Journal of Korea Robotics Society (2013) 8(3):217-227
http://dx.doi.org/10.7746/jkros.2013.8.3.217 ISSN: 1975-6291 / eISSN: 2287-3961

멀티모달 가이던스가 독보 기능 습득에 미치는 영향: 드럼 타격 시퀀스에서의 사례 연구

Effects of Multi-modal Guidance for the Acquisition of Sight Reading Skills: A Case Study with Simple Drum Sequences

이 인[1], 최 승 문[†]

Lee In[1], Choi Seungmoon[†]

Abstract We introduce a learning system for the sight reading of simple drum sequences. Sight reading is a cognitive-motor skill that requires reading of music symbols and actions of multiple limbs for playing the music. The system provides knowledge of results (KR) pertaining to the learner's performance by color-coding music symbols, and guides the learner by indicating the corresponding action for a given music symbol using additional auditory or vibrotactile cues. To evaluate the effects of KR and guidance cues, three learning methods were experimentally compared: KR only, KR with auditory cues, and KR with vibrotactile cues. The task was to play a random 16-note-long drum sequence displayed on a screen. Thirty university students learned the task using one of the learning methods in a between-subjects design. The experimental results did not show statistically significant differences between the methods in terms of task accuracy and completion time.

Keywords: Multi-modal Guidance, Haptic Cueing, Motor Learning, Sight Reading, Drum music

1. 서 론

개인의 여가 활동 시간이 꾸준히 증가함에 따라 여가 활동과 관계된 운동기능(motor skill)의 수행과 학습을 보조하는 방법에 대한 관심도 함께 증가하고 있다. 운동기능의 습득을 보조 또는 증진하기 위한 교육 방법론은 크게 시범(demonstration)과 보강적 피드백(augmented feedback)의 두 가지가 있다[1]. 시범은 예시를 통해서 학습자에게 목표 운동기능을 이상적으로 수행하는 방법을 직접 보여주는 방법이고, 보강적 피드백은 학습자의 현재 능력에 맞추어진 피드백을 제공함으로써 운동기능을 개선하고 학습의욕을 고취하는 방법이다. 일반적으로 시범은 새로운 운동기능을 배우기 시작하는 단계에서 가장 큰 효과를 보이고, 이에 반해 보강적 피드백은 학습자가 목표 운동기능을 어느 정도 수행할 수 있게 된 이후에 가장 큰 효과를 가지는 것으로 여겨진다. 두 가지 운동기능 교육 방법이 서로 다른 학습단계에서 영향을 발휘하므로, 따라서 두 방법을 함께 사용하는 것이 한 가지 방법만을 사용하는 경우에 비해 효과적으로 학습을 보조할 수 있을 것으로 예상된다.

인간은 매우 한정된 주의용량과 단기기억용량을 가지고 있으므로[2], 운동기능 학습을 보조하기 위해서는 목표 기능을 수행하기 위한 핵심 요소만을 간결하고 명확한 형태로 전달하는 것이 바람직하다. 이러한 맥락에서, 소수의 단일감각(single-modal) 자극으로 이루어진 지시(cueing; 운동 기능 학습 중 제공되는 간략한 형태의 시범) 또는 피드백만으로도 충분한 학습 보조 효과를 제공할 수 있는 것으로 여겨지며, 응용에 따라 단일감각 피드백이 전문 강사

Received : May 31. 2013; Reviewed : Jun. 25 2013; Accepted : Jul. 25. 2013
※ This work was supported in parts by the NRF grant (No. 2013R1 A2A2A01016907) and the Dual Use Technology Center program (No. 12-DU-EE-03), all funded by the Korea government.
[1] Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (inism@postech.ac.kr).
[†] Corresponding author; Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (choism@postech.ac.kr).

Copyright ⓒ KROS

의 지도보다 효과적인 사례도 있다[3]. 한편, 복수의 운동 기능 교육 방법을 동시에 사용할 때에는 학습자의 한정된 주의 및 감각기억 용량을 초과하지 않도록 각 방법을 서로 다른 감각 채널을 통해 제공할 필요가 있다. 감각 채널 중, 시각은 운동 기능의 시공간적 요소(동작의 순서, 속도, 자세 등)들을 표현하는데 적합하므로 운동 학습(motor learning) 분야에서 폭넓게 응용되고 있다[1]. 추가적으로 활용 가능한 감각 채널에는 청각과 촉각이 있으며, 이 중에서 촉각이 자세나 동작 등의 공간적 정보를 청각보다 직관적으로 전달할 수 있어 학습에 보다 효과적일 것으로 기대된다.

최근 촉각 지시 또는 피드백을 통해 운동 기능의 습득을 보조하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 연구의 예로, 진동자(vibration actuator)를 손이나 발 등 신체의 여러 부위에 부착하여 목표 운동 기능의 세부 동작들을 진동 자극을 통해 지시하는 연구가 피아노 연주[4], 드럼 리듬 연주[5], 연주 속도 조절[6], 보행 속도 조절[7], 스노우 보딩 자세[8] 등 다양한 기능에 대해 시도되었다. 지시뿐만 아니라, 진동 자극을 통한 보강적 피드백으로 팔의 자세[9,10], 보행 패턴[11], 바이올린 연주 동작 및 자세[12]를 교정한 연구도 수행되었다. 진동 자극 대신 힘/토크 자극을 통해 운동 학습을 보조하는 연구 또한 다수의 연구자에 의해 폭넓게 수행되었다. 지면의 제약과 본 연구와의 관련성 등을 고려해 힘/토크 자극을 이용한 운동 학습 보조에 관한 연구의 소개는 생략한다. 해당 분야의 연구는 최근 발표된 리뷰 논문에 심도 있게 정리되어 있다[13,14]. 기존의 촉각 운동 학습 연구 중, 소수의 문헌들만이 촉각 교육의 효과를 시각 또는 청각 교육과 정량적으로 비교하였다[6,8,10,15-17]. 관련 연구 중에서 지시와 보강적 피드백을 함께 사용한 사례는 일부 문헌에서 발견할 수 있으나[9,10,18,19], 이들 문헌에서 지시와 보강적 피드백의 혼용은 주요 연구 주제로 다루어지지 않았다. 촉각 지시와 촉각이 아닌 다른 감각 채널을 통한 보강적 피드백을 혼용하였을 때 두 방법의 상대적인 교육 효과를 명시적으로 비교한 연구는 아직 발표되지 않았다.

저자들은 오랜 연습을 통해 습득되는 다수의 사지 움직임을 동반하는 복잡한 인지-운동 기능을 보다 효율적으로 가르치는 방법을 개발하는 것을 목표로 한다. 드럼 음악 독보(sight reading) 기능은 임의로 주어진 드럼 악보를 눈으로 읽는 동시에 악보에 맞추어 드럼 세트를 연주하는 기능으로, 복잡한 인지-운동 기능의 좋은 예이다. 또한, 드럼 독보 기능의 교육은 촉각 운동 학습 분야에서 기존에 많이 다루어지지 않은 새로운 응용 주제이다. 관련 연구 중에서 시각 디스플레이 없이 촉각 지시만으로 드럼 세트에 대해 음악[4] 또는 리듬[5,16]을 교육한 사례가 있으나, 임의로 주어진 악보를 눈으로 읽고 연주하는 방법(독보 기능)을 촉각적으로 교육하는 연구는 시도되지 않았다.

