

노화에 따른 운동수행 내 · 간 다수지 시너지 분석

Age-related changes in multi-finger synergy during a constant force production with and without additional mechanical constraint

Yang Sun Park^{1,2,3}, Hyun Joon Kwon³, Kyung Koh^{2,3}, Jae Kun Shim^{3,4,5,6}

¹Department of Physical Education, Hanyang University, Seoul, South Korea

²The Movement Science Center of Research Institute for Sports Science and Sports Industry, Hanyang University, Seoul, South Korea

³Department of Kinesiology, University of Maryland, College Park, MD, USA

⁴Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Global Campus, Kyung-gi, South Korea

⁵Fischell Department of Bioengineering, University of Maryland, College Park, MD, USA

⁶Neuroscience and Cognitive Science (NACS) Program, University of Maryland, College Park, MD, USA

Corresponding author

Jae Kun Shim

Department of Kinesiology/ Fischell Department of Bioengineering/ Neuroscience and Cognitive Science (NACS) Program

University of Maryland, College Park

0110F SPH Building, College Park, MD 20742

Phone: 302-405-2492, Fax: 301-405-5578, Email: jkshim@umd.edu

Acknowledgement

이 논문은 2012년 정부(미래창조부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음 (NRF-2012R1A6A3 A04040457).

Abstract

Objective: The aim of this study was to investigate age-related changes of multi-finger synergy during a constant force production task with and without an additional mechanical constraint.

Method: 14 elderly subjects (age: 78.50±4.63 yrs, height: 157.29±8.97 cm, weight: 65.13±6.93 kg) and 14 young subjects (age: 21.13±1.35 yrs, height: 171.57±8.43 cm, weight: 70.29±16.77 kg) participated in this study. The subjects were asked to place index and middle fingers on two force transducers fixed on a small non-moving teeterboard and produce 10N by pressing the sensors while watching force feedback on a computer screen for no additional constraint condition (NAC). The subjects also performed the same task with an additional mechanical constraint (AC) where the subjects were asked to balance the teeterboard that could be rotated by finger forces. Uncontrolled manifold approach was used to calculate within-trial and between-trial multi-finger synergy indices, variance in uncontrolled subspace (V_{UCM}), and variance in subspace orthogonal to UCM subspace (V_{ORT}). 2 by 2 repeated measured ANOVA was performed with the within-factor of task condition (with and without an additional constraint) and the between factor of group (elderly and young).

Results: The elderly group significantly increased within-trial V_{ORT} in AC than NAC ($p < .05$) while the young group showed no significant difference between AC and NAC. There was no significant group

difference on within-trial V_{UCM} . Between-trial V_{ORT} remained unchanged between groups and conditions. However, between-trial V_{UCM} for the elderly group significantly decreased in AC as compared to NAC, along with no significant difference for the young group. In the results of multi-finger synergy, there was no significant group difference on within-trial synergy. However, between-trial synergy for the elderly group significantly decreased in AC as compared to NAC ($p < .05$).

Conclusion: Our results indicated that aging decreased consistency (i.e. CNS ability to perform the task on moment-to-moment basis) with additional mechanical constraint. In addition, aging was associated with decreased multi-finger synergy on trial-to-trial basis.

Keywords: finger, synergy, uncontrolled manifold, aging

서론

인간 신체의 움직임은 다양한 기본 요소들인 뼈, 근육, 신경들의 상호 작용의 의해 발생한다. 특히, 움직임에 필요한 최소한의 요소보다 더 많은 요소들이 움직임에 관여하게 되면 운동의 과잉(motor redundancy)이 생기게 된다(Bernstein, 1967). 이러한 운동 과잉의 문제를 중추 신경계가 움직임을 제어하는데 해결해야 할 문제로 제시되어 왔다(Bernstein, 1967; Turvey, Shaw, & Mace, 1978). 최근 연구에 따르면(Ambike, Mattos, Zatsiorsky, & Latash, 2016; Karol et al., 2011) 중추 신경계가 움직임에 관여한 기본요소들의 협응 관계를 통해 운동 과잉의 문제를 해결한다고 제시하였으며, 많은 실험적 근거를 통해 운동의 과잉이라는 것이 중추 신경계가 해결해야 할 문제라고 인식되기 보다는 동일한 움직임을 기본요소들의 다양한 조합으로 발현할 수 있다는 개념인 운동의 풍요(motor abundance)로 대체되어 제시되고 있다. 이러한 개념을 운동 시너지(motor synergy)라는 용어로 설명할 수 있으며, 이는 성공적인 과제를 수행하기 위한 움직임의 기본 요소들, 예를 들어 근육들이나 관절들 사이의 운동과제를 성공적으로 수행하기 위한 다양한 형태의 공동 작용이라고 볼 수 있다(Gelfand & Latash, 1998; Latash & Zatsiorsky, 2009).

