 조절할 수 없다는 단점이 있다.

선형 공진 진동자는 교류 전류를 흘려보낸 코일과 영구 자석의 공진 효과를 이용하여 진동 자극을 생성한다. 작은 크기로 제작이 가능하며, 응답 속도가 비교적 빠르고 진폭과 주파수를 독립적으로 조절할 수 있으며 가격이 저렴하다는 장점이 있어 터치스크린에서의 진동 피드백을 위해 편심 모터를 대체하는 용도로 현재의 모바일 기기에서 주로 사용되고 있다. 그러나 매우 좁은 공진 주파수 대역에서만 동작하며 편심 모터에 비해 진동이 약하다는 단점이 있다. 선형 공진 진동자의 좁은 주파수 대역을 보완하기 위한 시도로는 DMA (Dual-Mode Actuator)를 들 수 있다. DMA는 내부에 하나의 교류 코일과 두 개의 서로 독립된 공진 주파수를 갖는 공진 구조를 가지고 있어 독립적으로 진폭 조절이 가능한 두 개의 주파수 성분을 갖는 중첩 진동을 만들어낼 수 있다. 따라서 일반적인 선형 공진 진동자의 장점인 빠른 응답 속도와 저렴한 가격의 장점을 가지는 동시에 두 개의 주파수 대역을 활용한 풍부한 진동 효과를 생성할 수 있어 본 논문에서 소개되는 '실시간 이중 채널 촉각 음악 재생기'의 연구에 활용되었다.

압전 진동소자는 압전 물질에 전압차가 발생하면 물체가 변형하는 압전 효과(Piezoelectric effect)를 이용한다. 응답 속도가 매우 빠르며 넓은 범위에서 주파수를 진폭과 독립적으로 조절할

수 있다는 장점이 있으나 상대적으로 크기에 비해 진동의 강도가 약하고, 내구성이 비교적 떨어지는 단점 때문에 아직은 일부 실험적으로만 사용되고 있다.

2. 다중 진동자를 사용한 촉각 흐름

본 연구실에서는 모바일 기기에서의 진동 효과를 극대화하기 위해서 현재의 단일 진동자를 사용하는 단순한 햅틱 기술이 아닌, 2개 이상의 진동자를 사용하여 연속적인 공간감각을 재현하는 기능에 대한 연구가 수행되었다 [8]. 그 결과로 시간 경과에 따라 모바일 기기의 한쪽 끝에서 반대쪽 끝으로 흐름처럼 연속적으로 이동하는 듯한 진동 혹은 감각을 생성하였고 이를 "촉각 흐름"이라고 명명하였다.

촉각 흐름은 촉각적 착각 현상인 apparent tactile motion [9]과 phantom sensation [10]에 원리의 기반을 두고 있다. Apparent tactile motion은 한 지점에서 자극이 주어지던 뒤 짧은 시간 경과 후 다른 지점에서 자극이 주어지게 되면, 이전에 자극이 주어진 지점에서 그 다음 주어진 지점으로 자극이 움직이는 듯이 느껴지는 현상을 말한다. Phantom sensation은 피부의 인접한 두 지점에 자극을 동시에 주었을 때 두 지점의 자극을 따로 느끼는 것이 아니라 중간의 한 지점에서 자극을 느끼는 것을 말한다. 이 때에 자극이 느껴지는 위치는 두 자극의 세기 차이에 따라 두 자극 중 더 강한 자극에 가깝게 위치한다 (amplitude inhibition [11]). 이 현상을 이용하여 모바일 기기에서 진동자가 부착된 여러 지점에서 진동의 세기를 조절하여 모바일 기기의 면을 따라 진동이 움직이는 듯한 촉각 흐름을 구현할 수 있다.

이 장에서는 현재까지 연구된 1차원 및, 2차원 촉각 흐름의 구현과 그 인지 실험 결과 및 향후 연구 방향에 대해 소개한다.

가. 1차원 촉각 흐름

촉각 흐름에 대한 첫 단계의 연구로 모바일 기기에 2개의 진동자를 부착하여, 각 진동자의 진동 세기를 변화시킴으로써 그림 1과 같이 1차원 상에서 움직이는 진동을 구현할 수 있는지에 대한 연구가 이루어졌다.

(1) 시스템 구성

1차원 촉각 흐름을 테스트하기 위한 기기는 아크릴로 만든 직육면체 형태의 모바일 기기 모형 (10.5 × 4.5 × 1.5 cm) 과 2개의 LRA를 이용하여 구현되었다. 두 진동자는 모바일 기기 모형의 한 쪽 면에 8 cm 간격으로 부착되어 보통 손 크기를 가진 사람이 모바일 기기 모형을 쥐었을 때 손바닥의 엄지손가락 쪽 끝과 새끼손가락 쪽 끝 부분에 나란히 위치하도록 하였다 (그림 2). 두 진동자는 PC의 데이터 수집 카드 (DAQ) 에 의해 진동 파형을 전달받아 구동되었다. 진동 파형은 정현파 형태로, 둘 중 한

