



Original Article

Force Maintenance Capacity and Muscle Fatigue Resistance Across Weight Classes in Elite Male Ssireum Athletes

Tae-Whan Kim¹, Tae-Hyun Lee², Ki-Hoon Han³, and Su-Yeon Park^{3,4*}

¹Department of Sports Science, Korea Institute of Sport Science

²Department of Combative Martial Arts Training, Yong-In University

³Department of Physical Education, Pusan National University

⁴Human Performance Laboratory, Descente Innovation Studio Complex

Article Info

Received 2026. 03. 02.

Revised 2026. 03. 27.

Accepted 2026. 04. 19.

Correspondence*

Su-Yeon Park

suyeparks@gmail.com

Key Words

Ssireum,

Force maintenance ability,

Muscle fatigue,

Load cell sensor, EMG

PURPOSE This study investigated weight class-related differences in force maintenance ability and muscle fatigue resistance among elite Ssireum athletes and elucidated the underlying factors associated with these differences. **METHODS** Twenty-four elite Ssireum athletes were classified into a lightweight (Taebaek and Geumgang, $n=12$) or heavyweight (Halla and Baekdu, $n=12$) group. Absolute and body-weight-normalized forces were measured using a load cell during maximal isometric pulling. The mean power frequency slope on electromyography was used as a fatigue index to assess fatigue progression in the upper- and lower-extremity muscles. Between-group differences were examined using independent t-tests (or nonparametric equivalents), and laterality-group interaction effects were analyzed using two-way mixed analysis of variance (ANOVA, $\alpha=.05$). **RESULTS** The weight groups differed significantly ($p<.05$) in force maintenance evaluation measured by load cell sensors: force maintenance slope (N/s), normalized total mean force (N/bw), normalized early mean force (N/bw), and normalized late mean force (N/bw). Furthermore, the groups differed significantly in muscle fatigue resistance in the left flexor carpi ulnaris (FCU, $p=0.013$). Two-way mixed ANOVA revealed significant side effects for the biceps femoris (BF, $p=0.035$) and significant class effects for the latissimus dorsi (LD, $p=0.038$). **CONCLUSIONS** Weight-class differences in force maintenance capacity are driven by distinct muscle fatigue resistance patterns, rather than absolute strength. Specifically, divergent neuromuscular strategies in upper- and lower-limb coordination are crucial for maintaining repeated force and addressing performance gaps during late-stage competition. These findings establish a scientific basis for developing weight-class-specific training protocols and multidimensional performance indicators for elite Ssireum athletes.

서론

씨름은 한국 고유의 전통 스포츠로, 두 선수가 살바를 잡고 상대를 넘어뜨리거나 벗겨내어 승부를 겨루는 경기이다. 수백 년의 역사 속에서 민속 경기로 자리 잡아왔으며, 명절이나 지역 축제에서 빠지지 않

는 중요한 문화 행사로서 국민적 관심을 받아왔다. 씨름은 단순한 힘 겨루기를 넘어 체급별로 다양한 전략과 기술이 경기 결과를 좌우하는 종합 격투 스포츠이다. 체급에 따라 경기 양상과 기술사용 빈도, 그리고 공격 및 방어 전략이 뚜렷하게 다르기 때문에 각 체급에 따른 경기력 분석과 훈련 방법 개발이 필수적이다. 그러나 국내외로 근력, 근지구력 및 피로 전략에 관한 연구가 꾸준히 이루어진 유도과 레슬링 등 다른 투기 종목에 비해 씨름은 상대적으로 학문적 관심과 자료가 부족하므로 선수의 경기력 향상과 부상 예방을 위한 기초 과학적 근거 마련이 시급하다. 특히, 씨름의 경기 특성상 최대 등척성 힘의 발휘 및

© 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.

유지 능력은 승패를 결정짓는 핵심 요소임에도 불구하고, 실제 체급별 힘 발휘 전략이나 근피로 특성에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다.

유도 종목에서는 핵심 동작인 당기기를 중심으로 힘 발휘 특성과 최대 등척성 근력 유지 능력이 경기력의 핵심 요소로써 관련 연구가 활발하게 수행되어 왔다. 로드셀 기반 시스템을 활용하여 힘의 방향과 크기를 정량화하거나(Detanico et al., 2012; Kil et al., 2018; Montoro-Bombú et al., 2023; Yilmaz, 2015), 최대 등척성 당기기(Isometric Mid-Thigh Pull, IMTP)를 통해 최대 힘과 힘 발현율(Rate of Force Development, RFD)을 측정하는 방법이 경기력 평가 도구로 사용되고 있다(Detanico et al., 2012; Montoro-Bombú et al., 2023; Hassmann et al., 2011). 또한, 팔꿈치 관절을 최대 굴곡한 상태에서 소매를 당겨 힘을 오래 유지하거나 동일 자세에서 최대 힘 발휘하는 능력은 성공적인 경기 수행의 중요한 요소이며 근 지구력을 포함한 힘 유지 능력과 피로 저항성이 매우 중요하다고 강조되어 왔다(Franchini et al., 2011). Kim et al.(2025)은 동일한 당기기 과제를 통해 체급별 최대 당기기 힘과 지면반력 특성을 분석한 결과, 경량급이 더 무거운 체급보다 높은 최대 힘을 발휘하며 하지 기여도가 더 크다는 것을 보고하였다.

