

## Effects of sensory information distortion by muscle vibration on continuous limb movement in aging and accuracy constraint

Kyoung-Hyun Lee<sup>1</sup>, Ji-Hang Lee<sup>2</sup>, Sang Hyup Choi<sup>3</sup>, & Yong-Gwan Song<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Center for Sport Science in Gwangju, <sup>2</sup>Sungkyunkwan University, & <sup>3</sup>Korea University

**[Purpose]** The present study was to investigate to extent that effects of sensory information distortion by muscle vibration on continuous limb movement in aging and accuracy constraint. **[Methods]** Young adult group (n=11) and older adult group (n=11) were divided. All participant were instructed to perform repetitive aiming movement to specified targets under three-accuracy constraints (i.e., low, high, and mixed accuracy constraints) in the vibration and no-vibration conditions. Kinematic data was collected by movement time and movement error frequency. **[Results]** The results showed that compared with young adult, older adult increased movement time when accuracy constraint was high under vibration condition. Older adult also was a high degree of movement errors than young adults when accuracy constraint was high under vibration condition. **[Conclusion]** The muscle vibration stimulation may influence considerably on the continuous limb movement probably due to degeneration in sensory information processing by aging.

**Key words:** Muscle vibration, Aging, Sensory information, Continuous movement, Fitts task, Accuracy constraint

### 서론

중추신경계는 감각피드백을 기반으로 운동계획을 수립하고 이를 통해 수립된 운동명령을 효과기로 전달하여 최적의 움직임을 생성할 수 있도록 사지의 움직임을 조정하는 역할을 담당한다. 그러나 외부적인 방해와 같은 감각정보의 왜곡은 감각정보처리 과정에 문제를 유발하여, 운동계획과 실행에 영향을 미쳐 움직임 생성에 문제를 야기할 수 있다.

예를 들면, 감각정보는 목표 지향적 움직임 수행 시 다양한 감각정보를 기반으로 의도된 움직임 경로에서 발생할 수 있는 오류를 정정하기 위한 온라인 피드백

(online-feedback) 정보를 제공한다(Hore et al., 1999; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994; Wolpert & Kawato, 1998). 이러한 온라인 피드백을 통해서 계획된 움직임과 실제로 수행된 움직임을 실시간으로 비교하면서 동작을 수정하여 효율적인 움직임을 생성하게 된다. 즉, 과제 조건과 환경에 따라서 사전에 계획된 운동명령이나 운동프로그램을 실행시키는데 어려움이 발생할 때, 주로 신체의 감각피드백 정보에 의존하여 움직임을 조정하고 실행한다(Marteniuk et al., 1987; van Beers et al., 2002, 2004).

움직임 조직화와 실행에 있어서 감각정보가 중요한 역할을 하지만, 노화와 감각계 질환은 감각수용기의 민감성(acuity)을 둔화시킨다(Evans, 2010; Grabiner & Enoka, 1995; Green, 1986; Kenshalo, 1977). 예를 들면, 노화는 중추신경계 기능을 저하시키기 때문에 감각정보처리 지연과 지각을 방해하여 움직임 둔화를

논문 투고일 : 2017. 07. 31.

논문 수정일 : 2017. 09. 11.

게재 확정일 : 2017. 10. 12.

\* 교신저자 : 송용관(993418@naver.com).

야기할 뿐만 아니라 목표 지향적 동작 수행 시 잘못된 동작을 수정하기 위한 온라인 조정(online correction) 능력도 저하시킨다(Evans, 2010; Grabiner & Enoka, 1995; Green, 1986; Kenshalo, 1977). 이러한 운동기능 저하는 퇴행성 뇌질환 환자들에게서 더욱 뚜렷하게 나타나는데, 기저핵에 문제를 지닌 파킨슨병 환자와 소뇌질환 환자들은 뺨기 과제(reaching task) 수행 시 사지 위치에 대한 운동감각 지각과 움직임 실행 능력이 정상인에 비해 현저하게 떨어지는 것으로 나타났다(Grill et al., 1994; Maschke et al., 2003). 이러한 결과들은 동작 수행 시 감각정보에 대한 중요성을 보여주며, 노화와 퇴행성 뇌질환은 감각시스템의 문제를 야기하여 운동명령 수집과 전달을 방해함으로써 부정확하고 비정상적인 동작을 생성시킨다는 것을 시사한다. 결론적으로, 정확한 움직임을 수행하기 위해서는 중추신경계가 올바른 감각정보를 바탕으로 운동명령을 수립하고, 이러한 운동명령은 실제 동작 수행 시에는 움직임에 관여하는 근육들과 관절로 전달되어야 정확한 운동제어가 가능하다(Corcus et al., 1989; Gottlieb et al., 1989). 노화가 감각수용기의 민감성을 둔화시키는 것은 사실이나, 실제적으로 감각수용기의 민감성이 부정확한 움직임을 생성하는지에 관해서는 명확하지 않다. 더욱이 감각수용기의 민감성이 동작 수행 중 움직임 조정에 어떻게 영향을 미치는지에 관한 정보도 부족한 실정이다.

감각수용기의 민감성과 움직임 실행과의 관계를 규명하기 위한 방법 중 하나가 특정 움직임에 관여하는 근육이나 관절에 직접적으로 일시적인 진동 자극(vibration)을 가함으로써 사지의 위치 지각과 움직임 실행과의 관계를 알아보는 것이다. 진동 자극을 이용한 외부적인 감각정보의 방해는 잘못된 감각정보의 해석이나 정보 왜곡을 유발하여 부정확한 사지 움직임을 발생시킨다(Bianconi & van der Meulen, 1963; Burke et al., 1976, 1988; Goodwin et al., 1972; Inglis et al., 1991; Kim & Park, 2015; Matthews & Stein, 1969; Naito et al., 2007; Yun et al., 2013). 예를 들어, 선행연구들에서는 다양한 각도로 팔을 신전시키게 한 후에 진동 자극을 가하고, 재차 진동 자극 전에 움직였던 각도로 팔을 신전시켰을 때, 동작

위치 지각에서 오차가 발생하였다(Bernier et al., 2007; Bullen & Brunt, 1986; Capaday & Cooke, 1981; Cordo et al., 1995). 하지에 진동 자극을 가한 연구에서도 선 자세에서 진동 자극을 가할 때, 근육의 과신장이 유발되어 자세 안정성에 영향을 미치는 것으로 보고됐다(Ivanenko et al., 2000). 또한 외발서기 자세에서 진동자극 강도가 강할수록 노인들에게서 발의 압력중심(Center of Pressure) 가변성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Yoo et al., 2017). 특히, 하지를 이용해서 다양한 목표 거리와 각도를 설정하여, 진동 자극 처치 전과 후에 하지 동작 위치 지각 능력을 비교한 연구에서는 상대적으로 큰 각도 보다는 작은 각도 조건에서 더 큰 동작 오차가 발생하는 것으로 밝혀졌다(Yun et al., 2013). 다른 한편으로, 진동자극은 동작 위치에 대한 감각정보를 왜곡시키기 보다는 움직임 속도에 대한 고유 감각정보를 방해하는 것으로 밝혀졌다(Bock & Thomas, 2011; Pipereit et al., 2006). 이러한 연구들에서 진동자극을 통한 감각정보의 왜곡은 움직임에 대한 감각 재정렬의 이상을 유발하며, 움직임 계획과 실행에 있어서 감각정보의 중요성뿐만 아니라, 감각수용기의 민감성과 움직임 실행 간의 관계에 관한 지식을 제공해주고 있다.

외부적인 방해와 같은 감각정보의 왜곡이 신체감각 정보처리 과정에 문제를 유발하여, 부정확한 움직임을 야기하기 때문에 선행연구들은 대체로 실제 환경에서의 물체조작을 포함하는 과제를 통해 감각정보의 왜곡이 움직임 계획과 실행에 어떻게 영향을 미치는지를 규명하였다(Bianconi & van der Meulen, 1963; Bernier et al., 2007; Burke et al., 1976, 1988; Goodwin et al., 1972; Kim & Park, 2015; Matthews & Stein, 1969; Naito et al., 2007; Yun et al., 2013). 그러나 이들 연구들은 대부분 사지 위치에 관한 매칭(joint position matching) 과제와 정적 자세 동작과제를 통해서 감각정보의 역할을 규명했다. 즉, 움직임의 시작과 끝이 명확한 불연속적 동작 과제를 통해 감각정보 왜곡과 감각 재정렬을 평가하였다. 이로 인해, 움직임 수행에 있어서 감각정보 왜곡에 대한 기저를 파악하는데 제약이 있었다. 따라서 불연속적 동작에서뿐만 아니라 연속적 동작에서도 감각정보 왜곡이 움직임 수행에 어떻게 영향을 미치는지를 확인하는 과정이 필요하다.

이러한 측면에서 Fitts 과제는(1954) 움직임의 시작과 끝이 명확한 불연속적 동작 요소를 포함하는 연속적인 움직임 과제로 시각과 감각정보의 지속적인 상호작용을 통해 동작 수행력을 평가하기에 적합한 과제이다. 실제로, Fitts 과제는 인간의 움직임 속도와 정확성을 평가하기 위해 주로 사용되어왔으나, 점차 과제의 정확성 제약을 조작하여 감각운동 정보통합 과정을 규명하기 위해서도 적용되고 있다(Buchanan et al., 2003, 2004, 2006). 특히, 감각 및 운동계에 이상을 지닌 파킨슨병 환자들을 대상으로 감각정보 통합과 결손을 이해하는데도 활용되고 있다(Park & Stelmach, 2009). 따라서, 다양한 환경과 과제를 통해서 감각정보의 왜곡과 움직임 계획과 실행 간의 관계를 규명할 필요성이 제시된다.