비제어 다양체 분석(UCM; uncontrolled manifold analysis)은 운동 시너지를 구체적으로 정량화시킬 수 있는 방법으로, 운동 과잉에 의해 발생하는 기본 요소들의 가변성(variability)을 분석하여 중추 신경계가 움직임을 제어하는 기전을 이해하는데 사용되어 오고 있다. 이 분석법은 움직임에 관여한 기본 요소들과 운동 수행 과제의 관계를 통해 기본 요소들의 가변성을 운동수행에 영향을 미치지 않는 분산(variance in UCM subspace, V_{UCM})과 운동수행에 영향을 미치는 분산(즉, 일종의 오차; variance in subspace orthogonal to UCM subspace, V_{ORT})을 산출하는 방법이다(Shim, Park, Kim, & Kim, 2011). 운동 시너지는 많은 경우에 이 두 분산의 차이($V_{UCM} - V_{ORT}$)나 이와 비슷한 방법으로 정량화되며, 운동수행에 영향을 미치지 않는 분산이 커지거나 운동수행에 영향을 미치는 분산이 작을수록 운동 시너지는 커지게 된다. 그 동안 비제어 다양체 분석방법을 이용하여 인간의 운동 시너지를 밝히려는 노력은 다각적으로 이루어져 왔다(Hooke, Karol, Park, Kim, & Shim, 2012; Shim, Lay, Zatsiorsky, & Latash, 2004; Shim et al., 2011). 특히 다수지(multi-finger) 제어 능력에서 운동수행에 영향을 미치지 않는 가변성이 운동수행에 영향을 미치는 가변성보다 크게 나타나며, 이것을 성공적인 과제를 수행하기 위한 다수지 시너지라고 밝혔다(Shim et al., 2004; Latash, Scholz, & Schoner, 2007).

운동 시너지는 과제 수행내(within-trial)와 수행간(between-trial) 두 가지 수준으로 분석되어 제어의 다양한 측면을 보여준다(Koh et al., 2015; Scholz, Kang, Patterson, & Latash, 2003). 과제 수행내에 대한 분석은 성공적인 과제 수행을 위해 기본 요소들이 순간 순간(moment-to-moment) 상호 작용을 연구하는데 사용되었고(Tuller, Turvey, & Fitch, 1982), 과제 수행간에 대한 분석은 동일한 과제를 반복 수행 하였을 때 기본요소들의 다양한 상호 작용을 연구하는데 이용되었다. 예를 들면, 검지와 중지를 이용하여 두 손가락의 합을 10N 내는 과제에서, 10N 을 실시간으로 유지하려는 두 손가락의 상호 작용의 능력은 수행 내(within-trial) 분석을 통해 측정되며, 이 과제를 반복 수행할 때 두 손가락의 다양한 조합은 수행간(between-trial) 분석을 통해 측정된다. 이전의 선행된 연구들은 주로 운동과제 수행간 분석을 통해 시너지 기전들을 연구해왔다(Shim et al.,

2004; Park, Singh, Zatsiorsky, & Latash, 2012). 하지만 Scholz & Schoner(1999)에 의하면 운동 수행간과 수행내의 분석은 중추 신경계의 다른 제어 능력 분석하는 것이라고 제시하였다(Scholz & Schöner, 1999). 운동 시너지에 관련된 연구들은 노인들의 운동 협응과 조절 능력이 상실된다는 점에서 지속적으로 연구되어 왔다(Park, Sun, Zatsiorsky, & Latash, 2011; Shim et al., 2004). 노인의 손가락과 관련된 근육의 위약은 운동 단위 수의 감소로부터 오는데 이는 느려진 운동에 의한 신경 재분포 진행으로부터 기인하는 것으로 알려져 있다(Grabiner & Enoka, 1995; Larsson & Ansved, 1995). 이에 따라 손가락을 조절하는 능력이 약해져 손을 사용하여 물건을 잡는 동작 능력이 감소된다(Enoka et al., 2003; Ranganathan, Siemionow, Sahgal, & Yue, 2001). Shim, Lay, Zatsiorsky, & Latash(2004)는 노인이 다섯 손가락을 이용하여 물건을 잡는 과제 수행 시 운동수행에 영향을 미치는 가변성(task-relevant variability) 즉 운동과제 수행의 오차가 커지는 것을 보고하였으며(Shim et al., 2004), Shinohara 등(2004)은 노인이 복합적으로 손가락을 조절하는 능력에 있어서 신호를 조절하는 협응 능력이 약해져 노인이 낼 수 있는 최대 힘 값(MVC)이 감소된다고 보고하였다(Shinohara, Scholz, Zatsiorsky, & Latash, 2004). Voelcker-Rehage, Stronge, & Albers(2006)의 연구에 의하면, 노인에게 두 가지 다른 제약조건(constraint condition)에서 과제를 동시에 주었을 때 인지와 운동 수행의 감소가 나타나는데 이것은 힘을 추적하는 과제에 있어서 더 큰 가변성을 유발하여 인지 및 과제 수행의 오차를 만들어 냈으로써 노인의 과제 수행 능력이 감소되고 있음을 보고하였다(Voelcker-Rehage, Stronge, & Albers, 2006). 위에서 보고한 선행연구들은 노인의 수행 능력은 운동수행에 영향을 미치는 분산인 오차(V_{ORT})가 증가함에 따라 운동수행이 떨어진다는 결과를 보여준다. 즉, 과제를 완성하기 위한 운동 시너지는 운동수행에 영향을 미치는 분산(V_{ORT})과 영향을 미치지 않는 분산(V_{UCM})의 조합으로 만들어지므로, 노인에게 과제 수행 환경을 더 복잡하게 제시했을 때 V_{UCM} 이 어떠한 영향을 미치는지에 대한 의문과 궁극적으로 시너지에 어떠한 영향을 미치는지에 의문에 대해서는 아직까지 정확하게 규명된 바가 없다. 특히 운동과잉의 문제가 기본적인 운동요소(motor elements)의 수가 운동제한요소(motor constraints)의 수보다 많을 때 생김에도 불구하고 운동제한요소의 수나 그 형태에 따른 노인들의 운동시너지 변화의 기전에 대한 이해가 부족하다. 이에 본 연구의 필요성을 갖는다. 본 연구의 목적은 노인과 젊은이를 대상으로 지속적 수지 힘을 내는 과제에서 두 가지의 다른 제약조건(with no additional mechanical constraint vs. with additional mechanical constraint)을 따른 수행내 수행간 다수지 시너지 변화를 규명하는데 있다.