저자들은 드럼 음악 독보 기능의 학습을 보조하기 위해 멀티모달 가이던스 시스템을 개발하였다. 개발한 시스템은 학습자가 화면에 제시된 임의의 드럼 음악을 연습하는 동안 학습자의 연주 정확도를 측정하고, 독보 기능 습득을 돕기 위해 다양한 가이던스 정보를 제공한다. 가이던스의 일환으로, 학습 시스템은 악보 상의 음표들을 서로 다른 컬러로 표현함으로써 학습자의 연주 정확도 정보를 실시간으로 제공한다. 이러한 태스크 수행 성능을 학습자에게 알려주는 형태의 가이던스는 보강적 피드백 중에서 결과 지식(knowledge of results)으로 불리는 방법이다. 결과 지식은 학습자가 연주 중에 범한 오류를 인지하고 다음 수행에서 이러한 오류를 바로잡을 수 있게 한다. 또한, 학습 시스템은 두 가지(청각과 촉각) 지시 형태의 가이던스를 추가적으로 제공한다. 촉각 지시(tactile cueing)는 학습자의 양 팔 안쪽에 네 가지 리듬 진동을 가함으로써 드럼 음악 연주 중 각 음표에 따라 타격해야 하는 목표 타악기에 대한 정보를 제공한다. 청각 지시(auditory cueing)는 진동 자극 대신에 헤드폰을 통해 소리 자극을 제공한다는 차이 외에는 촉각 지시 방법과 동일하며, 감각 채널에 따른 지시의 교육 효과 차이를 파악하기 위해 구현되었다. 제안하는 학습 시스템은 아직 개발 초기 단계이므로 현재는 음정(매 순간 타격해야 하는 타악기)에 대해서만 가이던스를 제공하며, 리듬이나 강세 등의 추가적인 요소들은 차후 구현될 예정이다.

개발한 교육 시스템과 가이던스 방법들의 효과를 평가하기 위해 사용자 실험을 수행하였다. 실험참가자들은 세 그룹으로 나뉘어 각각 (1) 결과 지식, (2) 결과 지식과 청각 지시, (3) 결과 지식과 촉각 지시 방법을 사용해 독보 기능을 학습하였다. 교육 효과는 각 참가자 그룹이 태스크 수행 중에 범하는 오류의 빈도와 수행 시간의 평균을 비교함으로써 평가하였다. 이어지는 섹션에서는 교육 시스템, 가이던스 방법, 사용자 실험, 실험 결과 및 분석에 대한 상세한 내용을 다룬다.

Fig. 1. Instrument-note-cue relationships.

2. 실험 설계

2.1 태스크와 교육 시스템

실험 중 요구된 태스크는 임의로 주어진 드럼 음악을 각 참가자가 원하는 빠르기로 연주함으로써 임의의 악보에 대한 연주 능력(독보 기능)을 습득하는 것이다. 연구 초기 단계임을 고려해, 본 연구는 동시 타격이나 리듬적 요소가 없는 단순한 드럼 시퀀스에 대한 독보 기능의 교육을 목표로 하였다. 태스크의 길이와 드럼 세트를 구성하는 타악기들의 고른 학습 등을 고려해, 각 드럼 시퀀스는 드럼 세트의 모든 타악기들이 한 번씩 임의의 순서로 출현하는 악구(phrase) 두 개로 구성되었다. 실험에 사용된 드럼 세트가 8 개의 타악기(스네어 드럼 1 개, 탐탐 3 개, 심벌 2 개, 페달 2 개)로 구성되었기 때문에 하나의 악구는 8 개의 음표로 이루어졌으며, 따라서 전체 드럼 시퀀스는 16 개의 음표로 이루어졌다. 본 연구는 특정 드럼 시퀀스의 교육이 아닌 독보 기능의 교육을 목표로 하므로, 드럼 시퀀스는 매 시도(trial)마다 임의로 생성되었다. 실험참가자는 주어진 드럼 시퀀스 상의 각 음표의 음정에 대해 대응되는 타악기(Fig. 1 참조)를 순차적으로 타격함으로써 태스크를 수행할 수 있었다. 실험에 사용된 드럼 시퀀스와 학습 중 제공된 시각 가이던스(다음 절에서 자세히 설명)의 예가 Fig. 2에 묘사되어 있다.

교육 시스템은 제어 컴퓨터, 디지털 드럼 세트 (Model DD506; MEDELI Electronics), 24인치 LCD 모니터, 헤드폰, 두 개의 진동자(Haptuator; Tactile Labs) 및 진동구동

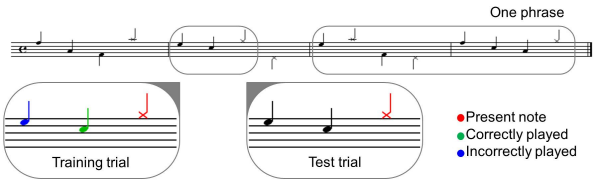


Fig. 2. Example task and visual guidance.

Fig. 3. Participant learning the sight reading skill.

회로로 구성되어 있다(Fig. 3). 제어 컴퓨터는 다른 디바이스들을 제어하고 실험 프로그램을 구동하는 역할을 하였다. 전자 드럼 세트는 드럼 시퀀스 연습과 학습자의 연주 정보 측정을 위해 사용되었다. LCD 모니터는 드럼 시퀀스를, 그리고 헤드폰은 청각 지시와 드럼 연주음을 학습자에게 제공하기 위해 각각 사용되었다. 두 개의 진동자는 학습자의 양 팔에 암 밴드의 형태로 착용되었으며(Fig. 3 우측 하단 삽화), 촉각 지시를 제공하였다.

2.2 가이던스 제공 방법

도입부에서 설명한 것처럼, 본 연구는 결과 지식과 지시를 동시에 활용하여 운동 기능을 교육하였을 때의 효과를 검증하는 것을 목적으로 한다. 이 때 학습자의 혼란을 방지하고 감각기억 용량을 넘지 않는 한도 내에서 정보를 제공하기 위해서 결과 지식과 지시는 서로 다른 감각 채널을 통해 제공하는 것이 좋다. 이와 반대로, 인간의 주의 분산 능력의 한계로 인해 정보 전달에 너무 많은 감각 채널을 사용하면 각각의 정보가 제대로 전달되지 않을 가능성이 높다. 교육 시스템에서 제공하는 결과 지식(각 음표에 대해 맞는 타악기를 타격하였는지 여부)은 1 bit의 정보 용량을 요구하고, 지시는 3 bit의 용량(8 개 타악기 중 1 개 지정)을 필요로 한다. 위와 같은 사실들을 토대로, 요구하는 정보 용량이 매우 작은 결과 지식은 악보에 더해 시각적으로 제

* 드럼 악보는 표준화된 표기법 없이 드럼 세트의 구성 또는 작곡자의 기호에 따라 다양한 표기법이 혼용되고 있다.
본 연구에서는 가장 일반적인 표기법을 기본으로 하여, 연구 목적에 맞게 일부 변형하여 사용하였다.

공하고, 지시만 청각 또는 촉각의 별도의 채널을 통해 제공하는 것이 효과적일 것으로 판단되었다.

