



Original Article

Distinct Unilateral Ankle Force Control Strategies in Soccer Players from a YANK Analysis

Rye Kyeong Kim¹ and Nyeonju Kang^{1,2*}

¹Department of Human Movement Science, Incheon National University

²Division of Sport Science, Health Promotion Center, & Sport Science Institute, Incheon National University

Article Info

Received 2026. 05. 04.

Revised 2026. 05. 26.

Accepted 2026. 06. 02.

Correspondence*

Nyeonju Kang

nyunju@inu.ac.kr

Key Words

Elite soccer players,
Lower extremities,
Isometric ankle force control,
YANK analysis

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2024S1A5A2A03039509).

PURPOSE This study compared unilateral force control capabilities between 13 elite soccer players and 16 healthy controls using the isometric ankle force control paradigm. **METHODS** Participants were instructed to perform unilateral ankle force control tasks across vision and no-vision conditions with their dominant and non-dominant ankles at 10% and 40% of their maximal voluntary contraction, respectively. Force control capabilities were analyzed using mean force, force accuracy, and force variability. Furthermore, force regularity and force smoothness were estimated using sample entropy (SampEn) and YANK analysis, respectively. **RESULTS** The groups did not differ significantly in mean force, force accuracy, and force variability across different visual conditions and targeted force levels. However, the soccer players showed significantly lower regularity (increased SampEn values) in the non-dominant lower limb and lower smoothness (increased YANK values) in both lower limbs during ankle isometric force control tasks. **CONCLUSIONS** These findings indicate that soccer players use more adaptive force control strategies in the lower extremities to successfully achieve task goals.

서론

축구는 경기 중 환경이 급박하게 변화하여 예측이 어렵기 때문에 시각 정보에 의한 지각-인지 처리가 신속하게 이루어져야 한다(Zhongfan & Inomata, 2003). 선행연구에 의하면, 숙련된 선수일수록 시각-운동 변환 과정과 관련된 중추신경계의 기능이 더 강화된 것으로 나타났다(Hunter et al., 2022; Kim et al., 2014). 이러한 시각-운동 처리 기능은 성공적인 경기 수행력을 위한 중요한 요인으로(Erickson, 2020; Klatt & Smeeton, 2022), 드리블, 방향 전환, 및 슈팅 등의 핵심 기술을 정확하고 정교하게 한다(Ben Kahla et al., 2022; Hunter et al., 2022). 특히, 숙련된 엘리트 선수들은 고유수용성 피드백 및 감각 피드백을 활용하여 공의 궤적이나 상대 선수의 움직임을 정확하게 예측하여 성공적인 경기 수행력을 발휘한다(Hunter et al., 2022; Snyder & Cinelli, 2020; Yilmaz et al., 2024).

최적화된 축구 기술을 구사하기 위해서는 하체의 움직임 조절 및 균형 능력뿐만 아니라, 발목 힘 조절 능력(ankle force control abilities)이 필수적이다(Beato et al., 2021). 숙련된 선수일수록 경기 상황 중 목표하는 거리에서 적절한 힘을 조절하여 킥의 정확성을 높이는 것으로 나타났으며, 이는 반복적인 훈련을 통해 최적의 힘 조절 전략이 발현된 것으로 보인다(Izovska et al., 2016). 성공적인 힘 조절 능력은 경기 중 압박감 속에서 시각 정보가 제한되거나 급박한 힘 조절이 요구되는 순간에서도 기술적 완성도를 높이는 핵심 요소로 작용한다(Ben Kahla et al., 2022; Hunter et al., 2022). 특히, 등척성 힘 조절 과정은 시각-운동 처리 과정을 통해 개인의 힘 조절 능력을 평가하는 효과적인 도구이다(Hu & Newell, 2011a, 2011b). 효율적인 힘 조절 전략은 실시간으로 제공되는 시각 정보를 바탕으로 운동을 출력 및 수정하는 시각-운동 통합 과정을 필요로 한다(Baweja et al., 2009; Sosnoff & Newell, 2005). 이러한 과정은 고유수용성 피드백 등 다양한 감각 정보와 결합하여 최대한 목표(submaximal targeted level)에 최대한 정확하게 힘을 유지할 수 있도록 한다.

등척성 힘 조절 능력 평가하는 전통적인 방법으로는 힘의 정확성(accuracy) 및 가변성(variability)과 같은 선형적 분석(linear

© This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

analysis)이 있다(Lee et al., 2025; Christou & Enoka, 2011; Enoka et al., 2003). 예를 들어, 힘 조절 시 가변성이 낮을수록 목표하는 힘을 안정적으로 유지하여 수행력의 정확성이 높음을 의미한다. 즉, 낮은 가변성은 힘 조절의 정확성과 밀접하게 연관되어 있어 운동 제어 능력의 효율성을 평가하는 지표가 된다. 특히, 숙련된 엘리트 선수들은 급변하는 환경 조건에서 성공적인 과제 수행을 위해 적응성(adaptability)과 유연성(flexibility)에 기반한 운동 제어 전략을 가지고 있는 것으로 보인다(Exel et al., 2019; Silva et al., 2016). 이러한 전략은 복잡하면서도 유연한 전략적 특성을 가지고 있으며, 이를 평가하기 위해 비선형적 분석(nonlinear analysis) 방법 중 하나인 Sample Entropy (SampEn)를 통해 힘의 규칙성(regularity)을 분석한다. 실제로 숙련된 엘리트 운동선수들(e.g., 테니스, 배드민턴, 및 양궁)은 일반인보다 난이도가 높은 MVC 40% 힘 조절 과제 시 힘을 불규칙적으로 발현할수록 과제에 대한 정확도가 높아지는 것으로 나타났다(Kim et al., 2021). 이는 장기간의 훈련을 통해 엘리트 선수들이 일반인보다 시각-운동 변환과 시각 인지 및 처리를 담당하는 대뇌 피질의 활성도를 높여, 급박하게 변화하는 외부 환경에 최적화된 적응력을 갖추게 되었음을 시사한다(Hu & Newell, 2011b; Hülndünker et al., 2018). 이처럼 숙련된 엘리트 운동선수들은 힘 조절 과제 시 일반인들과 차별화된 힘 조절 전략을 활용하는 것으로 보인다.

축구선수들에게는 주발(dominant)의 정교한 동적 제어 능력과 비주발(non-dominant)의 지지력 및 안정성이 동시에 요구되기 때문에 주발과 비주발의 세밀한 힘 조절 능력이 수행력을 결정하는 핵심 요소라고 할 수 있다. 일반적으로, 주발은 공을 정교하게 컨트롤하는 가동성을, 비주발은 신체의 균형과 안정성에 중점을 두고 있기 때문에 양발의 기능적 역할에 따라 차별화된 제어 전략을 가지고 있을 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 현재까지의 연구들은 축구선수들의 양발 협응성, 양발의 근력 및 동적 균형, 그리고 킥의 정확성 등에 집중해 왔다(Chtara et al., 2018; Hunter et al., 2022; Lee et al., 2024). 따라서, 시각 정보의 유·무와 과제 난이도에 따라 각각 주발과 비주발이 어떠한 제어 전략을 가지고 힘 조절 과제를 수행하는지에 대한 연구가 필요하다.

