KJSB

Korean Journal of Sport Biomechanics 2022; 32(3): 87-93
http://dx.doi.org/10.5103/KJSB.2022.32.3.87
http://e-kjsb.org eISSN 2093-9752

ORIGINAL

The Age-Related Changes of Whole-Body Motor Variability during Sit-to-Stand Task

쪼그려 앉았다 일어나기 과제 수행 시 발생하는 전신 운동가변성의 발달적 변화

Min Joo Kim[1,2,3], Jae Kun Shim[1,4,5]

[1]Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Young-in, South Korea
[2]Department of Physical Education, Seoul National University, Seoul, South Korea
[3]Institute of Sport Science, Seoul National University, Seoul, South Korea
[4]Department of Kinesiology, University of Maryland, College Park, MD, USA
[5]Fischell Department of Bioengineering, University of Maryland, College Park, MD, USA

Received : 10 August 2022
Revised : 08 September 2022
Accepted : 13 September 2022

Corresponding Author
Jae Kun Shim
Department of Kinesiology/ Fischell Department of Bioengineering/ Neuroscience and Cognitive Science (NACS) Program, University of Maryland, USA
Email : jkshim@umd.edu

Objective: The purpose of this research was to investigate the age-related changes in whole-body motor variability during sit-to-stand (STS) task. It has been reported that children perform motor tasks less accurately with greater variability as compared to adults. However, it is still unknown how they utilize the abundant degrees of freedom and accomplish voluntary actions. Uncontrolled manifold (UCM) analysis has been used to partition motor variabilities into two independent variability components, task-relevant variability (V_{ORT}) and task-irrelevant variability (V_{UCM}). We investigated what differences exist between children and adults with respect to these two motor variability components in relation to motor development stages.

Method: Ten 6-year-old children (height: 116.2 ± 4.3 cm, weight: 23.1 ± 3.9 kg, motor development assessment percentile score: 77.5 ± 18.6%), ten 10-year-old children (height: 138.7 ± 7.2 cm, weight: 35.8 ± 10.3 kg, motor development assessment percentile score: 73.9 ± 12.7%), and ten young adults (age: 23 ± 1.6 year-old, height: 164.3 ± 11.4 cm, weight: 60.8 ± 12.0 kg) participated in this study. Each participant performed STS ten times, and a motion capture system was used to capture the whole-body kinematics. Each segment centers of mass and the whole-body center of mass were calculated, and UCM analysis was used to quantify motor variabilities, V_{ORT} and V_{UCM}. One-way ANOVA was used for statistical analysis.

Results: We found that children produced more motor variabilities in V_{ORT} and V_{UCM} in all three dimensions, anterior-posterior, medial-lateral, and vertical. As age increased, both, V_{ORT} and V_{UCM} significantly decreased (p<.05).

Conclusion: The greater V_{ORT} found in children compared to adults indicates that the repeatability over repetitions improves through development, while the greater V_{UCM} found in children suggests that children better utilize the abundant degrees of freedom during STS compared to adults.

Keywords: Postural control, Motor variability, Uncontrolled manifold, Motor development

INTRODUCTION

농구공을 드리블하면서 코트 위를 달려가거나, 물건을 들고 계단을 올라가는 등의 복잡한 운동협응은 자세조절의 발달 이후 발현되는 이동운동기술(locomotor skill)과 물체조작운동기술(object manipulation skill)이 조화롭게 제어되어 나타나는 인간 움직임이다. 이러한 움직임은 건강한 젊은 성인에게는 어렵지 않은 과제이지만, 발달적으로 생애 초기나 후기에 해당하는 유아 및 아동과 노인에게는 결코 쉽지 않은 복잡한 협응구조를 지닌 움직임이다. 이러한 특성을 전생애적 운동발달적 측면에서 살펴보면, 생애 최초인 영아기에는 불수의적 움직임(involuntary movement)만 가능하여 수의적인 자세조절이 이루어지지 않지만, 점차 발달이 진행되면서 머리-꼬리(cephalo-caudal) 및 중앙-말초(proximal-distal) 원리에 따라 목을 가누고 엎드려 몸통을 들어올리고, 기기(crawl), 앉기, 서기 등이 가능해진다. 이후 스스로 앉을 수 있게 되면 양 손으로 물체를 쥐는 등의 물체조작이 가능해지고, 생후 1년경에는 이러한 자세조절 능력이 비약적으로 발달하여 독립적인 걷기(independent walking)가 가능해진다. 이러한 자세조절 발달은 이후 달리기, 점핑, 호핑 등과 같은 복잡한 이동운동기술이 발달하는 기초

Copyright © 2022 Korean Journal of Sport Biomechanics
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 noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가 된다.

