

작업자 피로 관리 및 산업 안전 강화를 위한 sEMG 신호 기반 근피로 분석 연구

권영재, 김정훈*, 최상일*
대구가톨릭대학교 컴퓨터소프트웨어학과
e-mail:rnjs1wo@naver.com

sEMG-Based Muscle Fatigue Analysis for Worker Fatigue Management and Industrial Safety Enhancement

YoungJae Gwon, Junghun Kim*, Sang-il Choi*

*Daegu Catholic University, School of Computer Software (Computer Engineering), Gyeongsan, 38430, Republic of Korea

요약

근피로는 단순한 피로를 넘어 근골격계 기능 저하와 작업 효율 감소를 초래하며, 반복될 경우 산업재해 위험을 높이는 주요 요인으로 알려져 있다. 특히 산업 현장에서 반복적·고강도 작업을 수행하는 근로자들에게 근피로의 조기 발견과 체계적 관리는 안전 확보에 필수적이다. 본 연구는 하지 국소 피로가 중추신경계를 통해 상지 근육 기능 저하로 확산되는 과정을 규명하기 위해, 표면 근전도(sEMG) 기반 중심 주파수(MDF)와 혈중 젖산 농도를 함께 분석하였다. 실험은 반복적인 스쿼트 동작을 수행하는 과정에서 넵다리두갈래근, 머리널판근, 위등세모근의 sEMG 신호를 수집하고 MDF 변화를 산출하였으며, 운동 전후 혈중 젖산 농도를 측정하여 대사적 피로와의 상관성을 평가하였다. 분석 결과, 세 근육 모두에서 반복 세트에 따른 MDF 변화가 통계적으로 유의하였고, 젖산 농도 또한 전후 비교에서 크게 증가하였다. 이는 하지에서 발생한 신경적 피로와 대사적 피로가 상지 근육으로 전달될 수 있음을 보여준다. 결론적으로, 본 연구는 하체-상체 간 피로 전달 메커니즘을 실험적으로 규명하고, sEMG와 젖산 피로가 작업자 피로 상태를 실시간으로 모니터링하며 산업 안전 관리에 기초자료로 활용될 수 있음을 제시하였다. 이러한 접근은 근골격계 질환 예방과 산업 현장의 작업 효율성 향상에 기여할 수 있는 과학적 근거를 제공한다.

1. 서론

근피로(muscle fatigue)는 단순한 피로를 넘어 근골격계 기능 저하와 작업 효율 감소를 초래하며, 반복될 경우 근골격계 질환 및 산업재해 위험을 높이는 주요 요인이다. 특히, 고강도·반복적인 동작을 수행하는 산업 현장의 근로자들에게 근피로는 생산성과 안전성에 직결되는 중요한 문제로, 조기 발견과 체계적 관리는 작업자 건강 보호와 산업 안전 강화에 필수적이다.

근피로 평가를 위한 기존 방법으로는 혈중 젖산(lactate) 농도 측정이 대표적이다. 이는 대사적 변화를 반영하는 주요 지표로 활용되지만, 침습적 절차가 필요하고 실시간 모니터링이 어렵다는 한계를 지닌다. 또한 지면 반발력(GRF: Ground Reaction Force)이나 관절 가동 범위(ROM: Range of Motion) 분석은 외적 반응을 측정하는 방식으로, 피로의 원인을 직접적으로 규명하는 데에는 한계가 있다.

이러한 한계를 보완하는 비침습적 방법으로 표면 근전도(sEMG: Surface Electromyography)가 주목받고 있다. sEMG는 근육 수축 시 발생하는 생체전기 신호를 피부 표면 전극을 통해 비침

습적으로 측정하며, 근육의 전기적 활성도를 정량적으로 분석하여 근피로를 평가할 수 있다. 특히 실시간 모니터링이 가능하고 다양한 작업 환경에 적용할 수 있어 산업 안전 관리 도구로서의 활용 가능성이 크다. 근피로가 진행될수록 sEMG 신호의 중심 주파수(MDF: Median Frequency)가 감소하는 현상은 근섬유 동원 저하와 전도 속도 저하를 반영하는 대표적인 지표로 알려져 있다.