흥미롭게도 최근에는 힘 조절 능력을 평가하기 위해 힘 산출 과정에서 발생하는 힘의 급격한 변화, ‘힘 변동의 변화율(change in force fluctuations: YANK)’을 분석하여 힘의 평활성(smoothness)을 규명하는 방법이 제시되고 있다(Lin et al., 2019; Yacoubi & Christou, 2024a, 2024b). YANK 값은 과제 난이도나 환경 변화에 따라 힘 조절의 속도와 효율성을 측정하는 지표이다. 선행연구에서는 하지 힘 조절 과제 시 시각 정보가 많은 상황에서 힘의 가변성은 낮게 나타난 반면에, YANK 값은 높은 것으로 나타났다(Kim et al., 2026). 이처럼, YANK 값이 높다는 것은 평활성이 낮음을 의미하며, 이는 신경계가 과제 수행 중 발생하는 오차에 민감하게 반응하여 목표 힘을 유지하고자 실시간으로 빈번하게 힘을 수정하려는 노력으로 해석할 수 있다. 이러한 과정에서 신경계가 운동단위(motor unit)를 급격하게 동원하거나 발화율을 급속히 조절하기 때문에 힘 변화율이 증가한다. 특히, 지속적인 주의 집중과 실시간 수정이 요구되는 과제에서는 대뇌가 오차에 민감하게 반응하여 근육으로 내려보내는 신호를 빠르게 하는 것이 YANK 값을 높이는 원인이 될 수 있다(Brown, 2000; Laine et al., 2015). 결론적으로 YANK 값의 증가는 오차를 최소화하기 위해 힘 조절 시 급격하고 빈번한 수정 동작을 유발하여

높은 집중력과 효율성을 반영한 제어 전략으로 평가될 수 있다.

본 연구의 목적은 축구선수들의 주발과 비주발에 대해 시각 정보의 유·무가 등척성 힘 제어 전략(isometric force control strategies)에 어떠한 영향을 미치는지 조사하는 데 있다. 본 연구에서는 시각 정보의 유·무에 따라 최대 자발적 수축의 10%와 40%의 수준에서 주발과 비주발의 힘 조절 과제를 수행하였다. 힘 조절 능력은 평균 힘(mean force), 힘 정확성, 가변성, 규칙성, 및 평활성을 통해 평가하였다(Kim et al., 2021; Ko et al., 2025, Kim et al., 2026). 본 연구에서는 축구선수가 일반인보다 주발과 비주발 모두 우수한 힘 조절 능력을 보일 것이라는 가설을 설정하였다. 구체적인 가설은 다음과 같다. 첫째, 시각 정보의 유·무에 따른 힘 조절 과제 시 축구선수는 주발에서 더 높은 정확성 및 낮은 가변성, 낮은 규칙성, 및 낮은 평활성을 보일 것이다. 둘째, 축구선수는 비주발에서 더 높은 정확성 및 낮은 가변성, 낮은 규칙성, 및 낮은 평활성을 보일 것으로 가설을 설정하였다.

연구방법

연구대상

본 연구는 등척성 힘 조절 과제를 진행하기 위해 신경학적 질환, 시력, 약물복용, 및 근골격계 손상이 없는 건강한 성인 남성 29명(축구 선수 나이: 23.7 ± 0.1 , 대조군 나이: 29.0 ± 0.5 ; 오른발: 29명)을 대상으로 하였으며, 실험 24시간 전 카페인 섭취 및 과도한 신체활동을 제한하였다(Lee et al., 2023). 선행연구에 따라 과제 수행 전 모든 참가자의 주축이 되는 발을 확인하기 위해 “주로 어떤 발을 사용하여 공을 차나요?”라는 질문을 통해 주발을 확인하였다(Satas et al., 2020). 또한, 헬싱키 선언(Declaration of Helsinki)의 연구 프로토콜 승인에 따른 실험이 진행되었다. 본 연구에 참여하는 모든 대상자들에게 실험 과정을 자세하게 설명하였으며, 동의서 작성 전 자발적 참여 의사를 확인하였다. 연구 대상자들의 신체적인 특성은 <Table 1>과 같다. 본 연구는 인천대학교 기관생명 윤리위원회에서 진행한 연구심의 승인을 받아 진행하였다(IRB7007971-202003-001-01).

측정 방법

본 연구에서는 축구선수들의 ‘하지’의 단축 등척성 힘 조절 과제를 위해 자체 개발된 발목 배측굴곡 힘 조절 측정 장비(isometric ankle-dorsiflexion force measurement system; SEED Technology

Table 1. Characteristic subjects (Mean $\pm$ SE)

	Soccer players (n=13)	Control group (n=16)
Age (years)	23.7 $\pm$ 0.1	29.0 $\pm$ 0.5
Height (cm)	176.1 $\pm$ 1.3	176.3 $\pm$ 1.3
Weight (kg)	72.9 $\pm$ 1.3	80.2 $\pm$ 1.8
History (years)	10.1 $\pm$ 0.8	-
Dominant side	13 Right	16 Right

Inc., South Korea)를 사용하였다. 대상자들은 편한 자세로 54.6 cm LED 모니터와 80 cm 간격을 두고 앉았으며, 바닥에 고정된 힘 변환기(Micro Load Cell-CZL635-3135, range = 330 lbs, Phidgets Inc., Calgary, Canada)가 내장된 플랫폼에 편한 자세(knee flexion 90-100°, hip flexion 90-95°, and ankle dorsiflexion 90°)로 발을 넣어 실험을 진행하였다. 피험자들은 각자의 발에 맞는 크기의 동일한 신발을 착용하였으며, 단축 힘 조절 과제 중 발생하는 하지 관절의 불필요한 움직임을 최소화하기 위해 피험자의 중족(metatarsal) 위치에 대상자들 발의 너비 및 높이를 맞춰 철판 만들어진 스트랩을 이용하여 발을 고정하였다. 이와 같은 조건에서 발목 배측굴곡 동작을 이용한 등척성 힘이 스트랩을 통하여 측정되었다.

이전 선행연구에 따라 하지의 단축 힘 조절 과제를 실시하기 전, 목표하는 힘 수준을 설정하기 위해 피험자들은 주발 및 비주발 각각 6 초씩, 총 2회에 걸쳐 하지의 최대 자발적 수축을 측정하였다(Lee & Kang, 2025). 이때 발생하는 피로를 최소화하기 위해 시도 간 휴식시간 1분을 제공하였다. 각 측정 시도에서 입력된 최대 자발적 수축 힘에 대한 평균값을 이용하여 개인의 최대하 목표 힘 수준은 각각 10%와 40%로 설정하였다. 또한, 시도 내 5초 및 시도 간 피로를 최소화하기 위해 60초의 휴식을 제공하였다(Lee & Kang, 2025). 피험자는 하지의 단축 힘 조절 과제를 각각 10%와 40%의 힘 수준에서 시각 정보의 유·무가 반영된 1개의 블록을 3번씩 측정하였으며, 주발 및 비주발 각각 4개의 실험조건에서 총 8개의 블록을 랜덤으로 수행하였다. 힘 조절 과제 시 모니터를 통해 개인의 주발 및 비주발이 실시간으로 힘을 생성하는 것을 보여주는 선(빨간색), 개인이 힘을 생성해 도달해야 되는 목표선(흰색), 개인의 힘 생성을 가이드 해주는 목표선의 10% 임계로 이루어진 점선(초록색)으로 시각 정보를 제공하였다. 본 연구는 피험자 개인의 힘 생성을 통해 목표선에 최대한 가까이 20초 동안 유지하도록 하였다. 또한, 시각 정보를 차단하고 나서 힘 조절 능력을 평가하기 위해 같은 실험 상황에서 과제가 시작하고 난 5초 뒤 목표선과 가이드 선, 그리고 임계선을 피험자에게 보이지 않도록 제한하였다. 힘 조절 과제 시 발생할 수 있는 피로를 최소화하기 위해 시도 및 블록 간 각각 30초와 1분의 휴식시간을 제공하였다. 자세한 실험 상황은 (Fig. 1)과 같다.