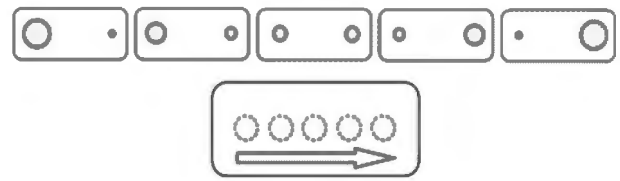


그림 1. 진동감각의 연속적인 공간이동인 촉각 흐름의 개념도

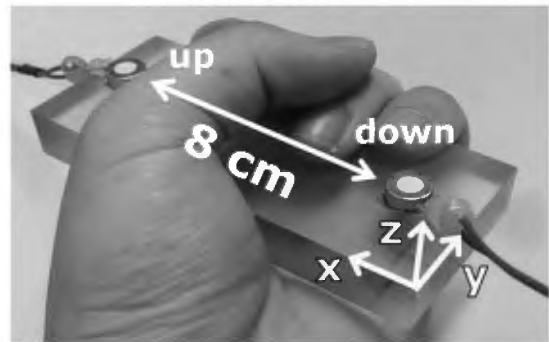


그림 2. 실험에 사용한 모바일 기기 모형과 진동자 부착 형태

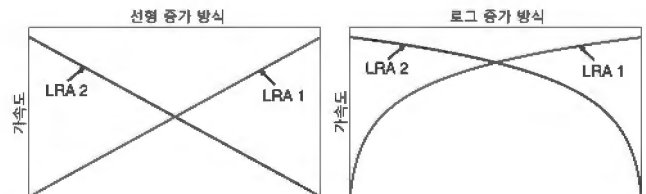


그림 3. 촉각 흐름 구현에 사용된 두 가지 세기 증가 방식

쪽 진동자의 세기는 시간 경과에 따라 감소하는 동안에 다른 쪽 진동자의 세기는 증가하는 방식으로 생성되었다. 이러한 방식의 세기 변화는, 사용자에게 세기가 감소하는 진동자로부터 세기가 증가하는 진동자로 진동 자극이 서서히 이동하는 듯한 착각을 전달하게 된다. 이 때 각 진동의 세기를 변화시키는 기술기에 따라 생성되는 느낌이 다른데, 여기에서는 크게 두 가지 세기 변화 방식에 대해 고려하였다. 하나는 선형 증가 방식으로, 세기가 시간에 관계없이 일정한 기울기로 증감하는 방식이고, 다른 하나는 로그 증가 방식으로, 세기가 시간에 대해 로그 형태로 증감하는 방식이다 (그림 3). 두 진동 세기 변화 방식을 수식으로 표현하면 아래와 같다.

선형 증가 방식:

$$a_1(t) = a_{\max} \frac{t}{T}, \quad a_2(t) = a_{\max} \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (1)$$

로그 증가 방식:

$$a_1(t) = a_{\max} \frac{\log(t+1)}{\log(T+1)}, \quad a_2(t) = a_{\max} \left(1 - \frac{\log(t+1)}{\log(T+1)}\right) \quad (2)$$

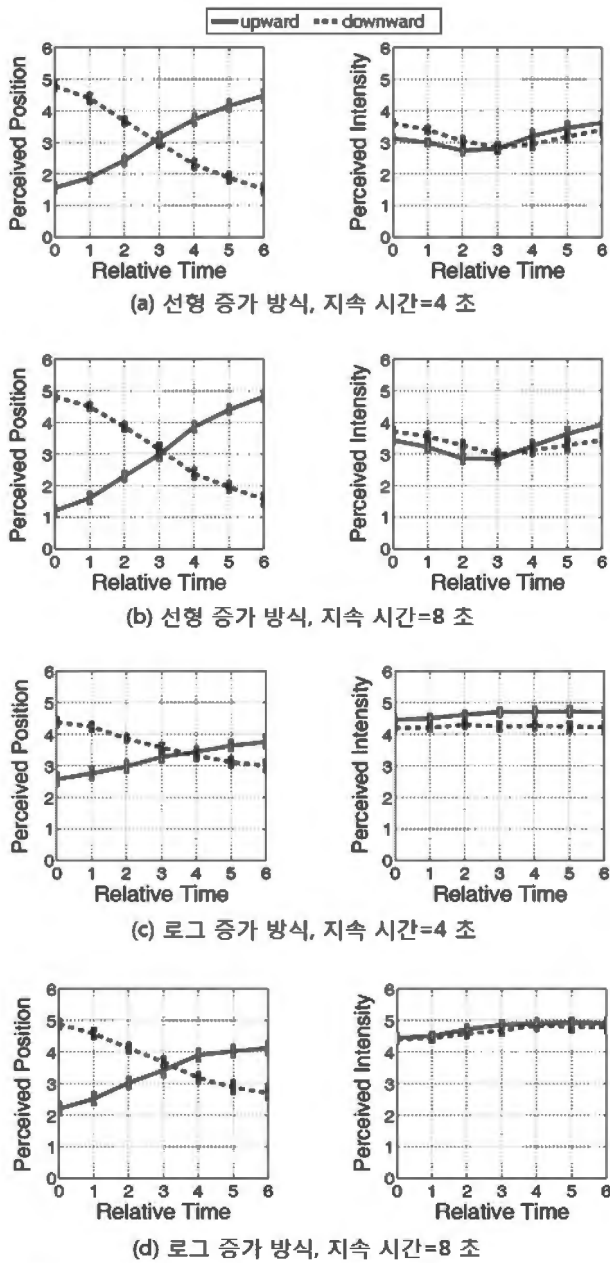


그림 4. 피실험자들의 촉각 흐름에 대한 인지 결과

식 (1), (2)에서 a_{max} 는 사용된 진동자의 가속도 단위 최대 진동 세기를 의미하며, t 는 촉각 흐름의 경과 시간, T 는 촉각 흐름의 전체 지속 시간, $\{a_1(t), a_2(t)\}$ 는 시간 t 에서 각 진동자의 진동 세기를 의미한다. a_{max} 는 약 1.6 G 로, 너무 세기가 강해서 손이 쉽게 피로해지거나 너무 약해서 촉각 흐름을 거의 느끼지 못하지 않는 범위 내에서 적당한 값으로 선택하였다.

(2) 사용자 평가

앞서와 같이 구현된 1차원 촉각 흐름이 실제로 사람들에게 공간 연속적으로 이동하는 듯한 느낌을 전달하는지 검증하기 위한

사용자 평가가 수행되었다. 20대 대학생 10명 (평균 만 22.7 세, 남자 8명, 여자 2명)이 실험에 참여하였다. 촉각 흐름의 경과에 따라 느껴지는 진동 감각의 위치와 세기의 변화를 확인하기 위해 피실험자에게 촉각 흐름을 느낀 뒤에 시간에 따른 감각의 위치 변화 및 세기 변화를 각각의 그래프로 작성하도록 하였다. 그래프는 6 × 6의 이차원으로 구성되었으며, x 축은 상대적인 시간, y 축은 느껴지는 위치 혹은 세기를 표현하도록 하였다. 피실험자는 6개의 시간 축마다 6개의 점을 교점에 찍어 시간 경과에 따른 인지 형태를 표현하였다.