이렇듯 자세조절은 인간의 걷기뿐 아니라 일상생활 및 스포츠 상황에서 수행하는 복잡하고 다양한 움직임을 위해 반드시 선행되어 발달되어야 한다. 운동발달적 측면에서 자세조절이 매우 급격히 발달하는 시기는 생후 12개월, 만 6세, 만 10세 경으로 알려져 있다(Forssberg & Nashner, 1982). 만 6세의 경우 자세조절이 정교하지 못하여 성인에 비해 가변성이 큰 특징을 보인다(Assaiante, 1998; Sundermier, Woollacott, Roncesvalles & Jensen, 2001). 자세조절 특성을 반영하는 대표적인 과제인 정적인 서있기 과제를 수행하는 동안 만 6세에서 만 10세에 이르는 아동의 전신의 압력중심(center of pressure, CoP)은 연령이 증가하면서 이동 속도가 감소하고 압력중심의 진자폭이 줄어들어 운동가변성(motor variability)이 감소되는 특성을 보인다(Forssberg & Nashner, 1982). 이는 자세조절에 관여하는 근육의 종류 및 수축과 이완 타이밍이 성인과 다르기 때문이다. 만 10세의 경우 만 6세 아동 보다 자세조절이 성인과 비슷한 특성을 보이나, 여전히 근육의 협응 측면에서는 성인보다 비효율적인 협응 패턴을 보인다(Riach & Starkes, 1994; Sundermier et al., 2001). 또한 만 6세 이후 비선형적인 변이가 나타나 급격히 자세조절 능력이 발달하는 것으로 알려져 있다(Kirshenbaum, Riach & Starkes, 2001; Riach & Starkes, 1994; Rival, Ceyte & Olivier, 2005). 이러한 발달적 변화는 연령이 증가함에 따라 자세조절에 관여하는 근육 간의 수축 및 이완과 협응이 정교해지는 특성에 따른 것으로 보여진다(Sundermier et al., 2001).

자세조절의 발달적 변화를 운동가변성 측면에서 규명한 선행연구에 따르면, 아동의 자세조절은 외부 환경의 변화에 적응하여 그 움직임을 생성할 때 성인보다 큰 운동가변성을 보인다(Guarrera-Bowlby & Gentile, 2004; Seven, Akalan & Yucesoy, 2008). 이는 같은 목적의 움직임을 수행하더라도 아동이 성인보다 부정확하고 덜 일관적인 움직임을 보이는 운동발달적 특성을 의미한다. 유아 및 아동은 성인보다 덜 정교하고 부정확한 동작을 수행하지만, 계단을 오르고, 점프하며, 장난감 바구니를 들고 다른 장소로 이동하는 등의 목적지향적인 움직임을 성공적으로 수행할 수 있다. 이러한 발달적 특성을 고려할 때, 유아 및 아동의 움직임은 성인과는 다르지만 이들이 지닌 시스템 내에서는 가능한 최적의 협응을 생성하고 있으며, 신경과 근골격계의 성숙과 연습과 경험에 따른 운동발달에 따라 점차 일관적이고 정교한 움직임을 내는 방향으로 자세조절이 발달된다(Massion, 1992).

자세조절은 기저면 상의 전신의 무게중심을 제어하는 능력으로 정의할 수 있으며(Winter, Patla & Frank, 1990), 전신의 무게중심은 각 분절의 위치와 정향에 의해 결정되기 때문에(Winter, 2009), 전신의 무게중심은 각 신체분절의 운동가변성에 영향을 받는다. 자세조절을 비제어다양체 분석(uncontrolled manifold analysis, UCM)을 활용하여 운동가변성과 운동 공동작용(motor synergy) 측면에서 규명한 선행연구에 따르면 성공적인 운동수행을 할 때 전신의 운동 공동작용이 증가하였다(Scholz & Schöner, 1999). 또한 전신의 무게중심을 제어하고, 기능적으로 중요한 움직임의 오류를 감소시켜 목적지향적인 움직임을 성공적으로 수행하기 위하여 여분의 자유도(abundant degrees of freedom)인 전신의 분절을 활용하였다(Kim et al., 2012; Scholz & Schöner, 1999; Wu, McKay & Angulo-Barroso, 2009). 자세조절의 대표적인 운동과제인 정적인 서있기를 수행하는 동안 다수의 신체분절 움직임의 가변성이 발생하는데, 수행에 오류를 발생시키는 오류값(직교분산, V_{ORT})은 성인과 아동 간에 차이가 없었으나, 수행 변인에 영향을 미치지 않는 분산(비제어분산, V_{UCM})의 경우 아동이 성인보다 많이 발생시켰다(Wu et al., 2009).

이러한 선행연구를 종합하여 볼 때, 운동발달 단계에 따른 각 연령의 특성은 각기 다를 것이며, 비제어다양체 분석을 통해 운동가변성을 수행에 영향을 미치는 가변성과 시스템의 자유도를 활용하는 가변성으로 구분하여 각 발달 수준에서 시스템이 갖고 있는 특성을 반영할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 운동기술 학습에 선행되어 발달되어야 하는 전신의 자세조절 능력을 운동가변성과 운동 공동작용 측면에서 연구하여 그 발달적 특성을 규명하고자 한다.