연구 방법

1. 연구대상

본 연구에는 하지 근골격계에 이상이 없는 여자 노인 10 명과 남자 노인 4 명, 총 14 명의 노인(나이 : 78.50 ± 4.63 yrs, 키: 157.29 ± 8.97 cm, 몸무게: 65.13 ± 6.93 kg)이 대상으로 참여하였다. 젊은이는 여자대학생 7 명과 남자 대학생 8 명 총 15 명의 대학생(나이: 21.13 ± 1.35 yrs, 키: 171.57 ± 8.43 cm, 몸무게: 70.29 ± 16.77 kg)이 본 실험에 참여하였으며 모든 피험자들은 실험에 참여하기 전 실험과정에 대한 설명을 하고 참여의사와 동의서를 받았다.

2. 실험방법

본 연구에 참여한 피험자들은 오른손의 검지와 중지를 이용하여 두 손가락의 힘의 합이 10N 을 발현할 수 있도록, 피험자의 눈높이에 설치된 모니터를 통해 목표 힘 값의 그래프와 본인이 발현하는 힘 값의 그래프를 통해 실시간으로 두 손가락의 힘 값을 확인할 수 있도록 하였다. 동작 시, 오른손에 관련된 관절의 사용을 제어하기 위해 (Figure 1, A) 와 같이 손목과 손가락의 높이가 일정하게 하고 손목의 관절을 사용하지 않게 유도하는 손목관절 제어 장치를 설치하였다. 목표 수행 시간은 10 초 동안 유지하도록 하였으며, 개인당 총 10 회씩 실시하였다. 손가락 힘을 측정하기 위해 힘 센서(Models 208 M182 and 484B, Piezotronics, Inc., Depew, NY)는 2 개를 이용하였다. 실험조건은 기계적 제한요소가 추가된(AC; additional mechanical constraint)

조건과 추가되지 않는 조건(NAC; no additional mechanical constraint) 두 가지로 제시하였다. 기계적 제한요소가 추가되지 않은 조건은 고정된 판 위에서 두 센서를 이용한 두 손가락 힘의 합을 측정하는 조건이며(Figure 1, B), 기계적 제한요소가 추가된 조건은 지면의 움직임이 Figure 1, C와 같이 회전되는 판 위에서 두 센서를 이용해 두 손가락의 힘을 합을 측정하는 조건이다. 이때 회전되는 축의 기준은 손가락 표면이 센서에 닿는 지면선을 기준으로 하여 일치하도록 설계하였다(Figure 1, C). 이 설계의 목적은 접선력(tangential force)에 의해 발생하는 토크의 값을 최소화하는데 있었다.

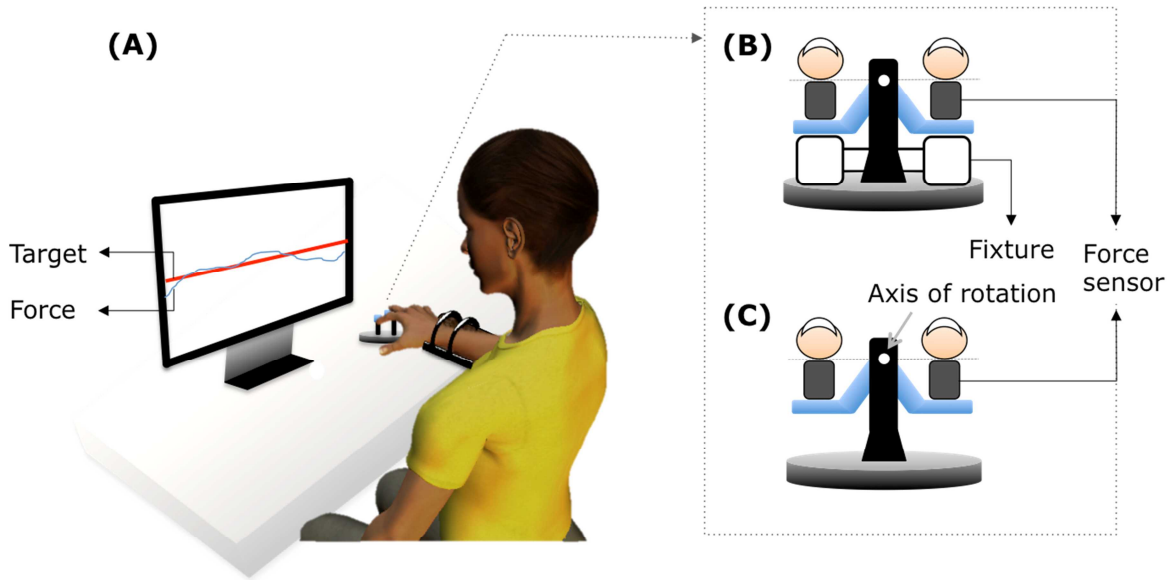


Figure 1. (A) Schematic illustration of the experimental setup, (B) the 10N force production task with no additional constraint (NAC), and (C) the task with an additional constraint (AC). Subjects were required to balance the teeterboard for the AC condition in addition to producing 10N.

