

1 외부 자극에 따른 노인의 동적 균형 회복 능력 분석

2 **Analysis of the dynamic balance recovery ability by external perturbation in the elderly**

3
4 **Abstract**

5 **Objective:** The aim of the study was to investigate age-related ability of dynamic balance recovery from
6 perturbation response during standing.

7 **Method:** Six older and six younger adults participated in this study. External perturbation during
8 standing as pulling force applied at the pelvic level in anterior direction was provided to the subject.
9 Margin of stability was quantified as a measure of postural stability or dynamic balance recovery and
10 using principal component analysis (PCA), regularity of margin of stability (MoS) was calculated.

11 **Results:** Our result showed that in the older adults group, 60.99% and 28.63% of the total variance
12 were captured by first and second principal components (PCs), respectively, and in the younger adults
13 group, 81.95% and 10.71% of the total variance were captured by first and second PCs, respectively.

14 **Conclusion:** 90% of total variance explained by first two PCs indicates that the older adults decreases
15 regularity of MoS than the younger adults. Thus, the results of the current study suggest that the aging
16 is associated with non-regularity of dynamic postural stability.

17
18 *Keywords:* perturbation, aging, margin of stability, principal component analysis, regularity.

19
20
21 **Introduction**

22
23 노화로 인한 신경계의 변화는 자극 반응기간과 신경전도 속도에 영향을 미쳐 노인의 균형능력을 감소시키게
24 된다(Lee, Lee, & Song, 2014). 균형을 유지하는 능력은 일상생활에서 기본적인 신체활동을 수행하는데 있어서
25 필수요소이고 안정성을 지속적으로 유지해 가는 것을 의미한다(Cohen, Blatchly, & Gombash, 1993; Wade &
26 Jones, 1997; Woo & Park, 2015). 노인의 균형능력이 일상생활과 가장 관련이 큰 사고는 낙상이고, 이는
27 예기치 않게 바닥 또는 낮은 위치로 자세가 변경되는 사고로 정의된다. 또한 노인의 낙상 발생은 지속적으로
28 증가되는 추세이며, 이는 심각한 손상으로 이어져 여러 합병증을 유발한다(Kim & Im, 2017). Zecevic, Salmoni,
29 Speechley, & Vandervoort, (2006) 는 노인에게 있어 낙상은 신체의 협응, 느린 신체반응속도, 낮은 민첩성
30 그리고 급박한 자세변화 등의 운동제어적인 측면이 50%를 차지한다고 하였는데 이는 예상치 못한 방해와 같은
31 환경적인 원인에서 비롯된 신체 균형 이탈에 의해 발생한다고 하였다.

32 낙상과 관련된 노인의 동적 움직임을 파악하기 위해 갑작스럽게 생길 수 있는 환경적 변화와 급박한 자세변화를
33 유발시키는 퍼터베이션(perturbation: 교란) 자극을 통해 노인의 동적 균형 능력을 규명하는 연구들이 다수
34 진행되어 왔다(Pai, Rogers, Patton, Cain, & Hanke, 1998; Schulz, Ashton-Miller, & Alexander, 2006). 특히,
35 운동역학 분야에서 자세유지의 변화를 규명하기 위해 압력중심(CoP: Center of Pressure) 의 분석보다
36 신체질량중심(CoM: Center of mass)의 위치가 동적 자세에서의 속도, 다리길이 그리고 중력가속도의 정보를
37 포함하여 어떠한 위치로 이동할 것인가를 예측하기에 더 적합하다고 알려진 예측질량중심(xCoM: the
38 extrapolated center of mass)을 사용한 안정여유도(MoS: margin of stability) 분석 방법을 통하여 (Hasson,
39 Van Emmerik, & Caldwell, 2008; Hof, Gazendam, & Sinke, 2005) 동적 균형능력을 정량화하는 방법으로
40 사용해 왔는데, 이는 시공간적 분석이 가능한 동적 안정성을 정량화 시킬 수 있다는 특징이 있다(Bierbaum,
41 Peper, Karamanidis, & Arampatzis, 2010; Barrett, Cronin, Lichtwark, Mills, & Carty, 2012; Jang, Hong, &
42 Jang, 2016).