METHOD

1. 연구참여자

본 연구에는 일반적인 운동발달 수준을 보이는 만 6세 일반 유아(키: 116.2±4.3 cm, 몸무게: 23.1±3.9 kg), 만 10세 일반 아동(키: 138.7±7.2 cm, 몸무게: 35.8±10.3 kg), 그리고 20대 일반 성인(남: 5명, 여: 5명, 연령: 23±1.6 세, 키: 164.3±11.4 cm, 몸무게: 60.8±12.0 kg)을 각각 10명씩 선정하였다. 일반적인 발달 수준을 지닌 연구참여자를 섭외하기 위하여 성인의 경우 정형학적, 신경학적 손상이 없는 경우로 한정하였으며, 아동의 경우 운동발달검사인 Movement Assessment Battery for Children-2 (MABC-2) (Henderson, Sugden & Barnett, 2007)를 실시하였다. 6세와10세 집단의 운동발달검사 백분위 점수는 각각 77.5±18.6과 73.9±12.7으로 일반적인 발달을 보였다. 모든 연구참여자들과 아동의 법적 보호자들은 실험에 참여하기 전 실험 과정에 대한 설명을 충분히 받았으며, 자발적으로 연구동의서에 서명하였다. 모든 연구절차는 S대학교 연구윤리위원회의 승인을 받아 진행되었다.

2. 연구절차

본 연구에 참여하는 연구대상자 및 법적 보호자는 연구자로부터 실험에 대한 상세한 설명을 제공받은 후 참여여부를 결정하였다. 성인의 경우 최소 3개월 이내에 정형학적 부상이 없고, 일상생활에 신경학적, 해부학적, 정형학적 어려움이 없는 자로 한정하였다. 유아 및 아동의 경우 발달 수준에 따른 개인차를 최소화하기 위하여 MABC-2를 사용하여 운동발달 수준을 평가하였다. 본 연구에 참여의사를 밝힌 유아 및 아동 중 MABC-2의 백분위 점수가 50% 이상인 대상자에게 참여를 권하였다.

전신의 무게중심을 산출하기 위한 운동학적 변인인 마커의 3차원 좌표값을 측정하기 위하여 연구대상자는 짧은 반바지와 민소매를 착용한 후 마커를 몸에 부착하였다. 마커는 3차원 동작 분석기(Qualysis, Sävebalden, Sweden)를 사용하여 120 Hz로 녹화하였으며, 이 때 나타나는 전신의 무게중심을 계산하기 위해 총 36개의 마커를 해부학적 뼈 위치(anatomical bony landmark)에 부착하여 전신을 14분절로 구분하였다(Table 1). 연구대상자의 어깨 너비만큼의 보폭을 측정한 후, 이 너비와 동일한 거리의 발 간격 위치를 실험공간 정중앙 바닥에 너비 1 cm 테이프 2개를 부착하여 표시하였다. 본 실험에 들어가기 앞서 연구대상자의 신체분절 길이, 관절의 중심 등을 계산하기 위해 연구대

Table 1. Anatomical position for markers

Marker label	Anatomical position	Marker label	Anatomical position
VERT	Vertex (top of head)	LASIS	Left anterior superior iliac spine
C7	Seventh cervical vertebrae	RASIS	Right anterior superior iliac spine
NOTCH	Sternal notch	LPSIS	Left posterior superior iliac spine
LSHO	Left acromion	RPSIS	Right posterior superior iliac spine
LELBL	Left elbow lateral	LKNEL	Left tibia lateral condyle
LELBM	Left elbow medial	LKNEM	Left tibia medial condyle
LUPA	Left upper arm	LTIB	Left tibia
LWRR	Left wrist radial	LANKL	Left ankle lateral malleolus
LWRU	Left wrist ulnar	LANKM	Left ankle medial malleolus
LKNU	Left 3rd knuckle	LHEE	Left posterior point of the heel
RSHO	Right acromion	RKNEL	Right tibia lateral condyle
RELBL	Right elbow lateral	RKNEM	Right tibia medial condyle
RELBM	Right elbow medial	RTIB	Right tibia
RUPA	Right upper arm	RANKL	Right ankle lateral malleolus
RWRR	Right wrist radial	RANKM	Right ankle medial malleolus
RWRU	Right wrist ulnar	RHEE	Right posterior point of the heel
RKNU	Right 3rd knuckle	LTOE / RTOE	Left / Right tip of the big toe

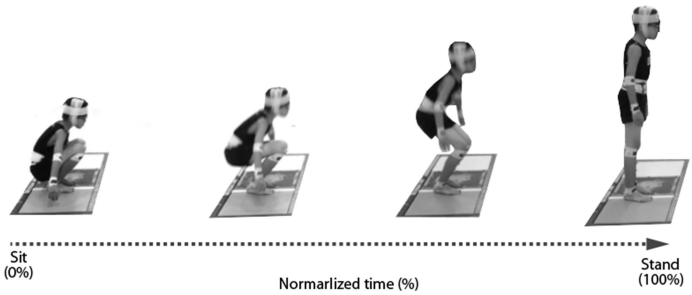

Figure 1. The representative example for the experimental motor task, sit-to-stand (STS)

상자가 해부학적 자세로 서 있는 자세를 녹화하였다.