기존 연구는 주로 운동선수나 실험실 환경에서 하지 근육의 국소 피로에 집중되어 있으며, 산업 현장에서 발생하는 하체 유발 피로가 상체 근육 기능 저하와 작업 안전에 미치는 영향을 실험적으로 검토한 연구는 매우 제한적이다. 최근 보고에 따르면, 하지 국소 신경근 피로가 해당 부위에 국한되지 않고 전신의 자세 조절 기능에도 영향을 미칠 수 있음이 제시되고 있다. 예를 들어, Nardon et al.은 하체 국소 피로 유발 후 피로하지 않은 상지 및 체간 근육의 근전도 활성도와 공동 활성이 동시에 감소하는 현상을 확인하였으며, 이는 비국소적 근피로 개념으로 설명된다. 즉, 하지 근피로가 중추신경계 억제 효과를 통해 비피로 근육의 활성 패턴에까지 영향을 줄 수 있음을 시사한다.

이에 본 연구는 하지 국소 피로가 중추신경계 경로를 통해 상체

근육 기능 저하로 이어지는지를 확인하고, 이를 위해 sEMG 기반 MDF 분석과 혈중 젖산 농도를 함께 활용하여 신경적·대사적 피로 간의 상관성을 평가하고자 한다. 나아가 이러한 분석은 작업자 피로 관리 및 산업 안전 모니터링 시스템 개발에 기여할 수 있는 기초 자료로서 의의가 있다.

2. 방법론

이 연구에 사용된 데이터는 윤리 지침(IRB 번호: KNUH 2025)에 따라 경북대학교병원 기관심사위원회(IRB)의 승인을 받은 후 수집되었습니다.

2.1 실험방법

본 연구에서는 산업 현장에서 발생하는 근피로를 모니터링하고, 하체 국소 피로가 상체 근육 기능에 미치는 신경적 전달 효과를 분석하기 위해 8채널로 구성된 iWorx사의 IX-BIO8 시스템을 활용하였다. 이 장비는 고해상도의 실시간 신호 감지와 멀티채널 기록이 가능하며, 산업 안전 관리 체계에 필요한 신뢰성 높은 생체신호 데이터 확보에 적합하다.

sEMG 전극은 3M사의 패치를 사용하였으며, 반복적이고 일정한 동작 수행을 위해 LEXPA사의 스퀴트 머신(YA-6400)을 활용하였다. 이는 산업 현장에서 발생하는 반복적 작업 상황을 실험실 환경에서 모사하기 위함이다.

근전도 데이터는 iWorx 전용 소프트웨어(LabScribe License)를 통해 처리되었으며, 대사적 피로 지표 확보를 위해 Roche사의 Accutrend Plus 시스템을 사용하여 혈중 젖산 농도를 측정하였다. 젖산 측정은 신경적 피로 지표(MDF)와의 상관성을 평가하는 보조 자료로 활용되었다.

측정 대상 근육은 넓다리두갈래근(biceps femoris), 머리넙판근(splenius capitis), 위등세모근(upper trapezius)으로 선정하였다. 넓다리두갈래근은 반복 작업 시 하체 근육 피로를 대표하는 지표로, 머리 넙판근과 위등세모근은 상지·체간 근육으로서 하체 피로가 중추신경계를 통해 상체 근육 기능 저하로 확산되는 경로를 확인하기 위해 선정되었다. 특히 이 두 근육은 산업 현장에서 상체 안정성과 작업 자세 유지에 중요한 역할을 하며, 전극 부착과 신호 획득의 신뢰성도 확보할 수 있다.

실험 절차는 전극 부착, 반복 동작 수행 및 데이터 수집, 휴식 순으로 진행되었다. 스퀴트 동작은 120 bpm의 속도로 50회를 1세트로 정의하였으며, 5분간 휴식을 포함한 총 5세트를 수행하였다. 이 조건은 산업현장의 반복 작업에서 발생할 수 있는 누적 피로를 유도하기 위해 설정되었다. 근전도 데이터는 세트 동안 연속적으로 측정되었으며, 세트 간 휴식 시에는 측정을 중단하였다. 젖산 농도는 피로의 대사적 지표로서 운동 전·후 채혈을 통해 측

정되었으며, 이를 통해 하체 피로 누적과 대사적 변화를 정량적으로 평가하였다.