43 운동제어적인 측면에서 노화의 특징 중 하나는 인지 및 감각 운동 자원의 부족으로 인해 운동이나 움직임 수행 시
44 일정한 패턴이 나타나지 않는다는 무규칙성(non-regularity)이다(Eskofier, Federolf, Kugler, & Nigg, 2013).

45 노인의 규칙성이 감소된다는 연구는 여러 선행연구에서 찾아볼 수 있는데, Challis, (2006) 는 최대 수축 힘을
46 유발한 저축굴곡(plantar flexion) 동작에서 노화로 인한 운동단위(motor unit)의 감소가 근육의 협응 능력을
47 저하시켜 노인에게서 규칙성의 감소가 나타났다고 보고하였다. 또한 Verrel, Lövdén, Schellenbach, Schaefer,
48 & Lindenberger, (2009)는 보행 시 노인이 젊은이보다 Whole-body CoM 변화의 규칙성이 감소한다고 하였고,
49 Eskofier et al., (2013)도 보행 시 노인이 젊은이보다 큰 가변성이 나타난다고 보고하였는데, 위에서 제시한
50 연구들은 모두 주성분 분석(PCA: Principal components analysis)방법을 통하여 노인의 보행 동작 분석 시
51 규칙성이 감소하거나 가변성이 증가한다는 연구결과를 도출하였다. 이에 본 연구에서 노인의 동적 안정성의
52 변화 규명을 위해 주성분 분석방법을 통해, 노인이 동적 안정성을 유지하는 일정한 패턴을 갖는지 혹은 일정한
53 패턴을 잃는 무규칙성을 갖는지를 검증하고자 한다.

54 본 연구의 목적은 노인에게 외부 자극이 주어졌을 시, 동적 균형 능력이 회복되는 안정성을 규명하기 위하여
55 신체질량중심을 통한 안정여유도 분석과 주성분 분석방법을 이용한 노인의 동적 균형 회복의 규칙성 여부를
56 파악하는데 있다.

57
58

59 Method

60

61 1. Participants

62 본 연구에서는 하지 근골격계 질환이 없는 노인 6 명(female: 5, male: 1, age: 69.33 ± 2.87 yrs, height:
63 160.20 ± 6.10 cm, weight: 63.40 ± 7.31 kg)과 젊은이 6 명 (female: 6, age: 21.17 ± 6.04 yrs, height:
64 160.85 ± 3.38 cm, weight: 51.18 ± 3.65 kg)이 대상으로 참여 하였다. 모든 대상자는 실험에 참여하기 전 실험
65 과정에 대한 충분한 설명을 숙지하였으며 동의서를 작성한 후 자발적으로 본 실험에 참여하였다.

66

67 2. Measurements

68 본 연구는 6 대의 적외선 고속 카메라를 이용하여 퍼터베이션 자극 시 움직임을 촬영하였으며(100 field/sec,
69 110 Shutter speed 1/500, 6Hz low pass filter), 19 개의 반사마커를 각 피험자의 전신에 부착하여(머리, 어깨,
70 팔꿈치, 손목, 손가락, 대퇴골, 무릎, 복숭아뼈, 엄지발가락) 전신의 위치 데이터를 확보하였다.

