

## 진동 화음의 어울림 인지에 대한 가능성 연구

### Consonance Perception of Vibrotactile Chords: A Feasibility Study

유용재, Yongjae Yoo\*, 황인욱 Inwook Hwang\*\*, 최승문 Seungmoon Choi\*\*\*

**요약** 본 연구에서는 고성능의 진동자들에 적용하기 위한 복잡한 진동 자극을 설계하기 위하여 음악의 화음 개념을 이용한 새로운 진동 자극의 설계 방법을 제시하였으며, 이를 “진동 화음”이라 명명하였다. 이 “진동 화음”은 서로 다른 주파수를 가진 정현파(sinusoid) 진동을 음악 화음의 구조와 유사하게 중첩하여 생성되었다. 실험에서는 이 “진동 화음”的 인지를 알아보기 위하여 다양한 조건의 진동화음에 대하여 어울림의 정도를 나타내는 척도인 협화도를 평가하고, 어울림과 어울리지 않음에 대한 피험자의 평가 기준을 조사하였다. 실험에 참가한 피험자들은 비교적 뚜렷한 기준을 가지고 협화도를 평가하였으며, 이러한 피험자들의 기준은 과거 진동 인지 실험 결과와 어느 정도 유사성이 있는 것으로 나타났다. 이 “진동 화음”的 개념은 최근의 고성능 진동자들을 위한 진동을 설계하는 데 직접적으로 활용될 수 있다.

**Abstract** We proposed a new design method for complex vibrotactile stimuli which uses the concept of musical chord for current wideband actuators. That is, a few sinusoidal vibrations with different frequencies are superimposed, called as "vibrotactile chords." In experiment, a set of "vibrotactile chords" were designed and evaluated their degrees of consonance to study their perception. The results indicated that the participants could robustly rate the degree of consonance of the vibrotactile chords and established a well-defined relation of the degree of consonance from the base and chordal frequencies of a vibrotactile chord. Participants' criteria for consonance and dissonance were related to several adjectives which were used in earlier findings. Our "vibrotactile chords" concept can be directly applied to design complex vibrotactile signals for the latest wideband actuators.

**핵심어:** 진동 화음 *vibrotactile chords*, 증상 진동의 인지 *perception of superimposed vibration*, 협화도 *degree of consonance*, 진동의 형용사 평가 *adjective rating of vibrations*

본 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 이루어진 한국연구재단의 지원과(No. 2011-0018641, No. 2011-0027953), 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 결과로 수행되었음 (No. NIPA-2011-C1090-1111-0008). 또한, 본 논문의 주저자는 2011년도 한국연구재단의 글로벌 박사 펠로우십(No. 2011-0008614)의 지원을 받아 연구를 수행하였음.

\* 주저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정. e-mail: [dreamseed@postech.ac.kr](mailto:dreamseed@postech.ac.kr)

\*\* 공동저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정. e-mail: [inux@postech.ac.kr](mailto:inux@postech.ac.kr)

\*\*\* 교신저자 : 포항공과대학교 컴퓨터공학과 부교수. e-mail: [choism@postech.ac.kr](mailto:choism@postech.ac.kr)

## 1. 서론 및 관련 연구

최근 몇 년간 진동자의 제작 기술이 비약적으로 발전하여, 고성능의 소형 진동자들을 합리적인 가격에 사용할 수 있게 되었다. 이러한 고성능 진동자들은 넓은 주파수 대역폭을 가지므로 중첩, 변조 등을 활용하여 복잡하고 다양한 형태의 진동을 생성해낼 수 있다. 그러나 이러한 넓은 주파수 대역폭에서의 복합적인 진동의 인지에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

이러한 복잡한 진동의 인지에 대하여 알아보기 위해, 본 연구에서는 음악의 ‘화음(chord)’ 개념을 진동에 적용하여 “진동 화음(vibrotactile chord)”을 생성하였다. 본래 음악에서 ‘화음(chord)’ 이란 동시에 연주되는 2개 이상의 음들을 뜻한다. 이를 진동에 적용하게 되면, 각각의 사인파 진동은 화음을 구성하는 음에 대응시킬 수 있고, 각각의 사인파 진동이 중첩되어 생성된 복합적인 진동을 진동 화음이라 할 수 있다. 본 연구에서는 이를 진동 화음에 대해서도 음악 화음과 유사한 어울림의 인지가 나타나는지 조사함으로써 인간의 진동 인지와 청각 인지를 연관지어 인간의 진동 인지에 대한 이해의 폭을 넓히고자 하였다. 아울러, 다중 주파수 진동에 이러한 어울림의 개념이 적용될 수 있는지 그 가능성을 확인하고자 하였다.