실험에서는 촉각 흐름을 조절하기 위한 세 개의 독립 변수를 설정하여 이들의 변화에 따라 촉각 흐름의 인지가 어떤 형태로 달라지는지 확인하였다. 세 가지 독립 변수는 촉각 흐름의 전체 지속 시간 (T)와 세기 변화 방식, 방향이며, 지속 시간은 4초와 8초, 세기 변화 방식은 선형 증가 방식과 로그 증가 방식, 방향은 위 쪽과 아래 쪽을 사용하였다.

각 독립 변수의 변화에 따른 실험 결과는 그림 4에 나타나있다. 시간에 따른 인지 위치의 변화는 대부분 선형의 형태로 나타난 반면 시간에 따른 인지 세기의 변화는 U자 형태로 나타났다. 시간에 따른 인지 위치 변화를 보면 촉각 흐름이 공간 연속적인 감각 이동의 느낌을 표현할 수 있음을 확인할 수 있다. 촉각 흐름의 지속 시간 동안 느껴지는 진동 세기는 일정하거나 혹은 중간 시점에서 상대적으로 약해지는 경향이 나타났다.

이와 같은 결과로부터 두 가지 척도를 설정하여 독립 변수가 이 척도들에 미치는 영향을 분석해보았다. 두 척도는 인지 자극 위치의 변화량과 인지 세기의 변화량으로, 각각 시간-인지위치 그래프의 기울기와 시간-인지세기 그래프의 분산으로 정의하였다. 분석 결과 세 독립 변수 중에서 방향은 결과에 유의한 영향을 미치지 않았다. 지속 시간과 세기 증가 방식은 인지 자극 변화량과 인지 세기, 변화량 모두에 영향을 미쳤다. 지속 시간이 길수록 인지 위치 변화량이 감소하고 인지 세기 변화량은 증가하였고, 선형 증가 방식이 로그 증가 방식에 비해 인지 위치 변화량과 인지 세기 변화량이 컸다. 이는 빠르게 움직이는 촉각 흐름일수록 감각의 이동거리는 짧게 느껴지나 세기는 일정하다는 것을 의미하며, 로그 증가 방식이 선형 증가 방식에 비해 감각의 이동거리가 짧게 느껴지고 세기가 일정하게 느껴지는 것을 의미한다. 이 결과는 추후 촉각 흐름의 인지적 효과를 변화시키는 데에 참고자료로 사용될 수 있을 것이다.

나. 2차원 촉각 흐름

앞서의 진동자 두 개를 이용한 1차원 상에서의 촉각 흐름에 대한 구현 및 검증 결과를 바탕으로, 1차원 촉각 흐름을 조합한 2차원 상에서의 촉각 흐름을 구현해보았다. 또한 사용자 평가를 통해 2차원 촉각 흐름을 통한 정보 전달량을 파악하는 연구를 진행하였다 [11].

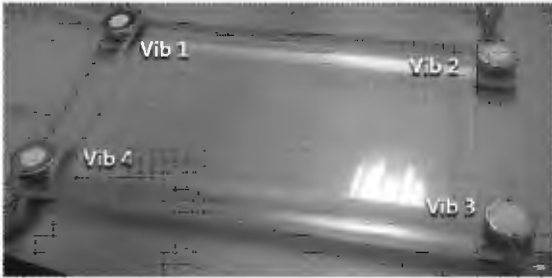


그림 5. 2차원 상에서의 촉각 흐름 구현을 위해 사용된 모바일 기기 모형과 진동자 배치 형태

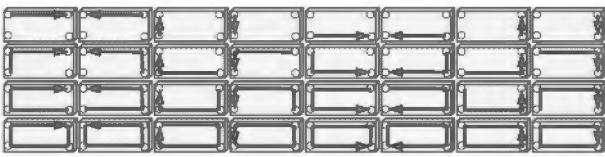


그림 6. 2차원 촉각 흐름의 구현에 사용된 32가지 조합 방식

3.7	53	2.5	73	3.8	73	2.9	93	3.7	73	3.1	60	3.2	100	4.2	67
3.2	73	4.9	80	3.5	67	3.9	33	4.5	73	4.8	53	4.5	47	3.5	60
3.7	60	4.9	60	5.2	47	5.4	73	4.3	53	3.3	60	4.5	67	4.9	13
3.8	67	3.3	60	3.8	27	4.1	53	4.8	47	3.9	60	4.0	27	3.8	13

그림 7. 진동 자극에 대한 정답률 (100 × 해당 자극이 주어졌을 때 정확히 응답한 횟수 / 해당 자극이 주어진 횟수)

(1) 시스템 구성

2차원 상에서의 촉각 흐름은 쥐기 편한 형태로 제작된 모바일 기기 형태의 아크릴 모형 (11 × 6 × 1 cm) 과 4개의 LRA를 이용하여 구현되었다 (그림 5). 긴 변에서의 진동자 간 거리는 10 cm이었으며, 짧은 변에서의 거리는 5 cm 로 자극 간의 명확한 구분을 위해 진동자 간의 거리를 최대한 확보하였다. 기타 장치의 구성은 1차원 촉각 흐름을 구현할 때와 동일하였다.

본 연구에서는 변을 따라 연속적으로 움직이는 듯한 느낌을 전달하는 데에 초점을 맞추어 각 변에서의 1차원 촉각 흐름을 조합하여 4개의 진동자로 생성할 수 있는 촉각 흐름 중에서 32가지를 구현하였다. 이 32가지는 처음에 촉각 흐름이 시작하는 위치 (윗변, 아랫변, 좌변, 우변), 촉각 흐름에 사용되는 변의 개수 (1 - 4개), 방향 (시계방향, 반시계방향) 의 조합으로 그림 6과 같이 생성되었다. 촉각흐름의 지속시간은 일정한 속도로 움직이는 느낌을 받을 수 있도록 긴 변에서는 1초, 짧은 변에서는 0.5초로 설정되었다.