모든 힘 신호는 16-bit 아날로그-디지털 컨버터(A/D; ADS1148 16-bit 2 kSPS, 최소 감지 힘 = 0.0192 N)를 사용하여 200 Hz로 데이터를 수집하였다. 또한 5 V 전압의 INA122 (Texas Instruments Inc., Dallas, TX, USA)를 사용하여 증폭되었으며, Microsoft Visual C++ 프로그램(Microsoft Corp., Redmond, WA, USA)을 통해 개발된 소프트웨어를 이용하여 시각 정보 및 힘 신호를 수집하였다.

데이터 처리

Matlab R2022a (Math WorksTM Inc., Natick, United States)를 이용하여 힘 데이터 분석을 실시하였으며, 시계열 분석에 있어 발생될 수 있는 불필요한 노이즈를 제거하기 위해 양방향 4차 버터워스 필터(bidirectional fourth-order Butterworth filter)를 이용하여 30 Hz cut-off 저역 통과 필터링을 실시하였다. 피험자들이 목표 힘에 도달하는 안정적인 상태를 정확하게 분석하기 위해 중간 14초를 분석하였다. 또한, 힘 조절 과제 중 초기 단계에서 목표 힘에 도달하기 위해 힘 조절의 급격한 상승과 이를 수정하기 위해 힘을 조정하는 과정 및 종료 시 목표 힘을 유지하는 능력과 근육이 이완되면서 생

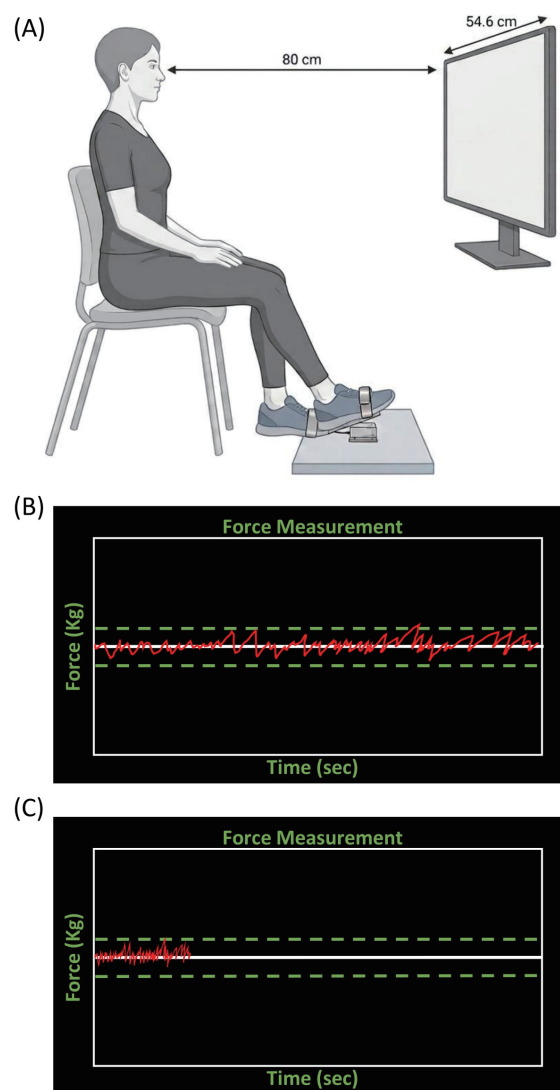


Fig. 1. Unilateral lower limb force control task. (A) Unilateral ankle force control position. (B) Vision on the screen during unilateral ankle isometric force control task. (C) No-vision on the screen during unilateral ankle isometric force control task.

기는 힘의 감소 구간을 고려하여 시작 5초와 마지막 1초의 힘 데이터 구간을 제외하였다(Lee & Kang, 2025).

하지 단축 등척성 힘 조절 능력은 평균 힘, 정확성, 가변성, 규칙성, 및 평활성을 분석하였다. 상대 평균 제곱근 오차(relative root mean square error, rRMSE = RMSE/목표 힘) 및 변동계수(coefficient of variation, CV) % = 힘 표준편차/평균 힘 × 100)를 이용하여 힘 생성 정도의 차이를 표준화하고 힘의 정확성과 가변성을 분석하였다. 힘의 규칙성은 SampEn을 사용하여 분석하였으며, 계산 방법은 다음과 같다.

$$npEn(x, m, r, N) = \ln \left[\frac{C_m(r)}{C_{m+1}(r)} \right]$$

이는 힘 시계열 데이터에서 m (길이)가 정해진 힘 패턴 값이 r (주어진 허용 오차) 값 내에서 다른 시점의 패턴과 반복되는 빈도를 의미한다. 다시 말해, m 은 비교 대상이 되는 패턴의 길이를, r 은 패턴 간의 유사성을 판별하는 허용 오차 기준을 나타낸다. Cm (r)은 자기 자신과의 일치(self-match)를 배제한 상태에서, 길이 m 인 특정 패턴이 시계열 내에서 반복적으로 나타날 확률을 의미한다(Richman & Moorman, 2000; Yentes et al., 2013). 이때, 선행연구에 따라 $m = 2$, $r = 0.2 \times$ 힘 데이터의 표준편차로 설정하였다(Yentes et al., 2013).