컴퓨터 과학의 발전은 가상현실(virtual reality; VR) 환경을 구현하여 직접적인 물체의 조작 없이 모션 제스처(motion gesture)만으로도 컴퓨터나 TV 화면을 제어하고, 다양한 모션 제스처 방식을 통해서 인간의 동작 및 움직임을 표현 및 재현하고 있다. 모션 제스처 또한 감각정보 피드백을 기반으로 동작을 계획하고 실행하기 때문에 감각정보의 통합 기전에 대한 유용한 정보를 제공해 주고 있다(Sabes et al., 1998; Sober & Sabes, 2005; Stewart et al., 2013, 2014a, b). 특히, 이들 연구는 상지를 이용한 목표 지향적 움직임을 통해 동작 제어와 실행 원리를 밝히는데 중점을 두고 있다(Sainburg et al., 2003; Sainburg & Schaefer, 2004; van Beers et al., 2002, 2004). 이렇게 감각정보가 움직임 조직화와 실행에 있어서 중요한 역할을 함에도 불구하고, 대부분의 연구들은 불연속적 동작을 중심으로 연구를 진행하였으며, 물체의 조작 없이 연속적인 조건 동작을 수행할 때 근육과 관절의 고유수용기로부터 받아들이는 정보가 외부적인 진동자극에 의해서 감각이 왜곡될 때, 실제 움직임 실행과 조정에 어떻게 영향을 미치는지에 대해서는 관심이 부족했다. 불연속적인 움직임에 비해 연속적인 움직임은 상대적으로 더 많은 감각정보피드백을 필요로 하는데, 이는 연속적인 움직임에서는 실시간으로 입력되는 감각정보가 운동정확성과 수행력을 결정하기 때문이다.

따라서 이 연구에서는 연속적인 조건 움직임을 수행 시 외부적인 감각정보 왜곡이 실제 움직임 실행과 조정

에 어떠한 영향을 미치는지를 규명하고자 하였다. 구체적으로 연속적인 움직임을 수행할 때, 진동자극을 통한 감각정보의 왜곡이 움직임 실행과 제어에 어떠한 차이점을 유발하는지에 대해서 연구를 진행하였다. 부가적으로 이러한 차이가 노화와 과제의 정확성 제약(accuracy constraint)에 따라서도 달라지는지 검증하였다. 이 연구에서는 진동자극 처치가 연속적인 움직임 수행을 방해할 것이며, 이러한 방해는 과제의 정확성 제약에 따라 다르게 나타날 것이라고 가정하였다. 또한, 진동자극 처치에 대한 감각정보 왜곡이나 움직임 수행 저하가 성인들에 비해 노인들에게서 더욱 명확하게 나타날 것이라고 가정하였다.

## 연구방법

### 실험참여자

이 연구의 실험참여자는 서울시에 거주하는 22명의 성인 및 노인들을 연구대상으로 하였다. 구체적으로 성인 집단에는 24~37세의( $M=29.54$ ,  $SD=4.67$ ) 성인 11명(남자 7명, 여자 4명)이 포함되었으며, 노인 집단에는 62세~70세( $M=65$ ,  $SD=2.25$ ) 노인 11명(남자 6명, 여자 5명)으로 구성되었다.

실험참여자 모집은 실험참여자 공고문과 스노우볼 표집(snowball sampling) 방법을 통해서 이루어졌다. 모집 과정 중 신체적 장애나 과거 신경계 기능 이상과 관련된 질환을 지녔던 사람들은 연구에 참여할 수 없다고 공지하였다. 연구 참여자로 결정된 사람들에게 실험 시작 전 연구목적을 설명하고, 재차 자발적인 참여의사를 밝힌 참여자들을 연구에 참여시켰다. 연구 참여자들에게 연구의 위험이나 불편함을 느끼게 될 경우 연구 수행 중 언제라도 자발적으로 그만둘 수 있다고 안내하였다. 실험참여자는 모두 오른손잡이였으며, 과거 오른손의 부상이나 현재 어떠한 통증도 느끼지 않는다고 구두로 보고하였으며, 감각결손 및 신경학적 이상도 없는 것으로 파악되었다. 실험 진행 전에 이에 대한 이해와 확인을 거친 후 실험참가 동의서에 서명을 받았다.

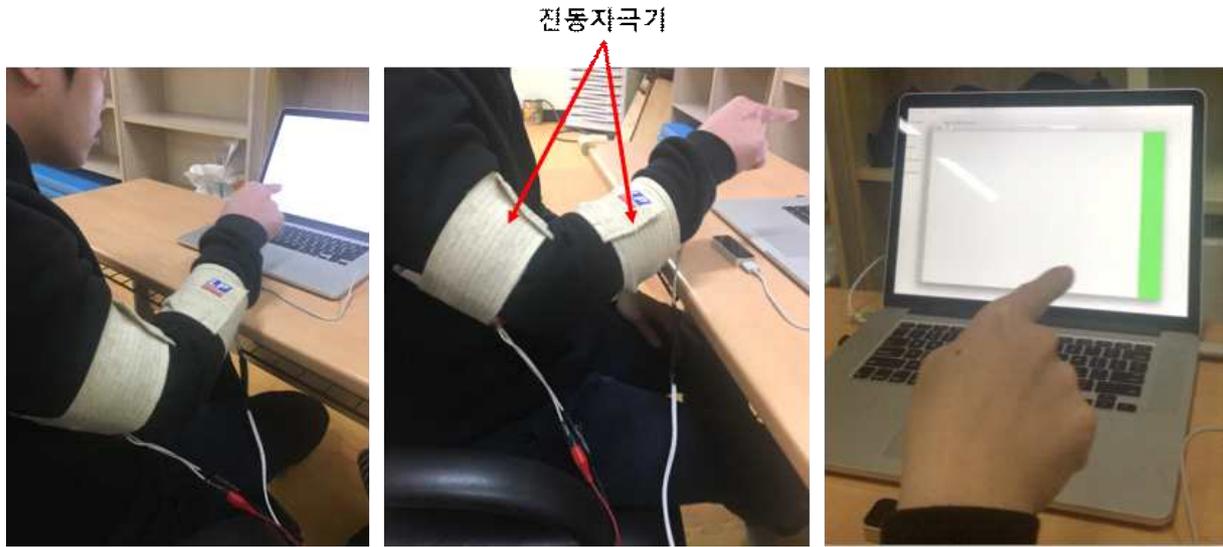


Fig. 1. Experimental setup. Vibrator (left and center) and leap motion controller connected with computer (right).

## 실험장비

본 연구에 사용된 실험장비는 가상현실을 구현하는 립모션(Leap Motion) 장비와 진동자극기(vibrator)를 활용하였다(Fig. 1). 첫째, 립모션 장비는 컴퓨터와 연결된 적외선 장비로 사용자의 손가락 동작을 인식하여 손 움직임을 추적한다. 립모션 컨트롤러는 컴퓨터에 연결되어 컴퓨터 화면에 제시되는 가상현실 환경에서 손짓(hand motion)을 통해 동작을 제어하게 해주며, 이를 통해 실제적인 물체 조작이나 외부적인 방해 없이 모션 제스처만으로 움직임 과제를 수행할 수 있게 해준다.

립모션 컨트롤러에서 자료 수집은 2개의 흑백 적외선 카메라와 3개의 적외선 LED를 통해 움직임을 초당 최대 200 프레임의 샘플 빈도로 동작을 캡처한다. 이 컨트롤러는 150도의 시야 각도를 지니고 있으며, Swipe, Grab, Pinch 제스처를 인식하고, 이를 약 0.7 mm로 측정하여 오차가 상당히 작다. 본 연구에서 립모션 컨트롤러는 손가락 끝 좌표, 속도, 방향, 길이를 중심으로 데이터를 수집하고,  $(x, y, z) = [100, 100, -100]$ 일 때, 실제 값은  $x = 10\text{cm}$ ,  $y = 10\text{cm}$ ,  $z = -10\text{cm}$ 로 계산된다.

둘째, 근육의 감각정보를 왜곡시키기 위해서 사용된 진동자극기는 진동모터로서 전력 공급기를 통해 일정한

전압으로 초당 100Hz의 진동빈도(2mm 진폭)를 발생시킨다. 진동자극기는 상완이두근(biceps brachii)과 상완삼두근(triceps brachii) 그리고 상완 아래쪽에 위치한 장요측 수근신근(long radial extensor muscle of wrist) 두 근육 위치에 부착하여 1분간 진동자극을 가하였다.

## 실험과제 및 절차

연구에 사용된 실험과제는 목표 표적 넓이 조건을 3가지로 설정한 Fitts 과제이다(Fig. 2). 첫 번째 조건은 목표 표적 넓이가 넓은 목표 조건(좌우 표적 넓이 각  $W=2\text{cm}$ )으로, 난이도 지수(ID)가 가장 낮은 정확성 제약(low accuracy)을 지닌 과제이다. 두 번째 조건은 목표 표적 넓이가 작은 목표 조건(좌우 표적 넓이 각  $W=0.64\text{cm}$ )이며, 난이도 지수(ID)가 가장 높은 정확성 제약(high accuracy)을 지닌 과제이다. 마지막 조건은 큰 목표 표적과 작은 목표 표적을 결합한 조건(우측 표적 넓이  $W=2\text{cm}$ , 좌측 표적 넓이  $W=0.64\text{cm}$ )이었으며, 중간의 난이도 지수(ID)가 결합된 정확성 제약(mixed accuracy)을 지닌 과제이다. 3가지 과제에서 두 목표 표적 간의 거리는 모두 29cm로 동일하였다.

