

감각 되먹임 종류가 건강한 성인 남성의 올바른 앉은 자세 학습에 미치는 영향

신호진 · 김성현[†] · 조휘영[†]
가천대학교 물리치료학과

Effect of Sensory Feedback Type on Correct Sitting Posture Learning on Healthy Adults

Ho-Jin Shin · Sung-Hyeon Kim[†] · Hwi-Young Cho[†]
Department of Physical Therapy, Gachon University

Received: September 21, 2021 / Revised: September 30, 2021 / Accepted: October 18, 2021
© 2021 J Korean Soc Phys Med

| Abstract |

PURPOSE: The growing number of people exposed to a static sitting posture has resulted in an increase in people with a poor posture out of the optimally aligned posture because of the low awareness of a correct sitting posture. Learning the correct sitting posture by applying sensory feedback is essential because a poor posture has negative consequences for the spine. Therefore, this study examined the effects of the sensory feedback types on learning correct sitting posture.

METHODS: Thirty-six healthy adult males were assigned to a visual feedback group, a tactile feedback group, and a visuotactile feedback group to learn the correct sitting posture by applying sensory feedback. The spine angle, muscle

activity, and muscle thickness were measured in the sitting position using retro-reflexive markers, electromyography, and ultrasound immediately after, five minutes, and 10 minutes after intervention.

RESULTS: The intervention time was significantly shorter in the visuotactile feedback group than the visual feedback group ($p < .05$). Compared to the pre-intervention, the repositioning error angles of the thoracic and lumbar vertebrae of all groups were reduced significantly immediately after intervention and after five minutes. After 10 minutes, there was a significant difference in the thoracic and lumbar repositioning error angles of the tactile feedback group and the visuotactile feedback group ($p < .05$). No significant difference was noted at any time compared to the pre-intervention in all groups ($p > .05$).

CONCLUSION: The use of tactile and visuotactile feedback in intervention to correct the sitting posture is proposed.

Key Words: Motor learning, Multimodal feedback, Sitting posture, Tactile feedback, Visual feedback

[†]Corresponding Author : Sung-Hyeon Kim, Hwi-young Cho
gpgkorea30@gmail.com, hwiyoung@gachon.ac.kr,
<http://orcid.org/0000-0003-0465-9665>, <http://orcid.org/0000-0002-4725-4396>
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

현대인들은 직장환경에서 컴퓨터 작업, 앉은 자세에서의 업무, 장시간 운전 그리고 일상생활에서 스마트폰 사용과 TV 시청 등 앉아있는 경우가 많이 발생한다[1]. 앉은 자세의 장시간 노출은 최적으로 정렬된 자세에서 벗어나 몸을 움츠려 구부정한 자세(*slump posture*), 팔걸이에 기대어 한쪽으로 틀어진 자세(*side leaning posture*), 등받이에 과도하게 기대어 골반이 뒤쪽 기울임 된 자세(*back leaning posture*) 등을 취하게 된다. 이러한 자세들은 수동적인 골격구조에 의존하게 되어 체간의 근육은 비활성화 혹은 신장된 상태가 되고 수동조직은 지속적으로 신장성 스트레스를 받는 상태가 되며[2,3], 허리통증, 근육의 불균형 및 기능부전 등과 같은 증상을 야기한다[4,5]. 또한 부적절한 앉은 자세가 지속되면 척추만성질환, 척추옆굽음증(*scoliosis*), 척추원반 탈출증(*herniated intervertebral disc*), 반복성 스트레스 증후군(*repetitive stress injury*) 등 다양한 문제를 일으킨다[5-7].

척추질환의 치료를 위해 수술 요법을 시행하거나 견인치료, 운동치료, 도수치료, 초음파, 약물요법 등과 같은 비수술적 방법이 사용되었다[8-10]. 하지만 만성 허리통증, 척추 질환 등과 같은 만성적 질환은 높은 치료적 비용, 치료의 장기화 등으로 예방이 더욱 중요하게 여겨지고 있다[11,12]. 질환의 예방을 위한 중재는 스트레칭, 허리 벨트 혹은 허리 지지대 사용, 인체공학 적 중재 등이 있고[13,14], 올바른 앉은 자세 교육 또한 중요한 중재로 여겨지고 있다[15,16]. 이상적인 앉은 자세로 짧은 앞굽음 자세(*short lordosis posture*)가 언급되었다[17]. 짧은 앞굽음 자세는 선 자세와 유사한 등뼈의 뒤굽음(*kyphosis*) (약 160도)과 허리뼈의 앞굽음(*lordosis*) (약 165도)을 유지하는 자세이다[18]. 골반의 앞쪽 기울임의 움직임은 주로 사용하는 이 자세는 골반 패턴 전략을 사용하며, 허리뼈에 대한 관절 모멘트를 더 작게 만들고 허리뼈를 중립자세에 가장 가깝게 배치하여 수동조직의 스트레스를 최소화한다[17]. 하지만 온전하게 학습자 스스로 자세를 취하기 어려워 자세 교육을 통한 학습과정이 필요한 것으로 보고되었다[18].

임상에서 물리치료사는 효율적인 운동학습을 위해

촉각, 시각, 언어 등 다양한 외재적 감각 되먹임(*sensory feedback*)을 사용한다[19]. 가상현실 기반 조작능력의 향상을 위한 되먹임 제공의 효과를 본 한 연구에서는 시각 되먹임, 청각 되먹임, 촉각 되먹임, 복합 되먹임을 적용하였고 시각, 청각, 촉각 되먹임을 동시에 적용한 복합 되먹임이 조작능력을 유의하게 향상시켰다고 보고하였다[20]. 또한 점프 후 착지 동작의 학습을 위해 감각 되먹임의 효과를 본 연구에서는 신체 내부 움직임에 초점을 맞춘 청각 되먹임, 신체 외부에 초점을 맞춘 청각 되먹임, 영상을 통한 시각 되먹임을 적용하여 신체 외부에 초점을 맞춘 청각 되먹임과 영상을 통한 시각 되먹임이 착지 동작 개선에 효과적임을 규명하였다[21]. 반면 정적인 앉은 자세와 관련된 기존연구는 부적절한 앉은 자세에 대해 의자에 내장된 장치의 촉각 되먹임이 미치는 영향 혹은 좋지 않은 자세를 중단하기 위한 시각과 촉각 되먹임이 미치는 영향 등이 보고되어 있다[22]. 하지만 정적인 앉은 자세에서의 되먹임이 적용된 연구는 학습을 위한 되먹임이 아니라 소리, 진동, 모니터의 팝업 창 등의 경고를 통해 부적절한 자세의 중단을 위한 되먹임의 효과만 보고되었고, 올바른 앉은 자세의 학습에 감각 되먹임이 미치는 영향 및 되먹임 종류의 효과 비교에 관한 연구는 보고되지 않았다. 이러한 잘못된 자세를 중단하는 감각되먹임은 허리와 등 부위의 과도한 폼 등과 같은 또다른 보상작용의 발생 가능성을 예방하는데에 한계가 있다. 따라서 본 연구는 감각 되먹임 종류가 건강한 성인 남성의 올바른 앉은 자세 학습에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