투기 종목에서 힘 발휘와 유지 능력, 그리고 힘 방향 제어 전략 등에 관한 연구가 활발히 진행되어 온 것과 더불어, 특정 동작 수행 중 발생하는 근피로를 분석하는 것 또한 경기력 평가의 핵심적인 요소로 다루어져 왔다. 특히 근전도(Electromyography, EMG) 신호의 RMS(Root Mean Square) 및 평균 전력 주파수(Mean Power Frequency, MPF) 변화를 근피로 지표로 활용하는 연구(Cifrek et al., 2009; Coorevitis et al., 2008; Phinyomark et al., 2012; Potvin & Bent, 1997; Wang et al., 2015)가 지속적으로 수행되어 왔으나, 이러한 주파수 기반의 지표를 씨름의 체급 특성에 직접적으로 적용하여 분석한 연구는 많지 않다.

씨름은 상대방을 견제하며 고정된 자세에서 최대 힘뿐만 아니라, 경기 후반부까지 반복되는 당기기 상황에서 힘을 얼마나 오래 유지할 수 있는지가 승패를 좌우하는 핵심 요소이다. 특히 체급별 경기 특성에 따라 힘 발휘 및 유지 전략은 매우 상이하기 때문에, 힘 유지 전략과 근육 피로 누적 양상이 경기 지속 능력과 전략 선택에 중요한 역할을 한다. 최근 씨름 선수의 체급별 당기기 전략에 관한 선행연구(Kim et al., 2025)를 통해 역학적 변인들이 보고된 바 있으나, 단발성 최대 힘 발휘와 지면반력 분석에 국한되어 실제 경기 상황에서 요구되는 지속적 힘 유지 능력과 근피로 저항성은 규명되지 않았다.

이에 본 연구는 해당 연구에서 확인된 체급별 당기기 전략의 연장선상에서, 당기기 과제 수행 시의 '최대 등척성 힘 유지 능력'과 '근피로 저항성'의 체급 간 차이를 분석하고자 한다. 이를 통해 엘리트 씨름 선수의 체급별 특성에 맞춘 전략적 훈련 설계 및 경기력 극대화를 위한 과학적 근거를 마련함으로써, 전통 스포츠로서 씨름의 학술적·현장적 발전에 기여하는 데 그 목적이 있다.

연구방법

연구대상

본 연구는 Kim et al.(2025)에 보고된 동일한 24명의 엘리트 씨름 선수를 대상으로 하였으며, 로드셀을 최대 힘으로 당기고 자세를 유

지하는 과제 동안 상하지 주요 근육의 근전도(EMG) 데이터를 추가로 수집하여 분석하였다. 체급에 따른 특성을 분석하기 위하여 태백급과 금강급을 경량급(Lightweight Group; LG, $n=12$)으로, 한라급과 백두급을 중량급(Heavyweight Group; HG, $n=12$)으로 분류하였다. 각 그룹의 신체적 특성은 다음과 같다.

- 경량급(LG): 나이 29.3 ± 4.5 yrs, 키 1.79 ± 0.04 m, 몸무게 89.4 ± 5.7 kg
- 중량급(HG): 나이 29.4 ± 5.4 yrs, 키 1.84 ± 0.06 m, 몸무게 126.8 ± 17.5 kg

모든 연구 대상자는 오른손과 오른발을 주로 사용하는 우세측 선수들이며, 최근 6개월 이내에 근골격계 부상이나 외과적 수술 이력이 없는 선수들로 구성되었다. 본 실험에 앞서 모든 참여자는 연구 목적에 대한 충분한 설명을 듣고 사전에 실험 과정을 충분히 숙지하였으며, 연구 참여 동의서에 서명 후 자발적으로 실험에 참여하였다.

실험절차

각 참여자는 정면에 설치된 로드셀 센서에 연결된 양갈래 튜브를 양손으로 각각 쥐고 로드셀 센서로부터 1.5m 거리에서 씨름의 시작 자세와 유사하게 상체를 숙이고 무릎을 굽혀 낮은 자세를 유지하여 준비하였다. 실험에 사용된 튜브는 실제 당기기 훈련 시 주로 사용되는 고강도의 고무 튜브로 끝에서 20cm 앞에 위치를 표시하여 모든 선수가 동일한 강도로 당길 수 있도록 하였다. 선수의 시작 높이에 따라 로드셀 센서의 수평 위치를 조정한 후, 시작 신호에 따라 최대 자발적 수축으로 당긴 자세를 20초 동안 등척성 수축으로 유지하도록 하였다.

실험장비

최대 당기기 힘을 측정하기 위하여 최대 1톤까지 측정할 수 있는 로드셀 센서(LCXYZ-T001, A&D Korea)를 사용하였다. 로드셀 신호는 초당 200Hz의 샘플링 속도로 실시간으로 측정되어 아날로그 증폭기를 통해 컴퓨터에 전송되며, LabVIEW 소프트웨어(2014 ver)에서 데이터를 수집 및 저장할 수 있도록 하였다. 근피로도 분석을 위하여 근전도 시스템(Telemyo DTS, Noraxon, USA)을 사용하여 상하지의 주요 근육인 외측광근(Vastus Lateralis, VL), 내측광근(Vastus Medialis, VM), 대퇴이두근(Biceps Femoris, BF), 광배근(Latissimus Dorsi, LD), 요측수근굴근(Flexor Carpi Radialis, FCR), 척측수근굴근(Flexor Carpi Ulnaris, FCU)의 좌·우측 근육을 모두 수집하였다.