### 1.1. 음악 화음의 어울림 인지에 대한 연구

음악 화음의 어울림에 대하여 H. von Helmholtz는 맥놀이 이론(Helmholtz's beat theory)을 제시하였다. 이 이론에서는 화음을 구성하는 두 음의 주파수 차에 의하여 맥놀이(beat)가 발생하는데, 이 맥놀이의 세기와 주파수에 따라 어울림 여부가 결정된다고 설명한다[1]. 또한 20세기 초반에는 C. F. Marmburg에 의하여 서양의 12음계의 음정(2개 음으로 이루어진 화음)에 대하여 어울림 순위를 매기는 실험이 수행되었다[2]. 이와 유사한 실험들이 20세기 중반까지 수행되었으며, 이들 실험의 결과를 토대로 화음의 협화도(degree of consonance)와 불협화도(degree of dissonance)가 제시되었다. 협화도는 사람이 느끼고 평가하는 주관적인 어울림의 정도를 0에서 100사이의 값, 불협화도는 100에서 협화도를 뺀 값이다.

### 1.2. 중첩 진동의 인지와 그 활용에 대한 연구

진동 화음과 개념적으로 유사한 중첩 진동은 그 인지와 활용에 대한 연구가 소폭이나마 이루어졌다. 중첩 진동의 인지는 대표적으로 S. Bensmaia 등의 중첩 진동의 구별 가능성(discriminability)에 대한 연구가 있으며, 그 활용에 대하여는 D. Ternes 등의 진동 아이콘에의 적용과 관련된 연구 등이 있다[3,4].

## 2. 실험 설계 및 수행내역

실험에서는 ‘진동 화음’에서 보편적인 ‘어울림’의 존재 여부와 이를 적합하게 평가할 수 있는지, 그리고 음악 화음처럼 두 진동의 주파수 차가 어울림의 인지에 영향을 미치는지 여부를 알아보고자 하였다.

### 2.1. 실험 개관 및 설계

실험에는 16명의 대학생(남자 11명, 여자 5명, 19~24세, 평균 21.7세)이 참가하였다. 실험 기기는 소형 쉐이커(shaker)(Brüel & Kjær; model 4810)에 모바일 기기의 모형(아크릴 수지,  $11.5 \times 4.5 \times 1.5\text{cm}$ , 91.7g)을 부착하여 사용하였으며, 피험자는 원손으로 모형을 쥐고 실험을 수행하였다. 소형 쉐이커는 컴퓨터와 DAQ board(National Instrument; PCI-6251), 3축 가속도계(Kistler; 8765C)를 이용하여 10kHz의 샘플링 속도로 폐루프 제어(closed-loop control)가 이루어졌으며, 입/출력에 대한 보정은 관련 논문에서 제시된 방법으로 수행되었다[5].

### 2.2. 진동 화음

실험에 사용된 진동 화음은 저음에 해당하는 기저 진동과 고음에 해당하는 화성 진동으로 이루어졌다. 기저 진동은 40Hz, 55Hz, 80Hz, 110Hz의 4개로 고정되었으며, 화성 진동은 기저 진동의 주파수에 서양 12음계에서의 이웃한 두 음의 주파수 비인 (1.059)를 계속 곱하여 20개를 생성하였다. 예를 들어, 110Hz 기저 진동의 화성 진동은 110Hz, 116.54Hz, 123.47Hz, …, 329.63Hz가 된다. 이 4개의 기저 진동과 20개의 화성 진동의 조합으로 80개의 진동 화음을 생성하였다. 모든 진동은 동일한 인지 강도를 갖도록 관련 논문을 참조하여 조절하였으며, 재생 시간은 2초였다 [6].

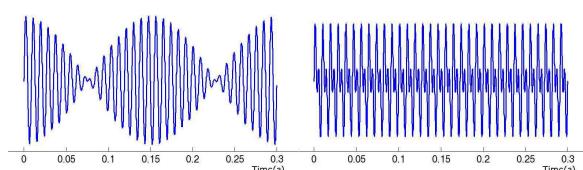


그림 1. 진동 화음의 파형 예시. 왼쪽은 기저 진동 110Hz + 화성 진동 116.59Hz의 파형, 오른쪽은 110Hz + 220Hz의 파형이다.



그림 2. 실험 장치의 구성 및 실험 시 모형을 쥐는 원손의 자세

### 2.3. 평가 방법 및 설문

피험자에게는 ‘어울림’에 대하여 주관적인 기준을 세우도록 한 뒤, 0~100사이의 협화도 점수를 이용하여 진동 화음의 어울림을 평가하도록 하였다. 진동화음 80개를 2회씩 무작위로 제시하여 총 160번의 평가가 이루어졌다. 실험 후 설문지에는 어울림 평가에 사용한 기준을 자유롭게 적도록 하고, 이 기준을 세우기가 수월하였는지 여부를 5점 리커트 척도(Likert scale)로 응답하도록 하였다. 또, 대표적인 형용사 12개에 대하여 자신의 기준과 얼마나 일치하는지 7점 리커트 척도로 응답하도록 하였다.