전신의 자세조절을 규명하기 위해 연구대상자는 전신의 무게중심이 수직 방향으로 이동하는 쪼그려 앉았다 일어나기(sit-to-stand, STS) 운동과제를 수행하였다. STS 과제는 사전에 측정한 어깨 너비만큼 다리를 벌린 후, 양 쪽 발바닥만 바닥에 닿은 채로 무릎과 고관절을 구부려 쪼그려 앉은 채로 대기하고(Figure 1), 정면에 위치한 LED에 불빛 신호가 나오면 즉시 제자리에서 일어나도록 구성되었다. 이 때 엉덩이와 손바닥 등이 바닥이나 다른 신체부위에 닿지 않도록 안내하였으며, 신체의 접촉이 일어나는 경우 해당 수행을 다시 녹화하였다. 연구참여자가 STS 과제를 정확하게 이해할 수 있도록 3번 시범을 보였고, 3번의 연습 기회를 제공하였다. 전신의 무게중심에 영향을 미칠 수 있는 머리 움직임을 고정하기 위하여 쪼그려 앉아 있는 준비 자세 상태의 눈높이에 LED를 설치하여 시선을 고정하도록 안내하였다. 쪼그려 앉아있는 상태에서 연구대상자는 LED를 응시하고 있다가 LED에 불빛이 들어오면 최대한 신속하고 빠르게 일어나되, 넘어지거나 발이 바닥에서 떼어지지 않도록 최대한 안정적으로 일어나도록 하였다. 이 때 움직이는 동안 머리 움직임을 최소화하기 위해 연구대상자가 서 있을 때의 눈높이와 같은 높이에 설치한 화이트보드 위의 목표물을 바라보도록 하였다. STS 과제는 10회를 수행하였으며, 수행 중 연구참여자가 균형을 잃고 최소 한 발이 바닥에서 떨어지거나, 넘어지고 혹은 걸음을 옮기는 등의 수행을 할 경우 횟수에서 제외하였다.

3. 자료처리

1) 전신의 무게중심

전신에 부착된 마커의 위치 좌표값은 MATLAB (MATLAB 7, MathWorks, Inc., Natick, USA) 프로그램을 통해 저역필터(low pass filter) 10 Hz를 적용하여 노이즈를 제거한 후 각 신체분절의 무게중심과 전신의 무게중심을 전후, 좌우, 수직 방향의 3차원 벡터 값으로 산출하였다. 전신의 무게중심을 산출하기 위해 6세와 10세 아동(Jensen, 1986, 1989)과 성인 남녀(de Leva, 1996a, 1996b)가 동일한 해부학적 기준을 사용하는 각 분절의 inertia property를 적용하였다(Table 2). 전신의 무게중심은 신체분절을 14개로 정의하여 계산하였으며 각각 전후, 좌우, 수직 방향의 3차원 벡터 값으로 산출되었다.

Table 2. Inertia property for children and adult

Segment	Endpoint		Mass (% mass)				Center of mass (% length)			
	Proximal	Distal	6 yrs	10 yrs	Female adult	Male adult	6 yrs	10 yrs	Female adult	Male adult
Head	VERT	C7	18.2	10.1	6.68	6.94	48.80	48.80	58.94	59.76
Trunk	C7	MIDH	43.0	41.70	42.57	43.46	55.80	55.80	41.51	44.86
Upper arm	SJC	EJC	2.40	3.20	2.55	2.71	42.40	42.40	57.54	57.72
Forearm	EJC	WJC	1.30	1.70	1.38	1.62	43.30	43.30	45.59	45.74
Hand	WJC	MET3	0.80	0.90	0.56	0.61	37.90	37.90	74.74	79.00
Thigh	HJC	KJC	8.50	11.00	14.87	14.16	49.10	49.10	36.12	40.95
Shank	KJC	AJC	4.60	5.30	4.81	4.33	43.70	43.70	44.16	44.59
Foot	Heel	TTIP	1.90	2.10	1.29	1.37	41.60	41.60	40.14	44.15

Note. MIDH, SJC, EJC, and WJC mean hip center, shoulder joint center, elbow joint center, and wrist joint center, respectively. MET3 was defined hand based on markers RKNU and LKNU for left and right hands

2) 비제어다양체 분석(UCM analysis)

본 연구에서 전신을 14개의 분절로 정의하였으며, 비제어다양체 공간은 13차원을 갖는다(공식 1, 2). 반복적인 수행으로부터 가변성을 계산하기 위해 측정된 값은 전신 무게중심의 평균값으로 뺀 후 이 값을 각각의 공간에 선형 투영하였다(공식 3). 각각의 공간에 투영된 값은 그 공간 안에서 분포되어 있는 정도인 분산으로 계산되며 이는 곧 각 공간의 가변성이다. 신체 크기에 따른 효과를 제거하기 위하여 각 가변성은 연구참여자의 신장 값과 전체분산(V_{total})으로 모든 변인의 값은 표준화되었다. 직교공간에 투영된 값의 분산은 직교분산(V_{ORT})이며, 비제어다양체 공간에 투영된 값의 분산은 비제어분산(V_{UCM})으로 계산된다(공식 4, 5). 운동 공동작용은 공동작용 지수(ΔV, index of synergy)로 산출되었다(공식 6).