[그림 1] sEMG 전극 부착 부위(머리넙판근, 위등세모근, 넓다리두갈래근)

2.2 신호 처리 및 지표 산출

획득한 데이터는 신뢰성 있는 분석을 위해 Notch filter(50 Hz 전원 노이즈 제거)와 Bandpass filter(10~400 Hz)를 적용하였다. 필터는 4차 Butterworth 구조를 사용하여 신호 왜곡을 최소화하였다. 필터링된 신호는 마킹 기능을 기준으로 2초 단위 세그먼트로 분할되었으며, 각 세그먼트에서 중심 주파수(MDF)를 계산하기 위해 FFT(Fast Fourier Transform)를 적용하였다. MDF는 근육의 전도 속도 저하 및 신경근 활성 감소를 반영하는 지표로, 누적 피로 평가에 활용되었다.

2.3 통계 분석 방법

그룹 간 차이를 검증하기 위해 Shapiro-Wilk 정규성 검정과 Levene's Test(분산 동질성)를 확인한 뒤, 일원분산분석(One-Way ANOVA)을 실시하였다. 분석 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다. 젖산 데이터는 운동 전후의 차이만 존재하므로 ANOVA에는 포함하지 않고, MDF 변화와의 상관성을 논의하는 보조 지표로 활용하였다.

3. 결과

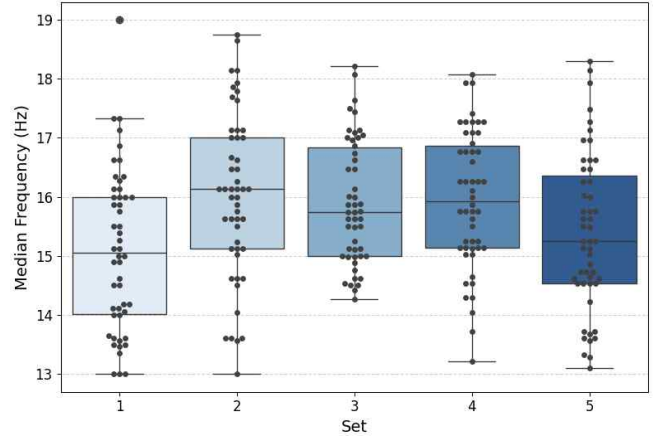
표 1은 넓다리두갈래근, 머리넙판근, 위등세모근의 세트별 중심 주파수(MDF)를 평균과 표준편차와 함께 나타내었으며, 그림 2는 간 근육의 세트별 중심 주파수 변화를 ANOVA로 분석한 결과를 시각적으로 보여준다. ANOVA 분석 결과, 세트 간 중심 주파수 변화는 세 근육 모두에서 통계적으로 유의미한 차이를 보였다(Biceps Femoris: $F = 8.376$, $p < 0.001$; Splenius Capitis: $F = 2.873$, $p = 0.024$; Upper Trapezius: $F = 5.165$, $p =$

0.001). 이는 반복적 동작 수행 과정에서 피로 누적이 하체뿐 아니라 상체 근육에도 유의한 영향을 미쳤음을 나타낸다.

[표 1] 세트별 중심주파수(MDF) 변화

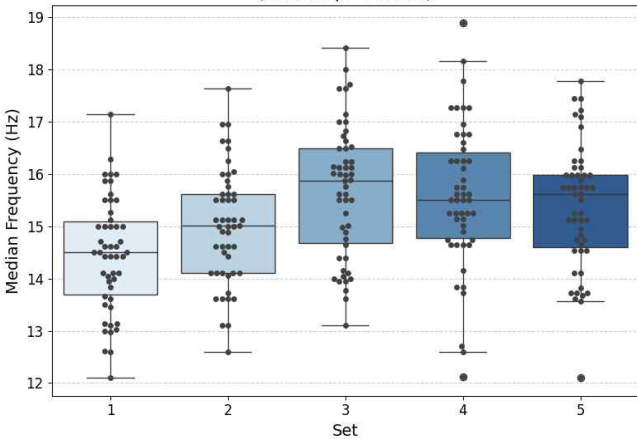
Set	Biceps femoris MDF (Hz)	Splenius capitis MDF (Hz)	Upper trapezius MDF (Hz)
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD
1	14.46 ± 1.25	13.81 ± 1.62	15.10 ± 1.89
2	15.01 ± 1.47	14.68 ± 1.75	16.03 ± 1.96
3	15.67 ± 1.52	14.34 ± 1.69	15.89 ± 1.81
4	15.58 ± 1.48	14.03 ± 1.56	15.95 ± 1.87
5	15.37 ± 1.42	14.01 ± 1.54	15.39 ± 1.73

Changes in Median Frequency Across Sets for Upper trapezius (ANOVA p = 0.001)