결과 지식은 악보 상의 음표들의 색깔을 통해 제공되었다(Fig. 2). 악보 상에서 현재 연주해야 하는 음표는 기본적으로 학습자가 쉽게 인식할 수 있도록 빨간색으로 표시되었으며, 학습 중 학습자가 해당 음표를 연주(음표의 음정에 대응되는 타악기를 타격)한 뒤에는 연주의 정확성 여부에 따라 맞으면 초록색으로, 틀린 경우에는 파란색으로 표시되었다. 이러한 컬러 코딩은 파란색이 초록색에 비해 부정적인 의미를 더 많이 내포하고 있는 것을 고려해 결정되었다. 빨간색은 사람의 주의를 가장 많이 끄는 색이므로 현재 음표를 표시하는데 보다 적합하다고 판단하여 틀린 음표를 표시하는 용도로는 사용되지 않았다.

촉각 지시는 대체로 진동 자극을 통해 이루어지며, 이에 필요한 진동 자극 모음은 일반적으로 진동 주파수, 강도, 리듬 또는 강도 엔벨롭(amplitude envelope; 시간에 따른 강도의 변화 양상), 또는 자극 위치를 변화시킴으로써 만들어진다. 이러한 다양한 설계 요소 중에서, 진동 강도의 조절은 운동 기능 학습 중 인지적/운동적 부하로 인해 약한 진동 자극은 느끼기 힘든 문제가 있어 본 연구에 적합하지 않았다. 또한 주파수의 경우, 실험에 사용한 진동자가 넓은 주파수 대역(50–500 Hz)을 지원하는 소형 진동자 중에서는 상대적으로 강한 진동을 생성할 수 있는 제품임에도 불구하고, 공진 주파수(60 Hz) 주변의 협소한 주파수 대역에서만 본 실험에 적합한 강도의 진동을 생성할 수 있어서 복수의 주파수 레벨을 사용하는 것이 불가능하였다. 따라서 리듬과 자극 위치만을 이용해 진동 자극들을 설계하였다. 리듬과 자극 위치는 강도나 주파수에 비해 진동 자극의 구별이 훨씬 용이한 요소로 알려져 있다.

본 연구에서는 촉각 지시를 위해 네 가지 단순 리듬(초당 1, 2, 4, 8 비트)과 두 가지 자극 위치(양 팔)를 조합해 총 8 개의 진동 패턴을 사용하였다. 리듬은 64 Hz (사용한 진동자의 공진 주파수 근처)의 사인파 진동 신호를 각각 변조 주파수 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 Hz로 진폭 변조(amplitude modulation)하여 생성하였다. 이러한 진동 리듬의 구현은 진동자의 진동 강도 한계로 인해 직접적으로 사용하기 힘든 낮은 주파수 대역의 진동을 상대적으로 강하게 생성할 수 있는 높은 주파수 대역의 진동을 이용해 간접적으로 생성하는 것으로도 볼 수 있으며, 따라서 본 연구에 사용된 네 가지 리듬은 네 가지 주파수 레벨로도 해석될 수 있다. 관련 문헌에 의하면 150 Hz 주파수를 각각 0.0 (무변조), 1.0, 2.0, 5.0 Hz로 진폭 변조해 생성한 진동 자극들은 서로 간에 쉽게 구별 가능한 것으로 알려져 있다[20]. 본 연구에서도 이와 유사한 변조 주파수를 사용하였으므로 진동 자극 간에 식별이 용이할 것으로 예상하였으며, 본 연구 이전에 사전 검증 절차를 통해 이를 확인하였다. 진동 자극은 일반적으로 사용되는 양 손을 대신해 양 팔 상완에 제공되었으며, 이는 손의 경우 학습자의 움직임 또는 타격 시 타악기의 반동으로 인해 진동 자극을 제대로 느끼지 못할 가능성이 있기 때문이다[5,6,21]. 8 개의 진동 패턴을 8 개의 드럼세트 타악기에 각각 하나씩 타악기의 물리적인 위치를 고려해 할당하였다. 바닥에서부터의 수직 위치(높이)가 높을수록 빠른 비트(높은 변조 주파수)의 리듬을, 가운데를 기준으로 수평 위치가 좌(우)측이면 좌(우)측 팔에 자극을 받도록 하였다(Fig. 1). 이러한 진동 패턴의 할당 방식은 드럼 악보의 음정이 각 타악기에 할당되는 방식에 비해 매우 직관적이며, 따라서 적은 인지 부담만으로도 쉽게 현재 주어진 음표의 음정에 대응되는 타악기를 학습자에게 지시할 수 있으므로 학습에 도움이 될 것으로 예상되었다.

감각 채널에 따른 교육 효과 차이를 보기 위해 촉각지시에 더해 청각 지시를 추가적으로 구현하였다. 청각 지시는 1 kHz의 반송 주파수(carrier frequency)를 사용하고 양 귀에 소리 자극의 형태로 제공된 것 외에는 촉각 지시와 동일하게 구현되었다. 해당 방법 외에 현재 타격할 타악기의 소리를 들려주는 방법과 타악기의 이름을 불러주는 방법 또한 구현하였으나, 두 방법 모두 사전 검증에서 리듬과 자극 위치를 사용한 현재 방법보다 좋지 않은 가이던스 성능을 보여 본 실험에서는 제외되었다. 좋지 않은 성능의 원인으로, 학습자가 드럼세트에 익숙하지 않았기 때문에 타악기의 소리 또는 이름을 식별하고 타악기와 연관하는 것이 리듬과 위치를 식별하고 타악기와 연관하는 것에 비해 상대적으로 어려웠기 때문으로 판단된다.

지시를 위한 청각과 촉각 자극의 길이는 1 초로 설정되었으며, 쉽게 느낄 수 있도록 충분히 강한 강도로 제공되었다. 지시 자극은 현재 음표가 빨간색으로 활성화됨과 동시에 시작하여, 학습자가 현재 음표를 연주할 때까지 3초 간격으로 반복하여 제공되었다. 학습자가 현재 음표를 연주하면 현재 음표에 대한 지시는 즉시 정지되고, 다음 음표에 대한 지시가 시작되었다.

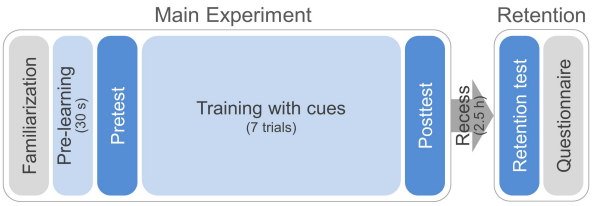


Fig. 4. Experimental procedures.

2.3 실험 조건 및 실험참가자

실험의 독립 변수는 학습 조건이며, (1) KR: 결과 지식만 사용, (2) KR+AC: 결과 지식과 청각 지시 사용, (3) KR+TC: 결과 지식과 촉각 지시 사용의 세 가지 조건이 평가 및 비교되었다. 본 실험의 목적은 복수의 감각 채널을 이용해 결과 지식과 지시를 동시에 제공하였을 때의 교육 효과를 평가하는 것이므로, 단일 감각을 통해 단일 교육 방법만을 제공하는 KR 조건은 다른 두 조건의 성능을 평가하기 위한 비교 조건으로 사용되었다. KR+AC와 KR+TC 조건은 악보 상의 각 음표에 대해 어떤 타악기를 타격해야 하는지를 청각 또는 촉각을 통해 지시 받으며, 따라서 학습 중 KR 조건에 비해 훨씬 정확하게 태스크를 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 실험 태스크의 특성상 외부에서 정보가 주어지지 않으면 학습자 스스로 자신의 연주에 대한 정답 여부를 알 수 없으며, 이로 인해 가이던스 없이는 주어진 태스크를 학습하는 것이 불가능하다. 따라서 아무런 가이던스를 제공하지 않는 조건은 본 실험에서 제외되었다.