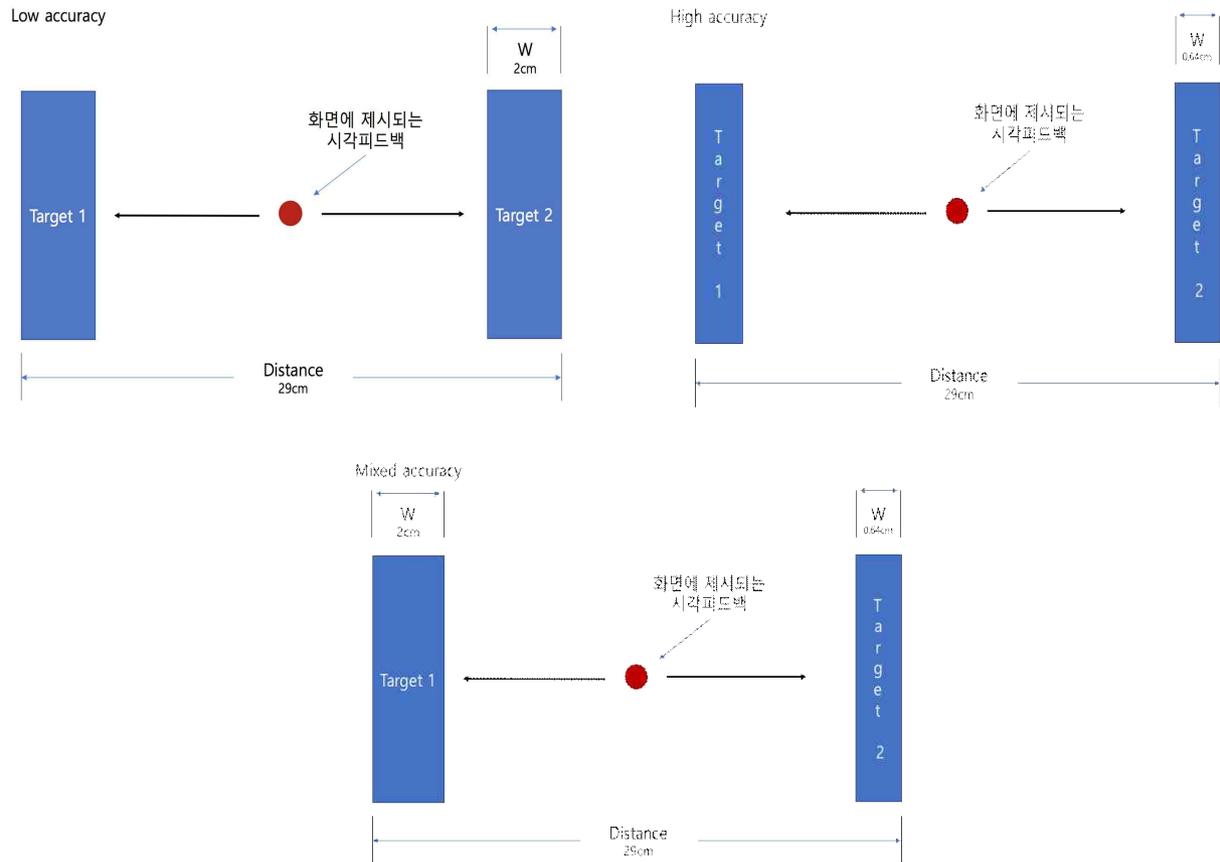


Fig. 2. Experimental tasks. low accuracy (top left), high accuracy (top right) and mixed accuracy (bottom center)

이 연구에서 실험과제를 3가지로 설정한 근거는 첫째, 감각왜곡의 효과를 규명한 선행연구들은 다양한 각도로 팔을 신전시킨 후 진동자극을 처치한 결과, 팔의 신전 각도가 큰 조건에서 보다 작은 조건에서 감각정보 왜곡이 더 명확하게 나타났다(Bernier et al., 2007; Yun et al., 2013). 둘째, Fitts 과제를 사용한 연구에서 과제의 정확성 제약이 상대적으로 높은 조건에서 감각운동 통합 능력의 저하되는 것으로 밝혀졌다(Buchanan et al., 2003, 2004, 2006). 셋째, 진동자극 처치 조건을 사용하지 않았지만, 감각신경계에 이상을 지닌 파킨슨병 환자들을 대상으로 Fitts 과제를 사용한 연구에서도 과제의 정확성 제약이 높을수록 감각정보의 통합 결손이 발생하는 것으로 확인되었다(Park & Stelmach, 2009). 이러한 선행연구들의 결과에 비추

보면, 과제의 정확성 제약에 따라 감각정보의 통합과 처리 과정이 상대적으로 다르다는 것을 알 수 있으며, 과제의 정확성 제약이 높을수록 감각왜곡의 효과가 더욱 명확히 나타날 수 있다고 유추할 수 있다. 따라서 감각왜곡과 관련된 선행연구 결과들을 바탕으로 연속적인 조건 움직임 수행 동안 진동자극 처치 전과 후 감각정보의 통합과 처리 과정이 어떻게 다른지 그리고 이러한 효과가 과제의 정확성 제약에 따라서 어떻게 나타나는지를 명확히 확인하고자 실험과제를 다변화하였다. 실험을 진행하기 위해 연구참여자들은 컴퓨터가 위치한 책상 앞에 편안한 상태로 앉은 후 컴퓨터와 연결된 립모션 컨트롤러 위에 손을 올려놓고 과제를 수행하기 위한 준비를 하도록 지시하였다. 실험 참가자들마다 손의 위치는 자신들의 가슴과 배꼽 사이에 가장 편안하다고 느끼는 높이

에 위치시키면 된다고 설명하였다. 립모션 컨트롤러에 손을 올려놓게 되면, 실험참가자의 손 위치를 알려주는 빨간색 포인트 점이 컴퓨터 화면에 나타나며, 실험참가자들은 이 빨간색 포인트 점을 통해 동작 개시 및 수행 중 실시간으로 자신들의 움직임에 대한 피드백을 제공할 수 있었다. 빨간색 포인트 점이 정해진 목표 표적에 들어가게 되면, 표적 색깔은 초록색으로 바뀌면서 동작 수행에 대한 정보를 실험참가자에게 제공한다. 실험참가자들에게 가능한 빠르고 정확하게 동작의 끊임없이 동작을 반복적으로 수행하도록 지시하였으며, 시도 종료 후 화면에 제시된 빨간색 포인트 점이 사라짐으로써 그 시도의 종료를 알리고, 다음 시도를 수행할 수 있도록 준비시켰다.

〈Table 1〉에 제시된 것처럼, 실험참가자들마다 5회의 연습시기를 가진 후에 본 실험과제를 수행하였다. 본 실험에서는 3가지 정확성 제약 조건으로 구성되었으며, 3가지 정확성 제약 조건은 각각 2회의 블록으로 구분되어 각 블록마다 15회씩 연속적인 조준 움직임을 수행하게 하였다(30회). 각 정확성 제약 조건마다 첫 블록을 마친 후에 진동자극을 1분 동안 가한 후 곧바로 두 번째 블록을 수행하게 하였으며, 최종적으로 각 정확성 제약 조건마다 30회씩 90회를 수행하였다.

각 시도는 15초 동안 수행하게 되며, 시도와 시도 간의 휴식시간은 3초로 설정되었다. 15회로 구성된 첫 블록 세션을 수행하고 30초 정도의 휴식시간을 취한 후 2번째 블록 세션(15회)을 수행하게 하였다. 각각의 목표 조건 사이의 휴식시간은 1분으로 설정하였으나, 실험참가자들이 더 긴 휴식시간을 요구할 시에는 1분 정도의 휴식시간을 부가적으로 제공하였다. 최종적으로 실험에

대한 총소요시간은 30분 정도 소요되었다. 〈Table 1〉에 제시된 것처럼 실험 과제 진행 순서는 큰 목표 조건(낮은 정확성 제약) → 작은 목표 조건(높은 정확성 제약) → 혼합 목표 조건(혼합 정확성 제약) 순으로 진행하였다.

### 측정변인 및 분석

진동자극 처치와 노화에 따른 연속적인 조준 움직임에서의 차이를 확인하기 위해, 본 연구에서 사용된 운동학적 자료는 움직임 시간(movement time; MT)과 움직임 오차 발생 빈도(movement error)이다. 움직임 시간은 움직임 개시 시점과 종료 시점을 기반으로 측정되었으며, 움직임 오차는 연속적인 동작 수행 시 정해진 두 목표 표적을 벗어나거나(지나치거나) 도달하지 못한 횟수를 측정하였다.

움직임 시간은 움직임 개시와 움직임 종료 사이의 시간을 구한 것으로, 움직임 개시(movement onset)는 최대 속도 값(peak velocity value)을 기준으로 구하였다(움직임 방향에 따른 + 또는 - 값). 움직임 종료(movement offset)는 동작 개시 최대 속도와 동작 방향이 바뀌기(예, 좌측 방향 → 우측 방향, 우측 방향 → 좌측 방향) 직전 동작이 멈춘 마지막 지점에서의 최대 속도를 기준으로 구하였다.

수집된 자료에 대한 통계분석은 2집단(노인과 성인) × 3조건(큰 목표, 작은 목표와 혼합 목표) × 2진동자극(진동자극 유, 무)에 대한 반복측정 분산분석을 통해 검증하였다. 사후 검증은 던컨의 다중범위검증(Duncan's multiple-range test) 방식을 통해 확인하였으며, 통계적 유의수준은 .05로 설정하였다.

Table 1. Experimental protocol

Accuracy constraint and Vibration conditions						
Accuracy constraint	① Low accuracy		② High accuracy		③ Mixed accuracy	
Block number	① Block	② Block	① Block	② Block	① Block	② Block
Vibration stimulation	vibration		vibration		vibration	
Trial number	15 trial	15trial	15 trial	15 trial	15 trial	15 trial

Table 2. Mean and SD of MT across older and young adults by accuracy constraint and vibration conditions.