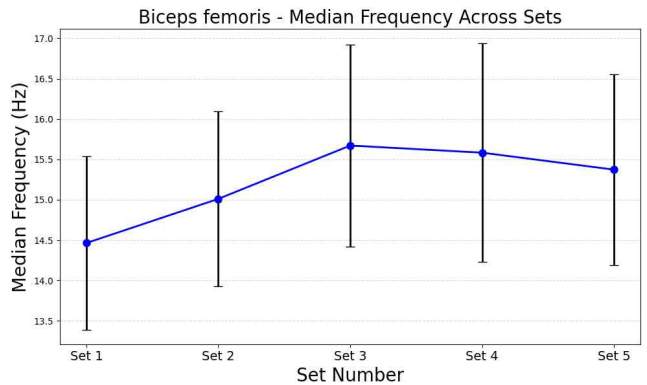
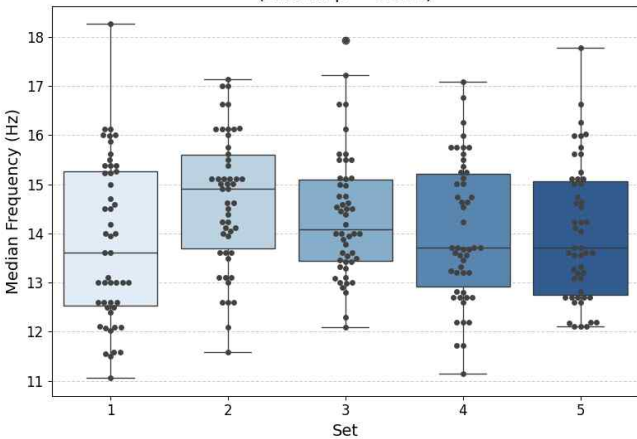


[그림 2] 각 근육에 대한 세트별 중심주파수 변화의 통계 분석(ANOVA결과)

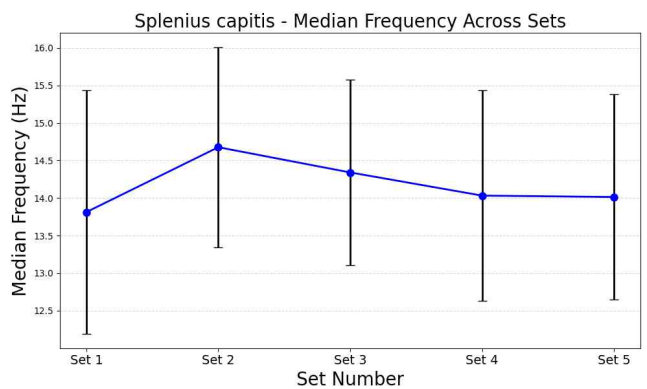
Changes in Median Frequency Across Sets for Biceps femoris (ANOVA p < 0.001)



Changes in Median Frequency Across Sets for Splenius capitis (ANOVA p = 0.024)

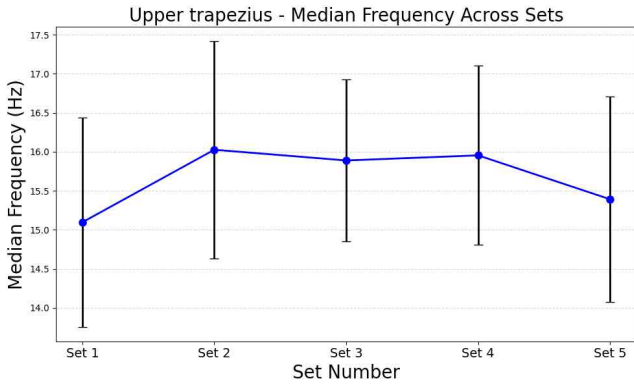


[그림 3] 넓다리두갈래근의 세트별 중심주파수 변화 분석



[그림 4] 머리널관근의 세트별 중심주파수 변화 분석

그림 3,4,5는 각 근육의 세트별 중심 주파수 변화를 보여준다. 세 근육 모두 초기 반복 구간에서는 일시적 활성 증가가 나타났지만, 반복 작업이 진행됨에 따라 중심 주파수는 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 초기 반복 동작에서 근육 활성화 증가가 나타났지만, 누적된 피로로 인해 신경근 전달 속도가 저하되고 빠른 근섬유 동원이 감소했음을 시사한다. 따라서, 하체 근육 피로가 단순히 국소적 현상에 그치지 않고 상체 근육 기능 저하로 확산될 수 있음을 보여준다.