추가적으로 본 연구에서는 평활성 분석을 위해 YANK (dF/dt)를 활용하였다. 이는 힘이 변화하는 속도를 나타내는 지표로 1/200초 단위의 세밀한 시간 변화를 반영하여 분석하는 방법이다. 또한, 힘의 궤적이 변화하는 정도를 평가하고자 YANK의 평균제곱근(root mean square, RMS) 값을 계산하였다. 이때 전체적인 힘의 변화 폭이 결과에 미치는 영향을 배제하기 위해, 산출된 값을 힘의 표준편차(standard deviation of force, SDF)로 나누어 정규화하였다(Yacoubi & Christou, 2024b). 이 지표는 단순한 힘의 진폭 변화가 아닌, 힘 생성 과정에서 질적인 부드러움을 나타내며 값이 클수록 힘 조절의 평활성이 낮음을 나타낸다.

$$YANK_{RMS} (s^{-1}) = \frac{1}{SDF} \sqrt{\frac{1}{n-k+1} \sum_k^n (YANK_k)^2}$$

통계 처리

본 연구에서 수집된 데이터의 통계 분석은 Window 용 SPSS 프로그램(ver 28.0, SPSS Inc, IBM)을 사용하였다. 측정된 모든 값은 평균 $\pm$ 표준오차(mean $\pm$ standard error)로 산출하였다. 두 그룹 간 하지 주발 및 비주발의 MVC 차이를 비교하기 위해 각각 독립표본 T 검정(independent t -test)을 실시하였다. 각 목표 힘 수준에서 운동 기능 변인과 시각 정보의 유·무 차이에 따른 비교를 위해 주발과 비주발을 기준으로 각각 삼원 혼합 분산 분석(three-way mixed measures ANOVA; $2 \times 2 \times 2$: Group $\times$ Force Level $\times$ Vision)을 실시하였다. 통계적 유의수준은 $\alpha = .05$ 로 설정하였다.

연구결과

Maximal and Submaximal Force Production

하지 주발 및 비주발의 MVC에 대한 그룹별 독립표본 T 검정 결과, 그룹 간 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 즉, 주발에 대한 그룹 간 통계적 p 값이 0.116(축구선수 = 356.3 ± 13.0 N, 일반인 = 383.6 ± 11.7 N ($t_{27} = 1.624$, $p = .116$), 비주발에 대한 그룹 간 통계적 p 값이 0.582(축구선수 = 346.1 ± 14.8 N, 일반인 = 356.7 ± 13.1 N ($t_{27} = 0.558$, $p = .582$))로 각 발에 대한 그룹 간 유의미한 차이는 나타나지 않았다.

하지 주발의 평균 힘에 대한 삼원 혼합 분산 분석 결과 주발의 Group $\times$ Force Level $\times$ Vision의 상호작용 효과($F(1, 27) = 0.792$; $p = .381$; partial $\eta^2 = 0.028$) 및 그룹 간 주효과($F(1, 27) =$

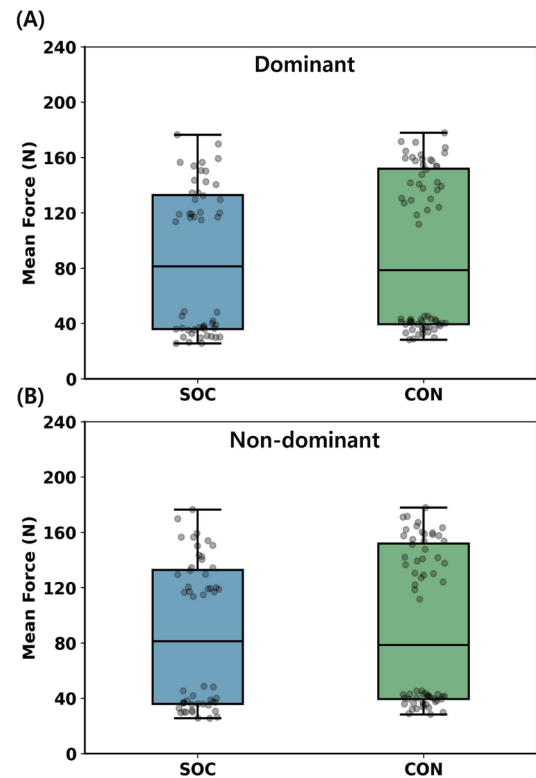


Fig. 2. Unilateral mean force. (A) dominant ankle, (B) non-dominant ankle.

2.894; $p = .100$; partial $\eta^2 = 0.097$)에 대한 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Fig. 2A).

비주발의 상호작용 효과($F(1, 27) = 0.159$; $p = .693$; partial $\eta^2 = 0.006$) 및 그룹 간 주효과($F(1, 27) = 0.403$; $p = .531$; partial $\eta^2 = 0.015$)에 대한 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Fig. 2B).

Unilateral Lower Limb Force Capabilities

1. 힘의 정확성

하지 주발의 rRMSE 분석 결과, 주발의 Group $\times$ Force Level $\times$ Vision의 상호작용 효과($F(1, 27) = 0.912$; $p = .348$; partial $\eta^2 = 0.033$) 및 그룹 간 주효과($F(1, 27) = 2.805$; $p = .106$; partial $\eta^2 = 0.094$)에 대한 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Fig. 3A).

비주발의 상호작용 효과($F(1, 27) = 0.250$; $p = .621$; partial $\eta^2 = 0.009$) 및 그룹 간 주효과($F(1, 27) = 0.397$; $p = .534$; partial $\eta^2 = 0.014$)에 대한 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Fig. 3B).

2. 힘의 가변성

하지 주발의 분석 CV 결과, 주발의 Group $\times$ Force Level $\times$ Vision의 상호작용 효과($F(1, 27) = 0.381$; $p = .542$; partial $\eta^2 = 0.014$) 및 그룹 간 주효과($F(1, 27) = 0.466$; $p = .501$; partial $\eta^2 = 0.017$)에 대한 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Fig. 4A).

비주발의 상호작용 효과($F(1, 27) = 0.996$; $p = .327$; partial $\eta^2 = 0.036$) 및 그룹 간 주효과($F(1, 27) = 0.466$; $p = .501$; partial $\eta^2 =$

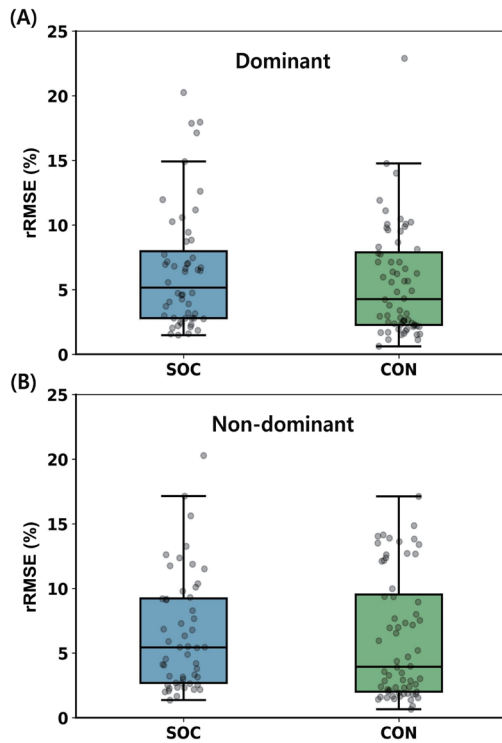


Fig. 3. Unilateral force accuracy (rRMSE). (A) dominant ankle, (B) non-dominant ankle.