실험에는 학습 조건당 각각 10명씩 총 30 명의 남자 대학생(18-28 세; 평균 20.9)이 참가하였다. 성별에 따른 차이가 실험 결과에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해 실험참가자는 남성으로 한정되었으며, 실험 결과에 영향을 미칠 수 있는 사전 지식을 가지지 않은 사람에 한해 실험에 참가할 수 있었다. 사전 설문에서, (1) 드럼 악보를 읽는 경우, (2) 연주할 수 있는 악기가 있는 경우, 또는 (3) 최근 5년 내에 의무 교육 과정 외에 추가적인 음악 교육을 받은 적이 있는 경우는 실험에서 제외하였다. 참가자들에게는 실험 후 소정의 사례를 지급하였다.

2.4 실험 절차

전체 실험 절차를 Fig. 4에 도표로 정리하였다. 실험에 앞서, 실험에 대한 간단한 설명이 실험참가자들에게 제공되었다. 이에 더해 KR+AC 조건과 KR+TC 조건의 참가자들은 지시 자극과 드럼세트 타악기 사이의 관계에 대한 설명을 듣고, 주어진 지시 자극에 대응되는 타악기를 실제로 타격해봄으로써 자극-타악기 관계를 숙지하고 실험 시스템에 익숙해지는 과정을 거쳤다. 이 과정은 참가자가 두 개의 악구(16 음표)를 연속으로 정확하게 맞출 때까지 지속되었다. KR 조건의 참가자들은 두 악구 분량을 자유롭게 연주하는 것으로 적응 단계를 마쳤다. 모든 참가자는 적응 단계가 시작되기 전까지는 촉각 및 청각 지시 자극에 노출되지 않았으며, 적응 과정 중에는 어떠한 시각 정보(악보와 시각 결과 지식)도 제공되지 않았다.

적응 단계를 마친 참가자들은 Fig. 1과 유사한 형태의 음정-타악기 관계도를 통해 드럼 악보 독보를 위한 기본적인 지식을 30 초 동안 학습하였다. 그 뒤, 본격적인 학습에 앞서 참가자들의 기본적인 독보 능력을 평가(사전 평가; PRE)하기 위해, 실험 태스크(모니터 상에 임의로 제시된 두 개의 악구로 이루어진 드럼 시퀀스를 최대한 정확하고 빠르게 연주)를 1 회 수행하도록 하였다.

학습 단계에서, 실험참가자들은 각자에게 주어진 학습 조건 하에서 실험 태스크를 연속해서 일곱 번(T1-T7) 수행하도록 요구되었다. 태스크의 연속된 수행을 위해, 학습 단계 시작에 맞추어 학습에 필요한 전체 드럼 시퀀스(7 회 × 2 악구 × 8 음표)가 참가자에게 제공되었으며, 연주된 음표는 컬러 코딩(맞게 연주한 경우 초록색, 틀린 경우 파란색)하여 시각적으로 결과 지식을 제공하였다. 또한, KR+AC와 KR+TC 조건의 참가자들에게는 각자에게 할당된 조건에 맞추어 청각 또는 촉각 지시가 추가적으로 제공되었다. 학습 직후, 참가자들은 독보 능력의 향상 정도를 측정하기 위한 평가 단계(사후 평가; POST)를 거쳤다.

사후 평가를 마친 후, 참가자들은 일시적으로 실험 장소에서 퇴실하여 일상 활동을 수행하다가 약 2.5 시간 후에 복귀하여 다시 한 번 독보 능력을 평가(회상 평가; RET)하고, 각자가 참가한 학습 조건의 정성적 평가를 위해 설문을 작성하였다. 회상 평가는 참가자 그룹 간에 학습 효과가 얼마나 오래 간직되는지를 비교하기 위해 이루어졌으며, 2.5 시간의 휴회 시간은 학습 시간(약 4 분)과 비교할 때 매우 긴 시간이다.

모든 평가 및 학습 단계에 대해, 참가자가 수행하는 태스크는 동일(드럼 시퀀스는 매 시도마다 임의로 생성)하였으며, 가이던스(시각 결과 지식, 청각/촉각 지시)는 학습 단계에서만 제공되었다. 실험 중, 주변 소음에 의한 영향을 막기 위해 모든 참가자들은 귀마개를 착용하였고, 드럼 세트의 연주음을 듣기 위해 헤드폰을 착용하였다. 드럼 세트의 연주음과 KR+AC 조건의 청각 지시의 소리 크기는 귀

마개를 착용한 상태에서도 쉽게 들을 수 있을 정도로 충분히 크게 조정되었다. 추가적으로, KR+TC 조건의 참가자들은 촉각 지시를 받기 위해 학습 단계 동안 진동 암 밴드를 양 팔에 착용하였다. 평균적으로 메인 세션(적응 단계에서 사후 평가 까지)은 약 30 분간 진행되었고, 회상 세션(회상 평가와 설문 응답)은 약 10 분이 소요되었다.

2.5 평가 척도

학습 단계와 평가 단계에서, 각 시도마다 주어진 드럼 시퀀스의 각 음표에 대해 음표에 대응되는 타악기, 학습자가 타격한 타악기, 학습자의 타격 시각(해상도 1 ms)이 기록되었다. 실험 종료 후, 기록된 데이터로부터 참가자의 오류율과 수행 시간이 각 시도별로 계산되었다. 오류율은 시퀀스 내의 전체 음표 개수(16) 대비 틀리게 연주한 음표의 비율로 정의되었고, 수행 시간은 직전 시도의 종료 시점에서부터 현재 시도의 마지막 음표가 연주된 시점까지의 시간으로 정의되었다. 평가 단계(PRE, POST, RET)에서의 결과값을 비교함으로써 학습 조건 별 학습 효과를 평가하였고, 학습 단계(T1–T7)에서의 값을 비교함으로써 학습 중 태스크 수행 능력 변화 추이를 살펴보았다.

설문 단계에서 참가자들은 학습 조건을 묘사하는 네 가지 문항에 대해 응답함으로써 자신의 학습 조건을 정성적으로 평가하였다: Q1. 주어진 학습 방법이 드럼 독보 및 연주 기능을 학습하는데 방해된다/도움된다; Q2. 주어진 학습 방법은 어렵다/쉽다; Q3. 주어진 학습 방법은 지루하다/흥미롭다; Q4. 주어진 학습 방법은 거추장스럽다/간편하다. 참가자들은 좌측 끝이 강한 부정의 느낌, 우측 끝이 강한 긍정의 느낌을 나타내는 수평선 상에서 본인의 느낌과 부합하는 지점에 표시함으로써 각 문항에 대해 응답하였다. 분석을 위해 각 응답은 수평선 상에서 표시 지점의 상대적 위치에 따라 0.0(강한 부정)에서 6.0(강한 긍정) 사이의 값으로 선형 변환되었다.