직교공간(ORT space) = $\vec{e}_{\perp}$

$DoF_{ORT} = 1$

(공식 1) 직교공간의 정의

비제어공간(UCM space) = $\vec{e}_{\parallel}$

$DoF_{UCM} = 13 = DoF_{Total}$-1

(공식 2) 비제어공간의 정의

$\vec{p} = \vec{p}_{real\ trajectory} - \vec{p}_{mean}$

$p_{\perp} = (\vec{p}, \vec{e}_{\perp})$

$p_{\parallel} = (\vec{p}, \vec{e}_{\parallel})$

(공식 3) 비제어공간과 직교공간에 실제 수행값을 투영하기 위한 공식

직교분산(V_{ORT}) $= (p_{\perp}^2/V_{total})/H$

Where V_{total}=$p_{\perp}^2$+$\sum p_{\parallel}^2$ and H = height

(공식 4) 직교분산 산출

비제어분산(V_{UCM}) $= (\sum p_{\parallel}^2/V_{total})/H$

Where V_{total}=$p_{\perp}^2$+$\sum p_{\parallel}^2$ and H = height

(공식 5) 비제어분산 산출

운동 공동작용 지수 (ΔV) $= (V_{UCM}/DoF_{UCM}) - V_{ORT}/DoF_{ORT}$

(공식 6) 운동 공동작용 지수 산출

4. 통계처리

본 연구에서는 연령에 따른 세 집단(만 6세, 만 10세, 성인)의 STS 과제 시 발생하는 운동가변성과 운동 공동작용의 차이를 분석하기 위하여 일원분산분석(ANOVA)를 사용하였으며, Bonferroni 사후검증을 실시하였다(SPSS 26.0, IBM, USA). 통계적 유의수준은 p < .05로 설정하였다.

RESULTS

1. 직교분산: Task-relevant variance (V_{ORT})

STS 과제를 수행하는 동안 발생한 V_{ORT}을 분석한 결과, 전후 방향에서는 [F(2, 27)=177.35, p < .001]가 좌우 방향에서는 [F(2, 27)=337.44, p < .001], 수직 방향에서는 [F(2, 27)=572.79, p < .001]으로 모든 방향에서 집단간 유의한 차이가 발견되었다(Figure 2). 사후검증 결과 모든 방향에서 6세, 10세, 성인 순으로 직교분산은 유의하게 감소하였다.

2. 비제어 분산: Task-irrelevant variance (V_{UCM})

STS 과제를 수행하는 동안 발생한 V_{UCM}을 분석한 결과, 전후 방향에서는 [F(2, 27)=42.14, p < .001], 좌우 방향에서는 [F(2, 27)=48.38, p < .001], 수직 방향에서는 [F(2, 27)=45.21, p < .001]으로 모든 방향에서 집단간 유의한 차이가 발견되었다(Figure 3). 사후검증 결과 모든

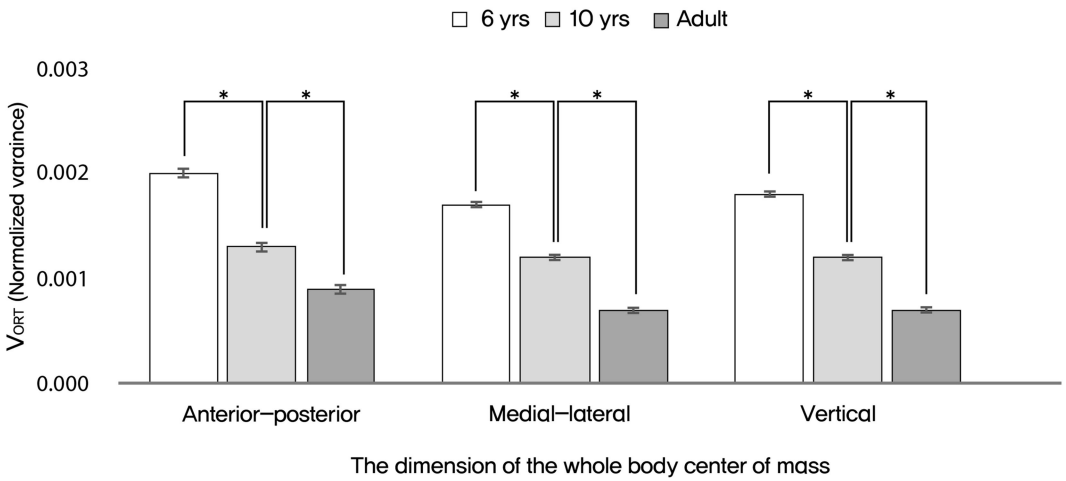

Figure 2. V_{ORT} in anterior-posterior, medial-lateral, and vertical dimensions among 6-year-old, 10-year-old, and adult. Asterisk indicates a statistical difference between groups.