## 3. 결과 및 분석

16명 중 14명의 피험자는 어울림에 대하여 뚜렷한 기준을 가지고 평가함을 반복상관계수 (inter-repetition correlation coefficient, 평균 0.728)를 통하여 확인할 수 있었으며, 평가 기준을 세우는 것의 체감 난이도는 ‘보통’에 가깝게(평균 2.86/5점) 나타났다.

### 3.1. 형용사 평가 결과

피험자들의 어울림에 대한 평가 기준은 자유롭게 기술한 내용과 리커트 척도 점수 모두에서 유사한 경향을 나타내었다. 이 때 어울림과 연관된 형용사로는 “기분좋다(6.14/7점 만점)”, “부드럽다(5.64)”, “가지런하다(5.57)”, “맑다(5.29)”가, 어울리지 않음과 연관된 형용사로는 “들쭉날쭉하다(6.64)”, “거칠다(6.29)”, “흐리다(5.93)”, “듬성듬성하다(5.79)” 등이 꼽혔다.

### 3.2. 진동 화음의 협화도

각 진동 화음의 협화도는 [그림 1]과 같이 나타났다. 또, 주파수 비율에 따른 협화도의 변화 양상은 기저 진동의 주파수에 따라 두 가지로 나타났다. 기저 진동의 주파수가 낮을 경우(40, 55Hz) 협화도가 꾸준히 증가하는 양상을 보인 반면에, 높을 경우(80, 110Hz)에는 협화도는 주파수 비가 1:2가 될 때까지 증가하고, 더 이상 증가하지 않았다. 이러한 협화도의 변화 양상은 두 진동의 주파수 차에 의해 발생하는 맥놀이의 주파수와도 밀접한 관계를 보였는데, 이는 앞서 음악의 맥놀이 이론과 유사한 부분이 있다. 현재 이러한 유사점에 대한 추가적인 연구가 진행 중이다. 또한, Tan의 진동 분류와 같은 기존의 연구결과와 유사한 경향을 확인할 수 있었는데, 주파수가 낮은 진동은 거칠게, 주파수가 높은 진동은 부드럽게 느껴지는 경향이 진동 화음의 인지에서도 나타남을 확인할 수 있었다 [7].

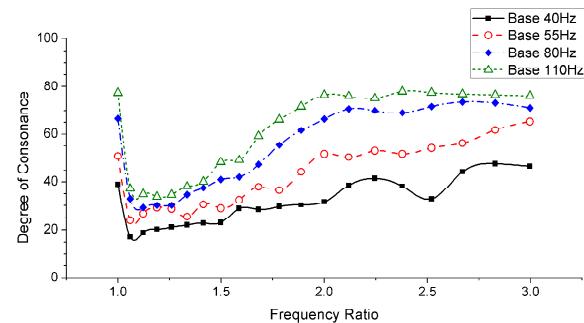


그림 3. 기저 진동과 화성 진동의 주파수 비에 따른 협화도 점수의 변화 양상. 모든 주파수에 대하여 주파수 비가 낮을 때에는 협화도가 낮게 나타나며, 점차 높아지게 되나, 기저 진동의 주파수에 따라 두 가지의 다른 양상을 보인다.

## 4. 결론

본 연구에서는 진동자극의 생성에 중첩된 진동을 활용한 진동 화음의 개념을 제시하고, 인지적 특성으로 어울림의 척도를 제시하여 이를 검증하였다. 이러한 진동 화음은 고성능의 진동자에 적용되어 풍부하고 복합적인 진동 자극을 생성하는 데 사용될 수 있다. 또한, 청각에서의 협화도와 유사점이 확인되었으며 이는 향후 연구를 통하여 연관 관계를 밝힐 것이다.

## 참고문헌

- [1] H. von Helmholtz, “On the Sensations of Tone”, Dover Publications, Inc., New York NY, USA, 1954.
- [2] C. F. Malmberg, “Perception of consonance and dissonance in music” Psychology Monograph 3(2), pp. 93-133, 1918.
- [3] S. Bensmaia, M. Hollins, J. Yau, “Vibrotactile intensity and frequency information in the Pacinian system: A psychophysical model”, Perception & Psychophysics 67(5), pp. 828-841, 2005.
- [4] D. Ternes, K. E. MacLean, “Designing large sets of haptic icons with rhythm”, Lecture Notes on Computer Science 5024 (Eurohaptics 2008), pp. 199-208, 2008.
- [5] A. Israr, S. Choi, H. Z. Tan, “Detection threshold and mechanical impedance of the hand in a pen-hold posture”, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 472-477, 2006.
- [6] J. Ryu, J. Jung, G. Park, S. Choi, “Psychophysical model for vibrotactile rendering in mobile devices” Presence: Teleoperators and Virtual Environments 19(4), pp. 1-24, 2010.
- [7] H. Z. Tan, “Information Transmission with a Multi-Finger Tactual Display”, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1996.