

## Effects of Neuromuscular Exercise with Biofeedback on Muscle Tone and Proprioception in Elderly Female with Total Knee Arthroplasty

Gyu-Ho Choi\*, Jin-Wook Lee\*\*

\*Ph, D. Dept. of Physical Education in General Graduate School, Dankook University, Yongin, Korea

\*\*Professor, Dept. of Exercise Prescription & Rehabilitation, Dankook University, Cheonan, Korea

### [Abstract]

The purpose of this study was to investigate the effects of applying a neuromuscular exercise program using biofeedback on muscle tone and proprioception in elderly female patients undergoing TKA. The subjects of this study were 10 subjects in the EG and 10 subjects in the CG who underwent biofeedback neuromuscular exercise program, and performed 3 times a week for 40 minutes for 8 weeks. The results of this study showed that after applying biofeedback and neuromuscular exercise program, muscle tone and stiffness in the VM, VL, and RF significantly increased, and proprioception also showed significant decreases in the changes in COP, TDAP, TDML, MVAP, MVML, and TD. Therefore, the application of biofeedback and neuromuscular exercise programs is thought to have a positive effect on the functional aspects of elderly women by improving the muscle function of the Quadriceps muscle and the proprioceptive function of the unstable knee joint after TKA.

▶ **Key words:** Elderly Women, Total Knee Arthroplasty, Biofeedback, Neuromuscular Exercise, Muscle Tone, Proprioception

### [요 약]

이 연구의 목적은 바이오피드백을 적용한 신경근 운동프로그램의 적용이 무릎 전치환술 여성 노인 환자의 근 긴장도 및 고유수용감각에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 이 연구 대상자는 바이오피드백 신경근 운동프로그램 운동군(EG) 10명과 대조군(CG) 10명으로 선정하였으며, 8주간 주 3회 40분간 실시하였다. 이 연구 결과 안쪽넓은근, 가쪽넓은근, 넙다리곧은근에서 근 긴장도와 근 경직도가 모두 유의하게 증가하였으며 고유수용감각에서도 바이오피드백과 신경근 운동프로그램 적용 후 COP의 변화에서 전후변위, 좌우변위, 전후평균속도, 좌우평균속도, 총변위에서 모두 유의하게 감소하는 결과를 보였다. 이 연구 결과를 종합해 보면 바이오피드백과 신경근 운동프로그램의 적용은 TKA 후 넙다리네갈레근의 근 기능 향상과 더불어 불안정한 무릎관절 고유수용감각의 기능을 향상시켜 여성 노인의 기능적인 측면에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 생각된다.

▶ **주제어:** 여성 노인, 무릎 전치환술, 바이오피드백, 신경근 운동, 근 긴장도, 고유수용감각

• First Author: Gyu-Ho Choi, Corresponding Author: Jin-Wook Lee

\*Gyu-Ho Choi (gyuhochoi@dankook.ac.kr), Dept. of Physical Education in General Graduate School, Dankook University

\*\*Jin-Wook Lee (12180386@dankook.ac.kr), Dept. of Exercise Prescription & Rehabilitation, Dankook University

• Received: 2025. 02. 18, Revised: 2025. 03. 18, Accepted: 2025. 03. 20.

## I. Introduction

골관절염(Osteoarthritis, OA)은 관절을 구성하는 연골과 주변 조직의 퇴행성 변화로 인해 발생하는 만성 관절 질환으로, 지난 30년 동안 전 세계적으로 발병률이 크게 증가하였다. 1990년에는 약 2억 4800만 명이 이 질환을 앓았던 반면, 2019년에는 5억 2800만 명으로 113% 이상 증가한 것으로 나타났으며[1], 특히 무릎 관절은 골관절염 환자의 83%에서 영향을 받는 주요 관절로, 이에 대한 관심이 필요하다[2].

OA는 다양한 연령층에서 발생할 수 있지만, 주로 중년 이후에 발병률이 급격히 증가하며[1], 노년층에서는 두 번째로 흔한 질환으로 꼽힌다. 특히 여성에서의 발병률이 남성보다 높으며[3], 기능 상실과 통증을 유발하여 노년기 장애의 주요 원인 중 하나로 작용하고 있다[4].

무릎관절의 OA는 원인에 따라 일차성과 이차성으로 구분된다. 일차성 골관절염은 유전적 요인, 연령 관련 생리학적인 변화, 인종 및 생체역학적 요인에 의해 영향을 받으며[5], 이차성 골관절염은 외상 후 손상, 이형성, 감염, 염증 및 생화학적 요인에 의해 발생할 수 있다[6].

병리학적 기전은 기계적, 생화학적, 세포적, 유전적 및 면역학적 요인 간의 복잡한 상호작용을 한다[5]. 무릎관절 OA의 주요 증상은 관절통, 부종, 관절 경직을 포함하며, 이러한 증상은 수면 방해, 피로, 우울감 및 삶의 독립성을 저하시켜 삶의 질을 감소시키는 것으로 보고하고 있다[3].

무릎 골관절염은 관절 연골의 손실, 관절하 뼈의 비정상적 재형성 및 마모, 골극 형성, 인대 이완, 근 위축, 윤활막의 염증 및 팽창 등을 특징으로 하며, 이러한 변화는 관절 기능의 저하를 유발합니다[7]. 골관절염은 관절 연골의 손상과 주변 뼈의 변화를 동반하는 대표적인 퇴행성 관절 질환으로 적절한 관리와 치료가 필요합니다.

1957년 Kellgren과 Lawrence에 의해 최초로 고안된 방사선학적 분류 체계는 무릎 관절 OA를 구분하는 데 있어 현대 사회에서도 가장 널리 사용되고 있는 공식적인 방법이다[8]. 이 분류 체계는 방사선 사진을 기반으로 무릎 관절 골 관절염의 단계를 0단계에서 4단계까지 나누며, 이는 골 관절염의 중증도와 밀접한 상관관계가 있다. 0단계는 골 관절염이 없는 상태를 의미하고, 4단계는 심각한 골 관절염 증상이 있는 상태를 나타낸다. 특히 KL-3단계와 KL-4단계에서는 주로 무릎 관절의 전치환술(Total Knee Arthroplasty, TKA)이 필요하다. TKA는 진행성 무릎관절 OA 환자의 통증 완화와 기능 회복을 위한 가장 효과적인 수술 중 하나로[7]. 주로 말기 무릎 관절 골 관절염 환

자에게 효과적인 치료법으로 널리 활용되고 있다[9]. OA로 인한 TKA는 매년 약 348만 건으로 발생률은 약 673% 증가하였으며, 2030년까지 TKA 수술 건수가 기하급수적으로 증가할 것으로 예상되고 있다[10,11].

TKA는 OA 환자의 통증을 효과적으로 완화시키고 기능적 향상을 도모하지만, 노인 환자의 경우 노화로 인해 운동 단위가 감소하면서[12] 건강한 사람에 비해 근력과 기능 회복이 더 어려울 수 있다[13-15]. 또한, 관절염으로 인해 손상된 관절 공간을 복원하는 과정에서 남아 있는 힘줄과 관절낭 등의 조직을 봉합하거나 제거하게 되며[16], 이로 인해 신체 내 기계적 수용체에 영향을 미쳐 움직임 조절과 근신경계 기능이 저하되고 고유수용감각 손실이 발생할 수 있다[17]. 고유수용감각과 근신경계 기능 저하, 자세 조절 및 근력 감소는 관절의 불안정성을 높이고[18], 통증 및 균형 장애와 관련되어 낙상의 위험을 증가시킬 수 있다. 따라서 OA 및 TKA 환자에게 재활운동은 필수적인 중재방법이며[19], 통증 완화, 신체 기능 향상, 삶의 질 개선에 크게 기여하는 것으로 보고되었다[20].