데이터 처리

본 연구의 모든 신호 데이터는 Python(version 3.11; Python Software Foundation, USA)을 사용하여 분석하였다. 신호처리를 위해 SciPy 라이브러리를 사용하였으며, 선형회귀분석 지표 산출을 위해 Scikit-learn의 LinearRegression 모델을 활용하였다. 로드셀 데이터는 당기는 방향의 축 데이터를 추출하여 선수 개인의 절대 힘 값을 산출하여 전체 힘 평균, 초반 힘 평균(5초), 후반 힘 평균(5초)을 산출하였다. 또한, 시간에 따른 힘 변화량을 독립변수로, 절대 힘(N)

을 종속변수로 하는 선형회귀 기울기(N/s)를 산출하여 힘 유지 수준을 분석하였다. 이때 산출된 기울기 값은 시간에 따른 힘의 감소율을 의미하며, 기울기의 절댓값이 작을수록(0에 가까울수록) 힘 유지 능력이 우수함을 나타낸다.

특히 본 연구에서는 체급 간의 실제 근력 출력과 체중 대비 효율성을 다각도로 분석하기 위해 절대 힘(N)과 체중으로 정규화한 상대 힘(N/bw)을 병행하여 산출하였다. 다만, 단순 산술적 비율로 정규화하는 비례 정규화(ratio scaling)는 체질량과 근력 간의 비선형적 관계를 완전히 통제하지 못해 중량급 선수의 상대 근력이 과소평가될 수 있다는 통계적 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 두 지표를 함께 제시함으로써 체급별 힘 발휘 특성에 대한 보다 균형 있고 객관적인 해석을 도모하고자 하였다.

근전도 측정을 위해 SENIAM(Surface EMG for Non-Invasive Assessment of Muscles) 가이드라인을 기준으로 전극을 부착하였으며(Hermens et al., 2000), 근전도 신호는 1500Hz의 샘플링 주파수로 수집하였다. 신호의 노이즈 및 불필요한 주파수 성분을 제거하기 위해 20 Hz ~ 450 Hz의 4th-order bandpass를 적용하여 필터링 하였다.

근전도 신호는 1초 길이의 구간 분할을 통해 단시간 푸리에 변환(Short-Time Fourier Transform, STFT)으로 주파수 분석을 실시하였고(Phinyomark et al., 2012; Yousif et al., 2019), 산출된 20개의 평균 전력 주파수(Mean Power Frequency, MPF) 값을 선형회귀 모델에 적용하였다. 이때 시간에 따른 MPF 기울기(Hz/s)를 근피로 저항성 평가를 위한 피로 지표(Fatigue Index)로 정의하였으며, 해당 기울기가 음의 방향으로 가파를수록 근피로 진행 속도가 빠름을 의미한다. 이 과정에 대한 예시는 <Fig. 1>과 같다.

통계 처리

모든 변인은 평균과 표준편차로 제시하였다. 로드셀 힘 변인들은 정규성 검정을 수행한 후, 그룹 간 차이를 비교하기 위해 독립표본 *t*-검정(independent *t*-test)을 사용하였고 정규성을 만족하지 못한 변인의 경우 비모수 검정을 진행하였다. 모든 측정 근육의 근피로 지수는 그룹 간 차이뿐만 아니라 좌우 차이도 고려하기 위해 이원 혼합 분산분석(Two-way mixed ANOVA)을 적용하였으며, 그룹(경량급 vs 중량급)과 측면(좌측 vs 우측) 간의 상호작용 및 주효과를 분석하였다. 모든 데이터는 IBM SPSS Statistics 25 (IBM Corp., Armonk, NY,

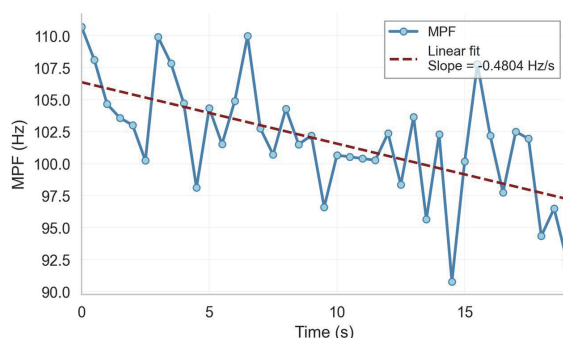


Fig. 1. Example of muscle fatigue index (MPF Slope) in the left flexor carpi ulnaris

USA)를 이용하여 분석하였으며, 통계적 유의수준은 $\alpha = 0.05$ 로 설정하였다. 사후검정은 Bonferroni 검정을 실시하였다.

연구결과

힘 유지 능력 평가

본 연구의 로드셀을 통해 측정된 체급별 힘 유지 능력 평가 결과는 <Table 1>에 제시하였다. 분석 결과, 힘 유지 기울기(Force Maintenance Slope, N/s)는 경량급(LG)에서 -0.23, 중량급(HG)에서 -2.20으로 나타나 그룹 간 차이가 통계적으로 유의미하였다($p = 0.028$, $d = 0.962$). 이는 경량급과 비교하여 중량급 선수들의 당기기 힘이 20초의 측정 구간 동안 더 가파른 감소율을 보였음을 의미한다. 체중 대비 힘 발휘 효율을 나타내는 체중 정규화 힘(N/bw) 비교에서도 모든 시점(전체, 초기, 후기)에서 경량급이 중량급에 비해 유의하게 높은 수치를 발휘하여 뚜렷한 체급 간 차이를 보였다($p < .001$). 구체적으로 전체 구간의 평균 상대 힘(Overall Mean Force)은 경량급 6.25, 중량급 4.68로 나타났으며, 이러한 우위는 초기 및 후기 구간에서도 일관된 패턴으로 확인되었다. 반면, 보조적 지표인 절대 힘(Overall Mean Force, Early/Late Mean Force, N)의 경우 그룹 간 유의미한 차이가 나타나지 않아($p > .05$), 두 체급 그룹이 발휘한 물리적인 힘의 절대적 크기는 유사한 수준이었음을 확인하였다.