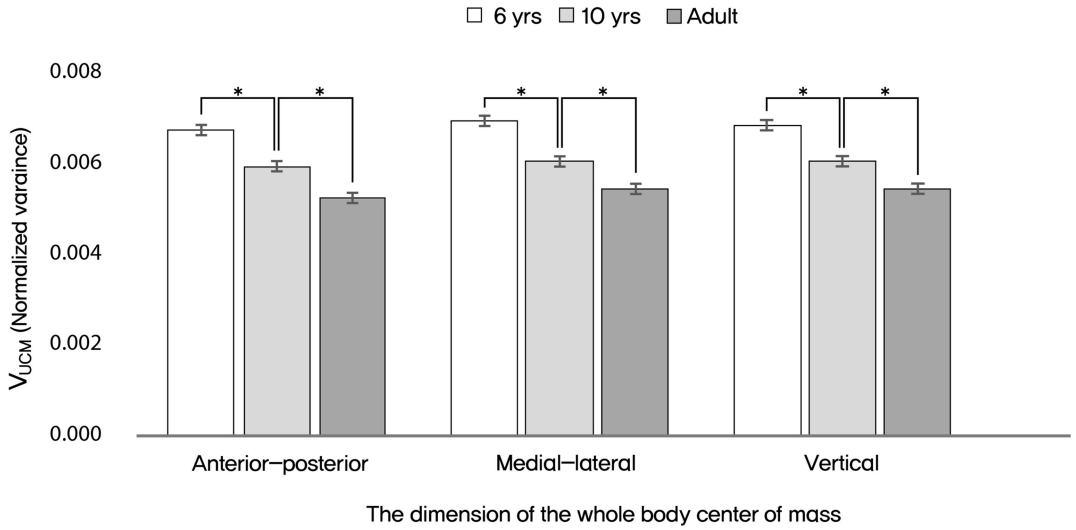

Figure 3. V_{UCM} in anterior-posterior, medial-lateral, and vertical dimensions among 6-year-old, 10-year-old, and adult. Asterisk indicates a statistical difference between groups.

Table 3. Result of ΔV

Dimension	6 yrs-old		10 yrs-old		Young adult		*F*
	M	SD	M	SD	M	SD	
Anterior-posterior	-0.00145	0.00019	-0.00081	0.00020	-0.00048	0.00013	83.487*
Medial-lateral	-0.00121	0.00026	-0.00071	0.00010	-0.00033	0.00013	64.407*
Vertical	-0.00126	0.00008	-0.00073	0.00005	-0.00032	0.00003	822.344*

Note. significant at *p <.001

방향에서 6세, 10세, 성인 순으로 비제어분산은 유의하게 감소하였다.

3. 운동 공동작용: Motor synergy (ΔV)

STS 과제를 수행하는 동안 발생한 ΔV를 분석한 결과, 전후 방향에서는 [F(2, 27)=83.487, p < .001], 좌우 방향에서는 [F(2, 27)=64.407, p < .001], 수직 방향에서는 [F(2, 27)=822.344, p < .001]으로 모든 방향에서 집단간 유의한 차이가 발견되었다(Table 3). 사후검증 결과 모든 방향에서 6세, 10세, 성인 순으로 ΔV는 유의하게 증가하였다.

DISCUSSION

운동발달 측면에서 인간의 움직임은 불수의적 움직임이 주를 이루는 영아기부터 다양한 경험과 연습을 통해 점진적으로 정확하고, 정교하며, 일관적인 방향으로 발달되어 성인기의 최고수행 단계에 도달한다. 또한 유아 및 아동은 환경에 변화에 적응하여 특정한 움직임을 생성할 때 성인에 비해 더 큰 가변성을 나타내고(Guarrera-Bowlby & Gentile, 2004; Seven et al., 2008), 움직임의 일관성은 기술을 학습함에 따라 점차 발달한다(Palmer et al., 2021; Parker, Larkin & Ackland, 1993). 이러한 관점에서 유아 및 아동의 움직임은 가변적이며, 성인보다 미숙한 협응을 보인다고 해석하는 것이 일반적일 것이다. 다만 유아 및 아동의 경우에도 해당 연령에서 요구되는 움직임을 성공적으로 수행하여 일상생활 및 스포츠 상황에서 발달 수준에 적합한 움직임을 수행할 수 있으며, 이는 유아 및 아동의 움직임에 오류를 일으키는 운동가변성이 많지만 그 시스템에 적합한 움직임이 생성된다는 측면에서 살펴볼 수 있을 것이다. 이러한 점에서 본 연구에서 사용된 UCM 분석은 오류를 발생시키는 것으로 알려진 전통적인 관점에서의 운동가변성, 즉, V_{ORT} 뿐 아니라 풍요로운 자유도(abundant DoF)로 인해 관절, 혹은 신체분절 등과 같은 기본요소(elemental variables)의 다양한 움직임의 조합을 의미하는 또 다른 가변성인 V_{UCM}을 동시에 산출하여 인간의 움직임 제어 기전을 시스템이 가진 오류와 자유도 활용에 관한 가변성 측면에서 규명해오고 있다(Kim, Song & Park, 2020; Kim et al., 2012; Park, Koh, Park & Shim, 2018; Park, Kwon, Koh & Shim, 2016; Scholz & Schöner, 1999; Shim, Park, Kim & Kim, 2011).