TKA 후 운동 프로그램으로 보행 재교육, 관절 가동 범위 운동, 근력 강화 운동, 고유수용감각 운동 등을 포함하며[21], 특히 최적의 관절 가동 범위 확보, 넵다리네갈래근의 근력 회복, 고유수용감각 회복이 중요한 요소로 강조된다[22,23]. 또한 통증 경감과 근력 개선을 목적으로 한 운동 프로그램의 적용은 기능적 안전성 확보에 효과적이며[24]. 하지의 근력 강화를 통한 무릎 관절의 안정성을 높이고 관절에 가해지는 부하를 줄여 스트레스를 제한하도록 권장하고 있다.

TKA 후 근신경계 기능 저하, 고유수용감각 손실, 근력 감소를 예방하기 위해 신경근 전기자극치료(Neuromuscular Electrical Stimulation, NMES)가 사용되고 있으며, Empi 300PV와 같은 NMES 장비가 운동과 병행하여 활용되고 있다. NMES는 수술 후 신경 활성화와 축삭 돌기 형성을 포함한 신경 재생 초기 단계를 촉진하는데 효과적이며[25], 신경성 근 기능 약화 및 말초 신경 회복에도 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다[26]. 선행연구를 살펴보면 TKA 환자들에게 NMES를 적용하면 넵다리네갈래근의 근력과 보행 능력, 환자 설문 결과, 계단 오르기 능력, 고유수용감각 등이 향상되는 것으로 보고되었다. 특히 NMES의 적용은 수술 후 2주부터 52주까지 넵다리네갈래근과 넵다리세갈래근의 최대 자발적 등척성 수축(Maximal Voluntary Isometric Contraction, MVIC)을 효과적으로 개선하는 데 기여하는 것으로 확인되었으며[27]. 다양한 환자 집단에서 근 기능 향상을 유도하

는 데 유용한 방법으로 사용되고 있다[28-32].

근 기능 중 근 긴장도(Muscle Tone: MT)는 이완된 근육의 긴장도 또는 수동적 스트레칭에 대한 저항 및 신체부위가 수동적으로 움직일 때 검사자가 느끼는 저항으로 정의되며[33,34] MT는 해부학적 연결성에서 비롯되어 신경학적인 앞먹임 및 뒤먹임 시스템에 의해 조절되는 운동제어의 구성요소이다[35]. 신체 자세를 유지하고 활동적인 움직임을 보장하기 위해 MT는 기본적인 조건이며[36] 적절한 MT가 없다면 운동의 기능 및 공간상에서 관절의 위치를 감지하는 능력이 손상될 수 있다[37].

손상된 움직임과 신체 능력을 개선하기 위해, TKA 후 환자에게 근 신경계 기능과 고유수용감각을 강화할 수 있는 운동 프로그램이 필요하며, 다양한 운동을 통해 신경근 조절과 고유수용감각을 향상시킨다면 환자의 기능적 한계를 감소시키고, 활동적인 일상생활을 가능하게 하여 환자의 자신감을 증진시킬 수 있다. 이는 궁극적으로 TKA 환자에게 장기적인 이점으로 작용할 것이다.

따라서 본 연구는 여성 노인 환자를 대상으로 무릎관절 골관절염 전치환술(TKA) 후 바이오피드백을 적용한 신경근 강화 운동프로그램이 고유수용감각과 근 긴장도에 미치는 영향을 알아보고자 실시되었다.

## II. Methods

### 1. Subjects

본 연구의 대상자는 G도 A시에 소재를 둔 C정형외과에서 무릎 관절 골관절염(OA)으로 인해 전치환술(TKA)을 실시한 65세 이상 여성 노인 환자를 대상으로 통제군 10명 실험군 10명으로 분류해 총 20명으로 구성하였다. 통제군에게는 바이오피드백을 제외하고 신경근 운동프로그램만 적용하였으며 실험군에는 바이오 피드백을 적용한 신경근 운동프로그램을 동시 적용하였다.

본 연구에 앞서 대상자들에게 연구에 대한 방법과 내용 등을 충분히 설명하였으며 연구에 참여한다는 동의서 또한 작성하였다.

최근 3개월 이내에 골관절염(OA)으로 인한 무릎관절 전치환술(TKA)을 제외하고 스포츠 손상이나 다른 이유등으로 인해 타 부위에 수술적 처치를 받은 환자의 경우 본 연구 대상에서 제외하였다. 본 연구 대상자의 신체적 특성은 Table 1. 과 같다.

Table 1. Subject Characteristic

Variable	EG(n=10)	CG(n=10)
Age(yr)	67.40±8.40	69.00±7.46
Height(cm)	157.11±6.37	156.02±6.04
Weight(kg)	63.17±3.84	65.52±8.64
Fat(%)	41.12±2.79	41.50±4.63
SMM(kg)	19.79±1.49	19.80±2.96

Mean±SD, EG: Experiment Group, CG: Control Group

### 2. Body Composition

신장과 체중은 자동 신장 체중계(GL-150, G-Tech International., LTD, Korea)를 사용하여 측정하였으며 체성분 측정기(270, Inbody, Korea)를 사용하여 체지방량 및 골격근량을 측정하였다.

### 3. Biofeedback

바이오 피드백의 적용은 휴대용 Empi 300PV 자극기(Empi Inc, a DJO Global Company, St Paul, Minnesota)를 사용하여 실시하였으며 효과적인 넙다리내갈레근의 최대 자발적 등척성 근수축(Maximal Voluntary Isometric Contractions: MVIC)을 생성하기 위해 Laufer 등[38]이 사용한 휴대용 장치와 동일한 파형의 자극으로 실시하였다.

신경근 전기 자극 치료기(Neuro-Muscular Electrical Stimulation: NMES)의 적용 시간은 운동 시간과 동일하게 적용하였으며 전기적 신호를 전달하는 패드의 적용은 안쪽넓은근(Vastus Medialis: VM), 가쪽넓은근(Vastus Lateralis: VL), 넙다리곧은근(Rectus Femoris: RF)에 적용하였다[39].



Fig. 1. NMES

### 4. Muscle Tone

마이오톤은 3가지 기계적 특징의 대한 데이터를 제공하며 F(Frequency)는 근 긴장도로 근육의 내재적 긴장을 나타내며 S(Stiffness)는 근육의 외부 힘에 대한 저항으로 경직도를 나타내며 D(Elasticity)는 근육 조직이 외부의 충격으로부터 초기 상태로 돌아가는 탄력성을 의미한다.

근 긴장도를 평가하기 위해 마이오톤(MyotonPRO, Myoton AS, Estonia) 장비를 사용하였으며 환측 다리 근육인 안쪽넓은근(VM), 가쪽넓은근(VL), 넙다리곧은근(RF)에 적용하였다. 마이오톤의 측정은 근육별로 3회 측정하였으며 이 중 평균값의 데이터를 사용하였으며 측정은 Ramazanoolu등[40]의 방법에 따라 적용하였다.