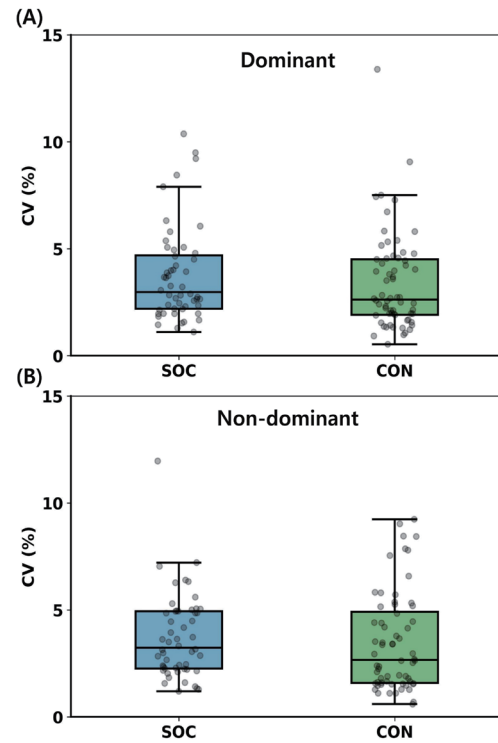


Fig. 4. Unilateral force variability (CV). (A) dominant ankle, (B) non-dominant ankle.

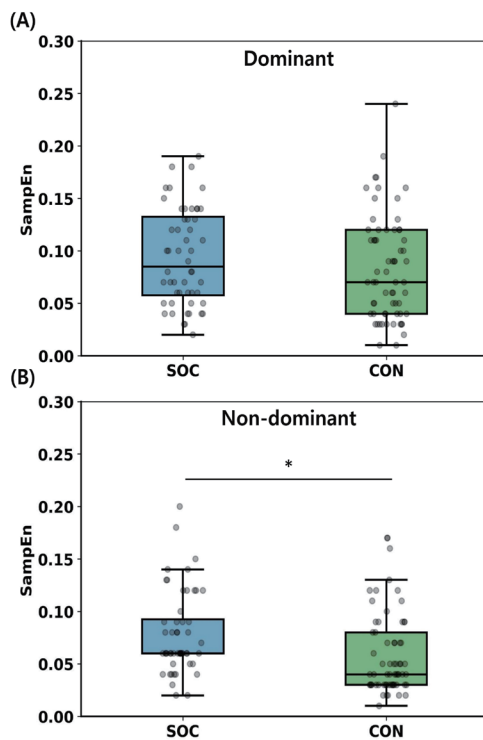


Fig. 5. Unilateral force regularity (SampEn). (A) dominant ankle, (B) non-dominant ankle. Asterisk (*) denotes significant difference between soccer players and control group ($p < .05$).

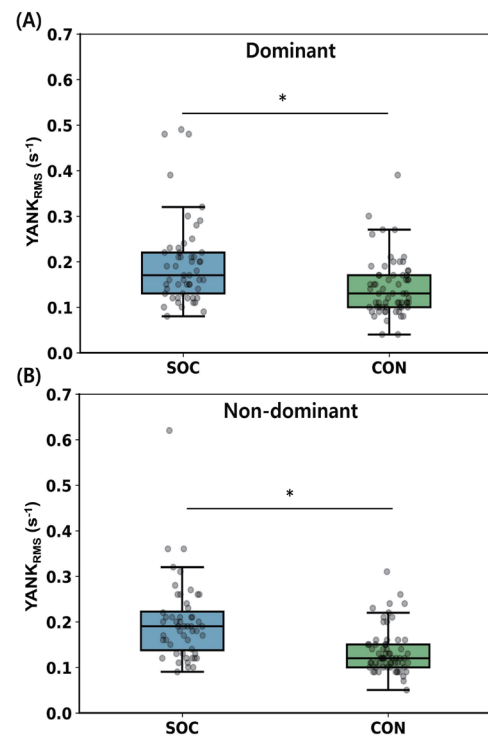


Fig. 6. Unilateral force smoothness (YANK). (A) dominant ankle, (B) non-dominant ankle. Asterisk (*) denotes significant difference between soccer players and control group ($p < .05$).

0.017]에 대한 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Fig. 4B).

3. 힘의 규칙성

하지 주발의 SampEn 분석 결과, 주발의 Group $\times$ Force Level $\times$ Vision의 상호작용 효과[F(1, 27) = 0.080; p = .779; partial η^2 = 0.003] 및 그룹 간 주효과[F(1, 27) = 2.890; p = .101; partial η^2 = 0.097; Fig. 5A]에 대한 유의미한 차이는 나타나지 않았다.

비주발의 상호작용 효과[F(1, 27) = 0.119; p = .733; partial η^2 = 0.004]에서는 유의미한 차이가 발생하지 않았지만, 그룹 간 주효과[F(1, 27) = 12.891; p = .001; partial η^2 = 0.323; Fig. 5B]에 대한 유의미한 차이가 확인되었다. 구체적으로, 선수들의 비주발에서 일반인보다 낮은 규칙성이 관찰되었다.

4. 힘의 평활성

하지 주발의 Yank 값 분석 결과, 주발의 Group $\times$ Force Level $\times$ Vision의 상호작용 효과[F(1, 27) = 0.435; p = .515; partial η^2 = 0.016]에서는 유의미한 차이가 나타나지 않았지만 그룹 간 주효과[F(1, 27) = 6.716; p = .015; partial η^2 = 0.199; Fig. 6A]에 대한 유의미한 차이가 확인되었다.

비주발의 상호작용 효과[F(1, 27) = 1.263; p = .271; partial η^2 = 0.045]에서는 유의미한 차이가 발생하지 않았지만, 그룹 간 주효과[F(1, 27) = 8.606; p = .007; partial η^2 = 0.242; Fig. 6B]에 대한 유의미한 차이가 확인되었다. 구체적으로, 선수들의 주발 및 비주발에서 일반인보다 낮은 평활성이 관찰되었다.

논 의

본 연구에서는 축구선수의 주발과 비주발에 대한 시각 정보의 유·무 및 과제 난이도에 따른 등척성 발목 힘 조절 능력을 평가하였다. 그 결과, 시각 정보의 유·무와 과제의 난이도에 따른 두 그룹 간의 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 그러나, 힘의 규칙성과 평활성에서 주발 및 비주발에 대한 그룹 간 유의미한 차이가 나타났다. 구체적으로, 축구선수와 일반인은 주발과 비주발에서 시각 정보의 유·무 및 과제 난이도와 관계없이 평균 힘, 정확성, 및 가변성에 대한 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 그러나 규칙성은 비주발에서 축구선수가 일반인들보다 유의미하게 낮게 나타났으며, 평활성의 경우 축구선수의 주발과 비주발 모두 일반인들보다 유의미하게 낮게 나타났다. 이는 숙련된 축구선수들이 과제 목표를 성공적으로 수행하기 위해 더 복잡하고 효율적인 조절 전략을 가진 것으로 보인다.

선행연구에 따르면 장기간의 훈련된 엘리트 선수들은 고유수용성 감각을 고도화하여 시각 정보를 제한한 상황에서도 성공적으로 목표 수행력을 발휘하는 것으로 나타났다(Talwar et al., 2024; Danion et al., 2000). 또 다른 연구에서는 시각적인 피드백이 없어도 고유수용성 피드백을 활용하여 상지의 운동 속도와 비례하는 안정적인(stable dynamics) 환경이나, 목표를 벗어날수록 오차를 더 크게 만드는 불안정한(unstable dynamics) 환경에서도 성공적으로 과제를 수행하는 것으로 나타났다(Franklin et al., 2007). 앞서 언급한 선행 연구들은 시각 정보가 없는 상황에서도 고유수용성 감각이나 체성 감각을 통해 과제 수행에 대한 가변성은 줄이고 정확성을 높임으로써

일정 수준 이상의 수행력을 발휘할 수 있음을 시사한다. 특히, 본 연구의 등척성 힘 조절 과제의 난이도는 최대하 10% 및 40%의 힘을 유지하는 것으로 일반인도 어려움 없이 수행 가능한 범위 내에 있어 신체 능력 수준에 따른 평균 힘, 정확성, 및 가변성에 대한 수행력에는 차이가 없는 것으로 사료된다.