앞서 1차원 촉각 흐름을 구현할 때에는 두 가지의 세기 변화 방식을 고려하였으나, 2차원 촉각 흐름의 구현에서는 선형 변화 방식의 한 가지만을 고려하였다. 촉각 흐름에 사용되는 변의 개수가 하나일 때에는 1차원 촉각 흐름과 구현 방법이 동일하며, 개수가 증가할 때에도 1차원 촉각 흐름을 연속적으로 재생하는 방법

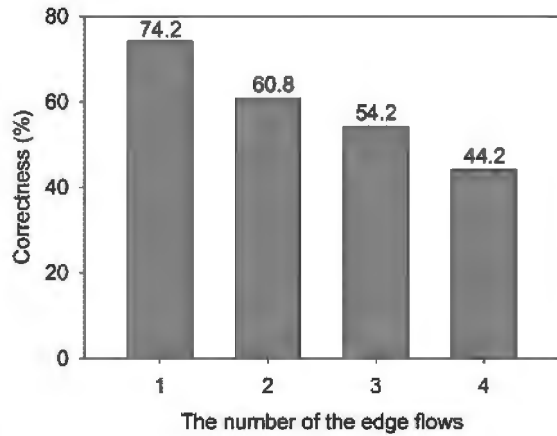


그림 8. 촉각 흐름에 사용된 변의 개수에 따른 진동 자극의 정답률

으로 구현하였다. 따라서 최대 같은 변에 있는 두 개의 진동자가 동시에 각 변을 따라 구동되었다.

(2) 사용자 평가

위에서 구현한 32가지 조합 형태가 어떻게 사용자들에게 전달되고 구분가능한 형태로 인지되는지를 확인하기 위해 사용자 평가가 이루어졌다. 20대 남성 3명이 실험에 참여하였으며 무작위로 32가지 촉각 흐름 중에 하나를 느끼게 하고 32가지 중에 어떤 것인지 맞추는 실험이 진행되었다. 피실험자는 촉각 흐름을 시각적으로 표현한 그림 아이콘을 클릭하여 응답하였으며 각 진동 자극을 5번씩 반복하여 총 160개의 진동을 평가하였다. 각 진동 사이에 강제로 2초간의 휴식을 갖도록 하였다.

실험에서 진동 자극에 대한 정답률을 구한 결과는 아래의 그림 7과 같다. 이 정답률이 세 가지 독립 변수인 촉각 흐름이 처음에 시작하는 위치, 촉각 흐름에 사용된 변의 개수, 방향에 대해 유의한 영향을 받았는지 확인하기 위해 삼원 분산분석(three-way ANOVA) 을 수행한 결과, 촉각 흐름에 사용된 변의 개수만이 유일하게 정답률에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 정답률은 그림 8에 나타난 것과 같이 촉각 흐름에 사용된 변의 개수가 1개일 때 74.2 %에서 4개일 때의 44.2 %까지, 변의 개수가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

또한 2차원 촉각 흐름을 이용하였을 때 32 가지의 촉각흐름 중 몇가지를 구분할 수 있는지 알아보기 위한 척도로 정보 전달량 (Estimated information transfer, T_{st}) 을 [12]에서 제시된 수식을 이용하여 계산하였다. 그 결과, 평균 3.703 bit 만큼의 정보량을 제공하는 것으로 나타났으며 이는 약 13가지의 구분 가능한 정보를 2차원 촉각 흐름을 통해 전달할 수 있음을 의미한다.

다. 논의 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 1차원 촉각 흐름 및 이를 조합한 2차원 촉각 흐

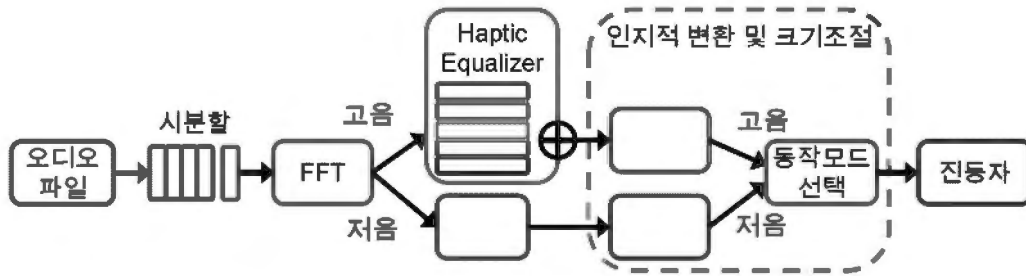


그림 9. 실시간 이중 채널 촉감 음악 재생기의 데이터 흐름도

름의 구현 및 검증이 이루어졌다. 2차원 촉각 흐름은 현 단계에서는 1차원 촉각 흐름을 조합한 것에 불과하지만 2차원 상에서도 의미있는 수준의 정보 전달이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 차후 단계로 3개 이상의 진동자를 동시에 구동하여 곡선 등의 형태로 진동 감각의 움직임을 자유롭게 렌더링하는 기술이 가능할 것으로 예상되며 이에 대한 연구가 수행될 계획이다.

3. 실시간 이중 채널 촉감 음악 재생기

실시간 이중 채널 촉감 음악 재생기는 모바일 기기에서의 음악 감상시 음악에 어울리는 진동을 함께 제공하여 사용자의 음악에 대한 몰입도와 재미를 향상시키기 위해 개발되었다. 이러한 촉각 음악 재생기와 유사한 목적의 기능은 기존에 여러 시도들이 있었으며 최근 일부 모바일 기기에는 Immersion사에 의해 개발된 실시간 변환 기능이 탑재되고 있다 (예: 삼성전자 Galaxy S3).