3. 자료처리

본 연구에서는 과제 수행 시 얻어진 안정화된 3 초에서 9 초 사이의 힘 값을 분석하였다(Koh et al., 2015). 운동수행에 영향을 미치는 분산과 영향을 미치지 않는 분산을 각각 과제 수행간 및 과제 수행내 분석으로 정량화 하였다(Koh et al., 2015).

각 수지의 힘의 합, F_{TOT} 은 다음과 같이 시간, t 와 수행, T 의 함수로 표현된다.

$$F_{TOT}(t, T) = F_I(t, T) + F_M(t, T)$$

여기서, $F_I(t, T)$ 와 $F_M(t, T)$ 는 각각 엄지와 검지의 힘이다.

수지의 힘은 t 와 T 의 독립적인 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$F_{TOT}(t, T) = m_{TOT}(T) + x_{TOT}(t) = \sum_{i=\{I,M\}} m_i(T) + x_i(t)$$

여기서, $m(T)$ 는 수행, T 에서의 평균 힘이며, $x(t)$ 는 $m(T)$ 값을 중심에서 실시간 변하는 힘이고, i 는 각 손가락 (I : 엄지, M : 중지)를 나타낸다.

3.1 과제 수행내 분석

다음과 같은 관계식에서 $x_{TOT}(t) = x_I(t) + x_M(t)$

운동수행에 영향을 미치는 분산, $V_{ORT_within_trial}$ 은 다음과 같이 산출된다.

$$V_{ORT_within_trial} = \frac{\text{var}(x_{TOT}(t))}{\text{dof}}$$

여기서, $\text{var}(\cdot)$ 는 \cdot 의 분산이며, dof 는 과제 수행 시 사용된 수지의 수이다 ($\text{dof} = 2$).

운동수행에 영향을 미치지 않는 분산, $V_{UCM_within_trial}$ 은 다음과 같다.

$$V_{UCM_within_trial} = \sum_{i=\{I,M\}} \text{var}(x_i(t)) - \frac{\text{var}(x_{TOT}(t))}{2}$$

과제 수행내 다수지 시너지, $\text{Syn}_{within_trial}$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{Syn}_{within_trial} = \frac{V_{UCM_within_trial} - V_{ORT_within_trial}}{V_{UCM_within_trial} + V_{ORT_within_trial}}$$

3.2 과제 수행간 분석

과제 수행내 분석과 동일하게 다음과 같은 관계식에서 $m_{TOT}(T) = m_I(T) + m_M(T)$

운동수행에 영향을 미치는, $V_{ORT_between_trial}$ 미치지 않는 분산, $V_{UCM_between_trial}$ 은 각각

$$V_{ORT_within_trial} = \frac{\text{var}(m_{TOT}(T))}{2},$$

산출 된다.

과제 수행간 다수지 시너지, $\text{Syn}_{between_trial}$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{Syn}_{between_trial} = \frac{V_{UCM_between_trial} - V_{ORT_between_trial}}{V_{UCM_between_trial} + V_{ORT_between_trial}}$$

4. 통계처리

본 연구의 통계처리는 SPSS 21.0(IBM, USA)을 이용하였고, 연령에 따른 두 집단(노인, 젊은이)과 두 가지 실험조건(단일과제, 이중과제)에 따른 시너지 차이를 분석하기 위해 반복측정분석(ANOVA with repeated measure)을 사용하였다. 유의차이에 따른 상호작용은 단순사후검증을 실시하였으며, 연령 집단별에 따라 independent t -test 와 실험조건에 따라 paired t -test 를 실시하였다. 모든 통계치의 유의수준은 $p < .05$ 로 설정하였다.

결과

1. 운동수행에 영향을 미치는 분산 (V_{ORT}) 결과

$V_{ORT_within_trial}$ 분석결과, 주효과 Task [$F = 9.100, p = 0.008$] 와 주효과 Group [$F = 5.507, p = 0.027$] 그리고 상호작용 Task \times Group [$F = 5.401, p = 0.028$]에서 모두 유의한 차이가 나타났다. 상호작용의 사후검증을 위한 단순효과검증은 아래 표와 같이 나타났다(Table 1, Figure 2. 참조).

$V_{ORT_between_trial}$ 분석결과, 주효과 Task [$F = 2.476, p = 0.127$] 와 상호작용 Task \times Group [$F = 1.913, p = 0.178$]에서는 유의한 차이가 나타나지 않았고, 주효과 Group [$F = 5.190, p = 0.031$]에서 유의한 차이가 나타났다. 사후검증을 위한 단순효과검증은 아래 표와 같이 나타났다(Table 1, Figure 2 참조).

Table 1. Result of post-hoc. of $V_{ORT_within_trial}$ and on $V_{ORT_between_trial}$ of two conditions (unit: N^2)

	Within-trial			Between-trial		
	NAC	AC	<i>t</i> -value	NAC	AC	<i>t</i> -value
Young	0.17±0.12	0.21±0.13	0.814	0.003±0.003	0.003±0.004	0.603
Elderly	0.40±0.66	0.08±0.07	2.645*	0.008±0.011	0.020±0.032	1.446
<i>t</i> -value	1.334	2.836*		1.716	1.918	

Note. significant at $*p < .05$.