축구선수에게서 관찰된 낮은 규칙성은 운동 제어의 복잡성과 높은 적응성을 의미하며, 이는 일반인들보다 축구선수의 비주발 힘 조절 능력이 좀 더 유연한 제어 전략을 가지고 있다고 해석할 수 있다(Barone et al., 2010). 선행연구에서는 운동선수들이 실시간 피드백을 통해 안정적인 패턴을 유지하면서도 환경적인 변화나 과제 난이도에 유연하게 대응하는 복잡한 제어 전략을 보이는 것으로 나타났다(Silva et al., 2021). 더욱이 축구는 양발을 능동적으로 사용해야 하는 종목으로 축구선수들은 각 발을 역할에 따라 제어하는 능력이 고도화되어있는 것으로 보인다. 따라서, 축구선수들에게 비주발의 역할은 단순하게 보조하는 역할이 아니라 정교한 자세 유지와 주발의 기술 수행력을 위한 독립적인 제어 시스템을 갖춘 것으로 판단된다(Barone et al., 2010; Haaland & Hoff, 2003). 즉, 축구선수의 비주발에 대한 낮은 규칙성은 기능적 오류가 아니라 환경적인 변화에 따라 정확성을 유지하기 위한 복잡하고 유연한 힘 조절 전략을 지속적으로 탐색하는 것으로 해석할 수 있다.

YANK 분석 결과, 축구선수의 주발과 비주발에 대한 평활성이 일반인보다 더 낮은 것으로 나타났다. 축구선수의 비주발은 강력한 킥이나 정교한 패스 동작을 위해 신체의 중심을 안정적으로 지지해야 하는 기술력을 필요로 한다. 선행연구에 따르면 축구선수는 정적 균형(static balance) 과제에서 높은 균형 능력을 보이는 것으로 나타났다(Barone et al., 2010), 하지의 기능적 비대칭성(functional asymmetry)이 일반인들보다 유의미하게 낮은 것으로 나타났다(Antosiak-Cyrak et al., 2015; Fousekis et al., 2010). 이는 숙련된 엘리트 선수들이 장기간 훈련을 통해 운동 수행 동작이 내재화되어 있어 신경학적으로 오차를 감지하고 수정하는 회로가 일반인들보다 더 정교하게 발달했기 때문인 것으로 보인다(Zhang et al., 2019). 즉, 운동을 담당하는 대뇌 피질에서 근육으로 내려가는 피드백 제어 작동이 최적화되어 과제 수행 시 목표 힘과 실제 발휘하는 힘 사이의 미세한 오차도 즉각적으로 감지하여 수정하기 때문에 효율적인 수행력을 발휘할 수 있도록 한다(Milton et al., 2007; Yarrow et al., 2009). 이러한 신체 기능 능력으로 인해 축구선수가 일반인과 유사한 수준의 힘 정확성 및 가변성을 보이더라도, 실제 신체 내부적으로는 수행 오차를 실시간으로 수정하기 위해 높은 복잡성과 적응성에 기반하여 유연하게 힘을 조절하는 전략을 발휘하는 것으로 사료된다.

더욱이, 장기간 숙련된 선수들의 경우, 목표 힘을 발현하기 위한 운동단위(motor unit, MU) 동원 속도(recruitment speed)와 신경계 구동(neural drive) 속도가 빠른 것으로 보인다. 선행연구에서는 14 주간의 고강도 저항 훈련(heavy-resistance strength training) 이후 하지 등척성 힘 조절 시 초기 단계(0-50 ms)에서 근수축에 대한 힘 발생 효율(rate of force development, RFD)이 급격하게 증가한 것으로 나타났다(Aagaard et al., 2002). 이는 근력의 평균은 비슷할지라도 그 과정에서 근육이 반응하기 전에 뇌가 근육으로 보내는 전기적 신호가 활성화되어 운동단위의 동원 속도가 빨라졌기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 또한 장기간의 훈련으로 TYPE II 근섬유 크기가 증가함에 따라 RFD를 극대화하는 능력이 발달해 있으며(Harridge et al., 1996), 이러한 생리적 변화가 힘을 수정할 때 근

육의 민감도와 반응속도를 향상시켜 축구선수의 주발과 비주발의 YANK 값을 높이는 주요 원인으로 보인다.

종합적으로 본 연구에서는 힘 조절 시 축구선수와 일반인이 유사한 평균 힘, 정확성, 및 가변성을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 축구선수들은 과제 수행 시 오차를 줄이기 위해 훨씬 더 역동적이고 복잡한 근신경계 제어 전략을 사용하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 축구선수의 비주발에서 나타난 낮은 규칙성과 양발에서 나타난 높은 YANK 값은 장기간 고도화된 훈련을 통해 설계된 정교한 피드백 루프와 최적화된 운동단위 동원 능력을 반영하는 결과로 해석할 수 있다. 이는 축구선수가 과제 수행 중 단순한 힘의 크기나 가변성의 오차만을 줄이려는 것이 아니라 외부 환경과 수행력에 대한 내적인 오류를 최소화하기 위한 것으로 판단된다. 즉, 주어진 과제 목표에 대해 유연하게 대응하기 위해 운동 제어 시스템의 복잡성과 적응성을 증가시키는 것으로 보인다. 본 연구 결과는 향후 축구선수들의 경기력 향상을 위한 주발 및 비주발 맞춤형 훈련 프로그램 개발 및 부상 예방을 위한 자료로 활용될 수 있다.

본 연구의 집단 간에는 연령에 대한 통계적 차이가 존재하였다. 이러한 연령 차이가 연구 결과에 영향을 미쳤는지를 분석하기 위해 공분산분석(analysis of covariance, ANCOVA)을 실시하였는데, 그 결과 연령이 발목 등척성 힘 조절 과제에 미치는 영향은 유의미하지 않은 것으로 나타났다. 또한, 본 연구에서 관찰된 높은 YANK 값은 숙련된 선수들의 경우, 변화하는 환경에 적응하여 실시간으로 오차를 수정하고 조절하려는 최적화된 근신경 제어 전략으로 해석된다. 그러나, 노인이나 신경학적 질병으로 인한 떨림(tremor) 증상을 가진 집단에서 발견될 수 있는 높은 YANK 값은 오히려 중추신경계의 운동 제어 능력 저하에 기인한 것일 수 있다. 즉, 목표 힘을 발휘하고 유지하는 과정에서 발생하는 미세한 오차에 대해 신경계가 필요 이상으로 반응하는 등 불필요한 힘 조절일 수 있으므로 이러한 특징이 병리적 신호인지를 평가하는 후속연구가 필요할 것으로 생각된다.