그러나 현재 상용화된 촉감 음악 재생기능은 진동 생성 알고리즘과 사용되는 진동자 모두에서 명확한 한계점을 가지고 있다. 현재 모바일 기기에 내장되는 소형 진동자에서 표현 가능한 주파수 범위는 최대 약 50 - 500 Hz이며 음악에서 주 멜로디에 포함되는 사람의 목소리 성분은 이보다 훨씬 높은 약 1 kHz 대역에 위치한다. 그러나 기존 진동생성 알고리즘에서는 이러한 진동과 음악의 상이한 주파수 대역에 대한 고려 없이, 음악 신호를 그대로 진동자에 보내서 재생하거나 저역필터 (low-pass filter)와 같은 동작을 통해 진동을 생성하였다. 따라서 기존 구현에서는 고음 성분에 포함된 음악의 주된 멜로디가 진동으로 표현되지 못하고 저음 성분에 포함된 단순한 드럼이나 기타의 비트만이 진동으로 재생되어 사용자들에게 음악의 흐름과 다소 동떨어진 지루한 진동으로 느껴지는 문제가 있다. 또한 현재 대부분의 모바일 기기에 내장된 진동자는 대부분 편심진동모터나 선형공진진동자로 진폭과 주파수를 독립적으로 조절할 수 없거나 하나의 주파수 대역만 사용가능하므로 진동 주파수의 변화를 이용한 다양한 진동의 표현이 불가능하다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 본 논문에서 소개하는 촉감 음악 재생기 [13]는 음악에서의 저음과 고음 신호를 각각 구분되는 진동 신호로 사용자에게 전달할 수 있도록 개발되었다. 또한 음

악의 장르와 그 특성을 반영하여 사용자의 취향에 따라 생성되는 진동의 느낌을 조절할 수 있도록 햅틱 이퀄라이저 기능이 포함되었으며 사람의 청각 및 촉각 인지 특성을 고려하여 신호의 강도 변환 과정이 구현되었다. 이 장에서는 본 연구실에서 개발된 실시간 이중 채널 촉감 음악 재생기의 구성과 현재 구현된 시스템의 사용자 평가에 대한 자세한 내용을 소개한다.

가. 시스템 구성

실시간 이중 채널 촉감 음악 재생기의 소프트웨어 내부 구성과 데이터의 흐름은 그림 9와 같다. 먼저 매 순간별 소리의 세기를 담은 음악 파일은 수십ms 길이로 잘게 나뉘어져 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform, FFT)을 수행하여 각 주파수 대역별 세기로 표현된다. 음악 파일이 나뉘어지는 단위 길이가 짧을수록 더 빠르고 섬세하게 반응하는 진동 신호의 생성이 가능하나 너무 짧은 경우 연산량의 증가와 FFT에서의 샘플 수 부족으로 정밀도 하락과 낮은 주파수의 신호 강도 계산이 어려워진다.

계산된 주파수별 음악 신호의 세기는 200 Hz를 기준으로 저음과 고음으로 나뉘어지며 음악에서 다양한 악기 소리 및 음성이 포함되는 고음 부분은 200 Hz - 6.4 kHz 의 주파수 범위를 다시 한 옥타브 단위로 5개의 세부 주파수 대역으로 나누게 된다. 각 세부 주파수 대역에서는 포함되는 주파수별 신호 세기를 모두 더해 주파수 대역에 포함되는 에너지를 계산하며, 음악프로그램에서의 이퀄라이저 기능과 같이 이 5개 세부 주파수 대역별 에너지의 가중합으로 고음 대역의 전체 에너지를 얻을 수 있다.

이와 같은 ‘햅틱 이퀄라이저’의 가중치 조절 기능은 특정 주파수 대역에 위치한 가수의 음성이나 악기의 소리를 진동에서도 원하는 대로 강조할 수 있게 한다. 세부 주파수 대역별 가중치는 사용자가 직접 설정할 수 있으며 현재의 구현에서는 락, 댄스, 클래식, 보컬 음악에 알맞은 사전 설정값을 제공하고 있다.

햅틱 이퀄라이저를 거쳐 계산된 고음 대역과 저음 대역의 음악 신호 세기는 알맞은 진동의 세기로 변환되기 위한 과정을 거친다. 음악 파일에 담겨 있는 신호는 소리의 물리적 크기를 단위로 한다고 볼 수 있으며 여기에서 만들어지는 소리는 사람의 청각 인지 체계를 거쳐 물리적 단위와는 다른 인지적 단위로 받아들여진다. 이러한 자극의 인지적 신호 세기는 청각에서 촉각으로의 감

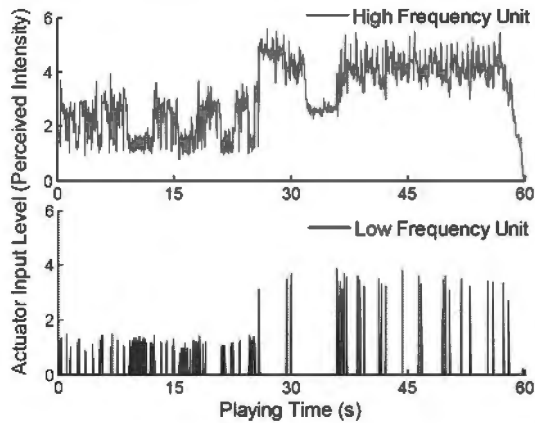


그림 10. 실시간 이중 채널 촉감 음악 재생기의 인지강도 단위 출력 신호 크기

각 변화에 따른 선형 변환을 거쳐 다시 진동 자극의 물리적 단위인 가속도로 변환된다. 물리적 단위와 인지적 단위 사이의 변환은 기존 정신물리학 연구에서 실험을 통해 측정된 데이터를 바탕으로 추정된 인지 강도 모델을 적용하여 이루어진다. 이 인지 강도 모델은 Stevens의 지수법칙 (Stevens' Power law)에 의해 기울기와 지수를 자극의 종류별 인자값으로 하는 간단한 지수 함수의 형태로 근사될 수 있다. 본 연구에서는 청각의 변환에는 Stevens의 모델 [14]을, 진동촉각의 변환에는 본 연구실의 별도 연구에서 추정된 모델 [15]을 사용하였다. 이러한 인지적 지식에 기반한 신호 세기의 변환과정을 통해서 음악 파일에서 시간에 따른 소리의 실제 느껴지는 강도 변화는 그 선형성을 유지한 채 진동의 강도 변화로 변환되어 사용자들이 느낄 수 있다.

또한 이 단계에서는 소리의 분포가 한 주파수 대역에 집중되어 있을 때 주변 잡음이나 다른 소리들이 넓은 주파수 대역에 퍼져 있는 경우보다 더 분명하고 크게 인지되어 들리는, 음량의 주파수 대역에 따른 대비 효과를 진동 신호에서 반영하기 위해 추가적인 증폭을 위한 가중치가 계산되어 신호 세기에 곱해졌다.