본 연구의 결과에 따르면 어깨 너비 크기의 기저면 위에서 쪼그려 앉았다 일어나는(STS) 운동과제는 운동발달 단계에 따른 자세조절의 차이를 보여줬다. 본 연구에서 6살 아동은 성인에 비해 반복적인 STS 과제를 수행할 때 수행 변인으로 설정한 전신의 CoM 궤적의 가변성이 컸으며(V_{ORT}), 또한 신체의 14개의 분절도 각기 다른 조합으로 사용되어 매번 수행할 때마다 일관되지 않은 협응을 보여주었다(V_{UCM}). 성인의 경우 V_{ORT} 뿐 아니라 V_{UCM}도 가장 적은 값을 발생시켰다. 즉, 연령이 가장 낮아서 운동발달 단계 상 아직 정교한 자세조절이 이루어지지 않는 6살의 경우 기존의 선행연구들과 마찬가지로 매우 높은 운동가변성을 보였으며(Forssberg & Nashner, 1982; Kirshenbaum et al., 2001), 동시에 자유도를 더 많이 활용한 것으로 보인다. Winter 등(1990)은 기저면 상의 무게중심을 제어하는 능력을 자세조절로 정의하였으며, 전신의 무게중심을 제어하는 것은 각 신체분절의 무게중심이 협력적으로 움직임을 생성하기에 가능하다고 생각할 수 있다. 즉 운동발달이 진행됨에 따라 자세조절 능력이 발달하고 있으며, 오류를 발생시키는 V_{ORT}가 감소하면서 동시에 보다 일관적인 형태로 자유도를 활용하는 것으로 해석할 수 있는 V_{UCM}이 줄어드는 방식으로 운동발달적 특성이 변화한다고 생각해볼 수 있다. 따라서 성공적인 과제 수행을 위해 각 집단에서 발생시키는 수행의 오류인 직교분산(V_{ORT})을 보상하기 위한 더 많은 양의 비제어분산(V_{UCM})이 발생하는 형태로 전신의 자유도가 활용되었으며, 연령에 따라 각기 다른 수준의 V_{ORT}이 발생되었고 그 오류를 보상하기 위해 연령마다 적절한 수준의 V_{UCM}이 생성되는 이 현상을 발달적인 측면에서의 전신이 제어되는 특성으로 해석할 수 있을 것이다. 또한 운동 공동작용 측면에서는 성인이 아동보다 큰 공동작용을 보였는데 이는 성인의 움직임이 아동과는 다른 특성을 반영한 결과로 해석할 수 있을 것이다. 다만 운동 공동작용을 의미하는 ΔV 값이 음수로 산출된 결과는 본 연구에서 사용된 실험과제가 STS 과제로 전신의 무게중심이 지면에서 수직 방향으로 이동할 때 신체분절 또한 같은 방향으로 구속되어 움직이는 동작의 특성이 반영되어 나타난 결과로 보인다.

선행연구에서는 자세조절이 요구되는 운동과제를 수행하는 과정에서 과제의 난이도가 변화될 때, 성인은 전신의 무게중심의 오류를 감소시키고 신체분절을 활용하여 성공적인 수행을 이끌어내도록 신체분절이 협력적으로 작용하는 결과를 보고하였다(Kim et al., 2012; Scholz & Schöner, 1999). 이 결과를 통해 인간의 움직임은 과제가 어려워질수록 오류가 더 많이 발생하고, 더 많이 발생한 오류를 보상하고 움직임을 성공적으로 수행하기 위해 V_{UCM}을 더 많이 생성하는 방식으로 인간의 몸이 작동한다고 설명하고 있다. 인간의 발달 단계에 따르면 유아 및 아동은 성인보다 미숙한 시스템이고, 유아는 또 아동보다는 발달 단계가 낮기 때문에 같은 운동과제가 주어질 경우 이는 시스템의 차이로 인하여 과제의 난이도가 달라질 수도 있을 것으로 생각된다. 따라서 동일한 환경에서 동일한 운동과제를 수행하더라도 운동발달 단계에 따라 해당 과제의 난이도는 달랐을 것이며, 이 과제를 성공적으로 수행하기 위해 시스템이 발생시키는 오류를 보상하여 더 많은 자유도를 활용하는 방식으로 움직임이 발생했다고 생각해볼 수 있다. 이러한 발달적 변화는 연령이 증가에 따른 근골격계와 중추신경계의 성숙과 연습 및 경험으로 인한 운동제어가 보다 정교해지는 운동발달의 특성을 지지하며(Massion, 1992; Palmer et al., 2021), 유아 및 아동의 움직임이 단순히 오류가 큰 것만이 아니라 이러한 움직임을 보완하기 위해 전신의 자유도가 보상하는 방식으로 제어된다고 생각해볼 수 있다.