3. 실험 결과

3.1 적응 단계

KR+AC 조건의 참가자들은 적응 단계를 마치기까지 2–3 악구(평균 2.3; 표준편차 0.5)를 소요한 반면, KR+TC 조건의 참가자들은 2–6 악구(평균 3.7; 표준편차 1.3)를 소요하였다. 적응 단계의 종료 조건이 연속된 두 악구를 실수 없이 연주하는 것이었다는 것을 고려하면, 실제로 KR+AC 그룹과 KR+TC 그룹이 지시 자극에 적응하기까지 각각 평균 0.3과 1.7 악구가 필요하였음을 알 수 있다. 이 결과는 청각 지시는 사실상 별도의 연습 없이도 쉽게 식별 가능하였지만, 촉각 지시는 약간의 연습을 거친 다음에야 완벽한 식별이 가능하였다는 것을 나타낸다. KR+TC 그룹도 적응 단계에서의 충분한 경험으로 인해 학습 단계에서는 어려움 없이 촉각 지시를 식별할 수 있었을 것으로 생각된다.

3.2 오류율

세 학습 조건의 참가자들의 오류율을 각 평가 및 훈련 시도 별로 평균하여 Fig. 5에 나타내었다. 전체적으로, 학습 전(PRE)에는 높은 오류율을 보이다가 학습 후(POST)에 오류율이 크게 감소하며, 이러한 향상은 2.5 시간의 휴회 시간 이후(RET)에도 잘 유지되었다. 세 그룹 중, 학습 직후에는 KR+TC 그룹이 가장 작은 오류율을 보여주었고, 휴회 시간 이후에는 KR 그룹이 가장 작은 오류율을 보여주었다. KR+AC 그룹은 두 평가 모두 가장 큰 오류율을 보여주었다. KR+AC와 KR+TC 그룹은 학습 중 지시 자극의 도움으로 인해 드럼 시퀀스를 실수 없이 연주할 것으로 예상되었으나, 학습 단계에서 다소의 오류를 보여주었다. 그 원인으로, 악보 상의 음표를 식별하고 음정-타악기 관계를 암기하기 위해 발생하는 추가적인 인지 부담이 지시 자극을 느끼고 식별하는 작업을 방해하였기 때문으로 생각된다.

학습 조건과 학습/평가 시도에 대해 단순주효과검증(simple main effect test; 독립변인이 다수일 때 하나의 독립변인만을 변화시키며 일원분석(one-way ANOVA)을 반복 수행하는 검증 방법; 유의 수준 0.05)을 수행하였다. 학습 조건 간에는 학습 시도 T1 ($F_{2,27} = 5.15$, $p = 0.0127$)과 T5 ($F_{2,27} = 3.63$, $p = 0.0402$)에서만 유의한 차이를 발견하였으며, 나머지 학습 또는 평가 시도에서는 학습 조건 사이에 유의한 차이를 보이지 않았다. 이 결과는 지시의 효과가 학습 초기에는 강하였지만, 학습이 진행됨에 따라 효과가 빠르게 감소하였음을 나타낸다. 학습/평가 시도 사이에는 모든 참가자 그룹(KR: $F_{9,81} = 5.66$, $p < 0.0001$; KR+AC: $F_{9,81} = 3.32$, $p = 0.0017$; KR+TC: $F_{9,81} = 3.96$, $p = 0.0003$)이 유의한 차이를 보였다.

사후 검증에는 Tukey's HSD 검증이 사용되었다. KR 그룹은 사후 평가(POST)와 회상 평가(RET)는 사전 평가(PRE)에 비해 오류율이 유의하게 작았고, KR+TC 그룹은 사후 평가만 사전 평가보다 유의하게 작은 오류율을 보였다. KT+AC 그룹은 세 평가 사이에 유의한 차이를 보이지 않았고, 훈련 시도들만이 사전 평가보다 유의하게 작은 오

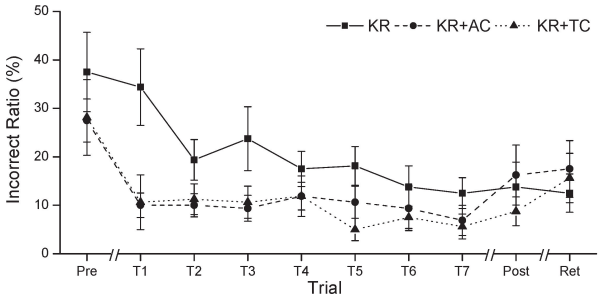


Fig. 5. Mean error ratios with standard errors.

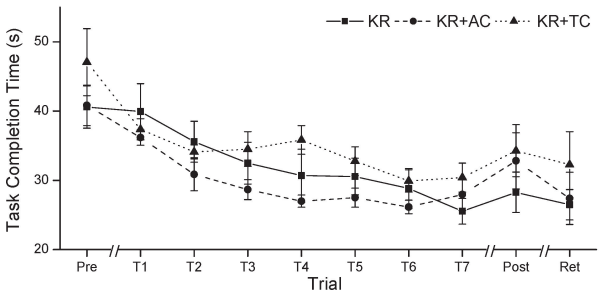


Fig. 6. Mean task completion times with standard errors.

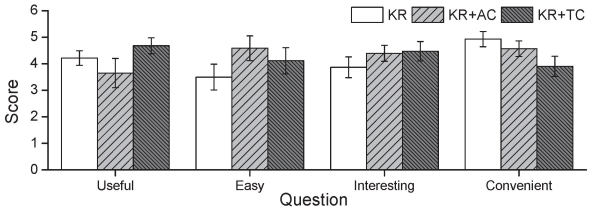


Fig. 7. Means and standard errors of subjective ratings.

류율을 보였다. 이 결과는 KR 그룹은 목표 기능을 잘 학습하였지만, KR+AC 그룹은 기능을 충분히 학습하지 못하였고, KR+TC 그룹은 기능을 학습은 하였으나 학습한 기능을 오래 유지하지는 못하였다는 것을 의미한다. 요약하면, 오류율의 관점에서, 시각 결과 지식에 더해 제공된 청각 또는 촉각 지시는 학습 효과를 증진하지 않고 오히려 일정 부분 학습을 방해하는 결과를 보였다.

3.3 수행 시간

각 그룹의 수행 시간을 각 시도 별로 평균하여 Fig. 6에 나타내었다. 수행 시간은 대체로 오류율과 비슷한 경향을 보였다. 수행 시간은 학습 전(PRE)에 가장 컸고, 학습 중 점진적으로 감소하다가(T1-T7), 학습 직후(POST)에 다시 미약하게 증가하였으나, 2.5 시간의 휴회 시간 후(RET)에도 감소 상태를 꾸준히 유지하였다. 학습 중에는 KR+AC 그룹이 가장 짧은 수행 시간을 보였고, 학습 후의 두 평가에서는 KR 그룹이 가장 짧은 수행 시간을 보였다. KR+TC 그룹은 모든 시도들에서 대체로 가장 긴 수행 시간을 보였다.