Condition	Low accuracy		High accuracy		Mixed accuracy	
	no vibration	vibration	no vibration	vibration	no vibration	vibration
	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)
Young adults	486.21 (111.21)	476.23 (155.21)	712.21 (135.12)	698.34 (228.32)	645.23 (199.12)	639.93 (184.33)
Older adults	554.32 (260.21)	548.11 (332.22)	1123.34 (459.98)	1498.34 (645.24)	859.23 (433.98)	877.32 (500.02)

## 연구결과

### 움직임 시간

과제의 정확성 제약과 진동자극에 따른 노인들과 성인들의 연속적인 조준 움직임 수행에서의 차이점을 확인하기 위해 움직임 시간을 분석하였다. 측정변인에 대한 성인집단과 노인집단에 대한 동질성을 확인한 결과, 움직임 시간에  $p = .189$ , 그리고 움직임 오차 발생 빈도  $p = .246$ 으로 각각 확인되면서, 두 집단 간의 동질성이 확보되었다.

(Table 2)와 (Fig. 3)에 제시된 것처럼, 정확성 제약이 낮은 과제를 진동자극 처치 없이 수행할 때, 노인들의 움직임 시간은 554.32ms이었으며, 성인들은 486.21ms로 나타났다. 진동자극 후 정확성 제약이 낮은 과제를 수행할 때 노인들의 움직임 시간은 548.11ms이었으며, 성인들은 476.23ms이었다. 정확성 제약이 낮은 과제 조건에서는 성인들에 비해 노인들의 움직임 시간이 길게 나타났지만, 성인과 노인 그리고 진동자극 유무에 따라 통계적으로 유의한 차이는 확인되지 않았다.

정확성 제약이 높은 과제를 진동자극 없이 수행할 때, 노인들의 움직임 시간은 1123.34ms이었으며, 성인들은 712.21ms 나타났다. 진동자극 후 정확성 제약이 높은 과제를 수행할 때, 노인들은 움직임 시간은 1498.34ms로 증가하였으며, 성인들의 움직임 시간은 698.34ms로 나타났다. 정확성 제약이 높은 과제에서 성인들과 노인들 간의 움직임 시간은 통계적으로 유의한 차이가 나타났다( $p < .01$ ). 특히, 노인들의 경우 진동자극 전보다

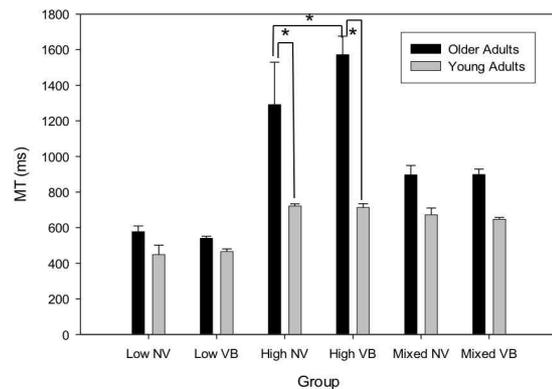


Fig. 3. Movement time on the accuracy constraint (Low, High and Mixed) and muscle vibration (NV; no vibration; VB; vibration)

후에 움직임 시간이 상대적으로 크게 증가하면서 진동자극 유무에 따른 차이가 유의한 것으로 인되었다( $p < .05$ ). 그러나 성인들에게서 이러한 차이는 확인되지 않았다.

정확성 제약이 혼합된 과제를 진동자극 없이 수행할 때, 노인들의 움직임 시간은 859.23ms이었으며, 성인들은 645.23ms로 나타났다. 진동자극 후 과제를 수행할 때, 노인들의 움직임 시간은 877.32ms로 증가하였으며, 성인들은 639.93ms로 나타났다. 정확성 제약이 혼합된 과제에서 노인들과 성인들 간의 통계적으로 유의한 차이가 확인되지 않았으며, 이러한 차이는 진동자극 유무에 따라서도 나타나지 않았다.

움직임 시간에 대한 집단과 과제 그리고 진동자극에 따른 상호작용 효과는 통계적으로 유의한 것으로 밝혀졌다( $F(1,20) = 25.919$ ,  $p < .01$ ). 이러한 결과는 과제의

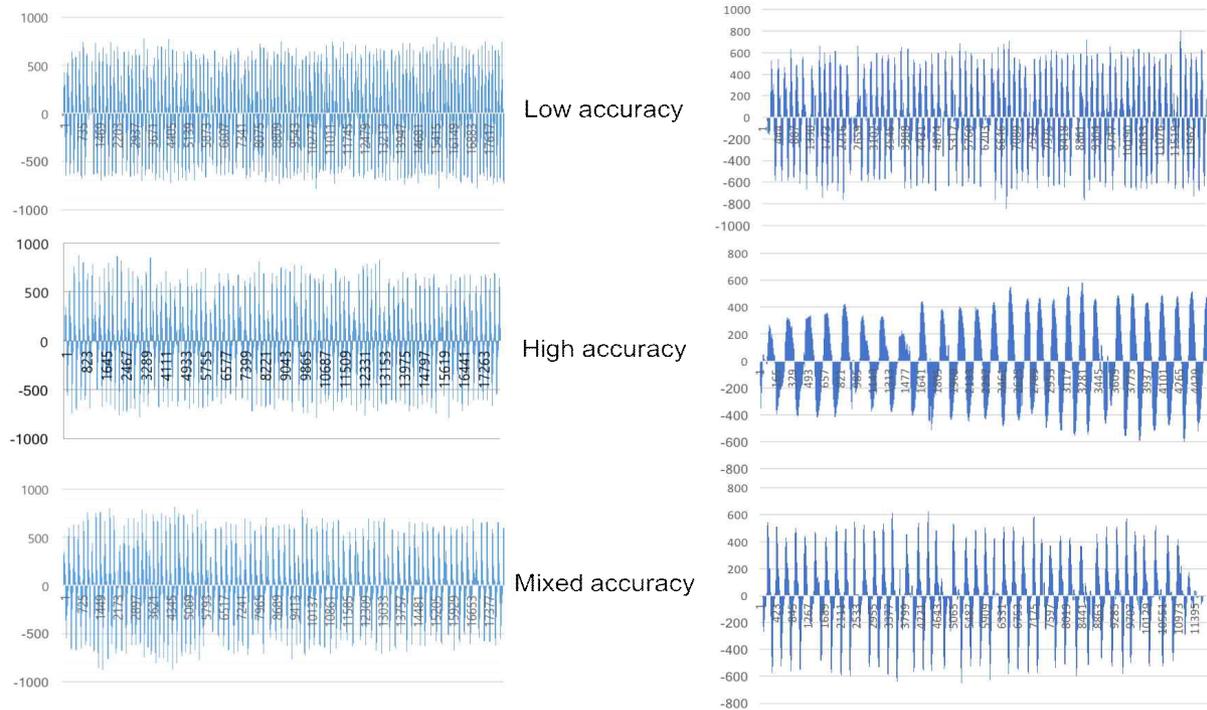


Fig. 4. Movement temporal patterns of accuracy constraint by muscle vibration (left: no vibration; right; vibration)

정확성 제약에 따라 노인과 성인들의 연속적인 움직임 수행 패턴이 다르다는 것을 의미한다. 즉, 노인과 성인들의 연속적인 움직임 수행 패턴에서 움직임 시간은 과제의 정확성 제약에 따라서 서로 다르다는 것을 보여준다. 또한, 이러한 연속적인 움직임 수행 패턴에서의 움직임 시간의 차이는 진동자극에 따라서도 발생하며, 노인들과 성인들이 서로 다르다는 것을 설명한다.

(Fig. 4)에 제시된 3가지 정확성 제약에 따라 진동자극 처치 전과 후에 연속적인 움직임 수행 동안 시간적 패턴을 흐름을 살펴본 결과, 움직임 패턴이 다른 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 즉, 예제 결과 그림에서 볼 수 있듯이, 연속적인 움직임 수행에 대한 시간적 패턴은 진동자극 전(그림 좌측)과 진동자극 후(그림 우측)에 움직임 수행에 대한 시간적 패턴의 흐름이 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 패턴은 움직임 속도와 움직임 시간의 변화가 발생할 때 나타나는데, 과제의 정확성 제약이 높은 과제에서 더 잘 확인되었으며, 성인들에 비해 노인들에게서 더욱 두드러진다는 것을 엿볼 수 있다.

### 움직임 오차 발생 빈도

연속적인 조준 움직임 수행에서 정확성 제약과 진동자극 유무에 따라서 발생하는 움직임 오차를 측정하기 위해, 움직임 수행 시 두 목표 표적을 벗어나거나(overshooting) 도달하지 못하는(undershooting) 움직임 횟수를 측정하였다(Fig. 5).

(Fig. 5)에 제시된 것처럼, 정확성 제약이 낮은 과제를 진동자극 없이 수행할 때, 노인들의 움직임 오차는 2.21회로 나타났으며, 성인들은 1.54회로 나타났다. 진동자극 후 과제를 수행할 때 노인들의 움직임 오차는 2.68회, 성인들은 1.87회로 다소 증가하였으나, 성인과 노인 그리고 진동자극 유무에 따라서 유의한 차이는 확인되지 않았다.