2. 운동수행에 영향을 미치지 않는 분산(V_{UCM})결과

$V_{UCM_within-trial}$ 분석결과, 주효과 Task [$F= 9.682, P= 0.004$]에서 유의한 차이가 나타났고, 주효과 Group [$F= 0.006, p = 0.940$]과 상호작용 Task \times Group [$F= 0.380, p = 0.543$]에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 사후검증을 위한 단순효과검증은 아래 표와 같이 나타났다(Table 2, Figure 2 참조).

$V_{UCM_between-trial}$ 분석결과, 주효과 Task [$F= 20.260, p = 0.000$] 와 주효과 Group [$F= 9.197, p = 0.005$] 그리고 상호작용 Task \times Group [$F= 6.621, p = 0.016$]에서 모두 유의한 차이가 나타났다. 사후검증을 위한 단순효과검증은 아래 표와 같이 나타났다(Table 2, Figure 2 참조).

Table 2. Result of post-hoc. of $V_{UCM_within-trial}$ and $V_{UCM_between-trial}$ of two conditions (unit: N^2)

	Within-trial			Between-trial		
	NAC	AC	<i>t-value</i>	NAC	AC	<i>t-value</i>
Young	0.057 \pm 0.102	0.005 \pm 0.008	2.094	0.23 \pm 0.18	0.03 \pm 0.02	4.399**
Elderly	0.047 \pm 0.039	0.013 \pm 0.016	3.114**	0.81 \pm 0.77	0.07 \pm 0.09	3.504**
<i>t-value</i>	0.332	1.489		2.728*	1.636	

Note. significant at * $p < .05$, ** $p < .01$

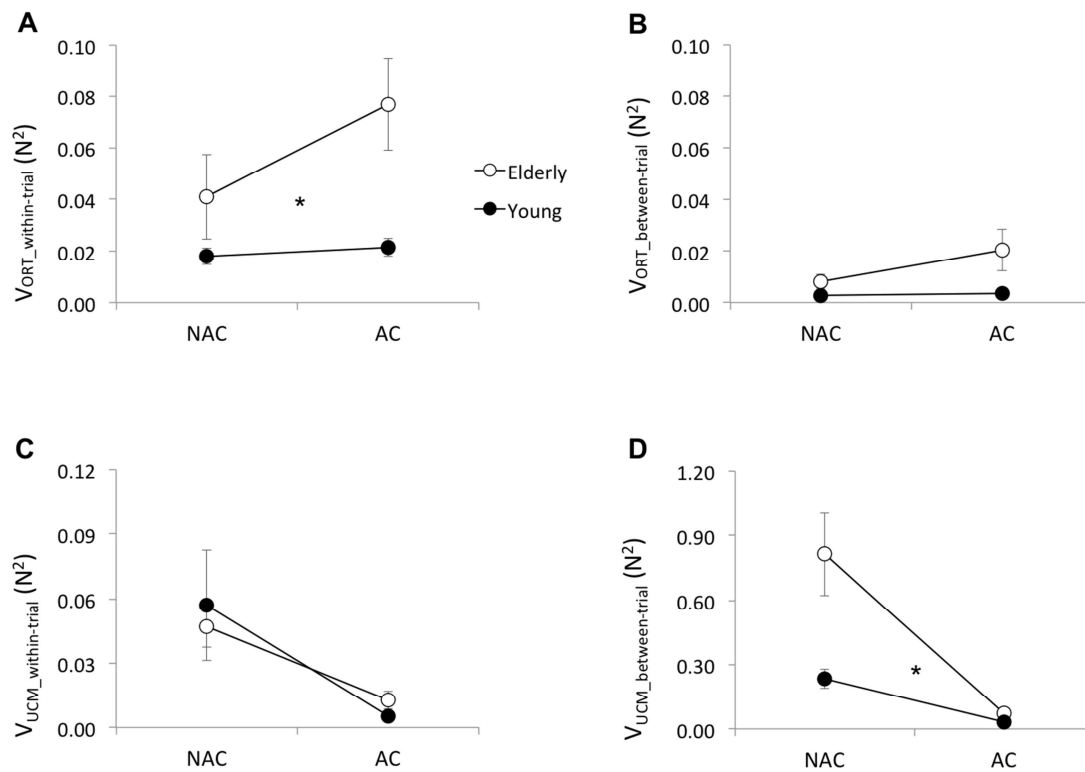


Figure 2. Within-trial V_{ORT} (A), between-trial V_{ORT} (B), within-trial V_{UCM} (C) and between-trial V_{UCM} (D), are shown for each age group (Elderly: solid symbols and Young; open symbols) between two task conditions (NAC: with no additional mechanical constraint and AC: with additional mechanical constraint). Averaged across participants data and shown with standard error bars. Statistical significance effects to the interaction (*, $P < 0.05$; interaction between group and task) were calculated using repeated measures ANOVA. Asterisk indicates a statistical difference between groups.

3. 다수지 시너지(multi-finger synergy) 결과

$Syn_{within-trial}$ 분석결과, 주효과 Task [$F = 206.522, p = 0.000$]에서 유의한 차이가 나타났고, 주효과 Group [$F = 0.178, P = 0.676$]과 상호작용 Task \times Group [$F = 0.339, p = 0.565$]에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 사후검증을 위한 단순효과검증은 아래 표와 같이 나타났다(Table 3, Figure 3 참조).