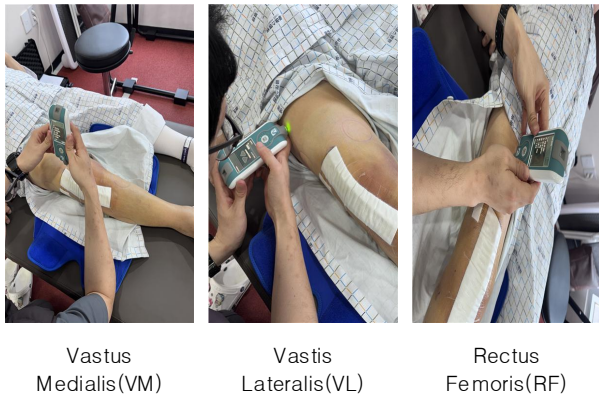


Fig. 2. Muscle Tone Measurement

5. Proprioception

고유수용감각의 측정은 KForce Plates(KForce, Kinvent, Montpellier, France)를 이용하여 측정하였으며 두 다리로 서서 측정하였다.

고유수용감각의 측정 방법은 Jogi등[41]의 방법을 수정 보완하여 실시하였으며, 고유수용감각 측정 시 양손은 좌우로 벌린 상태로 측정하였다. 모든 측정 항목은 2가지로 10초씩 3회 실시하였으며, 평균값의 데이터를 사용하였다.



Open Eyes Two Leg Stance Close Eyes Two Leg Stance

Fig. 3. Proprioception Measurement

6. Exercise Program

운동프로그램은 Jogi등[41] 및 Springer등[42]이 제시한 프로그램을 수정 보완하여 실시하였으며 운동프로그램은 Table 2.와 같다. 모든 프로그램은 주차별로 구성하였으며 신경근 운동과 고유수용감각 운동프로그램을 포함하였다.

신경근 운동프로그램은 일주일에 3회 모든 운동 종목은 20회씩 3세트를 진행하였으며, 고유수용감각 운동프로그램은 일주일에 3회 모든 운동 종목을 10초씩 10회 3세트를 진행하였다.

Table 2. Exercise Program

	Neuromuscular Exercise	Proprioception Exercise
1-2w	1. Ankle pump 2. Q-Setting 3. Supine Position Total Knee Extension 4. Assist Towel Knee Flexion	1. Open Eyes Two Leg Stance
3-4w	1. Include 1-2w Exercise 2. Straight Leg Raise 3. Clamshell 4. Bridge	1. Include 1-2w Exercise 2. Close Eyes Two Leg Stance
5-6w	1. Include 1-4w Exercise 2. Assist Tubing Band Knee Extension 3. Assist Tubing Band Knee Flexion	1. Include 1-4w Exercise 2. Open Eyes Single Leg Stance R/L
7-8w	1. Include 1-6w Exercise 2. Box Squat 3. Step Up Down	1. Include 1-6w Exercise 2. Close Eyes Single Leg Stance R/L

7. Data Analysis

통계분석은 IBM SPSS(Version 26.0) 프로그램을 이용하여 모든 대상자의 신체적 특성은 기술통계를 사용하였다. 사전값의 동질성 검증을 위해 독립표본 T검정(Independent t-test)을 실시하였다. 집단과 시공간 상호작용 효과검증을 위해 이원 반복 분산 분석(Two-Way Repeated Measures ANOVA)을 실시하였다. 분석 결과 상호작용의 효과가 있는 경우 사후 검증으로 대응표본 T검정(Paired t-test)을 실시하였다. 모든 통계적 유의수준은  $\alpha = .05$ 로 설정하였다.

III. Results

1. Quadriceps Femoris Muscle Tone

근 긴장도(Muscle Tone)는 Table 3. 과 같다. 가쪽넓은근(VL), 안쪽넓은근(VM), 넙다리곧은근(RF)에서 집단과 시공간에 상호작용 효과와( $p < .001$ ) 측정시공간에는 유의한 차이가 나타났으나( $p < .001$ ) 집단간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다.

CG에서 VL 근 경직도( $p < .001$ ) 및 근 긴장도( $p < .01$ )가 유의하게 증가하였으며 EG에서 근 경직도( $p < .001$ ) 근 긴

Table 3. Quadriceps Femoris Muscle Tone

Variable	Group	Pre	Post		F	p
VLF	CG(n=10)	15.99±3.39	16.54±3.39***	G	2.741	.115
	EG(n=10)	18.21±4.63	20.62±5.34***	T	73.326	.000***
				GxT	28.953	.000***
VLS	CG(n=10)	325.40±58.15	334.60±57.84**	G	1.870	.188
	EG(n=10)	352.10±94.92	403.80±94.51***	T	241.232	.000***
				GxT	117.484	.000***
VLD	CG(n=10)	2.16±.42	2.16±.42	G	.378	.547
	EG(n=10)	2.12±.50	1.95±.47***	T	55.158	.000***
				GxT	59.005	.000***
VMF	CG(n=10)	15.72±2.72	16.21±2.76***	G	1.312	.267
	EG(n=10)	16.71±4.69	19.11±4.57***	T	106.036	.000***
				GxT	46.315	.000***
VMS	CG(n=10)	311.80±50.67	321.20±49.46***	G	.028	.869
	EG(n=10)	298.50±72.22	343.90±75.52***	T	120.830	.000***
				GxT	52.146	.000***
VMD	CG(n=10)	1.87±.31	1.86±.30	G	.113	.741
	EG(n=10)	1.94±.50	1.68±.38***	T	24.035	.000***
				GxT	20.813	.000***
RFF	CG(n=10)	15.18±1.75	15.65±1.67***	G	6.196	.023*
	EG(n=10)	16.27±2.26	19.16±2.53***	T	142.906	.000***
				GxT	74.132	.000***
RFS	CG(n=10)	300.20±28.71	309.30±28.69***	G	1.531	.232
	EG(n=10)	301.50±55.62	358.20±60.30***	T	144.055	.000***
				GxT	75.386	.000***
RFD	CG(n=10)	2.09±.48	2.08±.48	G	.315	.581
	EG(n=10)	2.12±.62	1.78±.55**	T	24.389	.000***
				GxT	24.099	.000***

Means±SD, VL: Vastus Lateralis, VM: Vastus Medialis, RF: Rectus Femoris, F: Frequency, S: Stiffness, D:Elastic, Pre and Post: \*p<.05, \*\*p<.01, \*\*\*p<.001, Two-Way Repeated ANOVA: \*p<.05, \*\*p<.01, \*\*\*p<.001

장도( $p<.001$ )가 유의하게 증가하였다.

CG에서 VM 근 경직도( $p<.001$ ) 및 근 긴장도( $p<.001$ )가 유의하게 증가하였으며, EG에서 근 경직도( $p<.001$ ) 근 긴장도( $p<.001$ )가 유의하게 증가하였다.

CG에서 RF 근 경직도( $p<.001$ ) 및 근 긴장도( $p<.001$ )가 유의하게 증가하였으며, EG에서 근 경직도( $p<.001$ ) 근 긴장도( $p<.001$ )가 유의하게 증가하였다.

## 2. Open Eyes Two Leg Proprioception

눈을 뜨고 두 다리로 서서 실시한 고유수용감각의 결과는 Table 4. 와 같다. OE-TD는 집단과 시기간 상호작용 효과와 그룹간에는 유의한 차이가 나타나지 않았지만 측정시기간에는 유의한 차이가 나타났다( $p<.01$ ). 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.05$ ,  $p<.001$ ).