정확성 제약이 높은 과제를 진동자극 없이 수행할 때, 노인들의 움직임 오차는 2.34회 발생했으며, 성인들은 1.49회 나타났다. 진동자극 후 과제를 수행할 때 노인들의 움직임 오차 빈도는 5.59회로 증가하였으며, 성인들의

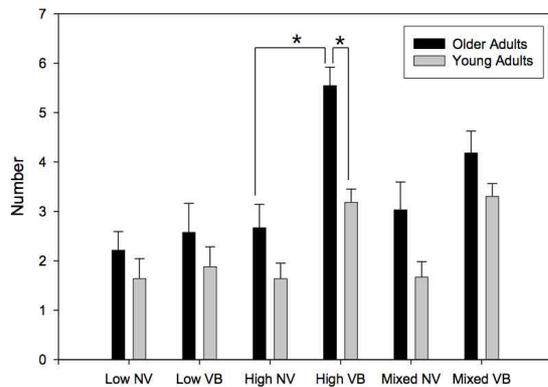


Fig. 5. Movement errors number on the accuracy constraint (Low, High and Mixed) and muscle vibration (NV; no vibration; VB; vibration)

움직임 오차 빈도도 3.18회로 증가하였다. 정확성 제약이 높은 과제에서 노인들과 성인들에 대한 움직임 오차 빈도는 통계적으로 유의한 차이를 보였으며( $p < .05$ ), 진동자극 전과 후 노인들의 움직임 오차 빈도에서도 유의한 차이가 확인되었다( $p < .01$ ).

정확성 제약이 혼합된 과제를 진동자극 없이 수행할 때, 노인들의 움직임 오차 발생 빈도는 3.08회였으며, 성인들은 1.41회 발생하였다. 진동자극 후 노인들에게서 움직임 오차 빈도는 4.05회 발생했으며, 성인들은 3.25회로 다소 증가한 것으로 밝혀졌으나, 유의한 차이는 확인되지 않았다.

움직임 오차에 대한 집단과 과제 그리고 진동자극에 따른 상호작용 효과는 통계적으로 유의한 것으로 밝혀졌다( $F(1,20) = 20.241, p < .01$ ). 움직임 오차 발생에서 상호작용이 확인되었다는 사실은 과제의 정확성 제약에 따라 노인과 성인들의 움직임 수행 패턴이 다르다는 것을 의미한다. 또한, 노인들과 성인들 간의 서로 다른 움직임 오차 발생 빈도 패턴은 진동자극에 따라서도 발생한다는 것을 보여준다.

## 논 의

이 연구에서는 외부적인 진동자극이 감각적응 과정에 어떻게 영향을 미치는지를 확인하였으며, 이러한 차이가

노화와 과제의 정확성 제약에 따라서 어떻게 변화되는지도 규명하였다. 연구결과, 첫째, 진동자극은 감각정보의 왜곡을 유발시켜 정확성 제약이 높은 과제를 연속적으로 수행할 때 움직임 실행을 방해하는 것으로 나타났다. 둘째, 진동자극은 성인들에 비해 노인들의 감각정보 처리와 통합에 더 많은 감각정보의 왜곡을 일으켜 움직임 수행을 저하시키는 것으로 밝혀졌다.

구체적으로, 노인들은 과제에 대한 정확성 제약이 클수록 움직임 시간이 증가하였으며, 이러한 움직임 시간 증가는 진동자극 후에 더 큰 것으로 확인되었다. 자발적인 조건 움직임을 수행할 때, 움직임 속도는 과제의 정확성 제약(과제의 난이도)이 증가할수록 움직임 정확성(움직임 속도)이 저하되는데, 이를 속도-정확성 상쇄(speed-accuracy trade-off)라고 일컫는다(Fitts, 1954; Fitts & Peterson, 1964). Fitts 과제는 정확성 제약이 높아질수록 인지적 요구와 정보처리 역량이 높아지기 때문에 정확성을 높이기 위해서 움직임 시간이 길어진다(Adam & Paas, 1996; Fitts, 1954; Fitts & Peterson, 1964). 본 연구에서도 과제의 정확성이 높아질수록 노인과 성인들의 움직임 시간이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 성인들에 비해서 노인들에게서 움직임 시간이 더 긴 것으로 밝혀지면서 속도-정확성 상쇄 현상이 확인되었다. Fitts 과제를 이용한 선행연구들에서도 노인들의 움직임 시간은 젊은 성인들에 비해 상대적으로 길게 확인되었는데(Ketcham et al., 2002; Poston et al., 2009; Rey-Robert et al., 2012; Sleiman-Malkoun et al., 2013; Teeken et al., 1996; Temprado et al., 2013; Yan et al., 2000), 본 연구에서도 노인들이 성인들에 비해 움직임 시간이 긴 것으로 나타나면서 일치된 결과를 보였다.

성인들에 비해 노인들에게서 움직임 시간이 증가한 것은 서로 다른 움직임 제어 전략을 사용했기 때문인 것으로 보인다(Boyle et al., 2015; Goggin & Meeuwssen, 1992). 조건 움직임을 수행할 때, 노인들은 움직임 가속과 감속 단계에서 더 긴 시간을 소비하는 경향을 보인다(Ketcham et al., 2002; Temprado et al., 2013). 이러한 움직임 시간의 증가는 전체 움직임을 계획하기 위해 소비된 시간과 움직임 수행에서 오류를 탐지하고, 탐지된 오류를 수정하는 시간이 길어졌다는 것

을 의미한다(Boyle et al., 2015; Yan et al., 1988). 이러한 기전으로 인해 성인들에 비해 노인들에게서 상대적으로 긴 감각운동 처리과정 시간 또는 지연이 나타난다. Boyle et al.(2015)의 연구에서도 성인과 노인들은 모두 서로 다른 움직임 제어 전략을 사용하여 자신들의 움직임을 최적화하였으며, 그 결과 성인들에 비해 노인들에게서 움직임 시간이 더 증가한 것으로 밝혀졌다. 성인과 노인들 모두 정확성 제약이 증가할수록 동작을 느리게 움직이는 제어 전략과 자신의 움직임 경로 궤적을 수정하는 전략을 채택하여 움직임을 수행하였는데, 노인들은 성인들에 비해 움직임 계획, 개시와 동작 수정 실행에 어려움이 컸기 때문에 이러한 움직임 제어 전략이 두드러졌으며(Boyle et al., 2015; Lorenzo-Lopez et al., 2008; Pohl et al., 1996), 본 연구의 결과도 이러한 관점에서 해석할 수 있다.

또한, 노인들에게서 발생하는 운동 수행력의 감소는 노화가 중추신경계의 기능 저하를 야기하므로 나이가 들수록 정보처리 역량도 동시에 감퇴되기 때문이다(Bashore et al., 1997; Birren et al., 1980; Cerella, 1985; Salthous et al., 1996; Welford et al., 1969). 더욱이 감각운동 과제를 수행할 때 노인들은 감각정보처리 능력이 노화로 인해 감퇴되는 것으로 밝혀졌다(Temprado et al., 2013). 본 연구에서 사용된 실험과제들은 정확성 제약이 높아질수록 더 긴 정보처리 과정을 필요로 한다. 더욱이 연구과제가 불연속적인 과제가 아닌 연속적인 과제이기 때문에 지속적인 감각정보의 입력 및 처리과정이 요구된다. 인지적으로 처리해야 할 정보가 증가할수록 정보처리과정은 길어지게 되는데(Fitts, 1954; Fitts & Peterson, 1964; Meyer et al., 1982; Rey-Robert et al., 2012; Schmidt, 1975), 성인들에 비해 노인들에게 움직임 시간이 증가하였다는 결과는 과제 수행 시 더 많은 정보처리시간이 필요했던 것으로 보인다. 노화로 인해 정확성 제약이 증가할수록 정확한 움직임을 위해서 더 많은 정보처리시간이 요구되고, 정보처리시간이 증가하게 되면 그만큼 움직임 속도는 감소하게 된다.

더 긴 정보처리 시간이 필요했다는 것은 감각피드백 회로에서의 시간 지연이 길어졌다는 것을 의미한다. 연속적인 조준 움직임을 수행은 지속적인 감각피드백 제어과

정을 필요로 하며(Hore et al., 1999; Pruszynski et al., 2008; Sainburg & Schaefer, 2004; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994), 동작 수행 중에도 실시간으로 전달되는 온라인 피드백을 통해서 움직임을 제어한다. 즉, 중추신경계가 연속적으로 운동출력 내 감각입력 정보를 변환시켜 변환된 운동명령 정보를 효과기로 전달하지만(Wolpert & Flanagan, 2010), 노화가 감각수용기의 변화를 일으켜 감각피드백 제어과정에서의 지연으로 이어졌기 때문에(Rey-Robert et al., 2012) 노인들은 운동 자극과 조정에 빠르게 반응하지 못했거나, 피드백 조정 기전을 효율적으로 사용하지 못했던 것으로 보인다. 특히, 정확성 제약이 가장 높은 과제에서 진동 자극 후에 움직임 시간의 증가가 성인들에 비해 노인들에게서 더욱 명확히 나타났다. 이는 진동자극이 정확한 움직임 수행에 필요한 감각정보의 입력과 출력을 방해하여 움직임의 둔화를 유발시킨 것으로 보인다. 선행연구들에서도 진동자극은 감각정보를 왜곡시켜 동작 위치에 대한 탐지를 방해하는데 이러한 감각정보 방해 효과는 큰 각도에서 보다는 작은 각도에서 더 잘 확인되었다(Bock & Thomas, 2011; Pipereit et al., 2006; Yun, et al., 2013). 실제로 큰 각도에 비해 작은 각도 조건에서 더 세밀하고 정밀한 감각정보 피드백을 필요로 하고, 이로 인해 동작을 수행하는 것이 어렵기 때문에 쉬운 과제에서 보다는 어려운 과제에서 감각정보 왜곡이 더 많이 발생한 것으로 볼 수 있다(Bock & Thomas, 2011; Pipereit et al., 2006; Yun, et al., 2013). 본 연구에서 사용된 실험과제가 팔의 신전 각도 과제는 아니지만, 과제의 정확성 제약 측면에서 큰 각도 보다는 작은 각도가 상대적으로 과제의 난이도가 높기 때문에, 위의 선행연구들의 결과를 토대로 본 연구의 결과를 비교 및 논의할 수 있을 것이다. 따라서 성인들은 아니지만, 노인들에게서는 과제의 정확성 제약이 가장 높은 과제를 수행할 때, 감각정보의 활용도가 높아지는데, 진동 자극 처치 후에 움직임 시간 증가가 두드러지게 나타났다는 사실은 감각피드백을 처리하는데 더 많은 시간이 소요되었다는 것을 보여준다. 또한, 이러한 결과는 노화가 감각정보처리 지연과도 관련이 있지만, 노인들이 외부적인 감각정보 방해에 더 영향을 많이 받는다는 것을 시사한다.