결론 및 제언

본 연구에서는 축구선수와 일반인을 대상으로 주발과 비주발의 시각 정보의 유·무 및 과제 난이도에 따른 등척성 힘 제어 전략(isometric force control strategies)을 평가하였다. 그 결과, 평균 힘, 힘의 정확성, 그리고 가변성에서는 주발과 비주발에 대한 시각 정보의 유·무와 과제 난이도에 따른 그룹 간의 유의미한 차이와 상호작용 효과가 나타나지 않았다. 그러나 비주발에 대한 힘의 규칙성과 주발 및 비주발에 대한 힘의 평활성은 축구선수가 일반인보다 유의미하게 낮은 것으로 나타났다. 이는 엘리트 축구선수들이 등척성 발목 힘 조절 시, 정형화된 힘 조절 패턴에 의존하지 않고, 예측하기 어려운 환경에 대응하여 역동적이고 유연하게 힘을 조절하고 있음을 의미한다. 향후 연구에서는 다양한 스포츠 종목의 특성(e.g., 개방형 및 폐쇄형 운동 기술)과 수행력을 반영하여 YANK 값이 관련 종목의 수행력을 예측할 수 있는 지표인지를 규명하는 연구가 필요할 것이다.

CONFLICT OF INTEREST

본 연구와 관련하여 연구비 지원 이외에 논문의 내용 및 결과에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 이해관계도 없음을 밝힌다.

AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptualization: Rye Kyeong Kim & Nyeonju Kang, Data curation: Rye Kyeong Kim, Formal analysis: Rye Kyeong Kim, Methodology: Rye Kyeong Kim, Project administration: Rye Kyeong Kim & Nyeonju Kang, Visualization: Rye Kyeong Kim, Writing-original draft: Rye Kyeong Kim & Nyeonju Kang, Writing-review & editing: Nyeonju Kang

참고문헌

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002). Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *Journal of Applied Physiology*, 93(4), 1318–26.
- Antosiak-Cyrak, K., Wiczynski, G., Podciechowska, K., & Rostkowska, E. (2015). Reliability of a new lower-extremity motor coordination test. *Polish Journal of Sport and Tourism*, 22(4), 219.
- Barone, R., Macaluso, F., Traina, M., Leonardi, V., Farina, F., & Di Felice, V. (2010). Soccer players have a better standing balance in nondominant one-legged stance. *Open Access Journal of Sports Medicine*, 2, 1–6.
- Baweja, H. S., Patel, B. K., Martinkewicz, J. D., Vu, J., & Christou, E. A. (2009). Removal of visual feedback alters muscle activity and reduces force variability during constant isometric contractions. *Experimental Brain Research*, 197(1), 35–47.
- Beato, M., Young, D., Stiff, A., & Coratella, G. (2021). Lower-limb muscle strength, anterior-posterior and inter-limb asymmetry in professional, elite academy and amateur soccer players. *Journal of Human Kinetics*, 77, 135–146.
- Ben Kahla, A., Elghoul, Y., Ammar, A., Masmoudi, L., Trabelsi, K., Glenn, J. M., & Dahmen, R. (2022). Bilateral training improves agility and accuracy for both preferred and non-preferred legs in young soccer players. *Perceptual and Motor Skills*, 129(6), 1804–1825.
- Brown, P. (2000). Cortical drives to human muscle: The Piper and related rhythms. *Progress in Neurobiology*, 60(1), 97–108.
- Christou, E. A., & Enoka, R. M. (2011). Aging and movement errors when lifting and lowering light loads. *Age*, 33(3), 393–407.
- Chtara, M., Rouissi, M., Bragazzi, N. L., Owen, A. L., Haddad, M., & Chamari, K. (2018). Dynamic balance ability in young elite soccer players: Implication of isometric strength. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 58(4), 414–420.
- Danion, F., Boyadjian, A., & Marin, L. (2000). Control of locomotion in expert gymnasts in the absence of vision. *Journal of Sports Sciences*, 18(10), 809–814.
- 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.
- Erickson, G. B. (2020). *Sports vision: Vision care for the enhancement of sports performance*. Elsevier Health Sciences.
- Exel, J., Mateus, N., Gonçalves, B., Abrantes, C., Calleja-González, J., & Sampaio, J. (2019). Entropy measures can add novel information to reveal how runners' heart rate and speed are regulated by different environments. *Frontiers in Psychology*, 10, 1278.
- Fousekis, K., Tsepis, E., & Vagenas, G. (2010). Lower limb strength in professional soccer players: Profile, asymmetry, and training age. *Journal of Sports Science & Medicine*, 9(3), 364.
- Franklin, D. W., So, U., Burdet, E., & Kawato, M. (2007). Visual feedback is not necessary for the learning of novel dynamics. *PLoS One*, 2(12), e1336.
- Haaland, E., & Hoff, J. (2003). Non-dominant leg training improves the bilateral motor performance of soccer players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 13(3), 179–184.
- Harridge, S., Bottinelli, R., Canepari, M., Pellegrino, M. A., Reggiani, C., Esbjörnsson, M., & Saltin, B. (1996). Whole-muscle and single-fibre contractile properties and myosin heavy chain isoforms in humans. *European Journal of Physiology*, 432(5), 913–920.
- Hu, X., & Newell, K. M. (2011a). Aging, visual information, and adaptation to task asymmetry in bimanual force coordination. *Journal of Applied Physiology*, 111(6), 1671–1680.
- Hu, X., & Newell, K. M. (2011b). Visual information gain and task asymmetry interact in bimanual force coordination and control. *Experimental Brain Research*, 212(4), 497–504.
- Hülsdünker, T., Strüder, H. K., & Mierau, A. (2018). The athletes' visuomotor system—Cortical processes contributing to faster visuomotor reactions. *European Journal of Sport Science*, 18(7), 955–964.
- Hunter, A. H., Smith, N. M. A., Camata, T. V., Crowther, M. S., Mather, A., Souza, N. M., Ramos-Silva, L. F., Pazetto, N. F., Moura, F. A., & Wilson, R. S. (2022). Age- and size-corrected kicking speed and accuracy in elite junior soccer players. *Science & Medicine in Football*, 6(1), 29–39.
- Izovska, J., Maly, T., & Zahalka, F. (2016). Relationship between speed and accuracy of instep soccer kick. *Journal of Physical Education and Sport*, 16(2), 459.
- Kang, M.-S., Hong, Y.-P., Kim, S.-J., Park, S., & Lee, D. T. (2020). The effect of core training on development and stability of lower extremity muscle strength in female soccer players. *Journal of the Korean Society for Wellness*, 15(3), 431–443. <https://doi.org/10.21097/ksw.2020.08.15.3.431>
- Kim, J. J., Shankar, V. R., Delmas, S., Choi, Y. J., Weintraub, M., Malik, R. J., Yacoubi, B., & Christou, E. A. (2026). Distinct effects of visual gain manipulation on force variability and smoothness during constant isometric contractions. *Journal of Neurophysiology*, 135(1), 324–333.
- Kim, R. K., Park, C., Jeon, K., Park, K., & Kang, N. (2021). Different unilateral force control strategies between athletes and non-athletes. *Journal of Biomechanics*, 129, 110830.
- Kim, W., Chang, Y., Kim, J., Seo, J., Ryu, K., Lee, E., Woo, M., & Janelle, C. M. (2014). An fMRI study of differences in brain activity among elite, expert, and novice archers at the moment of optimal aiming. *Cognitive and Behavioral Neurology: Official Journal of the Society for Behavioral and Cognitive Neurology*, 27(4), 173–182.
- Klatt, S., & Smeeton, N. J. (2022). Processing visual information