II. 연구방법

1. 대상자

본 연구의 대상자는 인천에 소재하는 G 대학교의 계시관에 부착된 공고문을 통해 모집되었다. 대상자 선정 기준은 다음과 같다[23]. 1) 20-30대 건강한 성인 남성 2) 주 2회, 회당 30분 이상 운동을 하지 않는 자. 대상자 제외 기준은 다음과 같다[24]. 1) 척추의 좌우 비대칭이 있는 자 2) 척추의 시상면 움직임에 문제를 야기할 수 있는 질환이 있는 자 3) 영당이 아래로 방사통

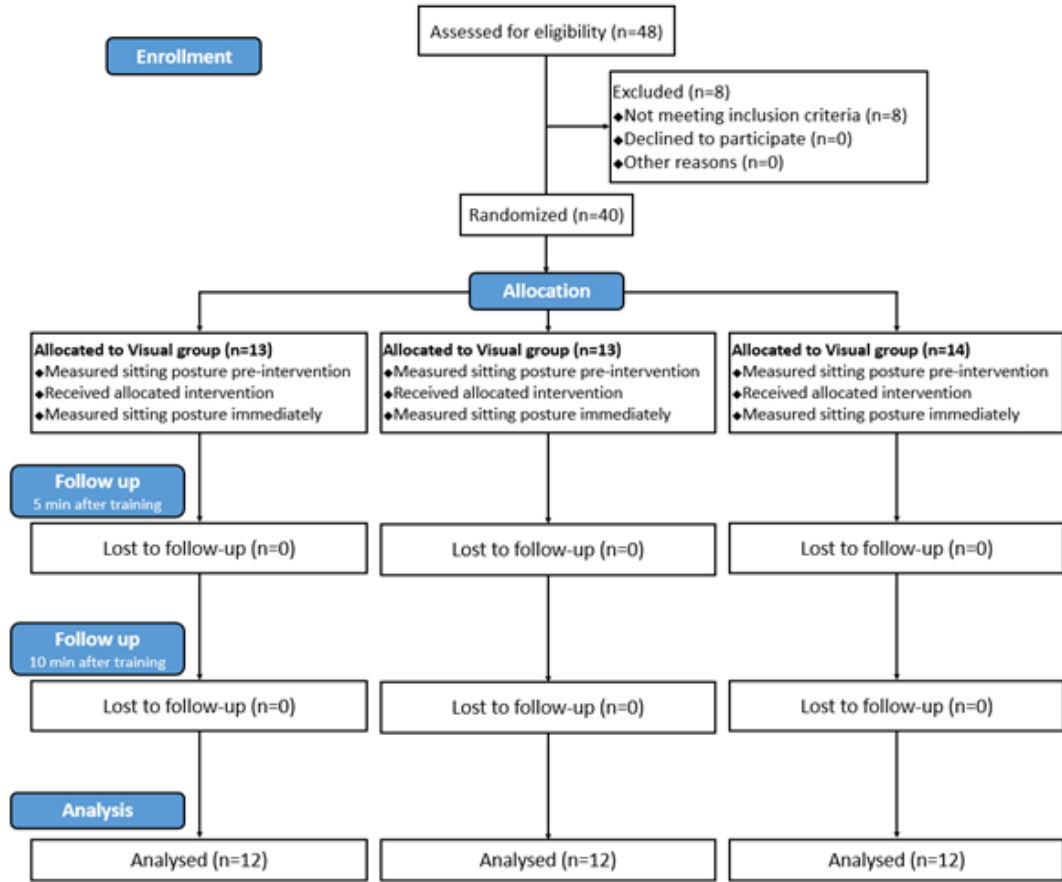


Fig. 1. CONSORT flow diagram.

이 있는 자 4) 신경학적 결함이 있는 자 5) 주요 척추 병리가 있는 자 6) 본 연구에서 수행되는 과제 수행 시 통증이 발생하는 자. 모든 대상자는 본 연구의 목적을 제외한 실험 방법과 과정에 대해 충분한 설명을 들었고, 연구 동의서에 자필서명 하였다. 본 연구는 가천대학교 생명윤리심의위원회의 승인(IRB; 1044396-202008-HR-157-01)을 받았고, WHO의 규정을 따르는 임상연구정보서비스(clinical research information service)에 등록되었다(KCT0006427).

2. 연구설계 및 연구절차

본 연구는 단일 맹검, 무작위 대조군 연구 설계로 실험을 진행하였다. 연구자는 엑셀의 난수를 사용하여 대상자를 각 군에 배정하였고, 대상자는 무작위 할당을

통해 시각 되먹임 군(visual feedback group), 촉각 되먹임 군(tactile feedback group), 시·촉각 되먹임 군(visuotactile feedback group) 중 하나의 군으로 배정받았다. 연구자는 대상자의 등뼈, 허리뼈에 반사 마커를 부착하고 앞은총 허리부위 뭇갈래근과 등부위 척추세움근, 배가로근에 전극을 부착하였다. 앉은 자세에서 척추 각도와 근활성도 및 근 두께를 측정하기 전 대상자는 측정 근육의 최대 수의적 수축을 수행하였다. 최대 수의적 수축 측정 후 사전 측정으로 언어적 지시와 함께 짧은 앞굽음 자세를 측정하였다. 측정 후 치료사의 감각 되먹임을 적용한 올바른 앉은 자세 교육이 수행되었고 신체각도, 근활성도, 근두께를 세 시점에서(교육 직후, 5분 후, 10분 후) 반복측정 하였다. 본 연구의 흐름도는 Fig. 1과 같다.