$Syn_{between-trial}$ 분석결과, 주효과 Task [$F = 30.051, p = 0.000$] 와 주효과 Group [$F = 4.243, p = 0.049$] 그리고 상호작용 Task \times Group [$F = 4.769, p = 0.038$]에서 모두 유의한 차이가 나타났다. 사후검증을 위한 단순효과검증은 아래 표와 같이 나타났다(Table 3, Figure 3 참조).

Table 3. Result of post-hoc. of $V_{Syn_within-trial}$ and $V_{Syn_between-trial}$ by two tasks (unit: N^2)

	Within-trial			Between-trial		
	Single task	Dual task	<i>t-value</i>	Single task	Dual task	<i>t-value</i>
Young	0.24 \pm 0.30	-0.70 \pm 0.27	11.676***	0.98 \pm 0.30	0.79 \pm 0.17	4.151**
Elderly	0.17 \pm 0.34	-0.70 \pm 0.19	8.892***	0.96 \pm 0.07	0.53 \pm 0.43	4.058**
<i>t-value</i>	0.604	0.013		0.554	2.140*	

Note. significant at * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .000$

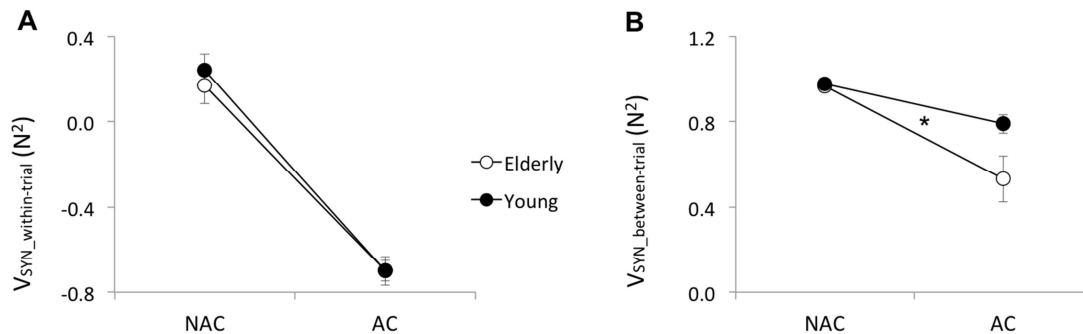


Figure 3. $Syn_{within-trial}$ (A), $Syn_{between-trial}$ (B) are shown for each age group (Elderly: open symbols and Young; solid symbols) between two task conditions (NAC: with no additional mechanical constraint and AC: with additional mechanical constraint). Averaged across participants data and shown with standard error bars. Statistical significance effects to the interaction (*, $p < 0.05$; interaction between group and task) were calculated using repeated measures ANOVA. Asterisk indicates a statistical difference between groups.

논 의

운동수행에 직접적으로 영향을 주는 분산은(V_{ORT}) 검지와 중지의 손가락이 협력하여 힘을 이루려는 수행에 대해 얼마나 큰 에러(error)를 발생하였는가를 산출한 값이다. 결국 과제와 관련한 분산값이 커질수록 과제 목표를 달성하기 위한 운동의 수행능력에 방해가 많이 받았다는 것으로 해석될 수 있다. 본 연구 결과, 운동 수행내(within-trial)에서 노인과 젊은이들과 두가지 조건에 따라 상호작용의 유의한 차이($p=0.028$)가 나타났는데, 이러한 결과로 노인이 이중과제 조건에서 운동 수행내 과제를 일정하게 유지할 수 있는 능력인 일관성(consistency)이 떨어졌다는 것을 알 수 있다. 단순효과 검증 결과, 제한요소가 추가되지 않은 조건에서는 노인과 젊은이의 수행능력 차이가 나타나지 않았고, 제한요소가 추가된 조건에서 노인이 젊은이들에 비해 유의하게 운동수행시 발생하는 에러값이 커지면서, 상호작용이 나타났다. 결국 제한요소가 추가되지 않은 조건에서 노인이 젊은이들과 비교해 운동수행이 다르지 않음을 알 수 있다 (Olafsdottir, Zhang, Zatsiorsky, & Latash, 2007).

과제와 유관한 분산 결과, 본 연구에서 나타난 흥미로운 결과는 운동 수행간(between-trial)의 결과에서는 집단간의 차이와 이중과제에 대한 변화 차이를 보이지 않았다는 점이다. 즉, 운동수행시 같은 과제를 반복 할수 있는 능력인 재현성(repeatability)이 노인이 젊은이와 비교해 그 능력이 다르지 않음을 알수 있었고, 두 집단 모두 제한요소가 추가 유무에 따른 운동수행이 달라지지 않은 것으로 보아, 제약적 환경이 증가한다 하더라도 운동수행에 대한 재현성이 작아지지 않았다는 것으로 해석된다.