71 실험 절차는 모든 연구 대상자가 자연스럽게 선 자세를 유지한 채 정면을 응시하도록 하였으며 허리에
72 퍼터베이션 벨트를 착용하였다. 각 피험자의 기저면(BoS: Base of support)의 경계는 각각 피험자의 어깨
73 넓이를 측정 한 뒤 개인에 맞게 표기하였다. 퍼터베이션 자극은 허리에 착용한 벨트와 연결된 줄이 모터와 연결된
74 스프링의 힘으로 인해 피험자의 앞 방향으로 최대한 잡아당겨진 뒤 놓아지는 형태로 주어졌으며, 2~30kg 범위
75 내의 8 가지 강도의 조건을 제시하여 실험을 진행하였다(Park, Koh, Lee, Shim, & Park, 2016). 퍼터베이션
76 자극이 주어진 후, 각각의 피험자가 처음으로 한 쪽 발의 무게중심이 완전하게 앞으로 이동된 강도는 총 12 명의
77 피험자에서 1 명은 9kg, 5 명은 13kg, 4 명은 20kg, 그리고 2 명은 24kg 의 조건에서 표집되었다. 동작의
78 이벤트는<Figure 1>과 같이 설정하였다. 양 발이 모두 기저면 내에 놓인 상태에서 퍼터베이션 자극이 이루어지기
79 전 준비 자세를 취하고 있는 지점인 Event 1, 퍼터베이션 자극이 주어진 뒤 무게중심이 이동되어 한 쪽 발이 toe-
80 off 된 지점을 Event 2, 그리고 toe-off 된 발이 완전하게 무게중심을 이동하여 heel contact 된 지점을 Event
81 3 으로 구분하였다. 또한 Event 1 에서부터 Event 2 까지를 Phase 1, Event 2 에서부터 Event 3 까지를 Phase
82 2 로 설정하였다. 분석 구간은 Event 1 에서부터 2 초 이후 지점까지로, 각 피험자 마다 Event 3 에 해당하는 heel
83 contact 지점이 다르기 때문에 모든 피험자들 중 가장 늦게 heel contact 된 피험자를 기준으로 최대한의 여유
84 지점인 2 초 후까지를 지정하여 분석을 실시하였다.

85

86

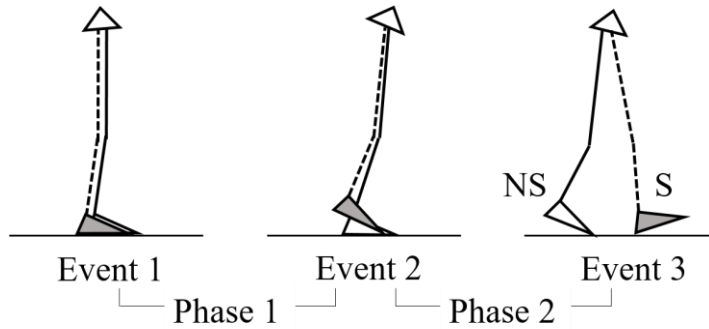


Figure 1. Analysis setting when the stepping event; NS: non-stepping leg; S: stepping leg.

3. Data processing

6 개의 적외선 카메라에서 얻어진 위치데이터를 이용하여 신체질량중심을 산출 하였으며, Kwon3d XP software 를 이용하여 분석하였다. 또한 주성분 분석방법을 통한 주성분 산출을 위해 MATLAB 을 이용하였다.

3.1. 안정여유도 산출

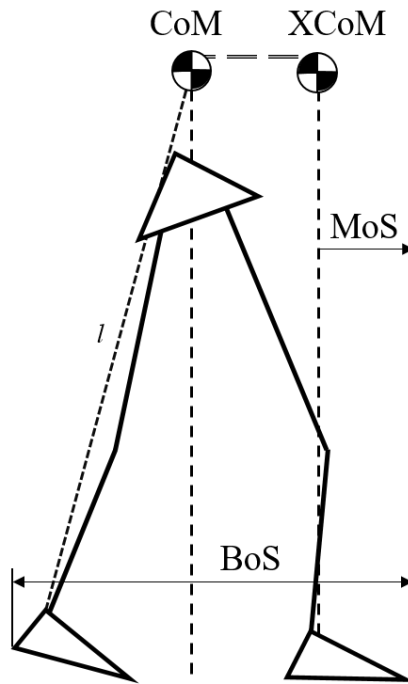
Hof et al., (2005)는 동적 신체질량중심을 예측하기 위해서 다음과 같은 수식을 통해 예측질량중심을