3. 짧은 앞굽음 자세 교육

모든 군은 동일한 언어적 지시를 받고 앉은 자세의 사전 측정 후 할당된 군에 맞는 감각 되먹임을 적용한 자세교육이 수행되었다. 동일하게 적용된 언어적 지시는 청각 되먹임으로써 적용되었고 구성은 다음과 같다 [24,26]. (1) 힘을 빼고 편안한 자세로 앉으세요. (2) 손은 책상 위에 놓고, 시선은 정면을 바라보세요. (3) 골반을 앞으로 굴린다는 느낌과 함께 허리뼈의 뒷면이 오목하게 되도록 하세요. (4) 등뼈는 허리뼈의 움직임에 의해 자연스럽게 만들어진 상태가 유지되도록 하세요. (5) 자세를 유지하고 배꼽을 뒤 위쪽으로 살짝 집어넣고, 편안하게 호흡하세요. 짧은 앞굽음 자세에 대한 교육은 기준 각도(등뼈: 뒤굽음 160도, 허리뼈: 앞굽음 165도)의 오차범위 $\pm 5^\circ$ 이내가 되도록 자세를 취하면 학습된 것으로 간주하여 교육을 마쳤다[24]. 한 명의 물리치료사에 의해 교육이 진행되었고, 교육 후 5회씩 연습을 1세트로 하여 한 세트마다 측면에서 자세를 촬영한 뒤 자세 수정을 위한 감각 되먹임이 적용되었다. 척추의 기준 각도 범위를 충족한 대상자들은 척추 각도와 근활성도 및 근 두께에 대한 측정을 수행하였다.

1) 시각 되먹임을 적용한 짧은 앞굽음 자세 교육
물리치료사는 첫 시도 전 청각 되먹임을 통해 올바른 앉은 자세에 대한 교육을 받았다. 측정 후 올바른 기준 각도에 미치지 못하는 신체 부분에 집중하여 시각 되먹임을 적용하였다. 시각 되먹임은 등뼈의 뒤굽음, 허리뼈의 앞굽음, 배꼽 넣기를 유지하기 위해 물리치료사의 동작 시범, 올바른 자세의 사진, 본인이 취한 자세의 사진 자료를 통해 제공받았다. 세트마다 취한 자세를 촬영하여 올바른 자세 사진과 대상자가 취한 자세 사진을 동시에 보여주어 추가적인 시각 되먹임을 제공하였다. 시각 되먹임 군에 할당된 대상자는 자세 교육 동안 물리치료사의 도수 접촉은 하지 않았으며, 동작 동안 대상자가 본인의 손으로 신체를 접촉하지 못하게 하여 촉각 되먹임의 가능성을 예방하였다.

2) 촉각 되먹임을 적용한 짧은 앞굽음 자세 교육
물리치료사는 첫 시도 전 시각 되먹임군과 동일한

청각적 되먹임을 통해 올바른 앉은 자세에 대한 교육을 받았다. 측정 후 올바른 기준 각도에 미치지 못하는 신체 부분에 집중하여 촉각 되먹임을 제공하였다. 등뼈의 뒤굽음, 허리뼈의 앞굽음, 배꼽 넣기를 유지하기 위해 촉각 되먹임은 대상자가 앉아있는 상태에서 대상자 본인과, 물리치료사의 도수접촉을 통해 제공되었다 [27,28]. 등뼈의 뒤굽음의 경우 허리뼈와 함께 과도하게 퍼져 있는 경우 손가락을 가슴 정중앙 부위에 위치시켜 치료사의 손과 멀어지도록 하였고, 허리뼈 앞굽음의 경우 물리치료사의 양쪽 엄지손가락을 허리뼈 부위에 두고 양손의 손바닥과 나머지 손가락은 엉덩뼈에 위치시켜 허리뼈의 앞굽음을 유도하는 힘을 가하였다. 배꼽 넣기의 경우 물리치료사의 손으로 배를 촉진하고 뒤, 위쪽 방향으로 가볍게 배를 밀어주었다. 촉각 되먹임 군에 할당된 대상자는 자세 교육 동안 시각 되먹임의 가능성을 예방하기 위해 본인의 자세 사진, 치료사의 시범 등은 제공되지 않았다.

3) 시·촉각 되먹임을 적용한 짧은 앞굽음 자세 교육
물리치료사는 첫 시도 전 다른 두 군과 동일한 청각적 되먹임을 통해 올바른 앉은 자세에 대한 교육을 받았다. 시·촉각 되먹임 군에 할당된 대상자들은 공통된 사진 자료 및 치료사의 도수 접촉을 통해 시각 되먹임 및 촉각 되먹임을 제공받았다. 등뼈의 뒤굽음, 허리뼈의 앞굽음, 배꼽 넣기를 유지하기 위해 제공된 시각 되먹임과 촉각 되먹임은 시각 되먹임 군과 촉각 되먹임 군에서 제공된 감각 되먹임과 동일하게 적용하였다.

4. 측정도구

본 연구는 감각되먹임의 종류가 올바른 앉은 자세 학습에 미치는 영향을 규명하기 위해 자세 학습이 소요 되는 교육시간, 척추 각도, 근활성도, 근두께를 측정하였다. 교육시간은 타이머를 사용하여 기준 각도의 오차 범위 내의 자세를 유지하게되는 시점으로 설정하였다.

1) 척추 각도

본 연구에서 앉아있는 동안 척추 각도를 측정하기 위해 반사 마커와 1600만 화소의 삼성 카메라(Samsung

electronics Co., Ltd., Suwon, Korea)가 사용되었다. 대상자는 등받이가 없는 높낮이 조절이 가능한 의자에 앉도록 지시받았다. 의자 높이는 대상자의 종아리 길이와 동일한 높이로 설정하였고, 각도계를 사용하여 대상자의 넓다리뼈의 큰돌기와 가쪽관절용기를 이은 가상의 선이 지면과 수평이 되도록 하였다. 검사자는 수집된 데이터 분석을 위해 Image J software (National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA)를 사용하였다. 반사 마커는 25 mm 크기의 반사 마커를 사용하여 등뼈 1번, 6번, 12번의 가시돌기와 허리뼈 1번, 3번, 5번의 가시돌기에 양면테이프를 사용하여 부착하였다[29,30]. 척추의 시상면 척추굽이를 측정하기 위해 카메라는 의자에 앉은 대상자와 2m 거리에 삼각대를 사용하여 위치시켰고, 높이는 지면에서부터 대상자의 팔꿈치까지의 길이에 맞추어 설정하였다. 측정 전 삼각대의 헤드 수평계와 좌·우측 수평계를 올바른 위치에 고정하여 준비과정을 마쳤다. 대상자는 검사자의 지시에 따라 맨발로 상체를 탈의한 상태로 높이 조절이 가능한 의자에 앉도록 하였다. 검사자의 지시와 함께 대상자는 지시받은 자세를 취했고, 삼각대에 고정된 카메라로 대상자의 측면 앉은 자세를 촬영하여 자료를 수집하였다. 측정된 척추 각도는 다음과 같다: 1) 등뼈각도: 시상면에서 등뼈 1번과 6번 가시돌기를 이은 선과 등뼈 6번과 12번의 가시돌기를 이은 선 간의 각도, 2) 허리뼈각도: 시상면에서 허리뼈 1번과 3번 가시돌기를 이은 선과 허리뼈 3번과 5번의 가시돌기를 이은 선 간의 각도. 수집된 척추 각도 자료는 위치 오류 각도(repositioning error angle)로 표현하였고, 기준 각도에서 측정된 각도를 뺀 값에서 절대값을 적용하여 산출하였다(기준값-측정값).