Table 1. Comparisons of force maintenance capacity(N/s) and pulling force between weight classes (Mean $\pm$ SD)

Variables	LG	HG	Effect size	<i>p</i>
Force Maintenance Slope (N/s)	-0.23 (1.40)	-2.20 (2.53)	0.962	0.028 *
Total Mean Force (N)	558.58 (67.30)	585.92 (76.59)	-0.379	0.363
Early Mean Force (N)	561.06 (70.16)	597.89 (80.11)	-0.489	0.244
Late Mean Force (N)	557.60 (66.41)	576.69 (76.11)	-0.267	0.519
Normalized Total Mean Force (N/bw)	6.25 (0.61)	4.68 (0.75)	2.288	< .001 **
Normalized Early Mean Force (N/bw)	6.28 (0.63)	4.78 (0.76)	2.156	< .001 **
Normalized Late Mean Force (N/bw)	6.24 (0.62)	4.61 (0.77)	2.332	< .001 **

* $p < .05$, ** $p < .001$

근피로 저항성 평가

각 근육의 측면별 MPF 기울기 평균값과 체급 간 비교 결과는 <Table 2>에 제시하였다. 분석 결과, FCU 좌측에서 경량급과 중량급 간의 MPF 기울기 차이가 통계적으로 유의하게 나타났다($p = .013$, $d = 1.104$). 이는 매우 큰 효과 크기를 보이며, 중량급 선수의 좌측 FCU에서 경량급에 비해 현저히 빠른 피로가 진행됨을 의미한다. LD의 경우, 좌측($p = .069$, $d = 0.814$)과 우측($p = .067$, $d = 0.787$) 모두 통계적 유의수준에 도달하지 못하였으나, 두 측면 모두에서 중량급이 경량급보다 가파른 MPF 감소를 보이는 체급 간 차이의 경향성이 확인되었으며, 두 측면 모두 중간 이상의 효과 크기가 관찰되어, 체급에 따른 피로 양상의 차이를 시사하였다.

BF에서는 그룹 간 통계적 유의차는 나타나지 않았으나, 우측에서는 중량급이 더 가파른 MPF 감소를 보인 반면($p = .371$, $d = 0.385$), 좌측에서는 오히려 완만한 감소 양상을 나타내어($p = .371$, $d = -0.385$) 측면 비대칭성 패턴이 관찰되었다. 그 외 VL, VM, FCR의 경우, 모든 측면에서 체급 간 통계적으로 유의한 차이가 발견되지 않았다($p > .05$).

Table 2. Comparisons of fatigue index (MPF Slope, Hz/s) by muscle and laterality between weight classes (Mean $\pm$ SD)

Muscle	Side	LG	HG	Effect size	<i>p</i>
VL	Left	-0.910 (2.772)	0.324 (2.176)	0.165	0.707
	Right	-0.074 (0.226)	-0.111 (0.300)	0.137	0.740
VM	Left	-0.274 (0.996)	0.216 (0.718)	-0.510	0.237
	Right	0.012 (0.360)	-0.036 (0.754)	0.699	0.112
BF	Left	-0.061 (0.817)	0.510 (1.809)	-0.385	0.371
	Right	-0.175 (0.475)	-0.597 (1.06)	0.385	0.371
LD	Left	-0.231 (0.406)	-0.387 (0.257)	0.814	0.069
	Right	-0.101 (0.404)	-0.383 (0.305)	0.787	0.067
FCU	Left	-0.101 (0.605)	-0.616 (0.265)	1.104	0.013 *
	Right	-0.318 (0.450)	0.168 (1.437)	-0.486	0.260
FCR	Left	-0.090 (0.578)	-0.480 (0.654)	0.590	0.175
	Right	-0.067 (0.432)	-0.317 (1.203)	0.276	0.506

* $p < .05$. For variables analyzed with non-parametric tests, effect size r was converted to Cohen's d for consistent comparison.

각 근육의 MPF 기울기에 대한 이원 혼합 분산분석 결과는 <Table 3>에 제시하였다. 분석 결과, 모든 측정 근육에서 체급과 측면 간의 유의미한 상호작용 효과는 나타나지 않았다. 주효과 분석에서 BF의 경우 측면(Side)에 따른 주효과가 유의미하게 나타났으며($F = 5.072$, $p = .035$, $\eta_p^2 = 0.187$), 이는 체급과 관계없이 좌·우 근육 간의 피로 진행 양상에 차이가 있음을 시사한다. LD의 경우, 체급(Class)에 따른 주효과가 통계적으로 유의미한 것으로 확인되었다($F = 4.867$, $p = .038$, $\eta_p^2 = 0.181$). 이러한 결과는 앞선 개별 측면 분석에서 관찰된 체급 간 차이의 경향성이, 측면 요인을 통합하여 분석한 분산분석을 통해 통계적 유의 수준 내에서 검출된 것으로 해석할 수 있다. 이는 씨름 당기기 수행 시 중량급 선수가 경량급에 비해 LD에서 상대적으로 더 가파른 근신경 피로 양상을 보일 가능성을 시사한다. 분석된 두 근육 모두에서 중간 수준의 효과 크기를 보였다. 그 외 근육(VL, VM, FCU, FCR)에서는 상호작용 및 주효과가 발견되지 않았다($p > .05$).