다음 단계인 동작모드 선택기에서는 크기가 변환된 저음과 고음 각각의 진동 신호의 크기를 서로 비교하여 큰 쪽으로 동작 모드를 결정한다. 고음 동작 모드에서는 DMA에서 생성 가능한 2개의 공진주파수중 높은 주파수만을 사용하여 고음 신호의 크기로 진동이 생성되고 (고주파수 정현파 진동) 저음 동작 모드에서는 DMA에서 생성 가능한 높은 공진주파수와 낮은 공진주파수 신호를 중첩하여 2개의 정현파가 겹쳐진 형태로 저음 신호 크기의 진폭을 갖는 진동을 생성한다 (이중주파수 중첩 진동). 실제 음악 파일에 대해 구동시 이 단계에서 생성되는 신호의 예는 그림 10과 같다.

DMA를 이용한 저음 동작 모드에서 중첩 진동 대신에 낮은 공진 주파수 만을 이용하는 방법도 고려할 수 있으나 모바일 기기에 내장되는 소형 진동자의 특성상 높은 공진 주파수와 낮은 공진 주파수 모두 100 Hz 이상의 사람에게 부드럽게 인식되는

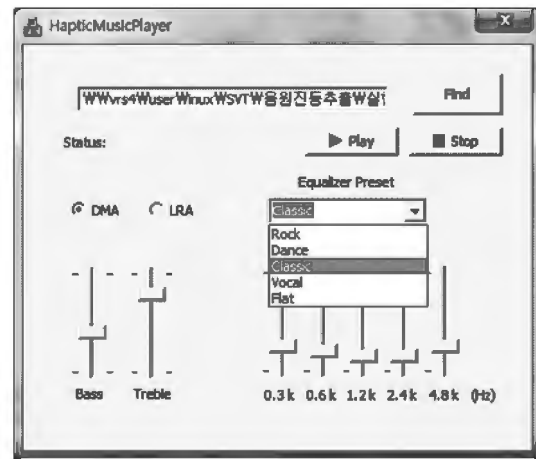


그림 11. 구현된 실시간 이중 채널 촉감 음악 재생기의 실행화면

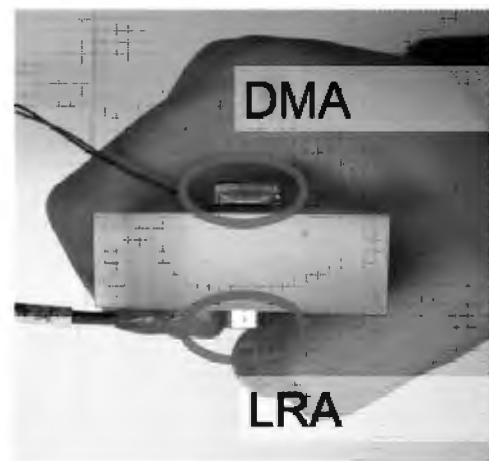


그림 12. 사용자 평가를 위해 플라스틱 모바일 기기 모형에 장착된 LRA와 DMA

대역에 위치하고 있으므로 두 진동 주파수간의 느껴지는 차이는 크지 않다. 반면 두 주파수가 중첩된 진동의 경우 단일 정현파 진동과 크게 구별되는 느낌을 전달하며 100 Hz 이하의 낮은 주파수를 가지는 진동과 유사한 정도의 거칠기를 전달할 수 있음이 본 연구실의 진폭변조 진동의 주파수에 따른 인지적 공간에 대한 연구 [16]나 단일 정현파 진동과 중첩된 진동의 구별실험을 진행한 Bensmaia의 연구 [17], 입수철 등의 맥놀이의 인지역치 연구 [18]에서와 같이 최근 보고되고 있다. 따라서 이러한 중첩 진동의 인지적 효과를 이용하여 소형 진동자의 제한된 진동 재생폭에서 단일 주파수의 진동과 구분되는 다양한 표현을 만들어낼 수 있고 특히 드럼 비트나 베이스 기타 등 음악에서의 낮은 주파수에 해당하는 악기의 느낌을 고음 신호와 구분되게 모사할 수 있다.

저음 또는 고음으로 동작 모드가 결정된 가속도 단위의 진동신호는 진동자의 입력전압별 출력가속도 특성을 고려하여 알맞은 입력전압으로 진동자에 출력된다.