수행 시간에 대해, 오류율과 동일한 방법으로 분산분석을 수행하였다. 모든 학습/평가 시도에서, 학습 조건 사이에 유의한 차이를 발견하지 못한 반면, 학습/평가 시도는 모든 학습 조건에 대해 유의한 차이를 보였다(KR: $F_{9, 81} = 9.76$, $p < 0.0001$; KR+AC: $F_{9, 81} = 5.36$, $p = 0.0001$; KR+TC: $F_{9, 81} = 4.08$, $p = 0.0002$). Tukey's HSD 검증에서, KR 그룹과 KR+TC 그룹은 학습 전에 비해 학습 직후에 유의한 수행 시간 감소를 보였으나, KR+AC 그룹은 유의한 차이를 보이지 못하였다. 하지만 휴회 시간 후 평가에서는 모든 참가자 그룹이 학습 전에 비해 유의한 향상을 보였다. 요약하면, 세 학습 조건은 태스크 수행 시간 측면에서 모두 유의한 향상을 보였고, 이들 사이에 통계적으로 유의한 차이는 발견되지 않았다.

3.4 정성 평가

참가자들의 학습 조건에 대한 정성 평가 결과는 Fig. 7에 정리하였다. 세 학습 조건 중, KR 조건은 사용편리성(convenience)에서 가장 높은 점수를 받은 반면 흥미도(interestingness)와 학습용이성(easiness)에서는 가장 낮은 점수를 받았다. KR+AC 조건은 학습용이성에서는 가장 높은 점수를 받았으나 학습유용성(usefulness)에서는 가장 낮은 점수를 받았다. KR+TC 조건은 학습유용성에서는 가장 높은 점수를 받았으나 사용편리성에서는 가장 낮은 점수를 받았다. 학습 조건에 대한 일원분석(one-way ANOVA)을 각 설문문항별로 수행하였으며, 모든 문항에 대해 학습 조건 사이에 유의한 차이를 발견할 수 없었다 (Q1. 학습유용성: $F_{2,27} = 1.70$, $p = 0.2023$; Q2. 학습용이성: $F_{2,27} = 1.12$, $p = 0.3406$; Q3. 흥미도: $F_{2,27} = 0.85$, $p = 0.4390$; Q4. 사용편리성: $F_{2,27} = 2.81$, $p = 0.0781$).

4. 결과 분석

4.1 적응 단계

촉각 지시는 사용하는 감각 채널을 제외하면 청각 지시와 동일함에도 불구하고, 완벽히 구별할 수 있게 되기까지 청각 지시보다 더 많은 노력을 필요로 하였다. 하지만 사람들이 청각 자극에 비해 촉각(본 실험에서는 진폭 변조된 진동) 자극에 덜 익숙한 것을 고려하면, 촉각 지시가 완벽히 구별되기까지 청각 지시보다 1-2 회 더 많은 노출을 필요로 한 것은 납득할만한 결과이다.

적응 단계에서 KR+TC 그룹은 총 8 가지의 촉각 지시 자극을 완벽히 구별할 수 있게 되기까지 평균적으로 3.1 회를 실수하였다. 이 실수들 중, 자극의 위치(왼팔/오른팔)를 혼동한 경우는 한 번도 발생하지 않았다. 절반 이상의 실수(평균 1.7 회; 왼팔 0.8 회, 오른팔 0.9 회)는 8 비트 진동 자극을 4 비트 자극으로 판단한 경우였다. 이러한 실수는 촉각 자극에 대한 연속된 자극 횟수를 판단(numerosity judgment)하는 능력의 한계로 인해 8 비트 자극의 자극 횟수를 실제보다 적게 인식하였기 때문으로 보인다[22]. 실제로 KR+TC 조건의 참가자 중 다수가 8 비트 진동 자극이 주어졌을 때 6 또는 7 회의 자극 밖에 느끼지 못하였다고 응답하였다. 적응 단계에 앞서 제공된 설명에서 1, 2, 4, 8 비트의 진동 자극이 가해질 것이라고 설명되었기 때문에, 참가자들은 자신이 느낀 6 또는 7 회의 진동 자극에 대해 4 비트 또는 8 비트의 진동 자극 중 하나로 판단해야만 했다.

나머지 실수 중 절반(0.8 회; 왼팔 0.3 회, 오른팔 0.5 회)은 1 비트 자극을 8 비트 자극으로 판단한 경우였다. 이러한 실수는 진폭 변조된 진동 자극의 특성에 기인한 것으로 생각된다. 1 비트 진동 자극은 실험에 사용된 촉각 자극 중 강도 변조 속도가 가장 느린 탓에 일부 참가자들은 비트를 형성하는 변조 신호(0.5 Hz)를 제대로 인식하지 못하고 반송 신호(64 Hz)에 보다 집중하는 모습을 보였으며, 반송 신호로 인해 느껴지는 매우 빠른 진동 자극을 8 비트 자극(실험에 사용된 자극 중 가장 빠른 자극)으로 오인한 것으로 생각된다.

모든 KR+TC 조건의 참가자들은 적응 단계를 거친 후에는 촉각 지시 자극을 실수 없이 정확하게 구별할 수 있었으며, 다른 학습 조건의 참가자 그룹과 비교해 실수의 경향에서 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

4.2 오류율

KR+AC 그룹과 KR+TC 그룹은 학습 초반에는 KR 그룹보다 유의하게 작은 오류율을 보였으나, 학습 직후(POST)와 휴회 시간 후(RET)에는 세 그룹 사이에 오류율에서 유의한 차이가 발견되지 않았다. 세 그룹은 학습 후의 두 평가에서 비슷한 수준의 태스크 수행 능력을 보였지만, 학습 효과가 유지되는 정도에는 차이가 있었다. KR 그룹은 학습 효과가 가장 오래 유지된 반면, KR+AC 그룹은 학습 효과가 가장 빨리 사라졌다. 이러한 결과는, 결과 지식은 독보 기능의 학습에 뚜렷한 영향을 주었지만 청각 또는 촉각 지시는 그 영향이 불분명하며, 학습된 기능의 유지 측면에서는 다소 방해되었다는 것을 나타낸다.

태스크의 단순함으로 인해 지시의 효과가 다소 저평가되었을 수 있다. 도입부에서 설명하였듯이, 지시는 목표 기능을 바람직하게 수행하는 데 필요한 지식을 제공함으로써 기능의 학습을 돕는 방법이다. 본 실험에 사용된 태스크가 비교적 단순하여서 별도의 지시 없이도 몇 번의 시행착오로부터 얻어진 결과 지식을 통해 태스크를 정확하게 수행하는데 필요한 지식(음정-타악기 관계)을 쉽게 습득할 수 있었고, 이로 인해 지시의 이점이 상쇄되었을 수 있다.

또한, 실험 결과는 개인차에 의한 영향을 일부분 받았을 수 있다. 기존 연구에 의하면 사람마다 운동기능 학습 능력에 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있으며, 이러한 사실은 독보 기능에 대해서도 예외가 아니다[23]. 이러한 차이는 그룹 내 편차가 커지는 요인이며, 이는 그룹간 차이가 통계적으로 유의하지 않게 나오는 결과로 이어진다.

학습 효과의 유지력에 대해, 과도한 가이던스가 참가자의 능동적인 학습을 저해했을 수 있다. KR 그룹은 각 타격의 정확성 여부(결과 지식)만을 제공받았기 때문에 태스크 수행에 일정 수준 이상의 노력이 요구된 반면, KR+AC와 KR+TC 그룹은 현재 타격해야 하는 타악기 정보를 추가적으로 제공(지시)받았기 때문에 상대적으로 적은 노력만으로도 태스크를 수행할 수 있었다.