산출하였다
$$XCoM = PCoM + \left(\frac{VCoM}{\sqrt{\frac{g}{l}}} \right)$$
. 이 때, PCoM 은 신체질량중심의 위치이고, VCoM 은

신체질량중심의 속도이다. l 은 다리 길이로 본 연구에서는 준비자세에서의 양 발의 복숭아뼈 위치데이터에서부터 신체질량중심까지의 길이로 사용하였고, g 는 중력 가속도이다. 본 연구에서는 예측질량중심과 기저면의 관계를 통해 안정여유도를 분석하였다. 안정여유도는 기저면에서부터 예측질량중심까지의 거리(m)를 다음과 같은 수식을 통해 산출하였다($MoS = BoS - XCoM$) (Hof et al., 2005). 또한, 안정여유도 분석 시 기저면을 스텝핑하지 않은 다리(무게중심의 이동이 없는, 지지하고 있는 다리)의 뒤꿈치 마커를 기준점으로 하여 퍼터베이션 자극을 받은 후 무게중심이 완전히 이동 된 후 한 발 앞으로 스텝핑 한 다리의 엄지발가락 마커까지로 정의하였다(Barrett et al., 2012)(Figure 2).

3.2. 주성분 분석

주성분 분석은 선형 변환 기법이며, 고차원의 데이터를 저차원의 데이터로 변환하여 데이터를 축소하는 기법이다(Jolliffe, 2011). 관찰된 데이터들 중에서 서로 연관성이 있는 변수들을 선형의 변환 형태로 나타내어 변환된 좌표계의 기저벡터를 주성분(PC: Principal components)이라고 한다. 주성분 분석에서 전체 분산을 포착하는데 필요한 구성 요소의 수는 데이터 규칙성의 지표이며, 이는 가능한 많은 상관관계가 있는 변수들을 주성분이라 불리는 적은 수의 비 상관 변수로 변환하는 분석방법이다. 특히, 인간 움직임의 운동학적 패턴을 정량화 하는데 주로 사용되어 왔으며(Daffertshofer, Lamoth, Meijer, & Beek, 2004), 움직임의 규칙성을 분석하는데 적절한 분석방법으로 알려져 왔다(Zamparo, Zorzi, Marcantoni, & Cesari, 2015). 본 연구에서는 지정된 전 구간에서 분석된 노인과 젊은이의 안정여유도 값들을 주성분 분석으로 분석하였고, 각 집단의 안정여유도의 전체 분산을 설명하는데 필요한 주성분의 분산 값을 규칙성의 지표로 사용하였다.



118
119

Figure 2. Schematic defining the parameters used to compute to margin of stability(MoS); l : leg length; XCoM: the extrapolated center of mass; CoM: center of mass; BoS: base of support.

122
123

4. Statistical analysis

125 자료처리는 설정된 이벤트 및 구간의 안정여유도 값의 분석을 두 집단 간에 독립표본 t-test 를 통해 실시하였다.
126 모든 통계처리는 SPSS Statistics 21.0 을 이용 하였으며 유의수준은 5%로 설정하였다.

127 Results

128

1. 안정여유도 결과

130 퍼터베이션 자극 시 두 집단에 따른 안정여유도 값 산출 및 통계 결과는 <Table 1>와 같이 나타났다. Event 1과
131 Event 2에서의 안정여유도 값의 차이인 Phase 1($t=.616$) 그리고 Event 2와 Event 3에서의 안정여유도 값의
132 차이인 Phase 2($t=.378$) 에서 노인과 젊은이 간에 유의한 차이는 나타나지 않았다.

133 노인과 젊은이의 안정여유도 평균과 표준편차의 패턴 그래프 결과는 <Figure 3>과 같이 나타났다. 두 집단의 평균
134 그래프의 패턴과 표준편차의 범위의 차이가 다르게 나타났다는 것을 알 수 있다.

135

Table 1. The results of margin of stability(MoS).