노화가 중추신경계를 변화시키기도 하지만, 동시에 주로 근육의 퇴보를 가져오기 때문에(Ketcham et al., 2002; Wisleder & Dounskaia, 2007), 섬세한 근육 제어를 요구하는 운동 과제에서 이러한 차이가 더욱 두드러진 것으로 보인다. Ketcham et al.(2002)은 노화가 신경근(neuromuscular)을 변화시키기 때문에 움직임 난이도가 증가할수록 노인이 젊은 성인들보다 움직임을 조정하는 것을 더 어려워하며, 특히, 어려운 과제를 수행할 때 효율적인 근육수축과 근경직(muscle stiffness) 생성과 조정에 문제를 보인다(Wisleder & Dounskaia, 2007). 또한, 진동자극은 동작 위치에 대한 감각정보를 왜곡시키기 보다는 움직임 속도에 관한 감각정보를 방해하기 때문에(Bock & Thomas, 2011; Pipereit et al., 2006), 노인들에게서 진동자극 후에 움직임 오차 발생과 움직임 시간 증가가 더욱 뚜렷했던 것으로 보인다. 또한, 효율적인 움직임을 생성하고 제어하는데 중요한 근육 조절 능력이 노인들에게서 저하되기 때문에 과제의 정확성 제약이 높은 과제를 수행할 때 진동자극이 근육 조절과 관련된 감각정보의 통합을 방해하여 움직임 시간의 증가하고 움직임 오차 발생이 더 많이 야기되었다고 볼 수 있다. 즉, 연속적인 조준 움직임을 수행할 때, 노화로 움직임 수행에 필요한 근육 제어 능력이 떨어진 노인들은 성인들에 비해 외부적인 감각정보 왜곡에 더 민감하게 반응한다는 것을 시사한다.

움직임 오차에 대한 결과에서도 노인들은 성인들에 비해 과제에 대한 정확성 제약이 클수록 움직임 오차 빈도도 더 많이 발생하였다. 연속적인 조준 움직임 수행 시 손 위치를 지각하는 것은 근육, 피부와 관절수용기로부터의 통합된 고유감각정보를 기반으로 한다(Sainburg & Wang, 2002; Shabbott & Sainburg, 2009). 이러한 고유감각정보를 바탕으로 감각운동체계 내에 내적모델(internal model)이 형성되는데, 이러한 내적모델이 움직임 생성과 조정에 중요한 역할을 한다(Hore et al., 1999; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994; Wolpert & Kawato, 1998). 즉, 감각적응이나 감각운동을 수행할 때 내적모델은 정확하고 효율적인 움직임 계획에 관한 정보를 피드포워드 방식으로 계획하고 실행하게 해준다. 또한, 동작 수행 중에는 정확한 움직임 정보가 동

작 시작 전에 운동명령을 수립하여 오차 발생 시에 즉각적으로 움직임 조정을 가능하게 해준다(Aruin & Latash, 1996; Hore et al., 1999; Hugon et al., 1982; Johansson & Westling, 1984, 1988a, b; Kawato, 1999). 그렇지만, 진동자극은 근육과 피부수용기의 감각왜곡을 일으켜 감각정보 통합과 내적모델 형성을 방해하여 느리고 부정확한 움직임을 유발한 것으로 보인다. 이러한 움직임 특징은 성인들에 비해 노인들에게서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 실제로 노인들은 성인들에 비해 진동자극 후 연속적인 움직임 수행에서 움직임 오차 빈도가 증가하였으며, 이러한 증가는 과제에 대한 정확성 제약이 높아질수록 컸다. 감각체계에 진동자극을 가한 선행연구들에서도 감각수용기가 외부 자극을 받게 되면, 근육의 길이 변화와 사지의 위치 감각을 지각하는데 문제가 발생하여, 부정확한 움직임이 생성된다는 결과와 일치되는 견해를 보였다(McCloskey, 1978; Carpenter et al., 1998; Grigg, 1993; Voight et al., 1996). 이로 인해, 노인들은 진동자극 후에 연속적으로 움직임을 수행할 때, 제시된 목표 표적 범위를 지나치거나 도달하지 못하는 부정확한 움직임 패턴이 나타났다.

그러나 본 연구에서 움직임 시간과 움직임 오차에 대한 결과 해석에 있어서 한 가지 고려할 부분이 있다. 그것은 연속적인 조준 움직임 수행 시 시각정보에 대한 의존성이다. 시각정보는 계획된 운동계획이나 수행 중 동작 수정을 할 수 있게 도와주는 중요한 정보이다(Glickstein, 2000). 실제로 움직임을 수행할 때, 노인들은 성인들에 비해 더 많이 시각 정보에 의존하고, 그 효과가 큰 것으로 나타났다(Boyle et al., 2013, 2015; Kovacs & Shea, 2011; Seidler-Dobrin & Stelmach, 1998; Swinnen et al., 1998; Wishart et al., 2002). 운동계획에 대한 시각과 고유감각의 상대적 기여를 조사한 연구에 의하면, 움직임 계획은 시각 정보에 더욱 의존하는 반면에, 근육에서 발생하는 토크와 힘의 제어는 고유감각정보에 더 많이 의존한다(Bagesteiro et al., 2006; Brown et al., 2003a, b; Lateiner & Sainburg, 2003; Sarlegna & Sainburg, 2007; Sober & Sabes, 2003, 2005). 그러나 본 연구과제는 물체를 조작하는 과제가 아니기 때문에 과제 수행 시 근육에서 발생하는 토크나 힘을 제

어하기 위한 요구가 상대적으로 크지 않다. 이는 실험참가자들이 자신들의 손 위치를 지각하거나 동작을 수정할 때, 고유감각정보 보다는 시각정보에 더 많이 의존했다는 것을 의미한다. 따라서 노인들은 과제 특성상 고유감각정보 보다는 시각정보에 더 많이 의존하면서 동작을 수행하면서 동작 중 발생하는 오차를 조정했을 가능성이 크다.

일반적으로 연속적인 조준 움직임 수행 과정에서 근육수용기는 움직임 속도에 관한 정보를 지속적으로 중추신경계로 전달하여 신체 움직임을 제어하도록 돕는 반면에, 관절 위치 매칭 과제에서 근육수용기는 근육의 길이 변화에 따른 동작의 위치 탐지와 제어와 관한 정보를 중추신경계에 전달한다(Bianconi & van der Meulen, 1963; Bernier et al., 2007; Burke et al., 1976; Goodwin et al., 1972; Matthews & Stein 1969; Eiichi et al., 2007). 본 연구에서 사용된 과제는 연속적인 움직임 수행 동안 자신들의 움직임 경로에 대한 시각 피드백을 지속적으로 제공받았기 때문에, 고유감각정보 보다는 시각피드백 정보에 더 많이 의존하면서 동작을 수행했을 것이다. 일례로, 감각운동적응 과정에서 구심성이 차단된 환자들은 동작 가변성이 매우 크게 나타날 때, 온라인 시각피드백에 대한 의존성이 커진다(Guédon et al., 1998). 이러한 측면에서 노인들은 감각왜곡으로 인하여 고유감각정보 보다는 온라인 시각피드백 정보에 더 많이 의존하면서 동작을 수행했을 가능성이 크다. 결론적으로 감각적응 과정에서 시각정보와 고유감각정보의 상호작용이 효율적인 움직임 수행에 중요하지만, 과제에 따라서 상대적 영향력이 달라지고, 그에 따라서 움직임 계획과 실행에 대한 기전이 달라질 수 있다는 점을 고려해야 할 것이다.

## 결론 및 제언

이 연구에서는 외부적인 진동자극을 통한 감각왜곡이 연속적인 조준 움직임 수행에 어떻게 영향을 미치는지를 확인하였다. 구체적으로 물체를 조작하거나 불연속적인 움직임을 수행하는 포인팅 과제(pointing task)가 아닌 물체 조작이나 사지의 마찰이 발생하지 않는 모션 제

스처를 기반으로 연속적인 움직임 과제를 수행하게 하였으며, 연속적인 움직임 수행이 과제의 정확성 제약과 진동자극 그리고 노화에 따라 차이가 있는지를 규명하였다. 연구결과, 진동자극을 통한 감각왜곡은 연속적인 조준 움직임 수행시 움직임 시간과 움직임 오차 빈도를 증가시키는 것으로 나타났으며, 이러한 증가는 성인들에 비해 노인들에게서 더욱 뚜렷하게 확인되었다. 진동자극을 통한 감각왜곡이 실시간으로 제공되는 감각피드백을 효율적으로 제어하는데 부정적으로 영향을 미쳤다는 것을 의미한다. 향후 연구들에서는 연속적인 조준 움직임 수행에서 시각정보와 감각정보에 대한 상대적인 기여에 대해서 구체적으로 파악해야 할 것이다. 이를 위해 동작 수행 시 무게 부하에 따라서 연속적인 조준 움직임에서의 수행차이가 발생하는지, 그리고 이러한 차이가 노인들이나 감각계 이상을 지닌 뇌질환 환자들에게서 어떠한 차이를 보이는지를 규명해야 할 것이다. 또한, 일부 연구에서 확인된 것처럼, Fitts 과제를 수행할 때, 움직임 시간의 증가와 움직임 제어 전략은 목표 넓이(W) 보다는 목표 간 거리(D)에 더 영향을 받는 것으로 확인되었는데, 성인들과 노인들 그리고 신경계 질환 환자들을 대상으로 이에 대한 연구가 수행된다면 Fitts 법칙의 이론적 정립을 도울 수 있을 것으로 판단된다. 끝으로, 향후에는 노화와 시각정보 그리고 감각왜곡과 시각정보 사이의 관계를 보다 명확히 규명해야 할 것이다.