OE-TDAP는 집단과 시기간 상호작용 효과와 그룹간에는 유의한 차이가 나타나지 않았지만 측정시기간에는 유의한 차이가 나타났다( $p<.01$ ). 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.05$ ,  $p<.01$ ).

OE-TDML은 집단과 시기간에 상호작용 효과와( $p<.01$ ) 측정시기간에는 유의한 차이가 나타났으나( $p<.001$ ) 집단 간에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.001$ ,  $p<.001$ ).

OE-MVAP는 집단과 시기간에 상호작용 효과와( $p<.05$ ) 측정시기간에는 유의한 차이가 나타났으나( $p<.001$ ) 집단 간에서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.01$ ,  $p<.001$ ).

OE-MVML은 집단과 시기간 상호작용 효과와 그룹간에는 유의한 차이가 나타나지 않았지만 측정시기간에는 유의한 차이가 나타났다( $p<.001$ ). 집단과 시기간에 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.001$ ,  $p<.01$ ).

## 3. Close Eyes Two Leg Proprioception

눈을 감고 두 다리로 서서 실시한 고유수용감각의 결과는 Table 5. 와 같다. CE-TD는 집단과 시기간 상호작용 효과와 그룹간에는 유의한 차이가 나타나지 않았지만 측정시기간 유의한 차이가 나타났다( $p<.01$ ). 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.05$ ,  $p<.01$ ).

Table 4. Open Eyes Two Leg Proprioception

Variable	Group	Pre	Post		F	p
OE-TD	CG(n=10)	146.14±34.45	116.80±13.66*	G	.026	.874
	EG(n=10)	142.39±72.08	127.92±66.94***	T	16.925	.001**
				GxT	1.951	.179
OE-TDAP	CG(n=10)	128.87±36.14	102.57±15.21*	G	.004	.952
	EG(n=10)	123.91±66.48	110.27±65.56**	T	15.178	.001**
				GxT	1.525	.233
OE-TDML	CG(n=10)	46.53±7.71	39.90±7.73***	G	.139	.714
	EG(n=10)	47.17±19.11	44.05±18.67***	T	63.470	.000***
				GxT	8.201	.010*
OE-MVAP	CG(n=10)	13.00±3.46	9.49±1.16**	G	.046	.833
	EG(n=10)	12.37±6.63	11.02±6.01***	T	28.340	.000***
				GxT	5.618	.029*
OE-MVML	CG(n=10)	5.03±1.16	4.20±1.29***	G	.012	.914
	EG(n=10)	4.87±1.96	4.21±1.66**	T	54.697	.000***
				GxT	.803	.382

Means±SD, OE: Open Eyes, TD: Total Displacement, TDAP: Total Displacement Anterior posterior, TDML: Total Displacement Medial Lateral, MVAP: Mean Velocity Anterior Posterior, MVML: Mean Velocity Medial Lateral, Pre and Post: \*p<.05, \*\*p<.01, \*\*\*p<.001, Two-Way Repeated ANOVA: \*p<.05, \*\*p<.01, \*\*\*p<.001

Table 5. Close Eyes Two Leg Proprioception

Variable	Group	Pre	Post		F	p
CE-TD	CG(n=10)	198.92±69.55	164.85±40.62*	G	.942	.345
	EG(n=10)	165.54±70.75	144.71±68.43**	T	15.562	.001**
				GxT	.904	.354
CE-TDAP	CG(n=10)	173.86±65.60	145.47±42.43*	G	1.154	.297
	EG(n=10)	142.81±59.67	122.93±59.44**	T	15.303	.001**
				GxT	.476	.499
CE-TDML	CG(n=10)	58.46±23.69	51.44±19.36**	G	.222	.643
	EG(n=10)	54.25±19.65	47.04±19.52**	T	31.354	.000***
				GxT	.005	.943
CE-MVAP	CG(n=10)	17.34±6.49	14.14±4.22*	G	.437	.517
	EG(n=10)	16.02±7.07	11.93±6.65**	T	22.563	.000***
				GxT	.333	.571
CE-MVML	CG(n=10)	6.36±2.53	4.89±1.38*	G	.990	.333
	EG(n=10)	5.35±1.99	4.31±1.49***	T	18.702	.000***
				GxT	.554	.466

Means±SD, CE: Close Eyes, TD: Total Displacement, TDAP: Total Displacement Anterior posterior, TDML: Total Displacement Medial Lateral, MVAP: Mean Velocity Anterior Posterior, MVML: Mean Velocity Medial Lateral, Pre and Post: \*p<.05, \*\*p<.01, \*\*\*p<.001, Two-Way Repeated ANOVA: \*p<.05, \*\*p<.01, \*\*\*p<.001

CE-TDAP는 집단과 시공간 상호작용 효과와 그룹간에는 유의한 차이가 나타나지 않았지만 측정시공간 유의한 차이가 나타났다( $p<.01$ ). 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.05$ ,  $p<.01$ ).

CE-TDML은 집단과 시공간 상호작용 효과와 그룹간에는 유의한 차이가 나타나지 않았지만 측정시공간 유의한 차이가 나타났다( $p<.001$ ). 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.01$ ,  $p<.01$ ).

CE-MVAP는 집단과 시공간 상호작용 효과와 그룹간에는 유의한 차이가 나타나지 않았지만 측정시공간 유의한 차이가 나타났다( $p<.001$ ). 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.05$ ,  $p<.01$ ).

CE-MVML은 집단과 시공간 상호작용 효과와 그룹간에는 유의한 차이가 나타나지 않았지만 측정시공간 유의한 차이가 나타났다( $p<.001$ ). 또한 CG과 EG 모두 유의하게 감소하였다( $p<.05$ ,  $p<.001$ ).

#### IV. Discussions

이 연구는 여성 노인 환자를 대상으로 무릎관절 골관절염(OA) 전치환술(TKA) 후 바이오 피드백을 적용한 신경근 강화 운동프로그램이 근 긴장도와 고유수용감각에 미치는 영향을 알아보려고 실시되었다.

노인의 무릎관절의 OA은 고유수용감각 결핍, 관절가동 범위 감소 및 경직, 그리고 넙다리네갈래근의 근위축 및 근력감소 등이 특징을 보이며[43] 이러한 문제점을 개선하기 위해 TKA를 시행된다. 그러나 TKA후에도 넙다리네갈래근의 근 기능이 40% 감소로 인해 일상생활활동(Activities of Daily Living, ADL)과 보행속도 저하되는 등의 기능적 문제를 야기할 수 있다. 따라서 효과적인 재활운동은 필수적이며, 특히 TKA후 재활초기에 신경근 운동(Neuromuscular Training: NMT) 또는 감각운동(Sensorimotor Training: SMT)을 포함하여 고유수용감각, 근력, 균형 및 보행능력 등을 향상시키는 운동이 체계적으로 실시되어야 한다[44].