초기에 개발된 실시간 이중 채널 촉감 음악 재생기는 그림 11

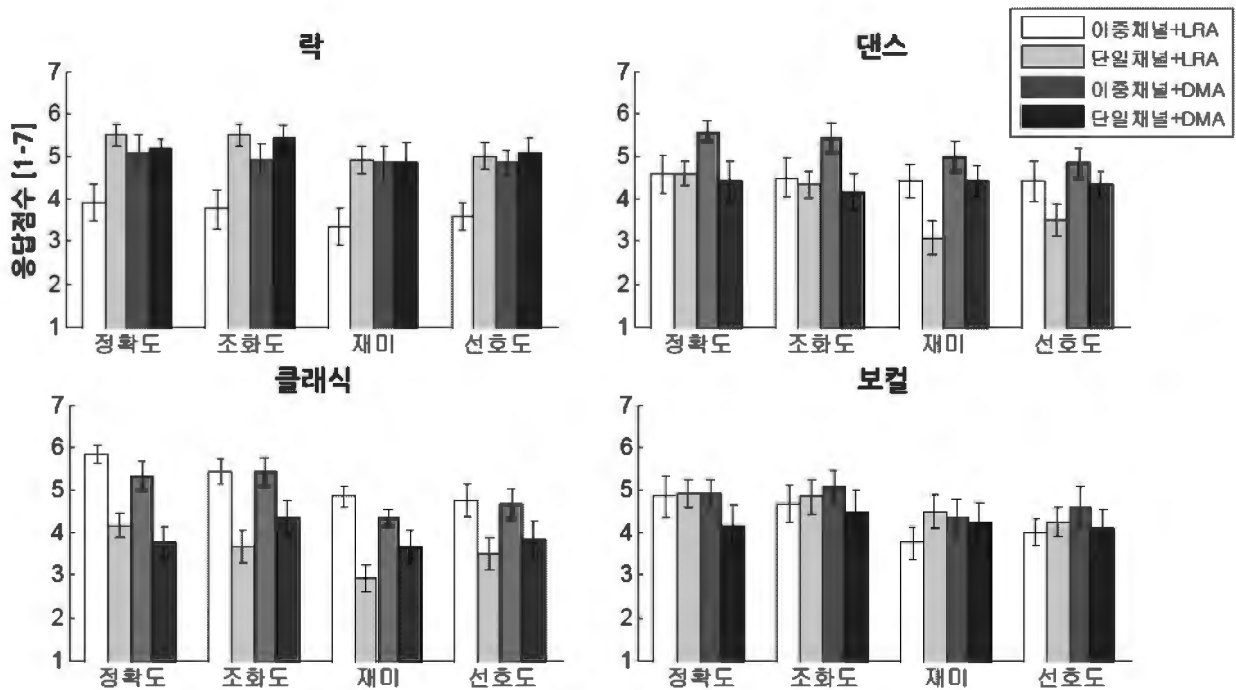


그림 13. 음악 장르별 사용자 평가 결과 (평균 및 표준 오차)

과 같이 데스크탑 PC 환경에서 개발되었다. 이는 그림 12와 같은 모바일 기기의 모형에 진동자를 부착하여 구현되었으며, 이를 이용하여 후술할 사용자 평가를 진행하였다. 그러나 앞서 소개된 일련의 동작 과정은 모바일 기기에서도 실시간에 처리될 수 있도록 단순한 연산으로 최적화되었다. 모바일 기기용으로 연산 부분을 이식하여 테스트한 결과, 50 ms의 한 주기당 약 1.0 ms가 소요되어 충분한 성능을 보여주었으며 (삼성 Galaxy S2, Android 4.0 환경) 현재 사용자, 하드웨어 인터페이스를 포함한 모바일 기기로의 완전한 이식을 진행중에 있다. MP3 플레이어 등 보다 낮은 성능의 기기에서의 구동을 위해 연산 부담을 줄이는 방법으로 음악 신호의 다운샘플링, FFT의 포인트 수 감소, 연산의 단위시간 증가 등을 활용할 수 있다. 촉각 음악 재생기의 실시간 재생 능력은 모바일 기기의 사용자가 가지고 있는 수많은 음악 콘텐츠들을 추가적인 작업시간이나 저장공간의 사용 없이도 진동으로 만들어낼 수 있다는 점에서 중요한 특성이라고 할 수 있다.

나. 사용자 평가

개발된 실시간 이중 채널 촉각 음악 재생기의 사용성을 평가하기 위한 일반인 대상의 사용자 평가가 이루어졌다. 12명의 남녀 20대 학생이 참가한 이 실험에서는 사용되는 진동자의 종류 (LRA, DMA)와 재생 방식 (저음 단일 채널, 이중 채널)에 따라 네가지 실험 조건이 생성되어 락, 댄스, 클래식, 보컬 음악 장르별로 미리 정해진 이퀄라이저 값을 사용되었다. LRA 사용 조건에서는 저음 신호와 고음 신호에서 모두 중첩 진동 대신 단일 공진 주파수 진동이 생성되었다. 피실험자들은 각 조건마다 그림 13와

같이 진동자가 장착된 플라스틱 모바일 기기 모형을 손에 쥐고 음악과 함께 진동을 느낀 뒤에 진동의 정확도, 조화도, 재미, 선호도를 평가하였다.

평가 결과는 그림 13에 그래프로 나타나있다. 평균적으로 이중 채널 재생방식으로 DMA를 이용하여 진동을 생성한 결과 다른 방식에 비해 대부분의 음악과 평가 항목에서 우수한 평가 결과가 나타났으며 특히 비트가 두드러지는 댄스 음악에서 그 우위가 두드러졌다. 주관식 설문응답에서도 피실험자들은 DMA가 만들어내는 두 개의 주파수와 중첩된 진동에 대해 대체로 호의적인 평가를 나타내었다. 반면 LRA가 만들어내는 단일 주파수 진동에 대해서는 부드럽지만 밋밋하고 지루하다는 응답을 보여주었다.

다. 논의 및 향후 연구 계획

현재 개발된 실시간 이중 채널 촉각 음악 재생기의 모바일 기기로의 이식은 연구의 목적을 고려할 때 가장 우선되는 사항이라 할 수 있다. 음악재생 뿐만 아니라 뮤직비디오, 영화, 게임 등의 배경음악 및 효과음에도 적용될 수 있는 형태로의 개발이 필요하다. 이와 더불어 자동으로 음악의 종류를 판별하고 그에 맞게 진동의 강도와 햅틱 이퀄라이저의 주파수 대역별 중폭 기중치를 결정하는 것도 필요한 기능이라 할 수 있다. 장기적으로는 진동 신호를 생성하기 위한 알고리즘을 현재의 단순한 신호 크기의 추출에서 사람의 청각적 주목도를 고려하는 알고리즘으로의 변환이 촉각 음악 재생기의 성능 향상을 위해 필요한 연구 주제라 할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서 소개한 다중 진동자를 이용한 촉각 흐름과, 실시간 이중 채널 촉각 음악 재생기의 사례는 촉감을 사용한 모바일 기기에서의 정보전달 및 상호작용에서 다중 진동을 이용함으로써 더 나은 사용자 경험과 더 많은 정보 전달을 수행해 낸 좋은 사례라 할 수 있다.

촉각 흐름을 이용한 정보 전달을 알아보기 위한 실험에서는 1차원 흐름의 경우 피실험자들이 비교적 정확하게 진동 흐름의 위치를 감지해내었으며, 2차원 흐름의 경우는 약 13개 내외의 정보를 전달할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 2차원 흐름은 정답률의 향상을 목표로 현재 연구가 이루어지고 있다.