논 의

본 연구는 엘리트 씨름 선수의 체급별 최대 등척성 당기기 힘 유지 전략과 근피로 특성을 규명하고자 하였다. 분석 결과, 경량급(LG)은 중량급(HG)에 비해 체중 대비 힘 발휘 효율(Overall Mean Force, N/bw)과 힘 유지 저항성(Force Maintenance Slope, N/s)에서 유의미하게 우수한 특성을 보였다. 근피로도 평가에서는 중량급이 경량급에 비해 척추수근굴근(FCU)과 광배근(LD)에서 현저히 가파른 평균전력

Table 3. Two-way mixed ANOVA: Interaction effects of laterality and weight class on fatigue index by muscle

Muscles	Source	<i>F</i>	Effect size	<i>p</i>
VL	Class	1.270	0.055	0.272
	Side	0.167	0.008	0.686
	Interaction	1.673	0.071	0.209
VM	Class	0.910	0.040	0.350
	Side	0.007	0.000	0.934
	Interaction	1.893	0.079	0.183
BF	Class	0.037	0.002	0.848
	Side	5.072	0.187	0.035 *
	Interaction	3.354	0.132	0.081
LD	Class	4.867	0.181	0.038 *
	Side	0.427	0.019	0.520
	Interaction	0.378	0.017	0.545
FCU	Class	0.005	0.000	0.946
	Side	1.201	0.052	0.285
	Interaction	3.755	0.146	0.066
FCR	Class	1.667	0.070	0.210
	Side	0.223	0.010	0.641
	Interaction	0.128	0.006	0.724

* $p < .05$

주파수(MPF) 감소를 보여 상지 중심의 근신경 피로가 집중되는 양상이 관찰되었다. 이러한 결과는 씨름의 체급별 기술 전략 차이가 근신경계의 피로 저항성과 밀접한 관련이 있음을 시사한다.

씨름은 유도과 유사하게 상대의 살바를 잡고 당기는 힘이 경기력을 결정짓는 핵심 요소이다. 유도 종목에서는 당기기 힘과 체급별 힘 발휘 전략에 대한 연구가 축적되어 있다. Detanico et al.(2012)은 유도 선수를 대상으로 judogi pull test를 실시한 결과, 절대 최대 힘(Fmax)은 체중 증가에 비례하나, 체중으로 보정한 상대적 힘(Fmax/kg)은 경량급에서 더 높게 나타났다고 보고하였다. Franchini et al.(2011)은 최대 등척성 힘은 경험이 많고 기술 수준이 높은 선수에서 더 높게 나타나지만, 체급별 비교 시 절대 힘 차이에도 불구하고 체중 대비 힘에서는 경량급의 상대적 효율성이 두드러짐을 확인하였다. Hassmann et al.(2010)은 Seoi-Nage 시뮬레이션 실험에서 표준화된 힘 변수(N/kg)가 체중이 작을수록 높으며, 이는 기술적 효율성과 폭발적 힘 발휘 특성과 밀접히 연결됨을 보고하였다. 이러한 선행연구 결과는 체급별 힘 발휘 전략이 단순 절대 힘의 크기가 아닌, 체중 대비 효율과 힘 유지 능력에 의해 결정됨을 시사한다. Kim et al.(2025)의 선행연구에서는 동일한 씨름 당기기 과제를 이용하여 체급별 최대 당기기 힘과 지면반력 특성을 분석한 결과, 경량급(금급)이 더 무거운 체급보다 높은 최대 힘을 발휘하면서 하지 기여도가 더 크다는 점을 보고하였다. 그러나 해당 연구는 최대 힘과 GRF 패턴과 같은 기계적 지표에 초점을 두었으며, 반복 수축 동안 힘을 얼마나 오래 유지할 수 있는지, 그리고 어느 근육에서 피로가 먼저 누적되는지와 같은 힘 유지 능력과 근피로 저항성은 다루지 못하였다. 이러한 공백을 보완하기 위하여, 본 연구는 동일한 당기기 과제에서 로드셀을 이용한 힘 유지 지표와 EMG 기반 MPF 기술기를 함께 분석하여, 체급별 당기기 전략이 시간에 따른 힘 유지와 근피로 양상에 어떻게 반영되는지를 규명하고자 하였다.

본 연구의 결과는 이러한 선행연구 패턴과 일치한다. 실험 프로토콜은 실제 씨름 준비자세인 낮은 기마자세에서 살바 대신 동일한 강도의 훈련용 탄성 튜브를 양손으로 잡고 최대 노력으로 당긴 후 20초간 자세를 유지하는 방식으로 설계되었다. 분석 결과, 힘 유지 기술기는 경량급(-0.23)이 중량급(-2.20)보다 완전한 감소 양상($p = .028$, $d = 0.962$)을 보였으며, 체중 대비 상대적 힘에서도 경량급의 우위가 확인되었다. 흥미로운 점은 체중을 보정하지 않은 절대 힘에서는 그룹 간 유의미한 차이가 나타나지 않았다는 것이다($p > .05$). 그러나 체급별 신체 크기의 차이를 고려하기 위해 체중으로 정규화한 힘(N/bw)을 비교했을 때, 모든 시점에서 경량급이 중량급보다 우수(Overall: 6.25 vs 4.68, $p < .001$, $d = 2.1 \sim 2.3$)하였다. 이러한 결과는 동일한 튜브 탄성 부하 상황에서 중량급 선수의 예상보다 낮은 효율성을 보고한 Detanico et al.(2012)의 연구와 일치하며, 씨름 경기력 평가에서 단순 절대 근력이 아닌 체중 대비 효율적 힘 발휘와 힘 유지 전략이 중요함을 시사한다. Franchini et al.(2011) 역시 체급별 비교 시 절대 힘의 차이에도 불구하고 경량급의 상대적 효율성이 두드러짐을 확인한 바 있으며, 본 연구 결과 또한 힘 유지 저항성과 체중 대비 힘 발휘 능력이 체급별로 다르기 나타났다. 이를 종합하면, 경량급 선수들은 동일 부하 환경에서도 더 높은 힘 유지 효율성과 피로 저항성을 보이며, 경기 후반부나 반복적 힘 발휘 상황에서 전략적 우위를 점할 수 있는 반면, 중량급은 초반 폭발력 집중 후 저하되는 힘 유지 능력을 보완하기 위한 훈련이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 체급 스포츠에서 경기력 평가는 단순 절대 수치가 아닌, 피로 저항

성 등 다층적 접근으로 전환해야 하며, 이는 실제 현장에서 체급별 맞춤형 훈련 설계에 즉각 활용될 수 있을 것이다.