본 연구 외에도 촉각 시범(지시)에 기반한 학습 방법을 사용하였을 때 학습 효과가 학습 후에 빠르게 사라지는 현상은 다수의 연구에서 관찰된다[14,18]. 그 원인으로는 시범의 도움을 받는 학습 단계와 도움 없이 태스크를 수행하는 평가 단계 사이의 괴리, 그리고 시범에 의한 학습자의 주의력 분산과 이로 인한 학습 부족 등이 지목되고 있다. 또한 운동 학습 분야에서 너무 잦은 가이던스의 제공은 학습한 기능의 유지력을 떨어뜨리는 것으로 알려져 있다[24]. 본 실험에서 KR+AC와 KR+TC 그룹은 하나의 음표에 대해 두 번 (지시와 결과 지식)의 가이던스를 제공받은 반면, KR 그룹은 그 한 번(결과 지식)만 제공받았다.

KR+AC와 KR+TC 그룹 사이에 발견되는 학습 효과 유지력 차이는 청각과 촉각 지시 사이의 식별성(discriminability) 차이에 의한 것으로 짐작된다. KR+AC 그룹의 청각 지시 자극이 KR+TC 그룹의 촉각 지시 자극보다 쉽게 구별 가능하기 때문에 KR+AC 그룹의 참가자들은 보다 많이 지시에 의존해 학습 단계를 수행했을 것으로 생각되며, 이로 인해 태스크 수행에 필수적인 음정-타악기 관계에 대한 지식을 충분히 습득하지 못한 것으로 보인다.

4.3 수행 시간

학습 후에 수행된 두 번의 평가에서 세 참가자 그룹 사이에 유의한 수행 시간 차이가 발견되지 않았으며, 이는 오류율의 결과와 동일한 이유로 설명할 수 있다.

수행 시간은 학습 단계에서도 유의한 차이를 보이지 않았으며, 이 결과는 지시가 태스크를 쉽고 정확하게 수행할 수 있도록 도와줌으로써 학습에 소요되는 시간을 감소시켜 줄 것이라는 기대와는 달리, 학습 및 평가 단계 전반에 걸쳐 지시가 수행 시간에 미치는 영향이 유의한 정도로 크지 않았다는 것을 나타낸다. 학습 단계에서, KR+AC와 KR+TC 그룹의 참가자들은 대체로 태스크를 최대한 빨리 진행하기보다는 지시 자극으로부터 현재 주어진 음표의 음정에 대응되는 타악기를 식별하고 얻어진 음정-타악기 관계를 기억하는데 충분한 시간을 소비하는 것을 선호하는 모습을 보였다.

비록 통계적으로 유의하지는 않았으나, KR+AC 그룹은 학습 단계에서 다른 그룹에 비해 태스크 수행에 적은 시간을 소요하는 경향을 보였다. 이 결과는 KR+AC 그룹의 참가자들은 적은 노력만으로도 주어진 청각 지시를 빠르게 식별하고 태스크 수행에 활용할 수 있었기 때문으로 짐작된다. 또한, 이러한 청각 지시의 높은 식별성으로 인해 KR+AC 그룹의 참가자들이 태스크를 수행하는데 있어 과도하게 청각 지시에 의존하게 되었고, 그 결과로 음정-타악기 관계를 암기하기 위한 노력(시간)을 적게 사용한 것으로도 추측이 가능하다.

KR+AC 그룹과 반대로, KR+TC 그룹은 대체로 태스크 수행에 오랜 시간을 소비하였다. 이 결과로부터, 청각 지시에 비해 촉각 지시가 식별에 더 많은 시간을 필요로 하였음을 짐작할 수 있다. KR+TC 그룹은 학습 전 평가(PRE)에서도 다른 그룹보다 긴 수행 시간을 보였으며, 이로 미루어 볼 때 KR+TC 그룹의 느린 태스크 수행 속도는 그룹 자체의 특성에 기인한 것으로도 보인다.

4.4 정성 평가

정성 평가에서도 세 참가자 그룹 사이에 유의한 차이는 발견되지 않았다. 이러한 결과는 부분적으로 학습 단계와 정성 평가 사이에 존재하는 휴회 시간의 영향을 받았을 것으로 보인다. 학습 단계에서 실험 참가자가 느끼는 주어진 학습 조건에 대한 주관적 느낌은 학습 종료 후부터 점차 잊혀지기 시작하여, 2.5 시간의 휴회시간 후에는 상당량 희석되었을 것으로 짐작할 수 있다.

KR+AC 조건의 높은 학습용이성 점수는 청각 지시의 높은 식별성을 반영하는 것으로 보이며, 낮은 학습유용성 점수는 청각 지시에 대한 과도한 의존과 이로 인해 발생하는 학습 불충분을 뒷받침하는 결과로 보인다. KR+AC와 KR+TC 조건이 학습용이성과 흥미도 측면에서 KR 조건보다 좋은 점수를 받은 것으로부터, 추가로 제공된 청각 또는 촉각 지시가 학습자의 학습에 대한 어려움을 낮추고 흥미를 높였음을 알 수 있다. 사용의 편리함에 있어서는, KR+TC 조건이 가장 낮은 점수를 받았고, KR+AC 조건은 그 뒤를 따랐다. 이 결과는 이 두 가지 조건의 참가자들에게는 지시 자극에 적응하고 식별할 수 있게 되기 위한 추가적인 노력이 요구되었고, 특히 KR+TC 조건의 경우 진동암 밴드를 추가적으로 착용하도록 요구되었다는 점을 고려하면 충분히 예상 가능한 결과이다.

5. 결 론

본 논문에서 드럼 시퀀스 독보(sight reading) 기능의 학습을 보조하기 위한 시스템을 제시하였다. 교육 시스템은 학습자의 각 타격에 대한 정답 여부(결과 지식)를 악보상에 나타나는 음표의 색깔을 통해 시각적으로 제공하고, 현재 주어진 음표에 대해 어떤 타악기를 타격해야 하는지(지시)를 청각 또는 촉각 자극을 통해 추가적으로 알려준다.

교육 시스템과 교육 시스템이 제공하는 가이던스의 효과를 평가하기 위해 세 가지 학습 조건에 대해 사용자 실험을 수행하였다. 비교 조건(KR 조건)의 참가자들은 학습 중에 결과 지식만 제공받았고, 나머지 두 조건의 참가자들은 결과 지식에 더해 청각 지시 또는 촉각 지시를 추가적으로 제공받았다. 학습 직후와 학습으로부터 2.5 시간이 지난 시점에서 세 참가자 그룹은 모두 학습 전과 비교해 통계적으로 유의한 성능(오류율과 수행 시간) 향상을 보였으나, 세 그룹 사이에는 유의한 차이를 발견할 수 없었다. 청각 지시와 촉각 지시는 학습 초반에 학습자가 범하는 실수를 줄이는 데에는 효과적이었지만, 이러한 효과가 학습 후의 성능에는 큰 영향을 미치지 못하였다. 이로부터, 독보 기능의 학습에 있어 결과 지식이 주도적인 효과를 발휘하는 반면, 지시의 효과는 부수적이라는 결론을 내릴 수 있다. 하지만 본 연구는 초기 단계로, 이러한 결론을 확인하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

본 실험에 사용된 태스크는 추가적인 도움이 없이도 몇 번의 시도 후에는 올바르게 수행할 수 있을 정도로 단순하였으며, 이로 인해 태스크를 올바르게 수행할 수 있도록 도

와줌으로써 학습을 돕는 지시의 효과가 제대로 발휘되지 않았을 수 있다. 보다 공정한 평가를 위해서는 보다 사실적인 독보 태스크에 대해 실험을 수행할 필요가 있다. 본 실험에서 태스크는 시간적인 제한이 없이 한 번에 하나의 음표씩 순서대로 처리된 반면, 실제 독보 연주에서는 실시간으로 악보를 해석하고 연주하기 위해 다수의 음악 기호가 동시에 처리된다[25].