이는 게임이나 멀티미디어 콘텐츠 등에 활용됨으로써 더 풍부한 사용자 경험을 제공하는 데 도움을 줄 수 있으며, 시청각 뿐만 아니라 촉각으로 정보를 전달함으로써 더 많은 정보를 모바일 기기 사용자에게 전달할 수 있음을 의미한다.

실시간 이중 채널 촉각 음악 재생기의 사례는 다중 진동을 활용한 촉각 피드백을 이용하여 사용자 경험의 향상을 얻어낸 사례라 할 수 있다. 두 개의 주파수 성분과 진동자를 이용함으로써 음악에서의 저음 및 비트에 해당하는 부분을 모사하였으며, 또한 햅틱 이퀄라이저 기능을 사용함으로써 고음부와 저음부의 신호를 음악의 종류에 따라 적용하여 사용자들에게 좋은 평가를 받았다. 이 촉각 음악 재생기는 사람의 청각적 주목도를 고려한 알고리즘과, 자동으로 음악 종류를 판별하여 그에 맞는 촉각 신호를 생성하는 알고리즘의 추가를 통한 개선이 이루어질 수 있으리라 생각된다.

앞으로 예상되는 모바일 기기에서의 더 많은 정보 전달에 대한 요구와 더 나은 사용자 경험에 대한 요구를 충족시키기 위하여 다양한 촉각 자극과 이의 활용이 필요할 것으로 보이는 바, 본 연구실의 다중 진동 피드백 방법과 응용 사례가 좋은 본보기가 될 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] H. Z. Tan, Information Transmission with a Multi-Finger Tactual Display. Ph.D. thesis, *Massachusetts Institute of Technology*, 1996.
- [2] K. Kyung; J. Lee; , "Ubi-Pen: A Haptic Interface with Texture and Vibrotactile Display," *Computer Graphics and Applications*, IEEE, vol. 29, no. 1, pp. 56-64, 2009.
- [3] J. Ryu, J. Chun, G. Park, S. Choi, S. H. Han, "Vibrotactile Feedback for Information Delivery in the Vehicle," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 2, pp. 138-149, 2010.
- [4] L. M. Brown, S. A. Brewster, and H. C. Purchase, "A First Investigation into the Effectiveness of Tactons," *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems* (World Haptics Conference), 2005, pp. 167-176.
- [5] K. E. MacLean, M. Enriquez, "Perceptual Design of Haptic Icons," *Proceedings of Eurohaptics*, pp. 351-363, 2003.
- [6] A. Chang, and C. O'Sullivan, "Audio-Haptic Feedback in Mobile Phones" *Proceeding of the Annual SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1264-1267, 2005.
- [7] S. Choi and K. J. Kuchenbecker, "Vibrotactile Display: Perception, Technology, and Applications," *To be appeared in Proceedings of the IEEE*, 2012
- [8] J. Seo and S. Choi, "Initial Study of Creating Linearly Moving Vibrotactile Sensation on Mobile Device," *Haptics Symposium (HS)*, pp. 67-70, 2010
- [9] C. E. Sherrick and R. Rogers, "Apparent haptic movement," *Perception & Psychophysics*, vol. 1, no. 6, pp. 175-180, 1966.
- [10] D. S. Allies, "Information transmission by phantom sensations," *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 85 - 91, 1970.
- [11] 서종만, 최승문, "모바일 기기에서 흐르는 듯한 진동 감각을 이용한 2차원 방향정보 전달", *한국차세대컴퓨터학회 논문지*, vol. 7, no. 5, pp. 35-44, 2011년
- [12] H. Z. Tan, C. M. Reed, and N. I. Durlach, "Optimum Information-Transfer Rates for Communication through Haptic and Other Sensory Modalities", *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no.2, pp. 98-108, 2010.
- [13] 황인욱, 최승문, 정문채, 김선욱, 황경훈, 사재천, "모바일 기기용 실시간 이중 채널 진동 촉각 음악 재생기", *한국 HCI 학술대회 논문집*, 251-253쪽, 2011년
- [14] S. S. Stevens, G. Stevens, and L. E. Marks, *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural, and social prospect*. John Wiley & Sons, 1975.
- [15] J. Ryu, J. Jung, G. Park, and S. Choi, "Psychophysical model for vibrotactile rendering in mobile devices," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 19, no. 4, pp. 1 - 24, 2010.

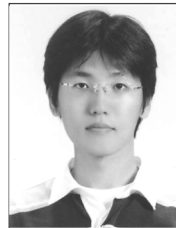
- [16] G. Park and S. Choi, "Perceptual Space of Amplitude-Modulated Vibrotactile Stimuli," *In Proceedings of the IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 59-64, 2011.
- [17] S. Bensmaia, M. Hollins, J. Yau, "Vibrotactile intensity and frequency information in the Pacinian system: A psychophysical model," *Perception & Psychophysics*, vol. 67, no. 5, pp. 828 - 41, 2005
- [18] S. C. Lim, K. U. Kyung, and D. S. Kwon, "Effect of frequency difference on sensitivity of beats perception," *Experimental Brain Research*, vol. 211, pp. 11 - 19, 2012.

저 자 소 개



유용재(준회원)

2011년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업.
 2012년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 박사 재학 중
 <주관심분야 : 햅틱스, 청각-촉각 인터페이스, 촉감 인지, HCI >



황인욱(비회원)

2006년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업.
 2012년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 박사과정 재학 중.
 <주관심분야 : 진동촉각 피드백, 촉감 인지, HCI>



서종만(비회원)

2009년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업.
 2012년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 박사 재학 중.
 <주관심분야 : 햅틱스, 진동촉각 피드백, 촉감 인지>



최승문 (비회원)

1995년 서울대학교 제어계측공학과 학사 졸업.
 1997년 서울대학교 제어계측공학과 석사 졸업.
 2003년 Purdue Univ. Dept. of Electrical and Computer Engineering, 박사 졸업.
 2012년 포항공과대학교 컴퓨터공학과 부교수 재직 중. 현 IEEE 햅틱스 기술위원회 공동의장 재직 중.
 <주관심분야 : 햅틱스, 촉감 인지, 로보틱스, 햅틱 제어 등>