따라서 당기기 버티기 동작 시 이러한 체급별 차이에 영향을 미치는 근피로 평가 역시 경기력 향상에 중요한 역할을 한다. 근피로는 중추신경계, 신경근접합부, 근육 등의 다양한 부위에서 발생하는 복합적 현상이며(Merletti et al., 2003), 근전도(EMG) 신호의 주파수 영역 변화는 근피로의 객관적 지표로 인정되고 있다(Cifrek et al., 2009). 특히 평균전력주파수(MPF)의 감소는 근피로를 정량화하는 표준 지표로, 근세포 내 pH 감소가 근섬유 전도속도를 저하시켜 운동 단위 활동 전위의 파형을 변형시키고 전력 스펙트럼을 저주파로 이동시키는 기전으로 설명된다(Brody et al., 1991; Cifrek et al., 2009). 본 연구에서는 단시간 푸리에변환(STFT)을 이용하여 등척성 최대 당기기 후 동작을 유지하는 동안 평균전력주파수의 시간 경과에 따른 변화를 추적하고, 선형 회귀 기울기를 피로지수로 산출하였다(Phinyomark et al., 2012; Wang et al., 2015).

본 연구 결과, LD는 체급별 근피로 특성을 이해하는 데 있어 매우 중요한 지표를 제공한다. 2-way mixed ANOVA 분석 결과, LD의 MPF 기술기에서 체급(Class)에 따른 주효과가 통계적으로 유의미하게 나타났다($F = 4.867$, $p = .038$, $\eta_p^2 = 0.181$). 비록 개별 측면 비교에서는 좌측($p = .069$, $d = 0.814$)과 우측($p = .067$, $d = 0.787$) 모두 통계적 유의수준인 0.05에 도달하지 못하였지만, 두 측면 모두에서 큰 효과 크기가 관찰되어 유사한 경향성을 보였다는 데 의미가 있다. 개별 측면별 비교는 표본 크기의 제한으로 인해 유의차를 검출하는 데 한계가 있었으나, 좌-우측 데이터를 통합하여 분석하는 혼합 분산분석(ANOVA)을 통해 체급 간의 실질적인 근피로 차이가 통계적으로 규명되었다. 이는 중량급 선수가 경량급 선수에 비해 당기기 동작 시 LD에 대한 의존도가 높으며, 이로 인해 해당 근육에서 보다 가파른 피로가 진행됨을 시사한다. 결과적으로 중량급 선수는 상지의 큰 근육인 LD에서 발생하는 피로가 경기 후반부의 힘 유지 능력 저하를 초래하는 주요 기전으로 작용할 가능성이 크다. 또한, FCU 좌측에서 경량급과 중량급 간 MPF 기술기의 차이가 통계적으로 유의하였으며($p = .013$, $d = 1.104$, 매우 큰 효과 크기), 중량급 선수의 FCU에서 현저히 빠른 피로 진행을 보였다. 이는 씨름의 비대칭적인 살바 잡기 특성과 밀접한 관련이 있다. ‘우살바’(오른손은 상대의 허리 살바를, 왼손은 다리 살바를 잡는 방식)의 경우, 왼팔은 상대의 다리 살바를 당겨 몸 쪽으로 밀착시키거나 기술 전개 시 상대의 중심을 제어하는 역할을 하기 때문으로 판단된다. BF에서는 측면(Side) 간의 주효과가 유의하여($F = 5.072$, $p = .035$, $\eta_p^2 = 0.187$) 좌측과 우측의 MPF 기술기 패턴이 상이했으나, 체급 간의 차이는 나타나지 않았다(Class: $p = .848$). 이러한 결과는 로드셀 기반 측정에서 관찰된 체급별 힘 유지 전략의 차이가 단순한 절대 힘의 크기 차이를 넘어, 근육 활용 패턴의 차이에 기인함을 시사한다. 중량급 선수의 경우 좌측 FCU($p = .013$, $d = 1.104$)와 체급에 따른 주효과가 LD($p = .038$)에서 유의하게 큰 기울기를 보여 상지 근육의 근피로가 집중적으로 진행되는 반면, 하지 근육(VL, VM)에서는 체급 간 유의한 차이가 나타나지 않았다.

이러한 중량급 선수의 상지 중심 피로 양상은 씨름의 기술적 특성 및 체격적 조건과 밀접한 관련이 있다. 중량급 경기는 상대적으로 높은 체중을 가진 선수 간의 대결이므로, 상대를 들어 올리거나 중심을 무너뜨리기 위해 살바를 강하게 움켜쥐는 ‘살바 싸움’이 매우 치열하게 전개된다. 이 과정에서 FCU의 지속적인 등척성 수축이 강하게 요구되는데, 본 연구에서 중량급의 좌측 FCU 피로가 유의하게 높게 나

타난 것은 상대의 체중을 제어하기 위해 다리 살바의 장력을 유지하기 위해 왼쪽 전완 근육에 과도한 등척성 부하가 집중되기 때문으로 해석된다. 또한, 들배지기나 맞배지기 같은 씨름의 핵심 기술 수행 시, 상대의 무거운 체중을 자기 몸쪽으로 강하게 밀착시키기 위해 LD를 활용한 강력한 당기기 힘이 필수적으로 요구된다. 중량급 선수는 이러한 체격적 우위와 체중 조건을 활용하여 상대를 제압하려는 ‘힘 씨름’에 의존하는 경향이 크며, 이에 따라 상지 근육에 부하가 집중되어 조기 피로를 경험하는 것으로 판단된다. 반면, 경량급 선수는 상지에만 의존하기보다 전신을 활용한 유기적인 기술 전환을 통해 상지 근육의 부하를 효율적으로 분산시키고 있는 것으로 해석할 수 있다.