2) 근활성도

본 연구에서 근육의 활성화 측정을 위해 8채널 무선 근전도를 사용하였고, BIOPAC (MP160, Biopac Systems Inc., Goleta, CA, United States) 장비(평가자 내 신뢰도 = .97)를 사용하여 근 활성 데이터를 수집하였다[31]. 수집된 표면 근전도 신호는 개인용 노트북에서 AcqKnowledge 5.0 software (Biopac Systems, Inc., Goleta, CA, United States)를 이용하여 처리하였다. 전극을 붙이기 전에 데이터

수집의 질을 최적화하기 위해 부착 부위의 피부에 있는 체모를 면도하고 알코올로 소독을 통해 측정 준비를 마쳤다. 전극은 10 mm 은/염화은(Ag/AgCl) 일회용 이극 표면 전극(Biopac Systems Inc., USA)을 사용하였다. 전극은 우세측 선택된 등부위 척추세움근(등뼈 9번 가시돌기의 가쪽 5 cm 지점), 앞은층 허리부위 뭇갈래근(허리뼈 4·5번 가시사이 공간의 가쪽 2 cm 지점), 배가로근(위앞엉덩뼈가시에서 안쪽 2 cm, 아래쪽 2 cm 지점)에 부착되었고, 기준전극은 엉덩뼈능선과 갈비뼈에 부착하였다[2,32].

원시 근전도 신호는 최대 수의적 수축으로 정량화하였다. 각 근육의 최대 수의적 수축은 3번 반복하였고 각 시도마다 5초간 유지하도록 하였다. 시도 간 휴식시간은 30초로 설정하였다. 등부위 척추세움근과 앞은층 허리부위 뭇갈래근은 대상자가 골반을 베드에 걸친 상태로 엎드린 자세에서 수행되었다. 검사자는 발목을 잡아서 하지를 고정하였고, 대상자는 팔을 깎지 낀 상태로 목 뒤에 위치시킨 후 숙인 체간을 기립하도록 지시받았다. 검사자는 위쪽 등뼈에 체간 굽힘 방향으로 최대 노력에 닿을 때까지 점진적으로 저항을 가했다. 배가로근은 대상자가 앉은 상태에서 배꼽을 등쪽으로 당긴 상태를 유지한 뒤 풍선을 불 듯 숨을 내뿜도록 하여 최대 수의적 수축을 수집하였다. 숨을 내뿜는 동안 배꼽을 등쪽으로 당긴 상태는 유지되었다[33]. 또 다른 방법으로는 앉은 자세에서 최대한 기침을 강하게 하도록 하여 최대 수의적 수축 값을 수집하였다[34]. 두 가지 최대 수의적 수축을 수행하여 더 높게 나온 수치를 최대 수의적 수축 값으로 설정하였다. 적절한 전극 위치는 도수근력검사 동안 근전도 신호 진폭을 관찰함으로써 확인되었다. 최대 수의적 수축 측정 후 올바른 앉은 자세 교육을 시행하기 전 2분간의 휴식시간을 갖도록 하였다. 원시 근전도 신호는 Band-pass filtered 30-500 Hz, full-wave rectified, sampling rate 1,000 Hz로 설정되었다. 수집된 근전도의 신호는 제곱평균제곱근법(root mean square)으로 처리하였다.

3) 근 두께

본 연구에서 배가로근의 두께를 측정하기 위해 초음

Table 1. Characteristics of the Participants

Variables	VF group	TF group	VTF group	p-value
Age (y)	26.73 ± 2.57	25.73 ± 3.90	27.60 ± 3.84	.475
Height (cm)	176.15 ± 5.48	175.10 ± 7.41	174.56 ± 5.70	.840
Weight (kg)	72.28 ± 8.41	73.18 ± 11.14	73.11 ± 6.40	.967
BMI (kg/m ²)	23.31 ± 2.56	23.81 ± 2.81	23.98 ± 1.45	.795
Leg length (cm)	48.30 ± 2.20	46.62 ± 1.80	46.61 ± 1.73	.080
Elbow length (cm)	63.97 ± 5.39	63.13 ± 3.82	61.98 ± 2.67	.552

Note. Data expressed the mean ± standard deviation or number of participants[†].

Abbreviation. VF, visual; TF, tactile; VTF, Visuotactile.

파(Hitachi Aloka Prosound F31 Ultrasound System with 3 probe, Hitachi-Aloka medical Ltd., Tokyo, Japan) 진단 영상장비(평가자 내 신뢰도 = .98-.99)가 사용되었고, 탐촉자는 10-MHz의 선형모양 탐촉자를 사용하였다[35]. 근육의 정적 단면적을 볼 수 있는 초음파 B-mode scan을 통해 자료를 수집하였다. 배가로근 두께의 측정 은 모든 대상자가 동일하게 오른쪽면 복부 벽에 적용되었다. 초음파 탐촉자는 복부 깊은 층의 선명한 이미지를 획득하기 위해 12번 갈비뼈와 엉덩뼈능선 사이 중간, 앞 겨드랑이 선을 지나는 배부위에 가로로 위치시켰다[36,37]. 배가로근 두께 측정 시 호흡에 의한 변화를 최소화하기 위해 호기의 끝에서 측정하였다[38]. 측정 간 휴식시간은 30초가 주어졌다. 배가로근 두께에 대한 데이터는 커서(cursor) 포인트를 사용하여 근막 밴드의 안쪽 가장자리 사이의 근육 두께를 센티미터(cm) 단위로 측정하여 수집되었고, 근막 포함 없이 배가로근 근막 부착부위에서 1.5 cm 지점에서 수직으로 측정하였다[39].

5. 통계분석

본 연구의 자료처리는 Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) 25.0 소프트웨어 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 사용하였고, 모든 연속형 변수는 평균과 표준편차로, 명목형 변수는 비율로 산출하였다. 대상자의 일반적 특성 및 종속 변수의 측정값에 대한 정규분포도를 확인하기 위해 샤피로-윌크 검정을 사용하였다. 교육시간의 군 간 비교는 일원 분산분석을 시행하였고, 사후분석을 위해 Tukey's honest significant

difference (HSD) test를 적용한 독립표본 t검정을 수행하였다. 교육 후 시간에 따른 척추 각도와 근 활성화 및 근 두께에 대해 감각되먹임 종류가 미치는 영향의 분석은 정규성 검정을 따르지 않아 시점 간 비교는 프리드만 검정, 시점 별 군 간 비교는 크루스칼-왈리스 검정 비모수 통계를 시행하였다. 사후 분석으로 본페로니 방법을 적용하여 시점 간 비교는 일쪽순 부호-순위 검정, 시점 별 군 간 비교는 만휘트니 U검정을 시행하였다. 알파 값은 .05로 설정하였다.