SMT와 NMT는 TKA후 손상된 기계적수용기(Mechanoreceptor)의 촉진을 통해 근수축 강도 및 근 기능을 향상시키고, 올바른 운동 단위의 반응을 조절하는 것을 목표로 한다[44]. 특히, NMT를 기반으로 한 고유수용성 훈련은 OA 환자의 관절 위치 감각 개선뿐만 아니라, 관절 통증 감소, 근경직 완화 및 근 기능 향상에 효과적인 것으로 보고되었다[45]. 또한, 선행 연구에 따르면 NMT를 통한 신경근 기능의 향상은 자세 안정성, 균형 및 근 기능의 전반적인 상태를 개선하는 데 유용하며, 기능적 능력을 향상시키고 동시에 OA의 진행 속도를 지연시키는 데 긍정적인 영향을 미친다고 하였다[46,47].

선행 연구에 따르면, 앞십자인대(ACL) 수술 후 넙다리네갈래근의 활성화 실패는 무릎관절 근기능 변화의 약 60%를 차지하는 주요 요인으로 보고되었다[48]. 이를 개선하기 위해 신경근전기자극치료(NMES)와 등척성 운동을 병행할 경우, NMES 단독 적용군보다 넙다리네갈래근의 최대 수의적 등척성 근수축(MVIC)이 더욱 효과적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 NMES가 근육 내 신경가지에서 활동전위를 유발하여 비자발적 근수축을 촉진할 뿐만 아니라, 신장성 운동이 근 길이를 증가시켜 외부 힘에 대한 저항력을 극대화함으로써 근수축 능력을 향상되었다고 하였다[49].

Lepley 등[48]은 NMES와 신장성 운동을 병행할 경우 넙다리네갈래근의 근수축 능력 향상에 긍정적인 영향을 미친다고 보고하였으며, 또 다른 연구에서는 8주간 무릎관절 펌근에 NMES와 NMT를 동시에 적용한 결과 넙다리네갈래근의 MVIC가 약 20% 증가한 것으로 나타났다[50].

특히, 넙다리네갈래근의 근기능 약화 및 근위축을 개선하기 위해 NMES를 적용한 연구에서는 저강도 전기적 자극보다 고강도 전기적 자극이 근수축 능력 향상에 더욱 효과적이었다고 보고하였다[51]. 이는 NMES 강도가 증가할

수록 활성화되는 근섬유의 수가 많아지고, 기계적수용기가 더욱 효과적으로 자극됨에 따라 MVIC가 향상 되었을 것이라 생각된다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서도 TKA 후 NMES를 적용한 NMT 운동이 근 긴장도 개선에 긍정적인 효과를 나타냄을 확인하였다. 그러나 NMT의 효과가 모든 대상자에게 동일하게 나타나는 것은 아니며, 연령에 따라 다르게 반응할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 기능적 능력이 향상됨과 동시에 OA의 진행 속도를 감소시킨다는 기존 연구 결과[47]를 지지한다.

다만, 노인의 경우 신경근 접합부(Neuromuscular Junction)의 변성으로 인해 젊은 연령층에 비해 신경근 효과가 상대적으로 저조할 수 있다는 점이 보고된 바 있다[52]. 이러한 점을 고려할 때, TKA를 시행한 여성 노인 환자에게 NMES를 적용한 NMT 운동은 기능 회복과 관절 안정성 향상을 위해 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

고유수용감각은 체성감각 시스템과 균형 조절의 필수적인 요소로 공간 내에서 신체 또는 신체 분절의 위치를 지각하는 능력과 더불어 관절의 움직임 및 사지의 굽힘과 폼을 감지하는 능력으로 정의된다[53]. 특히, 무릎관절에서의 고유수용감각은 세 가지 주요 기능을 수행하며, 정적 자세 유지 시 안정화, 반사 반응을 통한 과도한 움직임 조절, 그리고 외부 자극에 대한 보호 등의 역할을 담당한다[54]. 무릎관절의 불안정성은 환자의 기능적 능력과 이동성에 영향을 미치며[55], 이러한 장애는 관절 내·외 구조의 미세 손상으로 인해 발생하여 기계적수용기 및 구심성 신경경로에 부정적인 영향을 미칠 수 있다[56].

선행 연구에 의하면, NMT는 신경근 활성화[57] 및 관절의 위치 감각[58]을 향상시키는 것으로 보고되었으며, TKA 후 NMT와 기능 훈련을 비교한 연구에서도 양측 사지의 관절 위치 감각이 유의하게 개선된 것으로 나타났다[59]. 이는 파시니소체, 루파니소체(Pacini and Ruffini corpuscles)인 기계적 수용기가 무릎의 위치감각과 움직임에 대한 정보를 중추신경계로 전달하고 이러한 반사작용을 통해 관절 주변의 근 긴장도를 변경시켜 동적 안정성에 영향을 미쳤을 것으로 생각한다[60].

신체 압력 중심(Center of Pressure, COP)은 지면 반발력의 적용 지점을 추적하는 플랫폼을 이용하여 기록되며 COP의 신호는 내외측(mediolateral) 또는 전후방(anteroposterior) 방향의 변화하는 궤적을 추적하여 분석된다[61,62]. COP는 낙상의 위험을 평가하는데 사용되는 여러 변수를 사용하여 설명되며 이러한 방식은 신경학적 손상[63] 및 생리적인 노화[64]로 인해 고유수용감각이 저하된 대상들에게 주로 적용된다.

8주간 고유수용감각 운동이 정적 및 동적 균형에 미치는 영향을 분석한 연구에서, 눈을 뜨고 COP를 측정할 결과, 운동 프로그램 적용 후 전·후 COP 및 좌·우 COP 변위가 유의하게 감소하는 효과를 나타냈으며, 눈을 감고 COP를 측정하였을 때도 전·후 및 좌·우 COP 변위가 유의하게 감소하는 것으로 확인되었다[65].

## V. Conclusions

본 연구는 바이오 피드백을 적용한 신경근 운동프로그램의 적용이 무릎 전치환술 여성 노인 환자의 근 긴장도와 고유수용감각에 미치는 영향을 확인하고자 실시하였다.

TKA후 8주간 바이오 피드백과 신경근 운동을 적용한 결과 근 긴장도와 고유수용감각에서 유의미한 차이를 보였으며 이러한 결과는 최대강도로 설정하여 NMES를 적용하여 이로 인해 기계적 수용기에 전달된 구심성 감각 정보가 중추신경계로 입력되고 이를 바탕으로 조정된 운동 제어 명령이 관절 주변 근육에 전달됨으로써 근 긴장도와 근 경직도가 향상되고 신경근 조절이 개선되어 COP 변위가 감소한 결과로 생각된다. 따라서 바이오 피드백과 신경근 운동 프로그램의 적용은 TKA환자에게 근 긴장도의 향상 및 고유수용감각을 향상시켜 TKA 후 신체기능의 향상과 낙상의 위험률을 감소시키는데 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 몇 가지의 한계점이 존재한다. 첫째 여성 노인 TKA 환자를 대상으로 실시하였기 때문에 남성 노인 TKA 환자에게 동일하게 적용할 수 없다. 둘째 재활 운동시간을 제외하고 일상생활 습관을 통제하지 못하였다. 셋째 연구 대상자들의 활동량 등을 통제하지 못하였다. 향후 연구에서는 TKA를 받은 환자의 관절성 근육 억제(AMI)를 예방하기 위해 NMES 신경근 전기 자극을 활용한 운동 프로그램이 시행 3~4개월 후 넵다리네갈래근의 근 활성도와 근력에 미치는 영향을 분석할 필요가 있을 것으로 생각된다.