결론적으로, 본 연구에서 관찰된 체급별 근피로의 근신 특성 차이는 지속적 힘 유지 능력의 차이로 직결된다. 중량급의 상지 의존 전략은 중반 이후 급격한 힘 감소에 영향을 미치는 반면, 경량급의 상하지 균형 잡힌 활용은 피로를 분산시켜 후반부 경기력 유지를 가능하게 한다. 이는 씨름 경기에서 지속 가능한 힘 발휘라는 관점에서 경기력 향상을 위해서 근피로 저항성을 포함한 근신경 효율성을 고려하는 것이 필수적이며, 이를 바탕으로 한 체급별 맞춤형 훈련 설계가 요구된다. 본 연구의 제한점으로, 제한된 표본 크기와 단일 등척성 과제에 국한되어 다양한 씨름 기술에 대한 일반화가 제한적이다. 또한 실험실의 표준화된 환경과 달리 실제 경기 상황의 동적 운동과 상대의 저항이 반영되지 못했으며, 훈련 경력과 근신경 발달 수준 등의 개인차 변인이 충분히 통제되지 않았다. 향후 연구에서는 다양한 씨름 기술로의 확장 및 근피로 저항성 강화 훈련의 효과를 검증하는 중재 연구를 통해 본 결과의 실제 활용성을 확보할 수 있도록 해야 할 것이다.

결론 및 제언

본 연구는 엘리트 씨름 선수의 체급별 최대 등척성 당기기 수행 중 힘 유지 능력의 차이와 이에 수반되는 근피로 특성의 메커니즘을 규명하였다. 연구 결과, 경량급 선수는 중량급 선수보다 체중 대비 더욱 효율적인 힘 발휘와 완만한 힘 감소 양상을 보였으며, 이는 신체적 제약을 극복하기 위한 효율적인 근신경 활용 전략의 결과로 사료된다. 특히, 근피로 저항성 평가에서 중량급 선수는 상지 근육에 의존하여 특정 부위에 피로가 집중된 반면, 경량급 선수는 상하지 근육 전반에 걸쳐 피로를 균형 있게 분산시키는 기술적 전략 차이가 확인되었다.

이러한 발견은 체급별 힘 유지 능력의 차이가 단순한 절대 근력의 크기를 넘어, 근피로 저항성 및 신체 활용 기전의 차이에서 비롯됨을 시사한다. 이는 경기 후반부의 지속적인 경기력 유지를 위해 체급별로 차별화된 맞춤형 훈련 전략이 필요함을 뒷받침한다.

결론적으로 본 연구는 씨름 스포츠에서 체급별 경기력 차이에 대한 과학적 근거를 제시하였으며, 향후 체급 맞춤형 훈련 프로그램 개발 및 엘리트 씨름 선수의 경기력을 다층적으로 평가하기 위한 방법론적 기초를 마련하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

CONFLICT OF INTEREST

논문 작성에 있어서 어떠한 조직으로부터 재정을 포함한 일체의 지원을 받지 않았으며 논문에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 관계도 없음을 밝힌다.

AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptualization: T.-W. Kim, Data curation: T.-W. Kim, S.-Y. Park, Formal analysis: S.-Y. Park, Methodology: T.-W. Kim, T.-H. Lee, K.-H. Han, S.-Y. Park, Project administration: T.-W. Kim, T.-H. Lee, Visualization: S.-Y. Park, Writing-original draft: T.-W. Kim, S.-Y. Park, Writing-review & editing: T.-W. Kim, T.-H. Lee, K.-H. Han, S.-Y. Park