Event	Groups	M±S.D (m)	tvalue
Phase 1	elderly	0.19±0.08	.616
	young	0.21±0.06	
Phase 2	elderly	0.18±0.02	.378
	young	0.19±0.05	

136

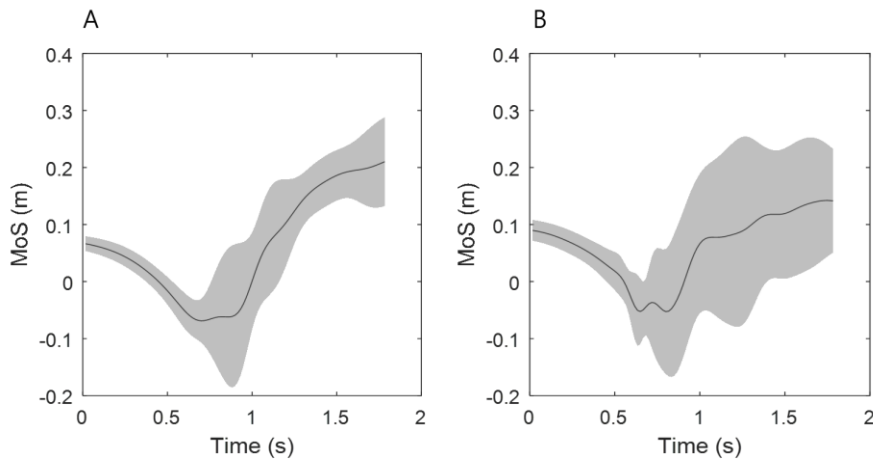


Figure 3. Pattern graphs of mean and standard deviation of margin of stability(MoS) across subjects for each group; A: young group; B: elderly group.

2. 안정여유도의 규칙성 결과

본 연구에서는 안정여유도의 규칙성 분석을 위해 주성분 분석 방법을 사용하여 퍼터베이터 자극 시 노인과 젊은이의 안정여유도 데이터의 구성 요소를 분석 하였다.

노인과 젊은이의 안정여유도 결과를 주성분 분석에 적용한 결과는 <Figure 4>와 같다. 노인은 첫 번째 PC가 60.99%, 두 번째 PC가 28.63%로 나타났고, 젊은이는 첫 번째 PC가 81.95%, 두 번째 PC는 10.71%로 나타났다. 젊은이는 노인과 비교할 때 높은 수준의 규칙성을 보였으며, 이는 노인이 젊은이보다 낮은 수준의 규칙성을 보이는 결과로 나타났다.

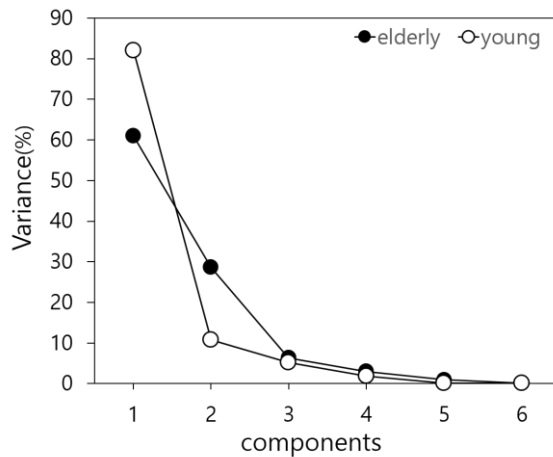


Figure 4. The percentage of the total variance explained by each principal component

Discussion

최근 노인들의 신체능력을 평가하는 연구에서 동적 불균형 상태를 인위적으로 유발한 뒤 동적 균형 감각을 회복하는 능력의 기전을 운동역학적으로 밝히고자 하는 연구들이 많이 진행되고 있다(Menant et al., 2008; Bierbaum et al., 2010; Barrett et al., 2012). 특히 노인에게 나타나는 동적 균형 회복 능력을 안정여유도 분석을 통해 정량화 한 선행연구들이 있었다. Barrett et al., (2012)는 노인에게 tether-release 방법으로 퍼터베이션을 준 상황을