## REFERENCES

- [1] H. Long, Q. Liu, H. Yin, K. Wang, N. Diao, Y. Zhang, and A. Guo, "Prevalence trends of site-specific osteoarthritis from 1990 to 2019: findings from the Global Burden of Disease Study 2019," *Arthritis & Rheumatology*, Vol. 74, No. 7, pp. 1172-1183, March 2022. DOI: 10.1002/art.42089
- [2] T. Vos, A. Flaxman, D. Naghavi, M. Lozano, R. Michaud, C. Ezzati, and J. E. Harrison, "Years lived with disability (YLDs) for 1160 sequelae of 289 diseases and injuries 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010," *The Lancet*, Vol. 380, No. 9589, pp. 2163-2196, December 2012. DOI: 10.1016/S0140-6736(12)61729-2
- [3] R. S. Hinman, M. Hall, S. Comensoli, and K. L. Bennell, "Exercise & Sports Science Australia (ESSA) updated Position Statement on exercise and physical activity for people with hip/knee osteoarthritis," *Journal of science and medicine in sport*, Vol. 26, No. 1, pp. 37-45, January 2023. DOI: 10.1016/j.jsams.2022.11.003
- [4] N. Arden, and M. C. Nevitt, "Osteoarthritis: epidemiology," *Best practice & research Clinical rheumatology*, Vol. 20, No. 1, pp. 3-25, February 2006. DOI: 10.1016/j.berh.2005.09.007
- [5] V. L. Johnson, and D. J. Hunter, "The epidemiology of osteoarthritis," *Best practice & research Clinical rheumatology*, Vol. 28, No. 1, pp. 5-15, February 2014. DOI: 10.1016/j.berh.2014.01.004
- [6] M. D. Kohn, A. A. Sassoon, and N. D. Fernando, "Classifications in brief: Kellgren-Lawrence classification of osteoarthritis," *Clinical Orthopaedics and Related Research*, Vol. 474, No. 1, pp. 1886-1893, February 2016. DOI: 10.1007/s11999-016-4732-4
- [7] C. W. Hutton, "Osteoarthritis: the cause not result of joint failure?," *Annals of the rheumatic diseases*, Vol. 48, No. 11, pp. 958-961, November 1989. DOI: 10.1136/ard.48.11.958
- [8] K. Jh, and JS. Lawrence, "Radiological assessment of osteo-arthritis," *Ann Rheum Dis*, Vol. 16, No. 4, pp. 494-502, February 1957. DOI: 10.4324/9780203214237-21
- [9] N. Nakano, H. Shoman, F. Olavarria, T. Matsumoto, R. Kuroda, and V. Khanduja, "Why are patients dissatisfied following a total knee replacement? A systematic review," *International orthopaedics*, Vol. 44, No. 1, pp. 1971-2007, July 2020. DOI: 10.1007/s00264-020-04607-9
- [10] A. J. Carr, O. Robertsson, S. Graves, A. J. Price, N. K. Arden, A. Judge, and D. J. Beard, "Knee replacement," *The Lancet*, Vol. 379, No. 9823, pp. 1331-1340, March 2012. DOI: 10.1016/S0140-6736(11)60752-6
- [11] I. N. Ackerman, C. Pratt, A. Gorelik, and D. Liew, "Projected burden of osteoarthritis and rheumatoid arthritis in Australia: a population-level analysis," *Arthritis care & research*, Vol. 70, No. 6, pp. 877-883, September 2018. DOI: 10.1002/acr.23414
- [12] S. Kurtz, K. Ong, E. Lau, F. Mowat, and M. Halpern, "Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030," *Jbjs*, Vol. 89, No. 4, pp. 780-785, April 2007. DOI: 10.2106/JBJS.F.00222
- [13] T. W. Kragstrup, M. Kjaer, and A. L. Mackey, "Structural, biochemical, cellular, and functional changes in skeletal muscle extracellular matrix with aging," *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, Vol. 21, No. 6, pp. 749-757, August 2011. DOI: 10.1111/j.1600-0838.2011.01377.x
- [14] H. J. Braun, and G.E. Gold, "Diagnosis of osteoarthritis:

- imaging,” *Bone*, Vol. 51, No. 2, pp. 278-288, August 2012. DOI: 10.1016/j.bone.2011.11.019
- [15] M. Silva, E. F. Shepherd, W. O. Jackson, J. A. Pratt, C. D. McClung, and T. P. Schmalzried, “Knee strength after total knee arthroplasty,” *The Journal of arthroplasty*, Vol. 18, No. 5, pp. 605-611, August 2003. DOI: 10.1016/S0883-5403(03)00191-8
- [16] P. C. Noble, M. J. Gordon, J. M. Weiss, R. N. Reddix, M. A. Conditt, and K. B. Mathis, “Does total knee replacement restore normal knee function?,” *Clinical Orthopaedics and Related Research®*, Vol. 431, No. 1, pp. 157-165, 2005. DOI: 10.1097/01.blo.0000150130.03519.fb
- [17] S. R. Piva, A. B. Gil, G. J. Almeida, A. M. DiGioia III, T. J. Levison, and G. K. Fitzgerald, “A balance exercise program appears to improve function for patients with total knee arthroplasty: a randomized clinical trial,” *Physical therapy*, Vol. 90, No. 6, pp. 880-894, June 2010. DOI: 10.2522/ptj.20090150
- [18] S. F. Attfield, T. J. Wilton, D. J. Pratt, and A. Sambatakakis, “Soft-tissue balance and recovery of proprioception after total knee replacement,” *The Journal of Bone & Joint Surgery British*, Vol. 78, No. 4, pp. 540-545, July 1996. DOI: 10.1302/0301-620X.78B4.0780540
- [19] J. A. Van Tunen, A. Dell’Isola, C. Juhl, J. Dekker, M. Steultjens, J. B. Thorlund, and H. Lund, “Association of malalignment, muscular dysfunction, proprioception, laxity and abnormal joint loading with tibiofemoral knee osteoarthritis—a systematic review and meta-analysis,” *BMC musculoskeletal disorders*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-15, July 2018. DOI: 10.1186/s12891-018-2202-8
- [20] D. Kim, G. Park, L. T. Kuo, and W. Park, “The effects of pain on quadriceps strength, joint proprioception and dynamic balance among women aged 65 to 75 years with knee osteoarthritis,” *BMC geriatrics*, Vol. 18, No. 245, pp. 1-6, October 2018. DOI: 10.1186/s12877-018-0932-y
- [21] M. Fransen, S. McConnell, A. R. Harmer, M. Van der Esch, M. Simic, and K. L. Bennell, “Exercise for osteoarthritis of the knee: a Cochrane systematic review,” *British journal of sports medicine*, Vol. 49, No. 24, pp. 1554-1557, August 2015. DOI: 10.1002/14651858.CD004376
- [22] M. B. Schache, J. A. McClelland, and K. E. Webster, “Lower limb strength following total knee arthroplasty: a systematic review,” *The Knee*, Vol. 21, No. 1, pp. 12-20, January 2014. DOI: 10.1016/j.knee.2013.08.002
- [23] S. C. Petterson, R. L. Mizner, J. E. Stevens, L. E. O. Raisia, A. Bodenstab, W. Newcomb, and L. Snyder-Mackler, “Improved function from progressive strengthening interventions after total knee arthroplasty: a randomized clinical trial with an imbedded prospective cohort,” *Arthritis Care & Research*, Vol. 61, No. 2, pp. 174-183, January 2009. DOI: 10.1002/art.24167
- [24] S. R. Piva, P. E. Teixeira, G. J. Almeida, A. B. Gil, A. M. DiGioia III, T. J. Levison, and G. K. Fitzgerald, “Contribution of hip abductor strength to physical function in patients with total knee arthroplasty,” *Physical therapy*, Vol. 91, No. 2, pp. 225-233, February 2011. DOI: 10.2522/ptj.20100122
- [25] F. Raposo, M. Ramos, and A. Lúcia Cruz, “Effects of exercise on knee osteoarthritis: A systematic review,” *Musculoskeletal care*, Vol. 19, No. 4, pp. 399-435, March 2021. DOI: 10.1002/msc.1538
- [26] R. G. Mestriner, C. B. DE OLIVEIRA, D. A. D. S. MELO, M. F. de Menezes, J. L. B. da Silva, and V. B. FRISON, “Método Chordata combinado com eletroterapia na recuperação funcional após lesão do plexo braquial: relato de três casos clínicos,” *Scientia Medica (Porto Alegre. Online)*. Vol. 26, No. 2, pp. 1-6, April 2016. DOI: 10.15448/1980-6108.2016.2.22425
- [27] A. Witt, R. S. Kristensen, A. Fuglsang-Frederiksen, T. H. Pedersen, N. B. Finnerup, H. Kasch, and H. Tankisi, “Muscle velocity recovery cycles in neurogenic muscles,” *Clinical Neurophysiology*, Vol. 130, No. 9, pp. 1520-1527, September 2019. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.05.030
- [28] D. U. Jette, S. J. Hunter, L. Burkett, B. Langham, D. S. Logerstedt, and N. S. Piuze, American Physical Therapy Association, “Physical therapist management of total knee arthroplasty,” *Physical therapy*, Vol. 100, No. 9, pp. 1603-1631, September 2020. DOI: 10.1093/ptj/pzaa099
- [29] J.A. Neder, D. Sword, S.A. Ward, E. Mackay, L.M. Cochrane, and C.J. Clark, “Home based neuromuscular electrical stimulation as a new rehabilitative strategy for severely disabled patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD),” *Thorax*, Vol. 57, No. 4, pp. 333-337, December 2002. DOI: 10.1136/thorax.57.4.333
- [30] S. Songjaroen, P. Sungnak, P. Piriyaprasarth, H. K. Wang, J. J. Laskin, and P. Wattananon, “Combined neuromuscular electrical stimulation with motor control exercise can improve lumbar multifidus activation in individuals with recurrent low back pain,” *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-9, July 2021. DOI:10.1038/s41598-021-94402-2
- [31] L. Labanca, J. E. Rocchi, S. Giannini, E. R. Faloni, G. Montanari, P. P. Mariani, and A. Macaluso, “Early superimposed NMES training is effective to improve strength and function following ACL reconstruction with hamstring graft regardless of tendon regeneration,” *Journal of Sports Science & Medicine*, Vol. 21, No. 1, pp. 91-103, February 2022. DOI: 10.52082/jssm.2022.91
- [32] L. Peng, K. Wang, Y. Zeng, Y. Wu, H. Si, and B. hen, “Effect of neuromuscular electrical stimulation after total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials,” *Frontiers in Medicine*, Vol. 8, No. 779019, pp. 1-17, December 2021. DOI: 10.3389/fmed.2021.779019
- [33] G. Rushworth, “Spasticity and rigidity: an experimental study and review,” *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*,

- Vol. 23, No. 2, pp. 99-118, May 1960. DOI: 10.1136/jnnp.23.2.99
- [34] A. M. de Noordhout, S. Myressiotis, V. Delvaux, J. D. Born, and P. J. Delwaide, "Motor and somatosensory evoked potentials in cervical spondylotic myelopathy," *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, Vol. 108, No. 1, pp. 24-31, January 1998. DOI: 10.1016/S0168-5597(97)00075-0
- [35] J. Ganguly, D. Kulshreshtha, M. Almotiri, and M. Jog, "Muscle tone physiology and abnormalities. Toxins, Vol. 13, No. 4, pp. 1-20, April 2021. DOI: 10.3390/toxins13040282
- [36] R. Viir, K. Laiho, J. Kramarenko, and M. Mikkelsen, "Repeatability of trapezius muscle tone assessment by a myometric method," *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, Vol. 6, No. 2, pp. 215-228, April 2006. DOI: 10.1142/S0219519406001856
- [37] M. L. Latash, and X. Huang, "Neural control of movement stability: Lessons from studies of neurological patients," *Neuroscience*, Vol. 3, No. 301, pp. 39-48, August 2015. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2015.05.075
- [38] Y. Laufer, J. D. Ries, P. M. Leininger, and G. Alon, "Quadriceps femoris muscle torques and fatigue generated by neuromuscular electrical stimulation with three different waveforms," *Physical therapy*, Vol. 81, No. 7, pp. 1307-1316, July 2001. DOI: 10.1093/ptj/81.7.1307
- [39] C. L. Lyons, J. B. Robb, J. J. Irrgang, and G. K. Fitzgerald, "Differences in quadriceps femoris muscle torque when using a clinical electrical stimulator versus a portable electrical stimulator," *Physical therapy*, Vol. 85, No. 1, pp. 44-51, January 2005. DOI: 10.1093/ptj/85.1.44
- [40] E. Ramazanođlu, S. Usgu, and Y. Yakut, "Assessment of the mechanical characteristics of the lower extremity muscles with myotonometric measurements in healthy individuals," *Physiotherapy Quarterly*, Vol. 28, No. 4, pp. 1-12, July 2020. DOI: 10.5114/pq.2020.97458
- [41] P. Jogi, A. Zecevic, T. J. Overend, S. J. Spaulding, and J. F. Kramer, "Force-plate analyses of balance following a balance exercise program during acute post-operative phase in individuals with total hip and knee arthroplasty: A randomized clinical trial," *SAGE Open Medicine*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-9, November 2016. DOI: 10.1177/2050312116675097
- [42] B. A. Springer, R. Marin, T. Cyhan, H. Roberts, and N. W. Gill, "Normative values for the unipedal stance test with eyes open and closed," *Journal of geriatric physical therapy*, Vol. 30, No. 1, pp. 8-15, April 2007. DOI: 10.1519/00139143-200704000-00003
- [43] A. Migliore, G. Gigliucci, L. Alekseeva, S. Avasthi, R. R. Bannuru, X. Chevalier, and R. Raman, "Treat-to-target strategy for knee osteoarthritis. International technical expert panel consensus and good clinical practice statements," *Therapeutic advances in musculoskeletal disease*, Vol. 11, No. 2, pp. 1-15, December 2019. DOI: 10.1177/1759720X19893800
- [44] E. Karadüz, R. Demirbaş, A. Yağcıođlu, and S. Hantal, "Sensorimotor versus core stabilization home exercise programs following total knee arthroplasty: a randomized controlled trial," *Advances in Rehabilitation*, Vol. 38, No. 1, pp. 20-34, March 2024. DOI: 10.5114/areh.2024.136953
- [45] Y. Wang, Z. Wu, Z. Chen, X. Ye, G. Chen, J. Yang, and X. Xu, "Proprioceptive training for knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials," *Frontiers in Medicine*, Vol. 8, No. 699921, pp. 1-19, October 2021. DOI: 10.3389/fmed.2021.699921
- [46] M. Taniguchi, S. Sawano, S. Maegawa, T. Ikezoe, and N. Ichihashi, "Physical activity mediates the relationship between gait function and fall incidence after total knee arthroplasty," *The journal of knee surgery*, Vol. 34, No. 11, pp. 1205-1211, September 2021. DOI: 10.1055/s-0040-1702165
- [47] E. M. Roos, "Joint injury causes knee osteoarthritis in young adults," *Current opinion in rheumatology*, Vol. 17, No. 2, pp. 195-200, March 2005. DOI: 10.1097/01.bor.0000151406.64393.00
- [48] L. K. Lepley, E. M. Wojtys, and R. M. Palmieri-Smith, "Combination of eccentric exercise and neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps function post-ACL reconstruction," *The Knee*, Vol. 22, No. 3, pp. 270-277, June 2015. DOI: 10.1016/j.knee.2014.11.013
- [49] A. Delitto, S. J. Rose, J. M. McKowen, R. C. Lehman, J. A. Thomas, and R. A. Shively, "Electrical stimulation versus voluntary exercise in strengthening thigh musculature after anterior cruciate ligament surgery," *Physical therapy*, Vol. 68, No. 5, pp. 660-663, May 1988. DOI: 10.1093/ptj/68.5.660
- [50] S. F. Eby, B. A. Cloud, J. E. Brandenburg, H. Giambini, P. Song, S. Chen, and K. N. An, "Shear wave elastography of passive skeletal muscle stiffness: influences of sex and age throughout adulthood," *Clinical biomechanics*, Vol. 30, No. 1, pp. 22-27, January 2015. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2014.11.011
- [51] A. Saito, M. Wakasa, M. Kimoto, T. Ishikawa, M. Tsugaruya, Y. Kume, and K. Okada, "Age-related changes in muscle elasticity and thickness of the lower extremities are associated with physical functions among community-dwelling older women," *Geriatrics & Gerontology International*, Vol. 19, No. 1, pp. 61-65, December 2019. DOI: 10.1111/ggi.13567
- [52] A. H. Paravlic, R. Pisot, and B. Simunic, "Muscle-specific changes of lower extremities in the early period after total knee arthroplasty: Insight from tensiomyography," *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, Vol. 20, No. 3, pp. 390-397, March 2020.
- [53] B. L. Riemann, and S. M. Lephart, "The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability," *Journal of athletic training*, Vol. 37, No. 1, pp. 71-79.
- [54] J. Knoop, M. P. M. Steultjens, M. Van der Leeden, M. Van