III. 연구결과

1. 연구 대상자의 일반적 특성

본 연구의 선정기준을 충족한 40명의 대상자가 실험에 참여하였다. 실험 도중 개인 사정으로 시각 되먹임 군에서 1명, 촉각 되먹임 군에서 1명, 시·촉각 되먹임 군에서 2명이 중도 탈락하였다. 최종적으로 온전히 실험에 참여한 36명 대상자의 일반적 특성은 Table 1에 제시하였다. 동질성을 확인하기 위해 군 간 비교를 수행한 결과 모든 변수(연령, 신장, 체중, 체질량지수, 다리 길이, 팔꿈치 길이)에서 군 간 유의한 차이가 없었다 ($p > .05$)(Table 1).

2. 교육시간

군 간 올바른 앉은 자세의 교육에 대한 소요 시간을 분석한 결과 군 간 유의한 차이가 있었다($p < .05$). 사후 분석 결과 시각 되먹임 군과 시·촉각 되먹임 군 사이의

Table 2. Intervention Time

Variables	VF group	TF group	VTF group	Between p-value
Intervention (min)	11.39 ± 3.01	9.77 ± 1.71	8.42 ± 1.16 [†]	.006

Note. a significant vs. Visual

[†]p < .05 compared to visual feedback group in between the groups

Abbreviation. VF, visual; TF, tactile; VTF, Visuotactile.

Table 3. Repositioning Error Score of the Thoracic Area

Degree	VF group	TF group	VTF group	Between p-value
Pre	6.36 ± 3.15	6.31 ± 2.07	7.10 ± 3.24	.782
Post	2.72 ± 1.69**	2.42 ± 1.48**	2.58 ± 1.41**	.875
5 mins	3.84 ± 1.70*	3.96 ± 4.09*	2.60 ± 1.80**	.154
10 mins	5.01 ± 3.05 [#]	3.12 ± 2.56*	3.65 ± 2.76*	.254
Within p-value	.011	.003	.004	

Note. Data expressed the mean ± standard deviation.

*p < .05 compared to pre in within the group; **p < .01 compared to pre in within the group;

[#]p < .05 compared to post in within the group.

Abbreviation. IMDT, immediate; min, minute.

비교에서 유의한 차이가 있었다.(p < .05)(Table 2).

3. 교육 후 척추 각도 변화

등뼈의 위치 오류 각도에서 군 간 비교는 모든 시점에서 유의한 차이가 없었고(p < .05), 군 내 비교는 모든 군에서 유의한 차이가 있었다(p < .05). 사후분석 결과, 시각 되먹임 군은 사전과 비교해 교육 직후, 5분 후 시점에서 유의한 차이가 있었고, 교육 직후와 비교해 10분 후 시점에서 유의한 차이가 있었다(p < .05). 촉각 되먹임 군과 시·촉각 되먹임 군은 사전과 비교해 모든 시점에서 유의한 차이가 있었다(p < .05)(Table 3).

허리뼈의 위치 오류 각도에서 군 간 비교는 10분 후 시점에서 군 간 유의한 차이가 있었고(p < .05), 사후 분석 결과, 시각 되먹임 군과 비교해 촉각 되먹임 군과 시·촉각 되먹임 군에서 유의한 차이가 있었다(p < .05). 군 내 비교는 모든 시점에서 유의한 차이가 있었다(P < .05). 사후분석 결과, 시각 되먹임 군은 사전과 비교해 교육 직후, 5분 후 시점에서 유의한 차이가 있었고, 교육 직후, 5분 후 시점과 비교해 10분 후 시점에서 유의한

차이가 있었다(p < .05). 촉각 되먹임 군과 시·촉각 되먹임 군은 사전과 비교해 모든 시점에서 유의한 차이가 있었다(p < .05)(Table 4).

4. 교육 후 근활성도 변화

등부위 척추세움근 활성화에서 군 간 비교는 모든 시점에서 유의한 차이가 없었고, 군 내 비교에서도 모든 군에서 시점 간 유의한 차이가 없었다(P > .05). 얇은층 허리부위 뭇갈래근 활성화에서 군 간 비교는 모든 시점에서 유의한 차이가 없었고, 군 내 비교에서도 모든 군에서 시점 간 유의한 차이가 없었다(P > .05). 배가로근의 활성화에서 군 간 비교는 모든 시점에서 유의한 차이가 없었고, 군 내 비교에서도 모든 군에서 시점 간 유의한 차이가 없었다(P > .05)(Table 5-7).

5. 교육 후 배가로근 두께 변화

배가로근 두께에서 군 간 비교는 모든 시점에서 유의한 차이가 없었고, 군 내 비교에서도 모든 군에서 시점 간 유의한 차이가 없었다(P > .05)(Table 8).

Table 4. Repositioning Error Angle of the Lumbar Region

Degree	VF group	TF group	VTF group	Between p-value
Pre	11.80 ± 3.59	12.79 ± 6.50	14.16 ± 4.54	.365
Post	2.58 ± .99**	2.31 ± 1.85**	2.65 ± 1.61**	.747
5 mins	3.54 ± 2.78**	3.20 ± 1.76**	2.31 ± 1.34**	.342
10 mins	9.38 ± 4.43 ^{###}	4.24 ± 2.64 ^{††}	3.98 ± 2.35 ^{†††}	.004
Within p-value	< .001	< .001	< .001	

Note. Data expressed the mean ± standard deviation.

*p < .05 compared to pre in within the group; **p < .01 compared to pre in within the group;

#p < .05 compared to post in within the group; ##p < .01 compared to post in within the group;

§§p < .05 compared to 5 mins in within the group.

††p < .01 compared to visual feedback group in between the groups.

Abbreviation. IMDT, immediate; mins, minutes.

Table 5. Erector Spinae Muscle Activity

μV	VF group	TF group	VTF group	Between p-value
Pre	9.01 ± 4.17	8.10 ± 2.56	9.23 ± 3.57	.779
Post	8.25 ± 3.14	8.23 ± 2.52	8.61 ± 2.92	.864
5 mins	9.66 ± 5.43	9.38 ± 4.25	8.71 ± 3.05	.934
10 mins	10.54 ± 4.32	8.58 ± 3.27	9.89 ± 4.03	.503
Within p-value	.410	.969	.417	

Note. Data expressed the mean ± standard deviation.