비제어 다양체 공간 분산(V_{UCM})은 과제의 목표를 달성하기 위한 운동 수행에 영향을 미치지 않는 변인, 즉 과제와 무관한 분산값으로 알려져 있다(Latash, Scholz, Danion, & Schöner, 2002; Shim et al., 2011). 운동 수행시 목표를 달성하기 위해 움직임과 관련된 요소들(예: 손가락, 근육, 관절 등)의 조합을 얼마나 많이 이용하는가 혹은 이용하지 않는가의 관점으로 접근하여 해석할 수 있다(Shim et al., 2011). 본 연구에서 산출한 과제와 무관한 분산 값이 크다는 것은 10N 을 내기 위해 두 손가락이 여러 가지 조합을 만들어 과제 목표를 달성하였다는 것을 의미하며, 값이 작다는 것은 작은 조합 혹은 단순한 조합만을 이용하여 과제를 수행하였다는 것을 의미한다. 본 연구에서 설계한 실험조건 중 단순과제의 환경은 두 손가락의 합이 10N 을 내기 위해 검지와 중지 힘의 사용을 다르게 분배한다 하더라도 최종적으로 10N 의 힘값을 구현해 낼 수 있는 환경으로 구성되었다. 반면, 제한요소가 추가된 조건은 손가락의 표면이 닿는 힘 센서를 기준으로 회전축을 형성하여 회전이 가능하므로, 각기 손가락의 힘이 균등하게 배분되지 않으면 힘의 목표 합값을 구동하지 못하는 환경으로 구성되었다. 예를 들어, 운동수행 동안 검지가 중지보다 계속적으로 큰 값을 구동한다면 회전축은 내측으로 계속 회전을 하게 되어 궁극적으로 10N 의 합을 구현하기 어렵게 되는 환경이다. 그러므로, 본 연구의 결과가 운동수행내와 운동수행간 모두 이중과제에서 0 에 근접하는 값을 나타낸 것을 본 실험설계가 갖는 당연한 결과로 볼 수 있다. 이를 제어의 관점에서 보면 10N 을 지속적으로 유지하는 운동의 제한조건과 시소(seesaw) 구조의 회전 밸런스를 유지하는 운동 제한 조건은 두 가지가 상충하여 (i.e. conflict of interest between sub-tasks), 두 손가락들이 성공적인 과제수행을 위해 양공분산을 낼 수도 음공분산을 낼 수도 없는 상황을 중추신경계는 공분산을 0 에 가깝게 만드는 방식으로 해결책을 만들어내는 기전을 사용했다고 볼 수 있다.

또한 운동수행내의 분석에서, 노인에게서만 제한요소가 추가 유무에 따라 유의한 차이가 나타난 것은 제한요소가 추가 되었을 때에 운동수행을 위한 두 손가락의 실시간으로 협력할 수 있는 능력인 유연성(flexibility)이 노화로 감소했다고 볼 수 있다(Koh et al., 2015). 또한 운동 수행간 노인과 젊은이 사이 상호작용이 나타난 것은제한요소가 추가되지 않는 조건에서 노인이 젊은이에 비해 더 다양하고 복잡한 형태로 두 손가락의 조합을 구현하는 다양성(multiformity)을 크게 사용하며 운동수행을 반복적으로 구현시키는 재현성의 능력이 부족함으로 해석될 수 있다. 이러한 결과가 운동 수행간에서만 나타났다는 점이 본 연구에서 발견된 흥미로운 결과이다. 시너지(synergy)는 과제 목표를 달성하기 위한 운동수행 시 두 손가락의 협력의 능력(긍정적으로 협력 하였는가? 혹은 부정적으로 협력하였는가?)을 설명할 수 있는 변인이다(Shim et al., 2004; Latash et al., 2007). 이해를 돕기 위해 시너지의 값을 간단히 세가지로 나누어 설명하면, 첫 번째 시너지가 양수값이면 많은 경우에 두 손가락이 에러를 보상 (error compensation)하며 서로 협력작용 하였다고(이것을 두 손가락이 서로 협력하는 시너지가 긍정적으로 이루었다고 해석함) 설명할 수 있고, 0(zero) 값에 가까워지면 두 손가락이 서로 독립적이었다고 설명할 수 있으며, 시너지가 음수값을 나타내면 두 손가락이 에러를 증폭 (error amplification)하며 서로 협력작용을 이루었다(시너지가 서로 부정적으로 이루었다고 해석함)고 설명할 수 있다

본 연구결과, 과제의 목표를 달성하기 위한 운동수행내에서 노인과 젊은이 두 집단 모두 제한요소가 추가되지 않는 조건에서 두 손가락이 운동수행을 위해 긍정적인 시너지를 만들어내었고, 제한요소가 추가된 조건에서는 음수값을 나타내어 부정적인 시너지를 만들어냈음을 알 수 있다. 이것은 두 손가락의 제한요소가 추가되지 않는 조건에서 서로 협력작용을 잘 이루다가 이중과제에서는 서로 협력작용을 부정적으로 이루는 형태로 바뀐 것으로 해석할 수 있으며, 본 결과가 노인과 젊은이와 차이가 나타나지 않은 점은 노화가 운동수행내의 손가락 제어에 영향을 주지 않는 것으로 해석될 수 있다

반면, 운동 수행간에서는 상호작용이 나타났는데, 단일조건에서 노인과 젊은이 두집단 모두 유의차가 없는 긍정적인 시너지를 만들다가 이중과제 환경으로 바뀌면서 노인과 젊은이 모두 시너지 값이 감소하는 결과를 나타냈다. 이 결과에서 노인이 젊은이에 비해 이중과제에서 유의하게 시너지가 감소하는 결과는($t=2.140$)

노인이 젊은이에 비해 제약이 증가하는 환경에서 두 손가락이 서로 영향을 받지 않는 독립성을 갖는 시너지를 갖고 운동수행을 실시하였다는 것을 알 수 있다. 궁극적으로 노인은 젊은이에 비해 같은 과제를 반복적으로 실행하는 운동 수행에서 복잡한 과제 환경일수록 젊은이에 비해 두 손가락이 서로 시너지를 발휘하는 능력이 감소한다.