160 반복적으로 연출한 상태에서의 안정여유도 분석을 통해 균형 회복 능력을 정량화 하여 동적 균형 감각을 회복하는
 161 능력의 기전을 밝혔다. 또한, Bierbaum et al., (2010) 는 보행 시 지면이 갑작스럽게 변화되는 동적 불균형
 162 상황에서 본 연구 방법과 같은 안정여유도 분석 방법을 통해 노인의 안정여유도가 젊은이보다 더 크게 감소하는
 163 결과가 나타났다고 하여 불균형 상태에서 균형 감각을 회복하는 능력을 검토하였다.

164 본 연구결과, 노인의 퍼터베이션 자극 이후 동적 안정성을 되찾는 동작까지를 젊은이와 비교한 Phase 1과 Phase 2
 165 동작에서의 집단간 평균의 차이 값을 산출해 보면 노인이 젊은이보다 안정 여유도 거리가 더 짧은 것으로
 166 나타났지만 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. <Figure 3> 에서 보여주고 있는 패턴 그래프는 노인의
 167 실시간 안정여유도 패턴이 젊은이에 비해 불규칙한 것을 알 수 있고, 또한 표준편차의 범위가 매우 큰 것을 알 수
 168 있다. 따라서 본 연구에서 두 집단의 안정여유도 산출 결과, 특히 노인에게 보여지는 균형 안정화의 능력이 각각
 169 매우 다른 패턴으로 나타나는 것으로 보여진다.

170 주성분 분석은 움직임의 규칙성을 정량화시키는 분석방법으로, 운동학 및 운동제어 분야에서 다양하게 사용되어
 171 왔으며(Verrel et al., 2009; Jolliffe, 2011; J. Park, Sun, Zatsiorsky, & Latash, 2011; Eskofier et al., 2013), 본
 172 연구에서는 노인의 동적 균형을 안정화 시키는 과정에서 규칙성의 여부가 나타나는지를 알아보기 위해
 173 사용되었다. 본 연구결과 <Figure 4>에서 나타난 바와 같이, 노인 집단에서는 첫 번째 PC가 60.99%, 두 번째
 174 PC가 28.63%로 나타나 첫 번째 PC와 두 번째 PC의 분포도가 퍼져있는 것을 알 수 있고 (첫 번째와 두 번째 PC
 175 차이는 32.36 %), 젊은이 집단은 첫 번째 PC가 81.95%, 두 번째 PC는 10.71% (첫 번째와 두 번째 PC 차이는
 176 71.24 %)로 나타났다. 이 결과로 젊은이가 첫 번째 분산에서 규칙성 있는 안정여유도가 나타났음을 알 수 있고,
 177 이에 반해 노인은 주성분이 대표성을 보이지 않는 분산을 보여 젊은이 보다 무규칙성이 나타났음을 알 수 있다.
 178 노인 움직임의 특징 중 가변성이 크거나 무규칙성이 나타난다는 선행 연구들이 진행되어 왔다. Stergiou, Giakas,
 179 Byrne, & Pomeroy, (2002)의 연구에서 노인인 젊은이의 보행 시 지면반력의 가변성을 분석한 결과, 수직방향에서
 180 두 집단간의 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 노인 집단의 피험자 간의 변동계수(inter-subjects coefficient of
 181 variation)가 수직지면반력에서 11.89로 가장 크게 나타나 노인 피험자 간의 패턴의 폭이 크게 분포 되어있다는
 182 결과를 보고하였다. 또한 Verrel et al., (2009)의 연구에서도, 트레이드밀 보행 시 동시에 발생하는 인지 과제가
 183 주어졌을 때 노인과 젊은이의 보행 패턴을 전신 신체질량중심의 변화를 주성분 분석으로 규명하였는데, 노인의
 184 보행 패턴이 젊은이에 비해 규칙적이지 않은 양상을 나타냈다는 결과를 보고하였다. 위에 제시된 선행연구의
 185 결과는 본 연구결과에서 나타난 노인의 동적 균형을 안정화 시키는 능력인 안정여유도가 무규칙성을 갖는다는 본
 186 연구결과를 지지한다