[그림 5] 위등세모근의 세트별 중심주파수 변화 분석

젖산 농도는 운동 전 1.7 mmol/L에서 5세트 종료 후 15.2 mmol/L로 크게 증가하였다(표 2). 이는 반복적 고강도 작업이 대사적 피로를 심화시켰음을 나타낸다. MDF 감소(신경적 피로)와 젖산 증가(대사적 피로)는 후반부 세트에서 일관되게 나타났다.

[표 2] 운동 전후 혈중 젖산 농도

Condition	Blood Lactate (mmol/L)
Before Exercise	1.7
After Exercise	15.2

4. 결론

본 연구는 하체 반복 작업으로 유발된 국소 근피로가 중추신경계를 통해 상체 근육 기능 저하로 이어지는 과정을 규명하기 위해, sEMG 중심주파수(MDF)와 혈중 젖산 농도를 분석하였다. 그 결과, 넙다리두갈래근, 머리넙판근, 위등세모근 모두에서 반복 세트에 따른 MDF의 유의한 변화를 확인하였으며, 젖산 농도 또한 운동 전 대비 운동 후 뚜렷하게 증가하였다. 이는 하지에서 발생한 신경적 피로와 대사적 피로가 상체 근육으로 확산될 수 있음을 보여주며, 하체-상체 간 피로 전달 메커니즘을 실험적으로 뒷받침한다.

초기 반복 구간에서 나타난 MDF 상승은 근육 적응 반응과 빠른 근섬유 동원의 활성화를 반영하는 것으로 해석되며, 이후 세트가 진행될수록 MDF가 점차 감소한 것은 누적 피로로 인한 신경근 전달 속도 저하와 대사적 부담 심화를 시사한다. 이러한 결과는 반복적·고강도 작업을 수행하는 산업 현장에서 하체 피로가 상체 안정성 저하와 작업 효율 감소로 이어질 수 있음을 의미하며, 산업재해 위험과 직결될 수 있음을 보여준다.

따라서 본 연구는 sEMG 기반 MDF 분석과 젖산 측정을 통합적으로 활용하여 신경적·대사적 피로의 상호작용을 규명하였으며, 이는 작업자 피로 상태를 실시간으로 모니터링하고 산업 안전 관

리 체계를 강화하는 데 활용될 수 있는 기초 자료를 제공한다. 나아가 이러한 접근은 근골격계 질환 예방, 작업 효율성 향상, 산업 안전 증진을 위한 과학적 근거로서 의미가 크다.

본 결과물은 2025년도 교육부의 재원으로 경상북도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)-(로컬 맞춤형 R&D)의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

참고문헌

- [1] Tosovic D., Than C., Brown J. M. M., "The effects of accumulated muscle fatigue on the mechanomyographic waveform: implications for injury prediction", *European Journal of Applied Physiology*, 제116권, pp.1485-1494, 2016년.
- [2] Nardon M., Piscitelli F., Alessandro C., et al., "Effects of localized and general fatigue on postural adjustments coupling during predictable external perturbations", *European Journal of Applied Physiology*, 2025년.
- [3] Lee J. H., Kim S., Heo J., Park D. H., Chang E., "Differences in the muscle activities of the quadriceps femoris and hamstrings while performing various squat exercises", *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 제14권, 제1호, p.12, 2022년.
- [4] James C., Mackenzie L., Capra M., "Quantification of the safe maximal lift in functional capacity evaluations: comparison of muscle recruitment using SEMG and therapist observation" *Journal of Occupational Rehabilitation*, 제23권, pp.419-427, 2013년.
- [5] Pincivero D. M., Campy R. M., Salfetnikov Y., Bright A., Coelho A. J., "Influence of contraction intensity, muscle and gender on median frequency of the quadriceps femoris", *Journal of Applied Physiology*, 제 90권, 제3호, pp.804-810, 2001년.
- [6] Wan J. J., Qin Z., Wang P. Y., Sun Y., Liu X., "Muscle fatigue: general understanding and treatment", *Experimental and Molecular Medicine*, 제49권, 제10호, p.e384, 2017년.
- [7] Horita T., Ishiko T., "Relationships between muscle lactate accumulation and surface EMG activities during isokinetic contractions in man", *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 제56권, pp.18-23, 1987년.