현재의 교육 시스템에 이러한 시간적 요구사항을 반영하기 위해서는 짧으면서도 식별성이 높은 지시 자극 모음이 요구되며, 이를 위해 진동자를 추가하거나 리듬 패턴을 개선하는 등의 방법을 고려하고 있다. 또한, 학습자가 지시 자극을 느끼고 식별하기 위한 시간을 고려해 지시 자극을 실제 요구되는 타격 시점보다 미리 제공해야 할 필요가 있을 것으로 예상된다. 타격 강도는 드럼 연주에서 고려해야 하는 또 다른 요소이며, 지시 자극의 강도를 다르게 함으로써 타격 강도를 지시할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 보다 능동적이고 효과적인 학습을 위해 학습 중 지시 제공 빈도를 조절하는 방안을 고려하고 있다[26].

References

[1] R. A. Magill, Motor Learning: Concepts and Applications, McGraw-Hill, 2001.

[2] A. D. Baddeley, *Human Memory: Theory and Practice*, Psychology Press, 1997.

[3] E. Todorov, R. Shadmehr, and E. Bizzi, "Augmented Feedback Presented in a Virtual Environment Accelerates Learning of a Difficult Motor Task", *Journal of Motor Behavior*, vol. 29, no. 2, pp. 147-158, 1997.

[4] S. Holland, A. J. Bouwer, M. Dalgleish, and T. M. Hurtig, "Feeling the Beat Where it Counts: Fostering Multi-Limb Rhythm Skills with the Haptic Drum Kit", *In Proc. of the ACM International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp. 21-28, 2010.

[5] K. Huang, T. Starner, E. Do, G. Weiberg, D. Kohlsdorf, C. Ahlrichs, and L. Ruediger, "Mobile Music Touch: Mobile Tactile Stimulation for Passive Learning", *In Proc. of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 791-800, 2010.

[6] I. Lee, K. Hong, and S. Choi, "Guidance Methods for Bimanual Timing Tasks", *In Proc. of the IEEE Haptics Symposium*, pp. 297-300, 2012.

[7] J. Watanabe and H. Ando, "Pace-sync Shoes: Intuitive Walking-pace Guidance Based on Cyclic Vibro-tactile Stimulation for the Foot", *Virtual Reality*, vol. 14, no. 3, pp. 213-219, 2010.

[8] D. Spelmezan, M. Jacobs, A. Hilgers, and J. Borchers, "Tactile Motion Instructions for Physical Activities", *In Proc. of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2243-2252, 2009.

[9] K. Bark, P. Khanna, R. Irwin, P. Kapur, S. A. Jax, L. J. Buxbaum, and K. J. Kuchenbecker, "Lessons in Using Vibrotactile Feedback to Guide Fast Arm Motions", *In Proc. of the IEEE World Haptics Conference*, pp. 355-360, 2011.

[10] A. Bloomfield and N. I. Badler, "Virtual Training via Vibrotactile Arrays", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 17, no. 2, pp. 103-120, 2008.

[11] P. Shull, K. Lurie, M. Shin, T. Besier, and M. Cutkosky, "Haptic Gait Retraining for Knee Osteoarthritis Treatment", *In Proc. of the IEEE Haptics Symposium*, pp. 409-416, 2010.

[12] J. van der Linden, R. Johnson, J. Bird, Y. Rogers, and E. Schoonderwaldt, "Buzzing to Play: Lessons Learned From an In the Wild Study of Real-time Vibrotactile Feedback", *In Proc. of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 533-542, 2011.

[13] L. Marchal-Crespo and D. J. Reinkensmeyer, "Review of Control Strategies for Robotic Movement Training after Neurologic Injury", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 6, no. 20, 2009.

[14] D. Powell and M. K. O'Mally, "The Task-Dependent Efficacy of Shared-Control Haptic Guidance Paradigms", *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 5, no. 3, pp. 208-219, 2012.

[15] D. Feygin, M. Keehner, and F. Tendick, "Haptic Guidance: Experimental Evaluation of a Haptic Training Method for a Perceptual Motor Skill",

In Proc. of the IEEE Haptics Symposium, pp. 40–47, 2002.

[16] G. Grindlay, "Haptic Guidance Benefits Musical Motor Learning", *In Proc. of the IEEE Haptics Symposium*, pp. 397–404, 2008.

[17] J. C. Huegel and M. K. O'Malley, "Progressive Haptic and Visual Guidance for Training in a Virtual Dynamic Task", *In Proc. of the IEEE Haptics Symposium*, pp. 343–349, 2010.

[18] J. Lee and S. Choi, "Effects of Haptic Guidance and Disturbance on Motor Learning: Potential Advantage of Haptic Disturbance", *In Proc. of the IEEE Haptics Symposium*, pp. 335–342, 2010.

[19] J. Lieberman and C. Breazeal, "TIKL: Development of a Wearable Vibrotactile Feedback Suit for Improved Human Motor Learning", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 919–926, 2007.

[20] G. Park and S. Choi, "Perceptual Space of Amplitude-Modulated Vibrotactile Stimuli", *In Proc. of the IEEE World Haptics Conference*, pp. 59–64, 2011.

[21] L. J. Post, I. C. Zompa, and C. E. Chapman, "Perception of Vibrotactile Stimuli During Motor Activity in Human Subjects", *Experimental Brain Research*, vol. 100, no. 1, pp. 107–120, 1994.

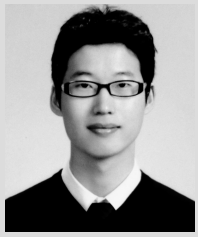
[22] E. C. Lechelt, "Temporal Numerosity Discrimination: Intermodal Comparisons Revisited", *British Journal of Psychology*, vol. 66, no. 1, pp. 101–108, 1975.

[23] H. R. Gudmundsdottir, "Advances in Music-reading Research", *Music Education Research*, vol. 12, no. 2, pp. 331–338, 2010.

[24] R. A. Schmidt, "Frequent Augmented Feedback Can Degrade Learning: Evidence and Interpretations", *Tutorials in Motor Neuroscience*, pp. 59–75, 1991.

[25] R. Kopiez and J. I. Lee, "Towards a General Model of Skills Involved in Sight Reading Music", *Music Education Research*, vol. 10, no. 1, pp. 41–62, 2008.

[26] C. J. Winstein and R. A. Schmidt, "Reduced Frequency of Knowledge of Results Enhances Motor Skill Learning", *Journal of Experimental Psychology*, vol. 16, no. 4, pp. 677–691, 1990.



이 인

2006 성균관대학교 컴퓨터공학과(공학사)

2006~현재 포항공과대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정

관심분야 : 햅틱스 응용, 운동 학습, 인간공학

최 승 문

1995 서울대학교 제어계측공학과(공학사)

1997 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)

2003 Purdue University, Department of Electrical and Computer Engineering (PhD)

2005~현재 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수

관심분야 : 햅틱 렌더링, 햅틱스 응용, 정신물리학,