- in elite junior soccer players: Effects of chronological age and training experience on visual perception, attention, and decision making. *European Journal of Sport Science*, 22(4), 600–609.
- Ko, D. K., Lee, H., Lee, H., & Kang, N. (2025). Bilateral ankle dorsiflexion force control impairments in older adults. *PLoS One*, 20(3), e0319578.
- Laine, C. M., Martinez-Valdes, E., Falla, D., Mayer, F., & Farina, D. (2015). Motor neuron pools of synergistic thigh muscles share most of their synaptic input. *Journal of Neuroscience*, 35(35), 12207–12216.
- Lee, H., Ko, D.-K., & Kang, N. (2025). Effects of visual feedback on bimanual force control capabilities and motor unit activation patterns. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, 35(1), 1–9.
- Lee, H., Lee, J. H., Lee, T. L., Ko, D. K., & Kang, N. (2023). Dual-hemisphere anodal transcranial direct current stimulation improves bilateral motor synergies. *Frontiers in Psychology*, 14, 1211034.
- Lee, T. L., & Kang, N. (2025). Bilateral force control and coordination patterns across upper and lower limbs. *EXCLI Journal*, 24, 1335–1346.
- Lee, T. L., Ko, D. K., & Kang, N. (2024). Advanced force coordination of lower extremities during visuomotor control task in soccer players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 95(3), 581–587.
- Lin, D. C., McGowan, C. P., Blum, K. P., & Ting, L. H. (2019). Yank: the time derivative of force is an important biomechanical variable in sensorimotor systems. *Journal of Experimental Biology*, 222(18), jeb180414.
- Milton, J., Solodkin, A., Hluštík, P., & Small, S. L. (2007). The mind of expert motor performance is cool and focused. *Neuroimage*, 35(2), 804–813.
- Satas, A., Jurgelaitiene, G., Brazaitis, M., Eimantas, N., & Skurvydas, A. (2020). Effect of knee extensors muscles fatigue on bilateral force accuracy, variability, and coordination. *Human Movement Science*, 72, 102659.
- Silva, A. F., Komar, J., & Seifert, L. (2021). Editorial: Search of individually optimal movement solutions in sport: learning between stability and flexibility. *Frontiers in Psychology*, 12, 728375.
- Silva, P., Duarte, R., Esteves, P., Travassos, B., & Vilar, L. (2016). Application of entropy measures to analysis of performance in team sports. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 16(2), 753–768.
- Snyder, N., & Cinelli, M. (2020). Comparing balance control between soccer players and non-athletes during a dynamic lower limb reaching task. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 91(1), 166–171.
- Sosnoff, J. J., & Newell, K. M. (2005). Intermittent visual information and the multiple time scales of visual motor control of continuous isometric force production. *Perception & Psychophysics*, 67(2), 335–344.
- Talwar, S., Smith, J. W., & Lamberth, J. (2024). The effect of stroboscopic vision training on blind-folded straight-line walking. *International Journal of Exercise Science*, 17(1), 438–444.
- Yacoubi, B., & Christou, E. A. (2024a). Motor output variability in movement disorders: Insights from essential tremor. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 52(3), 95–101.
- Yacoubi, B., & Christou, E. A. (2024b). Rethinking force steadiness: A new perspective. *Journal of Applied Physiology*, 136(5), 1260–1262.
- Yarrow, K., Brown, P., & Krakauer, J. W. (2009). Inside the brain of an elite athlete: The neural processes that support high achievement in sports. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(8), 585–596.
- Yilmaz, O., Soylu, Y., Erkmén, N., Kaplan, T., & Batalik, L. (2024). Effects of proprioceptive training on sports performance: A systematic review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 16(1), 149.
- Zhang, L., Qiu, F., Zhu, H., Xiang, M., & Zhou, L. (2019). Neural efficiency and acquired motor skills: An fMRI study of expert athletes. *Front Psychol*, 10, 2752.
- Zhongfan, L., & Inomata, K. (2003). Visual information processing under time pressure in high and low level soccer players. *Percept Mot Skills*, 96(3), 1040–1042.

‘YANK 분석을 활용한’ 축구선수의 차별화된 발목 등척성 힘 조절 전략

김려경¹, 강년주^{2*}

¹인천대학교 체육학과, 박사수로

²인천대학교 스포츠과학부, 부교수

*교신저자: 강년주(nyunju@inu.ac.kr)

[목적] 본 연구는 축구선수들의 주발과 비주발에 대한 시각 정보의 유·무 및 과제 난이도가 발목 등척성 힘 제어 전략에 어떠한 영향을 미치는지 조사하는 데 목적을 두고 있다.

[방법] 축구선수 13명 및 일반인 16명, 총 29명의 연구 대상자들이 각각 MVC의 10%와 40%의 힘 수준에서 시각 정보의 유·무에 따른 발목 등척성 힘 조절 과제를 수행하였다. 힘 조절 능력은 평균 힘, 정확성, 가변성, 규칙성(Sample entropy)을 통해 발목 등척성 힘 조절 전략을 평가하였다. 추가적으로 YANK 분석을 통해 시간에 따른 힘 변화의 부드러움을 나타내는 평활성을 계산하였다.

[결과] 시각 정보의 유·무 및 과제 난이도에 따른 두 그룹 간의 평균 힘, 정확성, 및 가변성에 대한 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 그러나, 비주발에서 축구선수들이 일반인들보다 유의미하게 낮은 규칙성을 보였으며, 평활성은 축구선수의 주발과 비주발 모두 일반인들보다 유의미하게 낮은 것으로 나타났다.

[결론] 본 연구의 결과는 등척성 발목 힘 조절 과제 시 축구선수의 비주발에서 보인 낮은 규칙성과 평활성이 숙련된 엘리트 선수일수록 지속적으로 변화하는 환경이나 미세한 오차에 대응하여 고정된 힘 조절이 아니라 유연하게 힘을 발휘하려는 것을 의미한다. 이는 축구선수들이 실제 힘 조절 과정에서도 고도화된 적응성을 발휘하여 성공적으로 과제를 수행하려는 것으로 해석할 수 있다. 향후 연구에서는 다양한 스포츠 종목의 특성(e.g., 개방형 및 폐쇄형 운동기술)과 수행력을 반영하여 YANK 값이 관련 종목의 수행력을 예측할 수 있는 지표인지를 규명하는 연구가 필요할 것이다.

주요어

엘리트 축구선수, 하지, 등척성 발목 힘 조절 전략, YANK 분석

※ 이 논문은 2024년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2024S1A5A2A03039509).