187 궁극적으로 노인에게 예상치 못한 불균형의 자극이 발생된 상황에서 동적 균형을 회복하는 능력을 분석한
 188 안정여유도 값의 결과, 노인과 젊은이 간에 동작에 따른 통계적 유의한 차이가 나타나지 않았다. 하지만 안정여유도
 189 분포를 주성분으로 분석 시 각각의 노인들 마다 동적 균형을 회복하는 과정에서 안정성을 유지하는 능력이 각기
 190 다른 패턴으로 나타나는 신체 안정화의 무규칙성을 발견할 수 있었다. 따라서, 노인들은 동적 균형을 회복하는
 191 능력에서 일관성이 없으며 개별적으로 다른 특징을 나타낸다는 것으로 사료된다.

192 본 연구결과를 바탕으로 노인들은 일정한 균형능력의 패턴을 보이지 않았고, 무규칙성의 특성을 나타냈기 때문에
 193 추후 노인들을 위한 균형 능력을 증진 시키는 운동 프로그램이나 훈련을 제시하는 방법에 조금 더 개인적 동적
 194 균형능력을 고려한 다양한 폭의 운동 방법이 필요할 것으로 생각된다.

196 Conclusion

198 본 연구는 6명의 노인과 6명의 젊은이를 대상으로 노인에게 외부 자극이 주어졌을 시, 동적 균형 능력이 회복되는
 199 안정성을 규명하기 위하여 신체질량중심을 통한 안정여유도 분석과 주성분 분석방법을 통한 노인의 동적 균형
 200 회복의 규칙성 여부를 파악하는데 목적이 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

201 노인과 젊은이 간에 동작에 따른 안정여유도의 통계적 유의한 차이가 나타나지 않았지만, 안정여유도 분포를
 202 주성분으로 분석 했을 때 각각의 노인들 마다 동적 균형을 회복하는 과정에서 안정성을 유지하는 능력이 각기 다른
 203 패턴으로 나타나는 신체 안정화의 무규칙성을 발견할 수 있었다. 따라서, 노인들은 동적 균형을 회복하는 능력에서

204 일관성이 없으며 개별적으로 다른 특징이 나타남을 발견하였다.

205

206 **Reference**

207

208

209 Barrett, R. S., Cronin, N. J., Lichtwark, G. A., Mills, P. M., & Carty, C. P. (2012). Adaptive recovery responses to repeated

210 forward loss of balance in older adults. *Journal of biomechanics*, 45(1), 183-187.

211 Bierbaum, S., Peper, A., Karamanidis, K., & Arampatzis, A. (2010). Adaptational responses in dynamic stability during

212 disturbed walking in the elderly. *Journal of biomechanics*, 43(12), 2362-2368.

213 Challis, J. H. (2006). Aging, regularity and variability in maximum isometric moments. *Journal of biomechanics*, 39(8),

214 1543-1546.

215 Cohen, H., Blatchly, C. A., & Gombash, L. L. (1993). A study of the clinical test of sensory interaction and balance.

216 *Physical Therapy*, 73(6), 346-351.

217 Daffertshofer, A., Lamoth, C. J., Meijer, O. G., & Beek, P. J. (2004). PCA in studying coordination and variability: a tutorial.

218 *Clinical biomechanics*, 19(4), 415-428.

219 Eskofier, B. M., Federolf, P., Kugler, P. F., & Nigg, B. M. (2013). Marker-based classification of young–elderly gait pattern

220 differences via direct PCA feature extraction and SVMs. *Computer methods in biomechanics and biomedical*

221 *engineering*, 16(4), 435-442.