- der Esch, C. A. Thorstensson, L. D. Roorda, and J. Dekker, "Proprioception in knee osteoarthritis: a narrative review," *Osteoarthritis and cartilage*, Vol. 19, No. 4, pp. 381-388, April 2011. DOI: 10.1016/j.joca.2011.01.003
- [55] G. K. Fitzgerald, S. R. Piva, and J. J. Irrgang, "Reports of joint instability in knee osteoarthritis: its prevalence and relationship to physical function," *Arthritis care & research*, Vol. 51, No. 6, pp. 941-946, December 2004. DOI: 10.1002/art.20825
- [56] J. W. McChesney, and M. H. Woollacott, "The effect of age-related declines in proprioception and total knee replacement on postural control," *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, Vol. 55, No. 11, pp. 658-666, November 2000. DOI: 10.1093/gerona/55.11.M658
- [57] M. Moutzouri, F. Coutts, J. Gliatis, E. Billis, E. Tsepis, and N. Gleeson, "Early initiation of home-based sensori-motor training improves muscle strength, activation and size in patients after knee replacement: a secondary analysis of a controlled clinical trial," *BMC musculoskeletal disorders*, Vol. 20, No. 231, pp. 1-10, May 2019. DOI: 10.1186/s12891-019-2575-3
- [58] J. Y. Tsauo, P. F. Cheng, and R. S. Yang, "The effects of sensorimotor training on knee proprioception and function for patients with knee osteoarthritis: a preliminary report," *Clinical rehabilitation*, Vol. 22, No. 5, pp. 448-457, May 2008. DOI: 10.1177/0269215507084597
- [59] M. Moutzouri, N. Gleeson, F. Coutts, E. Tsepis, and J. Gliatis, "Early self-managed focal sensorimotor rehabilitative training enhances functional mobility and sensorimotor function in patients following total knee replacement: a controlled clinical trial," *Clinical rehabilitation*, Vol. 32, No. 7, pp. 888-898, February 2018. DOI: 10.1177/0269215518757291
- [60] M. Ciceklidag, I. Kaya, T. Ayanoglu, I. H. Ayas, M. Ozer, M. B. Ataoglu, and U. Kanatli, "Proprioception After Primary Repair of the Anterior Cruciate Ligament," *The American Journal of Sports Medicine*, Vol. 52, No. 5, pp. 1199-1208, March 2024. DOI: 10.1177/03635465241228839
- [61] A. de Sá Ferreira, and P. J. F. Baracat, "Test-retest reliability for assessment of postural stability using center of pressure spatial patterns of three-dimensional statokinesigrams in young health participants," *Journal of biomechanics*, Vol. 47, No. 12, pp. 2919-2924, September 2014. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.07.010
- [62] M. Duarte, S. M. S. F. Freitas, and V. Zatsiorsky, "Control of equilibrium in humans—Sway over sway. Motor Control—theories, experiments and applications," Vol. 3, No. 10, pp. 219-245, January 2011. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780195395273.003.0010
- [63] M. Vališ, J. Dršata, D. Kalfeřt, P. Semerák, and J. Kremláček, "Computerised static posturography in neurology," *Open Medicine*, Vol. 7, No. 3, pp. 317-322, March 2012. DOI: 10.2478/s11536-011-0152-8
- [64] R. W. Baloh, K. M. Jacobson, J. A. Enrietto, S. Corona, and V. Honrubia, "Balance disorders in older persons: quantification with posturography," *Otolaryngology—Head and Neck Surgery*, Vol. 119, No. 1, pp. 89-92, July 1998. DOI: 10.1016/S0194-5998(98)70177-9
- [65] C. H. Song, J. S. Petrofsky, S. W. Lee, K. J. Lee, and J. E. Yim, "Effects of an exercise program on balance and trunk proprioception in older adults with diabetic neuropathies," *Diabetes technology & therapeutics*, Vol. 13, No. 8, pp. 803-811, July 2011. DOI: 10.1089/dia.2011.00363

## Authors



Gyu-Ho Choi received B.S. degree in Hoseo University in 2018. He received his M.S. degree in Sports Medicine & Science from Kyung Hee University in 2020. He is currently enrolled in the doctoral program at

Dankook University's Graduate School. He works as an athletic trainer at an orthopedic exercise therapy center. His areas of interest include sports injuries, sports rehabilitation and sports medicine.



Dr. Jin-Wook Lee is an Professor in the Department of Exercise Prescription and Rehabilitation at Dankook University, South Korea. He holds a Bachelor of degree from Korea University, in 1999, and subsequently

completed his Master of Sports Medicine and Doctor of Exercise Injury at Dankook University in 2010 and 2017, respectively. Dr. Lee's research focuses on advancing knowledge in sports rehabilitation, sports medicine, exercise injury and exercise physiology. His work explores biohealth technologies to boost performance and recovery.