## 참고문헌

- Adam, J. J. & Paas, F. G. W. C. (1996). Dwell time in reciprocal aiming tasks. *Human Movement Science*, 15, 1-24.
- Aruin, A. S. & Latash, M. L. (1995). Directional specificity of postural muscles in feed-forward postural reactions during fast voluntary arm movements. *Experimental Brain Research*, 103, 323-332.
- Bagesteiro, L. B., Sarlegna, F. R., & Sainburg, R. L. (2006). Differential influence of vision and proprioception on control of movement distance. *Experimental Brain Research*, 171, 358-370.
- Bashore, T. R., Ridderinkhof, K. R., & van der Molen, M. W. (1997). The decline of cognitive processing speed in old

- age. *Current Direction in Psychological Science*, 6, 166-169.
- Bernier, P. M., Chua, R., Inglis, J. T., & Franks, I. M. (2007). Sensorimotor adaptation in response to proprioceptive bias. *Experimental Brain Research*, 177, 147-156.
- Bianconi, R. & Van Der Meulen, J. R. (1963). The response to vibration of the end organ of mammalian muscle spindles. *Journal of Neurophysiology*, 26, 177-190.
- Birren, J. E., Woods, A. M., & Williams, M. V. (1980). *Behavioral slowing with age: causes, organization, and consequences*. In: Poon LW (ed) *Aging in the 1980s: psychological issues*. American Psychological Association, Washington, DC, pp 293-308.
- Bock, O. & Thomas, M. (2011). Proprioception plays a different role for sensorimotor adaptation to different distortions. *Human Movement Science*, 30, 415-423.
- Boyle, J. B., Kennedy, D. M., & Shea, C. H. (2015). A novel approach to enhancing limb control in older adults. *Experimental Brain Research*, 233, 2061-2071.
- Boyle, J. B., Panzer, S., Wang, C., Kennedy, D., & Shea, C. H. (2013). Optimizing the control of high ID single degree of freedom movements: re-thinking the power of the visual display. *Experimental Brain Research*, 231, 479-493.
- Brown, L. E., Rosenbaum, D. A., & Sainburg, R. L. (2003a). Limb position drift: implications for control of posture and movement. *Journal of Neurophysiology*, 90, 3105-3118.
- Brown, L. E., Rosenbaum, D. A., & Sainburg, R. L. (2003b). Movement speed effects on limb position drift. *Experimental Brain Research*, 153, 266-274.
- Buchanan, J., Park, J-H, Ryu, Y. U., & Shea, C. H. (2003). Discrete and cyclical units of action in a mixed target pair aiming task. *Experimental Brain Research*, 150, 473-489.
- Buchanan, J., Park, J-H, & Shea, C. H. (2004). Systematic scaling of target width: Dynamics, planning, and feedback. *Neuroscience Letters*, 367, 317-322.
- Buchanan, J., Park, J-H, & Shea, C. H. (2006). Target width scaling in a repetitive aiming task: Switching between cyclical and discrete units of action. *Experimental Brain Research*, 175, 710-725.
- Bullen, A. R., & Brunt, D. (1986). Effects of tendon vibration on unimanual and bimanual movement accuracy. *Experimental Neurology*, 93, 311-309.
- Burke, D., Gandevia, S. C., & Macefield, G. (1988). Responses to passive movement of receptors in joint, skin and muscle of the human hand. *Journal of Physiology*, 402, 347-361.
- Burke, D., Hangbarth, K., Lofstedt, L., & Wallin, B. (1976). The responses of human muscle spindle endings to vibration during isometric contraction. *Journal of Physiology*, 261, 695-711.
- Capaday, C. & Cooke, J. D. (1981). The effects of muscle vibration on the attainment of intended final position during voluntary human arm movements. *Experimental Brain Research*, 42, 228-230.
- Carpenter, J. E., Blasler, R., & Pellizzon, G. G. (1998). The Effects of Muscle Fatigue on Shoulder Joint Position Sense. *The American Journal of Sports Medicine*, 26, 262-265.
- Cerella, J. (1985). Information processing rates in the elderly. *Psychological Bulletin*, 98, 67-83.
- Corcos, D. M., Gottlieb, G. L., & Agarwal, G. C. (1989). Organizing principles for single-joint movements, II. A speed-sensitive strategy. *Journal of Neurophysiology*, 62, 358-368.
- Cordo, P., Gurfinkel, V. S., Bevan, L., & Kerr, G. K. (1995). Proprioceptive consequences of tendon vibration during movement. *Journal of Neurophysiology*, 74, 1675-1688.
- Evans, W. J. (2010). Skeletal muscle loss: cachexia, sarcopenia, and inactivity. *American Journal of Clinical Nutrition*, 91, 1123-1127.
- Fitts, P. M. & Peterson, J. R. (1964). Information capacity of discrete motor responses. *Journal of Experimental Psychology* 67, 103-112.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology* 47, 381-391.
- Glickstein, M. (2000). How are visual areas of the brain connected to motor areas for the sensory guidance of movement? *Trends Neuroscience*, 23, 613-617.
- Goble D. J. (2010). Proprioceptive acuity assessment via joint position matching: From basic science to general practice. *Physical Therapy*, 90, 1176-1184.
- Goggin, N. L., & Meeuwse, H. J. (1992). Age-related differences in the control of spatial aiming movements. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 63, 366-372.
- Goodwin, G. M., McCloskey, D. I. & Matthews, P. B. C.

- (1972). The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain* 95, 705-748.
- Gottlieb, G. L., Corcos, D. M., Agarwal, G. C. (1989). Organizing principles for single-joint movements. I. A speed-insensitive strategy. *Journal of Neurophysiology*, 62, 342-357.
- Grabiner, M. D. & Enoka, R. M. (1995). Changes in movement capabilities with aging. *Exercise Sport Sciences Reviews*, 23, 65-104.
- Green, J. J. (1986). Characteristics of aging human skeletal muscles. In: Sutton, JR.; Brock, RM., editors. *Sports medicine for the mature athlete* (p. 17-26). Benchmark Press; Indianapolis.
- Grigg, P. (1993). Peripheral neural mechanisms in proprioception. *Journal of Sports Rehabilitation*, 3, 2-17.
- Grill, S. E., Hallett, M., Marcus, C., & McShane, L. (1994). Disturbances of kinaesthesia in patients with cerebellar disorders. *Brain*, 117, 1433-1447.
- Guédon, O., Gauthier, G. M., Cole, J., & Vercher, J-L. (1998). Vision and arm afferent information in the adaptation to altered visuo-manual relationships in a two dimensional tracking task. *Journal of Motor Behavior*, 30, 234-238.
- Hore, J., Ritchie, R., & Watts, S. (1999). Finger opening in an overarm throw is not triggered by proprioceptive feedback from elbow extension or wrist flexion. *Experimental Brain Research*, 125, 302-312.
- Inglis, J. T., Frank, J. S., & Inglis, B. (1991). The effect of muscle vibration on human position sense during movements controlled by lengthening muscle contraction. *Experimental Brain Research*, 84, 631-634.
- Ivanenko, Y. P., Grasso, R., & Lacquaniti, F. (2000). Neck muscle vibration makes walking humans accelerate in the direction of gaze. *Journal of Physiology*, 525, 803-814.
- Johansson, R. S. & Westing, G. (1988a). Coordinated isometric muscle commands adequately and erroneously programmed for the weight during lifting task with precision grip. *Experimental Brain Research*, 71, 59-71.
- Johansson, R. S. & Westing, G. (1988b). Programmed and triggered actions to rapid load changes during precision grip. *Experimental Brain Research*, 71, 72-86.
- Johansson, R. S. & Westling, G. (1984). Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic-control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Experiment Brain Research*, 56, 550-564.
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 718-727.
- Kenshalo, D. R. (1977). Age changes in touch, vibration, temperature, kinesthesia, and pain sensitivity. In: Birren, JE.; Schaie, KW., editors. *Handbook of the psychology of aging* (p. 562-579). Van Nostrand Reinhold; New York.
- Ketcham, C. J., Seidler, R. D., Van Gemmert, A. W., & Stelmach, G. E. (2002). Age-related kinematic differences as influenced by task difficulty, target size, and movement amplitude. *Journals of Gerontology B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 57, 54-64.
- Kim, D-H. & Park, J-H. (2015). Effects of sensory distortion by muscle vibration on balance control in patients with cerebellar disease. *Korean Journal of Sports Science*, 24(1), 529-541.
- Kovacs, A. J., & Shea, C. H. (2011). The learning of 90° continuous relative phase with and without Lissajous feedback: external and internally generated bimanual coordination. *Acta Psychologica*, 136, 311-320.
- Lateiner, J. E. & Sainburg, R. L. (2003). Differential contributions of vision and proprioception to movement accuracy. *Experimental Brain Research*, 151, 446-454.
- Lorenzo-Lopez, L., Amenedo, E., Pascual-Marqui, R. D., & Cadaveira, F. (2008). Neural correlates of age-related visual search decline: a combined ERP and sLORETA study. *NeuroImage*, 41, 511-524.
- Marteniuk, R. G., MacKenzie, C. L., Jeannerod, M., Athenes, S., & Duqas, C. (1987). Constraints on human arm movement trajectories. *Canadian Journal of Psychological*, 41(3), 365-378.
- Maschke, M., Gomez, C. M., Tuite, P., & Konczak, J. (2003). Dysfunction of the basal ganglia, but not the cerebellum, impairs kinaesthesia. *Brain*, 126, 2312-2322.
- Matthews, P. B. C. & Stein, R. B. (1969). The sensitivity of muscle spindle afferents to small sinusoidal changes of length. *Journal of Physiology*, 200, 723-743.
- McCloskey, D. I. (1978). Kinesthetic sensibility. *Physiology Reviews*, 58, 763-820.
- Meyer, D. E., Smith, J. E., & Wright, C. E. (1982). Models for the