결론

본 연구의 목적은 노인과 젊은이를 대상으로 손가락을 이용한 과제 수행내(within trial)에서와 과제 수행간(between trial)에서 두가지의 다른 환경 조건(한가지 운동제한조건을 갖는 단순 과제 수행, 두 가지 운동제한조건을 갖는 이중 과제 수행)을 제시하여 다수지 시너지 변화를 규명하는데 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

과제수행내 다수지 시너지는 제한요소 추가 유무의 두 조건 모두에서 노인과 젊은이가 다르지 않았지만, 과제수행간에서는 제한요소가 추가된 과제에서 노인이 젊은이에 비해 다수지 시너지가 감소하였다. 따라서, 노화는 복잡한 과제 환경에서 같은 과제를 다양한 형태로 반복 수행 할수 있는 능력인 시너지를 감소하게 한다.

참고문헌

- Ambike, S., Mattos, D., Zatsiorsky, V., & Latash, M. (2016). Synergies in the space of control variables within the equilibrium-point hypothesis. *Neuroscience*, 315, 150-161.
- Bernstein, N. A. (1967). The co-ordination and regulation of movements.
- Enoka, R. M., Christou, E. A., Hunter, S. K., Kornatz, K. W., Semmler, J. G., Taylor, A. M., & Tracy, B. L. (2003). Mechanisms that contribute to differences in motor performance between young and old adults. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(1), 1-12.
- Gelfand, I. M., & Latash, M. L. (1998). On the problem of adequate language in motor control. *Motor control*, 2(4), 306-313.
- Grabiner, M. D., & Enoka, R. M. (1995). Changes in movement capabilities with aging. *Exercise and sport sciences reviews*, 23(1), 65-104.
- Hooke, A. W., Karol, S., Park, J., Kim, Y. H., & Shim, J. K. (2012). Handwriting: three-dimensional kinetic synergies in circle drawing movements. *Motor control*, 16(3), 329-352.
- Karol, S., Kim, Y.-S., Huang, J., Kim, Y. H., Koh, K., Yoon, B. C., & Shim, J. K. (2011). Multi-finger pressing synergies change with the level of extra degrees of freedom. *Experimental brain research*, 208(3), 359-367.
- Koh, K., Kwon, H. J., Yoon, B. C., Cho, Y., Shin, J. H., Hahn, J. O., . . . Shim, J. K. (2015). The role of tactile sensation in online and offline hierarchical control of multi-finger force synergy. *Exp Brain Res*, 233(9), 2539-2548. doi: 10.1007/s00221-015-4325-6
- Larsson, L., & Ansved, T. (1995). Effects of ageing on the motor unit. *Progress in neurobiology*, 45(5), 397-458.
- Latash, M. L., Scholz, J. F., Danion, F., & Schöner, G. (2002). Finger coordination during discrete and oscillatory force production tasks. *Experimental brain research*, 146(4), 419-432.
- Latash, M. L., Scholz, J. P., & Schöner, G. (2007). Toward a new theory of motor synergies. *MOTOR CONTROL-CHAMPAIGN*, 11(3), 276.
- Latash, M. L., & Zatsiorsky, V. M. (2009). Multi-finger prehension: control of a redundant mechanical system *Progress in Motor Control* (pp. 597-618): Springer.

- Olafsdottir, H., Zhang, W., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2007). Age-related changes in multifinger synergies in accurate moment of force production tasks. *Journal of Applied Physiology*, 102(4), 1490-1501.
- Park, J., Singh, T., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2012). Optimality versus variability: effect of fatigue in multi-finger redundant tasks. *Experimental brain research*, 216(4), 591-607.
- Park, J., Sun, Y., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2011). Age-related changes in optimality and motor variability: an example of multifinger redundant tasks. *Experimental brain research*, 212(1), 1-18.
- Ranganathan, V. K., Siemionow, V., Sahgal, V., & Yue, G. H. (2001). Effects of aging on hand function. *Journal of the American Geriatrics Society*, 49(11), 1478-1484.
- Scholz, J. P., Kang, N., Patterson, D., & Latash, M. L. (2003). Uncontrolled manifold analysis of single trials during multi-finger force production by persons with and without Down syndrome. *Experimental brain research*, 153(1), 45-58.
- Scholz, J. P., & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental brain research*, 126(3), 289-306.
- Shim, J. K., Lay, B. S., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2004). Age-related changes in finger coordination in static prehension tasks. *Journal of Applied Physiology*, 97(1), 213-224.
- Shim, J. K., Park, J., Kim, M. J., & KIm, S. J. (2011). Motor Variability and Synergy Research through Uncontrolled Manifold Analysis. *Journal of Korean Society of Sports Psychology*, 22(4), 127-142.
- Shinohara, M., Scholz, J. P., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2004). Finger interaction during accurate multi-finger force production tasks in young and elderly persons. *Experimental brain research*, 156(3), 282-292.
- Tuller, B., Turvey, M., & Fitch, H. L. (1982). The Bernstein perspective: II. The concept of muscle linkage or coordinative structure. *Human motor behavior: An introduction*, 253-270.
- Turvey, M. T., Shaw, R. E., & Mace, W. (1978). Issues in the theory of action: Degrees of freedom, coordinative structures and coalitions. *Attention and performance VII*, 557-595.
- Voelcker-Rehage, C., Stronge, A. J., & Alberts, J. L. (2006). Age-related differences in working memory and force control under dual-task conditions. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 13(3-4), 366-384.