Abbreviation. IMDT, immediate; min, minute.

Table 6. Multifidus Activity

μV	VF group	TF group	VTF group	Between p-value
Pre	13.57 ± 5.29	15.40 ± 4.12	10.65 ± 5.32	.074
Post	14.60 ± 5.00	16.36 ± 3.08	11.46 ± 5.26	.098
5 mins	13.13 ± 5.78	14.00 ± 3.89	10.95 ± 5.20	.357
10 mins	9.69 ± 8.75	15.77 ± 7.59	12.00 ± 3.93	.083
Within p-value	.124	.086	.572	

Note. Data expressed the mean ± standard deviation.

Abbreviation. IMDT, immediate; min, minute.

IV. 고찰

본 연구는 건강한 성인 남성을 대상으로 척추 각도, 체간 근육 활성화도 및 근육 두께의 측정을 통해 짧은 앞굽음 자세 교육 시 감각 되먹임의 종류가 학습

과 유지에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

올바른 앉은 자세 학습의 교육시간을 분석해 본 결과 되먹임 종류가 교육시간에 영향을 미쳤다는 것을 규명하였다. 본 연구에서 시각 되먹임 군과 촉각 되먹임 군 사이에 유의한 차이는 발견되지 않았고, 시·촉각

Table 7. Transverse Abdominis Activity

μV	VF group	TF group	VTF group	Between p-value
Pre	15.70 \pm 7.88	16.99 \pm 6.76	14.18 \pm 6.47	.647
Post	15.61 \pm 7.86	16.02 \pm 6.24	13.73 \pm 6.26	.683
5 mins	17.18 \pm 8.22	15.57 \pm 5.54	13.09 \pm 6.42	.475
10 mins	18.50 \pm 4.91	17.22 \pm 4.21	15.57 \pm 4.50	.277
Within p-value	.363	.241	.168	

Note. Data expressed the mean \pm standard deviation.
Abbreviation. IMDT, immediate; min, minute.

Table 8. Transverse Abdominis Thickness

μV	VF group	TF group	VTF group	Between P-value
Pre	.60 \pm .11	.56 \pm .20	.51 \pm .09	.160
Post	.63 \pm .08	.55 \pm .20	.53 \pm .10	.052
5 mins	.58 \pm .13	.57 \pm .21	.51 \pm .13	.502
10 mins	.66 \pm .14	.55 \pm .16	.54 \pm .12	.145
Within p-value	.090	.781	.300	

Note. Data expressed the mean \pm standard deviation.
Abbreviation. IMDT, immediate; min, minute.

되먹임 군(8.42 \pm 1.16 min)은 시각 되먹임 군(11.39 \pm 3.01 min)보다 올바른 자세 교육에 걸린 시간이 유의하게 짧았다. 이는 시각 되먹임이 다른 종류의 감각 되먹임과 비교해 유의한 차이를 보고한 선행 연구와 일치하는 결과를 보였고[22], 시·촉각 되먹임이 동작을 빠르게 학습하는데 있어 효과적이라는 것을 의미한다. 또한 시각 되먹임은 주어진 과제 수행에서 오류를 수정할 때 비교 판단을 통해 이루어져 다른 감각 되먹임보다 상대적으로 학습에 지연을 일으키게 된다[40]. 나아가, 본 연구의 결과는 다중양식 되먹임(Multimodal feedback)과 단일양식 되먹임(unimodal feedback)의 차이로 영향을 미친 것으로 추측된다. 다중양식 되먹임과 단일양식 되먹임을 비교한 선행 연구들에서 다중양식 되먹임이 단일양식 되먹임보다 효과적인 학습효과를 보인다고 언급하였다[20,41]. 다중 양식 되먹임은 학습자의 이해력에 긍정적인 영향을 미치며[42], 학습 과제에 대한 인지 부하(cognitive load)를 감소시켜준다[43]. 또한, 종류가 다른 되먹임의 동시 적용은 작업 기억(working

memory)을 확장시켜 복잡한 움직임 과제를 동시에 학습시킬 수 있다[44]. 이와 같은 다중양식 되먹임의 이점에 의해 교육시간의 단축을 야기한 것으로 사료된다. 반면 촉각 되먹임 군과 비교해 시·촉각 되먹임 군은 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 되먹임의 과제 적합성에 의한 것으로 사료된다. 되먹임은 학습에 있어 과제를 정확하게 자각 및 인지시키기 위해 과제의 특성에 적합한 되먹임 양식이 적용되어야 한다[19]. 촉각은 역학적으로 몸에 힘을 적용하여 움직임을 변화시킬 수 있으므로 가장 직접적인 형태의 운동 정보로 학습 인지에 효과적이다[45]. 이러한 이유로 촉각 되먹임 군과 유의한 차이가 없는 것으로 추측된다.

본 연구는 학습된 짧은 앞굽음 자세를 반복 측정하여 학습 효과의 유지를 측정하였다. 본 실험 결과 등뼈 및 허리뼈 오류 각도에서 시각 되먹임 군은 5분 후까지, 촉각 되먹임 군과 시·촉각 되먹임 군은 10분 후까지 효과가 유지되었고 허리뼈에서 10분 후 시점에서 시각 되먹임 군이 다른 군들과 비교해 오류 각도의 유의한

증가를 보였다. 시각 되먹임과 촉각 되먹임 모두 자세 유지에 필수적인 감각 요소이다[46]. 또한 시각 되먹임은 정적인 신체 위치의 정보 제공과 몸의 위치 및 환경을 인지하여 신체의 자세 조절에 중요한 역할을 하며 [47,48], 촉각 되먹임은 근육 위 피부 접촉으로 근육을 자극하여 고유수용성 감각을 보조한다[49]. 하지만 시각 되먹임 군은 다른 군들에 비해 유지 시간이 유의하게 짧았다. 이는 되먹임의 초점에 따른 것으로 사료된다. 본 연구에서 시각 되먹임은 신체의 움직임 조절에 초점을 맞추어 신체 내부에 집중하는 내적주의초점(internal focus)의 특성으로 제공되었다. 반면 촉각 되먹임 군과 시·촉각 되먹임 군에서 적용된 촉각 되먹임은 “제 손가락에서 떨어지세요”, “제 손의 움직임을 따라가 보세요” 등과 같이 대상자의 신체 외부에 초점을 두는 외적주의초점(external focus)의 특성으로 제공되었다[50]. 드롭 수직 점프(drop vertical jump) 시 착지 동작의 학습을 위한 내적 주의 초점과 외적 주의 초점의 효과를 비교한 기존 연구에서 외적 주의 초점이 내적 주의 초점과 비교해 일주일 뒤 유지효과 평가에서 우세하게 학습 효과가 지속되었다고 언급하였다[21]. 비록 본 연구의 유지효과 평가의 시간이 10분으로 기존 연구와 비교해 상대적으로 짧은 시간이었지만, 이는 본 연구에서 외적 주의 초점의 특성을 갖는 촉각 되먹임과 시·촉각 되먹임이 시각 되먹임보다 학습효과가 더 지속된 결과와 일치한다. 또한 부적절한 자세를 중단시키기 위한 되먹임의 효과를 본 기존 연구와 비교해 본 연구의 실험은 올바른 자세를 스스로 찾도록 하는 되먹임의 효과를 규명하는 연구이다[22]. 본 연구의 피드백 제공을 통해 운동학습의 자동화단계를 거쳐 온전하게 자세의 학습이 된 후에는 자동적으로 그 자세를 취할 수 있어 인지적 요구를 하지 않는다. 이는 기존 연구에서 좋지 않은 자세를 취할 때마다 그 자세를 중단하도록 알림 형식의 되먹임과는 다르게 온전히 학습된 이후로는 되먹임의 필요 없이 올바른 자세를 취하도록 하여 일상생활 장기간 앉은 자세를 요구하는 업무를 하는 직업군에게 있어 의미가 있다고 사료된다.