- speed and accuracy of aimed movements. *Psychological Reviews*, 89, 449-482.
- Naito, E., Nakashima, T., Kito, T., Aramaki, Y., Okada, T., & Sadato, N. (2007). Human limb-specific and non-limb-specific brain representations during kinesthetic illusory movements of the upper and lower extremities. *European Journal of Neuroscience*, 25, 3476-3487.
- Pipereit, K., Bock, O., & Vercher, J.-L. (2006). The contribution of proprioceptive feedback to sensorimotor adaptation. *Experimental Brain Research*, 174, 45-52.
- Pohl, P. S., Winstein, C. J., & Fisher, B. E. (1996). The locus of age-related movement slowing: sensory processing in continuous goal directed aiming. *Journals of Gerontology Psychology Series 51*, 94-102.
- Pruszynski, J. A., Kurtzer, I., & Scott, S. H. (2008). Rapid motor responses are appropriately tuned to the metrics of a visuospatial task. *Journal of Neurophysiology*, 100, 224-238.
- Rey-Robert, B., Temprado, J. J., Lemaire, P., & Berton, E. (2012). Combining movement kinematics, efficiency functions, and Brinley plots to study age-related slowing of sensorimotor processes: insights from Fitts' task. *Gerontology*, 58, 171-180.
- Sabes, P. N., Jordan, M. I., & Wolpert, D. M. (1998). The role of inertial sensitivity in motor planning. *Journal of Neuroscience*, 18, 5948-5957.
- Sainburg, R. L. & Schaefer, S. Y. (2004). Interlimb differences in control of movement extent. *Journal of Neurophysiology*, 92, 1374-1383.
- Sainburg, R. L. & Wang, J. (2002). Interlimb transfer of visuomotor rotations: independence of direction and final position information. *Experimental Brain Research*, 145, 437-447.
- Sainburg, R. L., Lateiner, J. E., Latash, M. L., & Bagesteiro, L. B. (2003). Effects of altering initial position on movement direction and extent. *Journal of Neurophysiology*, 89, 401-415.
- Salthouse, T. A., Hancock, H. E., Meinz, E. J., & Hambrick, D. Z. (1996). Interrelations of age, visual acuity, and cognitive functioning. *Journals of Gerontology B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 51, 317-330.
- Sarlegna, F. R. & Sainburg, R. L. (2007). The effect of target modality on visual and proprioceptive contributions to the control of movement distance. *Experimental Brain Research*, 176, 267-280.
- Schmidt, R. A. & Wulf, G. (1997). Continuous concurrent feedback degrades skill learning: Implications for training and simulation. *Human Factors*, 39, 509-525.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225-260.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., Quinn, J. T. (1979). Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Reviews*, 86, 415-451.
- Seidler-Dobrin, R. D., & Stelmach, G. E. (1998). Persistence in visual feedback control by the elderly. *Experimental Brain Research*, 119, 467-474.
- Shabbott, B. A. & Sainburg, R. L. (2009). On-line corrections for visuomotor errors. *Experimental Brain Research*, 195, 59-72.
- Shadmehr, R. & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *Journal of Neuroscience*, 14, 3208-3224.
- Sleimen-Malkoun, R., Temprado, J. J., & Berton, E. (2013). Age-related dedifferentiation of cognitive and motor slowing: insight from the comparison of Hick-Hyman and Fitts' laws. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 5, 1-11.
- Sober, S. J. & Sabes, P. N. (2005). Flexible strategies for sensory integration during motor planning. *Nature Neuroscience*, 8, 490-497.
- Stewart, J. C., Gordon, J., & Winstein, C. (2013). Planning and adjustments for the control of reach extent in a virtual environment. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 10, 1-27.
- Stewart, J. C., Gordon, J., & Winstein, C. J. (2014a). Control of reach extent with the paretic and nonparetic arms after unilateral sensorimotor stroke: kinematic differences based on side of brain damage. *Experimental Brain Research*, 232, 2407-2419.
- Stewart, J. C., Gordon, J., & Winstein, C. J. (2014b). Control of reach extent with the paretic and nonparetic arms after unilateral sensorimotor stroke II: planning and adjustments to control movement distance. *Experimental Brain Research*, 232, 3431-3443.
- Swinnen, S., Verschueren, S. M. P., Bogaerts, H., Dounskaia, N., Lee, T. D., Stelmach, G. E., & Serrien, D. J. (1998).

- Age-related deficits in motor learning and differences in feedback processing during the production of bimanual coordination pattern. *Cognitive Neuropsychology*, *15*, 439-466.
- Teeken, J. C., Adam, J. J., Paas, F. G. W. C., van Boxtel, M. P. J., Houx, P. J., & Jolles, J. (1996). Effects of age and gender on discrete and reciprocal aiming movements. *Psychology and Aging*, *11*, 195-198.
- Temprado, J. J., Sleimen-Malkoun, R., Lemaire, P., Rey-Robert, B., Retornaz, F., & Berton, E. (2013). Aging of sensorimotor processes: a systematic study of Fitts' task. *Experimental Brain Research*, *228*, 105-116.
- van Beers, R. J., Haggard, P., & Wolpert, D. M. (2002). When feeling is more important than seeing in sensorimotor adaptation. *Current Biology*, *12*, 834-837.
- van Beers, R. J., Haggard, P., & Wolpert, D. M. (2004). The role of execution noise in movement variability. *Journal of Neurophysiology*, *91*, 1050-1063.
- Voight, M. L., Hardin, J. A., Blackburn, T. A., Tippett, S., & Canner, G. C. (1996). The Effects of muscle fatigue on and the relationship of arm dominance to shoulder proprioception. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, *23*, 348-352.
- Welford, A. T., Norris, A. H., & Shock, N. W. (1969). Speed and accuracy of movement and their changes with age. *Acta Psychologica*, *30*, 3-15.
- Wishart, L. R., Lee, T. D., Cunningham, S. J., & Murdoch, J. E. (2002). Age related differences and the role of augmented visual feedback in learning a bimanual coordination pattern. *Acta Psychologica*, *110*, 247-263.
- Wisleder, D. & Dounskaia, N. (2007). The role of different submovement types during pointing to a target. *Experimental Brain Research*, *176*, 132-149.
- Wolpert, D. M. & Flanagan, J. R. (2000). Motor learning. *Current Biology*, *20*, 467-472.
- Wolpert, D. M. & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, *11*, 1317-1329.
- Yoo, D-Y., Lee, S-M., & An, J-S. (2017). The influence of vibratory stimulus using stochastic resonance on static posture control ability of senior adults. *Korea Journal of Sport Science*, *28*(2), 351-360.
- Yun, J-E., Kim, Y-H., & Park, J-H. (2013). Lower limb's proprioceptive acuity with position matching via goal-directed task. *Journal of Coaching Development*, *15*(3), 129-139.

## 과제의 정확성 제약과 감각정보의 왜곡이 연속적인 움직임 수행에 미치는 영향

이경현(광주스포츠과학센터), 이지향(성균관대학교), 최상협 · 송용관(고려대학교)

**【목적】** 이 연구는 노인과 성인들을 대상으로 과제의 정확성 제약과 진동자극을 통한 감각정보의 왜곡이 연속적인 조준 움직임 수행에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 실험을 수행하였다. **【방법】** 성인집단(11명)과 노인집단(11명)으로 구분하여, 3가지의 정확성 제약을 지닌 Fitts 과제를 수행하게 하였으며, 과제의 정확성 제약에 따라 진동자극을 처치한 후 동일 과제를 재차 수행하게 하였다. Fitts 과제를 수행하는 동안 감각왜곡을 유발하기 위한 진동자극을 상완 부분에 가하였다. 과제의 정확성 제약에 따라 진동자극 처치 전과 후의 움직임 시간과 움직임 오차 빈도를 측정하였다. **【결과】** 연구결과 첫째, 과제의 정확성 제약이 높은 과제를 수행할 때, 진동자극 후 움직임 시간이 증가하였으며, 움직임 시간은 성인에 비해 노인들에게서 길었다( $p < .01$ ). 둘째, 움직임 오차 빈도는 진동자극 전 보다 후에 더 많이 발생하였으며, 움직임 오차 빈도는 과제의 정확성이 높을 때 노인들에게서 더 많이 발생했다( $p < .05$ ). **【결론】** 이 연구의 결과는 연속적인 조준 움직임을 수행할 때, 진동자극을 통한 감각왜곡은 감각정보의 해석과 통합을 방해하여, 움직임 계획과 조정에 부정적으로 영향을 미칠 수 있으며, 과제의 정확성 제약에 따라 이러한 차이가 더 크다는 것을 시사한다. 또한 노인들에게서 감각정보의 왜곡이 더욱 크게 나타나면서 노화가 감각기능의 저하를 야기한다는 것을 입증하였다.

**주요어:** 진동자극, 노화, 감각정보, 연속적인 움직임, Fitts 과제, 정확성 제약