참고문헌

- Brody, L. R., Pollock, M. T., Roy, S. H., De Luca, C. J., & Celli, B. (1991). pH-induced effects on median frequency and conduction velocity of the myoelectric signal. *Journal of Applied Physiology*, 71(5), 1878–1885.
- Cifrek, M., Medved, V., Tonković, S., & Ostojić, S. (2009). Surface EMG based muscle fatigue evaluation in biomechanics. *Clinical Biomechanics*, 24(4), 327–340.
- Coorevits, P., Danneels, L., Cambier, D., Ramon, H., & Vanderstraeten, G. (2008). Assessment of the validity of the Biering-Sørensen test for measuring back muscle fatigue based on EMG median frequency characteristics of back and hip muscles. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18(6), 997–1005.
- Detanico, D., Arins, F. B., Dal Pupo, J., & Dos Santos, S. G. (2012). Strength parameters in judo athletes: An approach using hand dominance and weight categories. *Human Movement*, 13(4), 330–336.
- Franchini E., Miarka B., Matheus L., & Del Vecchio F. B. (2011). Endurance in judogi grip strength tests: Comparison between elite and non-elite judo players. *Arch Budo*, 7(1), 1–4.
- Hassmann, M., Buchegger, M., & Stollberg, K. P. (2011). Judo performance tests using a pulling force device simulating a seoi-nage throw. *Ido Movement for Culture. Journal of Martial Arts Anthropology*, 11, 47–51.
- Hassmann, M., Buchegger, M., Stollberg, K. P., Sever, A., & Sabo, A. (2010). Motion analysis of performance tests using a pulling force device (PFD) simulating a judo throw. *Procedia Engineering*, 2(2), 3329–3334.
- Hermens, H.J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., & Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 10(5), 361–74.
- Kil, S. K., Lee, S. C., Hwang, J. H., Lee, J. B., Choi, S. H., Lee, H. B., Han, Y. H., & Kim, T. W., (2018). Development of vector measuring apparatus for training of Judo. *Journal of Rehabilitation Welfare Engineering & Assistive Technology*, 12(4), 323–329.
- Kim, T. Lee, T., & Park, S. (2025). The comparison of pulling strategies of elite Ssireum athletes across weight classes. *Korean Journal of Sport Science*, 36(1), 103–109, <https://doi.org/10.24985/kjss.2025.36.1.103>
- Merletti, R., Farina, D., & Gazzoni, M. (2003). The linear electrode array: A useful tool with many applications. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(1), 37–47.
- Montoro-Bombú, R., Gomes, B. B., Santos, A., & Rama, L. (2023). Validity and reliability of a load cell sensor-based device for assessment of the isometric mid-thigh pull test. *Sensors*, 23(13), 5832.
- Phinyomark, A., Sirinee, T., Huosheng, H., Pornchai, P., & Limsakul, C. (2012). The usefulness of mean and median frequencies in electromyography analysis. In G. R. Naik (Ed.), *Computational Intelligence in Electromyography Analysis-A Perspective on Current Applications and Future Challenges*. <https://doi.org/10.5772/50639>
- Potvin, J. R., & Bent, L. R. (1997). A validation of techniques using surface EMG signals from dynamic contractions to quantify muscle fatigue during repetitive tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 7(2), 131–139.
- Wang, R., Fukuda, D. H., Stout, J. R., Robinson, E. H., Miramonti, A. A., Fragala, M. S., & Hoffman, J. R. (2015). Evaluation of electromyographic frequency domain changes during a three-minute maximal effort cycling test. *Journal of Sports Science & Medicine*, 14(2), 452.
- Yilmaz, S. (2015). Pulling forces in different judo stances in laboratory conditions. *Archives of Budo Science of Martial Arts and Extreme Sports*, 11(1), 73–80.
- Yousif, H. A., Zakaria, A., Rahim, N. A., Salleh, A. F. B., Mahmood, M., Alfarhan, K. A., Kamarudin, L. M., Mamduh, S. M., Hasan, A. M., & Hussain, M. K. (2019, November). Assessment of muscles fatigue based on surface EMG signals using machine learning and statistical approaches: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 705, No. 1, p. 012010). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/705/1/012010>

엘리트 씨름 선수의 체급별 힘 유지 능력과 근피로 저항성 비교

김태완¹, 이태현², 한기훈³, 박수연^{4*}

¹한국스포츠과학원 수석연구위원

²용인대학교 무도학과 교수

³부산대학교 체육교육과 교수

⁴부산대학교 박사과정, 데상트코리아 연구원

*교신저자: 박수연(suyparks@gmail.com)

[목적] 본 연구는 엘리트 씨름 선수의 체급별 힘 유지 능력과 근피로 저항성의 차이를 규명하고, 그 원인을 분석하는 데 목적이 있다.

[방법] 엘리트 씨름 선수 24명을 경량급(태백급, 금강급, $n=12$)과 중량급(한라급, 백두급, $n=12$)의 두 그룹으로 분류하여 연구를 진행하였다. 로드셀 센서를 활용하여 최대 등척성 당기기 수행 중 절대 힘과 체중 정규화 힘(상대 힘)을 유지 능력을 측정하였으며, 근전도의 평균 전력 주파수(MPF) 기울기를 근피로 지표로 활용하여 상·하지 주요 근육의 피로 진행 양상을 분석하였다. 두 그룹 간 차이는 독립표본 t -검정 (또는 비모수 검정)으로 검증하였으며, 좌우 대칭성과 그룹의 상호작용 효과는 이원 혼합분산분석(2-way Mixed ANOVA)으로 분석하였다. 모든 통계적 유의수준은 $\alpha=.05$ 로 설정하였다.

[결과] 본 연구 결과, 로드셀 센서로 측정한 힘 유지 평가에서 Force Maintenance Slope(N/s), Normalized Total Mean Force(N/bw), Normalized Early Mean Force(N/bw), Normalized Late Mean Force(N/bw)에서 체급 간 유의한 차이가 나타났다($p<.05$). 또한, 근피로 저항성 평가에서 척추근굴근(FCU) 좌측에서 그룹 간 유의한 차이가 관찰되었으며($p=.013$), 2-way mixed ANOVA 분석 결과 대퇴이두근(BF)에서는 측면(Side) 효과가 유의미하였고($p=.035$), 광배근(LD)에서는 체급(Class) 효과가 유의하였다($p=.038$).

[결론] 체급별 힘 유지 능력의 차이는 절대 힘의 크기 차이를 넘어 근피로 저항성에서 뚜렷한 특징적 차이를 보였다. 특히 상·하지의 활용 방식에 따른 근신경 특성의 차이는 경기 후반부의 반복적 힘 발휘 능력과 경기력 격차를 결정짓는 핵심 요인으로 확인되었다. 본 연구는 향후 씨름 선수들을 위한 체급 맞춤형 훈련 프로그램 설계 및 과학적인 경기력 평가 지표 마련에 중요한 기초 자료가 될 것으로 사료된다.

주요어

씨름, 힘 유지 능력, 근피로, 로드셀 센서, 근전도