하지만 등부위 척추세움근, 앞은총 허리부위 뭇갈래근, 배가로근의 활성화와 배가로근 두께는 모든 시점과

군 간 비교에서 유의한 차이를 보이지 않았다. 허리통증 환자와 건강인을 대상으로 앉은 자세의 근활성을 연구한 Claus (2018) 등은 연구에 따르면, 동일한 자세의 앉은 상태를 유지하여도 근활성은 차이가 날 수 있다고 언급하였다[24]. 이는 동일한 동작이 동일한 근활성 패턴을 일으키지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서도 짧은 앞굽음 자세의 척추 각도를 맞추기 위해 다양한 근활성 패턴으로 자세를 취해 경향성이 없는 것으로 추측된다. 마지막으로, 초음파 장비를 통해 측정된 배가로근의 두께는 사전과 교육 후 시점들 간의 차이가 나타나지 않았다. 이는 단순한 동작으로 감각 되먹임 교육 전 동일하게 제공된 언어적 지시 만으로도 배가로근의 적절한 수축을 유도한 것으로 사료된다.

하지만 본 연구는 몇 가지 제한점이 존재한다. 첫째, 건강한 성인 남성만을 대상으로 연구하여 성별이 다른 여성, 그리고 허리통증을 포함한 척추 질환이 있는 환자에게 본 실험을 통해 밝혀낸 결과를 일반화시킬 수 없다. 둘째, 적은 수의 표본 수가 사용되어 통계 분석 방법에 제한이 있었다. 셋째, 유지효과를 보기 위한 기간이 한정적이다. 본 연구에서 측정한 단기 유지와 장기 유지 이외에 더 다양한 시점의 유지효과를 보지 못했다. 추후 연구에서는 더 다양한 시점의 유지효과를 보는 연구가 필요하며, 대상자의 폭을 넓혀 다양한 대상자 군을 대상으로 하는 실험이 필요한 것으로 사료된다.

V. 결론

위의 결과를 종합하여 볼 때, 본 연구는 감각 되먹임 종류가 건강한 성인 남성의 올바른 앉은 자세 학습에 영향을 미친다는 것을 규명하였다. 또한 시각 되먹임과 촉각 되먹임, 그리고 시·촉각 되먹임 모두 올바른 앉은 자세 학습에 긍정적인 영향을 미쳤다. 또한 촉각 되먹임과 시·촉각 되먹임은 10분 뒤까지 학습이 지속되었다. 따라서 본 연구 결과를 통해 올바른 앉은 자세 학습에 있어 촉각 되먹임과 시각·촉각 되먹임의 사용이 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Hadgraft NT, Lynch BM, Clark BK, et al. Excessive sitting at work and at home: Correlates of occupational sitting and TV viewing time in working adults. *BMC Public Health*. 2015;15:899.
- [2] O'Sullivan PB, Grahamslaw KM, Kendell M, et al. The effect of different standing and sitting postures on trunk muscle activity in a pain-free population. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2002;27(11):1238-44.
- [3] Dolan P, Adams M, Hutton W. Commonly adopted postures and their effect on the lumbar spine. *Spine*. 1988;13:197-200.
- [4] O'Sullivan P. Lumbar segmental "instability": Clinical presentation and specific stabilizing exercise management. *Manual Ther*. 2000;5:2-12.
- [5] SafeWork. Ergonomic hazards of the seated posture. www.safemanitoba.com/uploads/bulletins/bltn233.pdf, 2004.
- [6] Lee DE, Seo SM, Woo HS, et al. Analysis of body imbalance in various writing sitting postures using sitting pressure measurement. *J Phys Ther Sci*. 2018;30(2):343-6.
- [7] Owen N, Sparling PB, Healy GN, et al. Sedentary behavior: emerging evidence for a new health risk. *Mayo Clin Proc*. 2010;85(12):1138-41.
- [8] Schoutens C, Cushman DM, McCormick ZL, et al. Outcomes of nonsurgical treatments for symptomatic adult degenerative scoliosis: A systematic review. *Pain Med*. 2020;21(6):1263-75.
- [9] Zhang B, Xu H, Wang J, et al. A narrative review of non-operative treatment, especially traditional Chinese medicine therapy, for lumbar intervertebral disc herniation. *Biosci Trends*. 2017;11(4):406-17.
- [10] Liu D, Yang Y, Yu X, et al. Effects of specific exercise therapy on adolescent patients with idiopathic scoliosis: A prospective controlled cohort study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2020;45(15):1039-46.
- [11] Steffens D, Maher CG, Pereira LS, et al. Prevention of low back pain: A systematic review and meta-analysis. *JAMA Intern Med*. 2016;176(2):199-208.
- [12] Foster NE, Anema JR, Cherkin D, et al. Prevention and treatment of low back pain: evidence, challenges, and promising directions. *Lancet*. 2018;391(10137):2368-83.
- [13] Burton AK, Balagué F, Cardon G, et al. How to prevent low back pain. *Best Pract Res Clin Rheumatol*. 2005; 19(4):541-55.
- [14] Pillastrini P, Mugnai R, Bertozzi L, et al. Effectiveness of an ergonomic intervention on work-related posture and low back pain in video display terminal operators: a 3 year cross-over trial. *Appl Ergon*. 2010;41(3):436-43.
- [15] Poitras S, Blais R, Swaine B, et al. Management of work-related low back pain: a population-based survey of physical therapists. *Phys Ther*. 2005;85(11):1168-81.
- [16] Sigurdsson SO, Austin J. Using real-time visual feedback to improve posture at computer workstations. *J Appl Behav Anal*. 2008;41(3):365-75.
- [17] Castanharo R, Duarte M, McGill S. Corrective sitting strategies: An examination of muscle activity and spine loading. *J Electromyogr Kinesiol*. 2014;24(1):114-9.
- [18] Claus AP, Hides JA, Moseley GL, et al. Is 'ideal' sitting posture real? Measurement of spinal curves in four sitting postures. *Man Ther*. 2009;14(4):404-8.
- [19] Sigrist R, Rauter G, Riener R, et al. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: a review. *Psychon Bull Rev*. 2013;20(1):21-53.
- [20] Cooper N, Milella F, Pinto C, et al. The effects of substitute multisensory feedback on task performance and the sense of presence in a virtual reality environment. *PLoS One*. 2018;13(2):e0191846.
- [21] Welling W, Benjaminse A, Gokeler A, et al. Enhanced retention of drop vertical jump landing technique: A randomized controlled trial. *Hum Mov Sci*. 2016; 45:84-95.
- [22] Zheng YJ, Morrell JB. Comparison of visual and vibrotactile feedback methods for seated posture guidance. *IEEE Trans Haptics*. 2013;6(1):13-23.