222 Hasson, C. J., Van Emmerik, R. E., & Caldwell, G. E. (2008). Predicting dynamic postural instability using center of mass

223 time-to-contact information. *Journal of biomechanics*, 41(10), 2121-2129.

224 Hof, A., Gazendam, M., & Sinke, W. (2005). The condition for dynamic stability. *Journal of biomechanics*, 38(1), 1-8.

225 Jang, Y. K., Hong, S. Y., & Jang, I. (2016). Gait Stability in K-pop Professional Dancers. *Korean Journal of Sport*

226 *Biomechanics*, 26(4), 377-382.

227 Jolliffe, I. (2011). Principal component analysis *International encyclopedia of statistical science* (pp. 1094-1096): Springer.

228 Kim, S. K., & Im, G. J. (2017). Risk of Falls in Dizzy Patients. *Research in Vestibular Science*, 16(1), 10-16.

229 Lee, H.-K., Lee, J.-C., & Song, G.-H. (2014). The effects of rhythmic sensorimotor training in unstable surface on balance

230 ability of elderly women. *Journal of the Korean Society of Physical Medicine*, 9(2), 181-191.

231 Menant, J. C., Perry, S. D., Steele, J. R., Menz, H. B., Munro, B. J., & Lord, S. R. (2008). Effects of shoe characteristics on

232 dynamic stability when walking on even and uneven surfaces in young and older people. *Archives of physical*

233 *medicine and rehabilitation*, 89(10), 1970-1976.

234 Pai, Y.-C., Rogers, M. W., Patton, J., Cain, T. D., & Hanke, T. A. (1998). Static versus dynamic predictions of protective

235 stepping following waist–pull perturbations in young and older adults. *Journal of biomechanics*, 31(12), 1111-

236 1118.

237 Park, D.W., Koh, K., Lee, S. R., Shim, J. K., & Park, Y. S. (2016). Analysis of Postural Stability in Response to External
238 Perturbation Intensity in Dancers and Non-dancers. *Korean Journal of sports biomechanics*, 26(4), 427-432.

239 Park, J., Sun, Y., Zatsiorsky, V. M., & Latash, M. L. (2011). Age-related changes in optimality and motor variability: an
240 example of multifinger redundant tasks. *Experimental Brain Research*, 212(1), 1-18.

241 Schulz, B. W., Ashton-Miller, J. A., & Alexander, N. B. (2006). Can initial and additional compensatory steps be predicted
242 in young, older, and balance-impaired older females in response to anterior and posterior waist pulls while
243 standing? *Journal of biomechanics*, 39(8), 1444-1453.

244 Stergiou, N., Giakas, G., Byrne, J. E., & Pomeroy, V. (2002). Frequency domain characteristics of ground reaction forces
245 during walking of young and elderly females. *Clinical biomechanics*, 17(8), 615-617.

246 Verrel, J., Lövdén, M., Schellenbach, M., Schaefer, S., & Lindenberger, U. (2009). Interacting effects of cognitive load and
247 adult age on the regularity of whole-body motion during treadmill walking. *Psychology and aging*, 24(1), 75.

248 Wade, M. G., & Jones, G. (1997). The role of vision and spatial orientation in the maintenance of posture. *Physical Therapy*,
249 77(6), 619-628.

250 Woo, B. h., & Park, Y. S. (2015). The effects od lower limb muscle activity on posture stability and ground type during gait
251 in elderly women. *Korean Journal of Sport Biomechanics*, 25(1), 77-84.

252 Zamparo, P., Zorzi, E., Marcantoni, S., & Cesari, P. (2015). Is beauty in the eyes of the beholder? Aesthetic quality versus
253 technical skill in movement evaluation of Tai Chi. *PloS one*, 10(6), e0128357.

254 Zecevic, A. A., Salmoni, A. W., Speechley, M., & Vandervoort, A. A. (2006). Defining a fall and reasons for falling:
255 comparisons among the views of seniors, health care providers, and the research literature. *The Gerontologist*,
256 46(3), 367-376.

257