CONCLUSION

본 연구의 목적은 만 6세, 10세 아동과 성인을 대상으로 자세조절이 요구되는 STS 과제를 수행하는 동안 발생하는 운동가변성을 비제어다양체 분석을 하여 그 발달적 차이를 규명하고자 하였다. 본 연구를 통하여 연령이 증가할수록 수행을 저해하는 직교분산뿐 아니라 전신의 다양한 자유도를 활용하는 정도인 비제어분산이 감소하는 것을 확인하였다. 직교분산 결과는 아동이 성인에 비해 부정확하고 일관성이 떨어지는 움직임 특성을 보인다는 것을 의미하며, 비제어분산 결과는 아동이 성인에 비해 과잉 자유도를 더 많이 사용하는 방식으로 STS 과제를 수행한다는 것을 의미한다. 따라서 전신의 무게중심을 수직 방향으로 이동시켜야 자세조절이 요구되는 움직임에 한하여 운동발달적 측면에서 인간의 움직임이 직교분산이 감소하면서 비제어분산도 감소하는 형태로 발달하는 것으로 생각해볼 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study is part of a Doctoral dissertation by Min Joo Kim.

REFERENCES

Assaiante, C. (1998). Development of locomotor balance control in

healthy children. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *22*(4), 527-532.

de Leva, P. (1996a). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, *29*(9), 1223-1230.

de Leva, P. (1996b). Joint center longitudinal positions computed from a selected subset of Chandler's data. *Journal of Biomechanics*, *29*(9), 1231-1233.

Forssberg, H. & Nashner, L. M. (1982). Ontogenetic development of postural control in man: adaptation to altered support and visual conditions during stance. *Journal of Neuroscience*, *2*(5), 545-552.

Guarrera-Bowlby, P. L. & Gentile, A. M. (2004). Form and Variability During Sit-to-Stand Transitions: Children Versus Adults. *Journal of Motor Behavior*, *36*(1), 104-114.

Henderson, S. E., Sugden, D. A. & Barnett, A. L. (2007) *Movement Assessment Battery for Children-2*, London, England: Harcourt Assessment.

Jensen, R. K. (1986). Body segment mass, radius and radius of gyration proportions of children. *Journal of Biomechanics*, *19*(5), 359-368.

Jensen, R. K. (1989). Changes in segment inertia proportions between 4 and 20 years. *Journal of Biomechanics*, *22*(6-7), 529-536.

Kim, K., Song, J. & Park, J. (2020). Effect of Kinetic Degrees of Freedom on Hierarchical Organization of Multi-element Synergies during Force Production and Releasing Tasks. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *30*(2), 131-144.

Kim, M. J., Karol, S., Park, J., Auyang, A., Kim, Y. H., Kim, S., et al. (2012). Inter-joint synergies increase with motor task uncertainty in a whole-body pointing task. *Neuroscience Letters*, *512*(2), 114-117.

Kirshenbaum, N., Riach, C. L. & Starkes, J. L. (2001). Non-linear development of postural control and strategy use in young children: a longitudinal study. *Experimental Brain Research*, *140*(4), 420-431.

Massion, J. (1992). Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Progress in Neurobiology*, *38*(1), 35-56.

Palmer, H. A., Newell, K. M., Mulloy, F., Gordon, D., Smith, L. & Williams, G. K. (2021). Movement form of the overarm throw for children at 6, 10 and 14 years of age. *European Journal of Sport Science*, *21*(9), 1254-1262.

Park, D. W., Koh, K., Park, Y. S. & Shim, J. K. (2018). Uncontrolled Manifold Analysis of Whole Body CoM of the Elderly: The Effect of Training using the Core Exercise Equipment. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *28*(4), 213-218.

Park, Y. S., Kwon, H. J., Koh, K. & Shim, J. K. (2016). Age-related changes in multi-finger synergy during constant force production with and without additional mechanical constraint. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, *26*(2), 175-181.

Parker, H. E., Larkin, D. & Ackland, T. R. (1993). Stability and change in children's skill. *Psychological Research*, *55*(2), 182-189.

Riach, C. L. & Starkes, J. L. (1994). Velocity of centre of pressure excursions as an indicator of postural control systems in children. *Gait and Posture*, *2*(3), 167-172.

Rival, C., Ceyte, H. & Olivier, I. (2005). Developmental changes of static standing balance in children. *Neuroscience Letters*, *376*(2), 133-136.

Scholz, J. P. & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental Brain Research*, *126*(3), 289-306.

Seven, Y. B., Akalan, N. E. & Yucesoy, C. A. (2008). Effects of back loading on the biomechanics of sit-to-stand motion in healthy children. *Human Movement Science*, *27*(1), 65-79.

Shim, J. K., Park, J. B., Kim, M. J. & Kim, S. (2011). Motor variability and synergy research through uncontrolled manifold analysis. *Korean Journal of Sport Psychology*, *22*(4), 127-142.

Sundermier, L., Woollacott, M., Roncesvalles, N. & Jensen, J. (2001). The development of balance control in children: comparisons of EMG and kinetic variables and chronological and developmental groupings. *Experimental Brain Research*, *136*(3), 340-350.

Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* (4th ed.). Hoboken, New Jersey: Wiley.

Winter, D. A., Patla, A. E. & Frank, J. S. (1990). Assessment of balance control in humans. *Medical Progress through Technology*, *16*(1-2), 31-51.

Wu, J., McKay, S. & Angulo-Barroso, R. (2009). Center of mass control and multi-segment coordination in children during quiet stance. *Experimental Brain Research*, 196(3), 329-339.