- [23] Hatzitaki V, Amiridis IG, Nikodelis T, et al. Direction-induced effects of visually guided weight-shifting training on standing balance in the elderly. *Gerontology*. 2008; 55(2):145-52.
- [24] Claus AP, Hides JA, Moseley GL, et al. Different ways to balance the spine in sitting: Muscle activity in specific postures differs between individuals with and without a history of back pain in sitting. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2018;52:25-32.
- [25] Watanabe S, Kobara K, Yoshimura Y, et al. Influence of trunk muscle co-contraction on spinal curvature during sitting. *J Back Musculoskelet Rehabil*. 2014;27(1):55-61.
- [26] Urquhart DM, Hodges PW, Allen TJ, et al. Abdominal muscle recruitment during a range of voluntary exercises. *Man Ther*. 2005;10:144-53.
- [27] Winder B, Keri PA, Weberg DE, et al. Postural cueing increases multifidus activation during stabilization exercise in participants with chronic and recurrent low back pain: An electromyographic study. *J Electromyogr Kinesiol*. 2019;46:28-34.
- [28] Koh EK, Park KN, Jung DY. Effect of feedback techniques for lower back pain on gluteus maximus and oblique abdominal muscle activity and angle of pelvic rotation during the clam exercise. *Phys Ther Sport*. 2016;22:6-10.
- [29] Edmondston SJ, Waller R, Vallin P, et al. Thoracic spine extension mobility in young adults: influence of subject position and spinal curvature. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2011;41(4):266-73.
- [30] Sorensen CJ, Norton BJ, Callaghan JP, et al. Is lumbar lordosis related to low back pain development during prolonged standing?. *Man Ther*. 2015;20(4):553-7.
- [31] Aguilera-Castells J, Buscà B, Arboix-Alió J, et al. Correlational data concerning body centre of mass acceleration, muscle activity, and forces exerted during a suspended lunge under different stability conditions in high-standard track and field athletes. *Data Brief*. 2019;28:104912.
- [32] Neumann P, Gill V. Pelvic floor and abdominal muscle interaction: EMG activity and intra-abdominal pressure. *Int Urogynecol J Pelvic Floor Dysfunct*. 2002;13(2):125-32.
- [33] Imai A, Kaneoka K, Okubo Y, et al. Trunk muscle activity during lumbar stabilization exercises on both a stable and unstable surface. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2010; 40(6):369-75.
- [34] Lee AY, Kim EH, Cho YW, et al. Effects of abdominal hollowing during stair climbing on the activations of local trunk stabilizing muscles: a cross-sectional study. *Ann Rehabil Med*. 2013;37(6):804-13.
- [35] Ishida H, Watanabe S. Influence of inward pressure of the transducer on lateral abdominal muscle thickness during ultrasound imaging. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2012;42(9):815-8.
- [36] McMeeken JM, Beith ID, Newham DJ, et al. The relationship between EMG and change in thickness of transversus abdominis. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2004;19(4):337-42.
- [37] Norasteh A, Ebrahimi E, Salavati M, et al. Reliability of B-mode ultrasonography for abdominal muscles in asymptomatic and patients with acute low back pain. *J Bodywork Movement Ther* 2007;11(1):17-20.
- [38] Ainscough-Potts AM, Morrissey MC, Critchley D. The response of the transverse abdominis and internal oblique muscles to different postures. *Man Ther*. 2006;11(1): 54-60.
- [39] Reeve A, Dilley A. Effects of posture on the thickness of transversus abdominis in pain-free subjects. *Man Ther*. 2009;14(6):679-84.
- [40] Sasaki R. Developmental characteristics of temporal control of movement in preschool and school children of different ages. *Percept Mot Skills*. 1997;85(3 Pt 2): 1455-67.
- [41] Nam CS, Shu J, Chung D. The roles of sensory modalities in collaborative virtual environments (CVEs). *Computers in Human Behaviour*. 2008;24(4):1404-17.
- [42] Grant KW. *Hearing by Eye II: Advances in the Psychology of Speechreading and Auditory-Visual Speech*, edited

- by Ruth Campbell, Barbara Dodd, and Denis Burnham. *Trends Cogn Sci.* 1999;3(8):319-20.
- [43] Burke JL, Prewett MS, Gray AA, et al. Comparing the effects of visual-auditory and visual-tactile feedback on user performance: A meta-analysis. in proceedings of the 8th international conference on Multimodal interfaces New York. 2006;108-17.
- [44] Baddeley, A. D. Working memory. *Science.* 1992;255: 556-9.
- [45] Lieberman J, Breazeal C. TIKL: Development of a wearable vibrotactile feedback suit for improved human motor learning. *IEEE Transactions on Robotics.* 2007; 23:919-26.
- [46] Horak FB. Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age Ageing.* 2006;35(suppl 2):7-11.
- [47] Ernst MO, Banks MS. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature.* 2002;415(6870):429-33.
- [48] Nesbitt, K. Designing multi-sensory displays for abstract data. PhD thesis. School of Information Technologies. University of Sydney. Australia. 2003.
- [49] Aimonetti JM, Hospod V, Roll JP, et al. Cutaneous afferents provide a neuronal population vector that encodes the orientation of human ankle movements. *J Physiol.* 2007;580(Pt. 2):649-58.
- [50] Magill RA. Motor learning and control: concepts and applications. 9th ed. New York: McGraw Hill. 2007.