

## 저출력 레이저의 치료 효과 규명을 위한 근전도 신호의 피로도 해석 연구

김지현<sup>1</sup> · 최효훈<sup>2</sup> · 윤종인<sup>1</sup>

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 의료과학대학 의공학과, <sup>2</sup>삼성전기 생산기술센터

### Muscle Fatigue Analysis Based on Electromyography Signals for The Evaluation of Low-Level Laser Therapy

Ji-Hyun Kim<sup>1</sup>, HyoHoon Choi<sup>2</sup> and Jong-In Youn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Biomedical Engineering, College of Medical Science, Catholic University of Daegu 712-702, Korea

<sup>2</sup>Manufacturing Center, Samsung Electro-Mechanics 443-743, Korea

(Received August 22, 2011. Accepted December 1, 2011)

**Abstract:** Skeletal muscle fatigue is defined as a ‘any reduction in the maximal capacity to generate force or power output’, and is the reduction of oxygen consumption and by-product of metabolism. For the muscle fatigue therapy, low level laser has been introduced that leads the mitochondrial respiratory and attributes the muscle fatigue recovery. This study analyzed the muscle fatigue signals from electromyography(EMG) during low-level laser therapy (LLLT). Healthy subjects performed voluntary elbow flexion-extension exercise and received placebo LLLT and active LLLT using a 830 nm laser diode. Then, EMG were measured for the evaluation of muscle fatigue. The acquired EMG data were analyzed with median frequency and short time fourier transform methods. The results showed that the LLLT had a significant symptomatic relief of muscle fatigue based on the EMG frequency analysis. Therefore, the muscle fatigue analysis with EMG signals can be applied to quantitative evaluation for the monitoring of LLLT effects.

**Key words:** Muscle fatigue, LLLT, EMG, Median frequency, Short time fourier transform

### 1. 서 론

근피로(Muscle fatigue)는 근장력을 최대로 유지시킬 수 있는 능력의 손실로 정의되며 과도한 또는 반복적인 활동으로 인해 야기 되는 능률 저하로 정의된다[1-4]. 근육은 대뇌에서 발생한 신경활동전위를 신경계를 통해 근육말단으로 전달하여 근육활동전위를 발생시켜 골격근 섬유를 통해 전달한다[5]. 이 골격근 섬유는 actin과 myosin으로 구성되어 있고

actin을 myosin이 잡아당겨서 근육이 수축하게 되며 과도한 또는 반복적 근섬유 수축이 수행될 경우 근피로가 유발된다[6]. 또한 근피로는 근육 내에 불충분한 산소 공급, 에너지원을 비롯한 주요한 대사물질의 고갈 또는 대사물질의 축적 등의 원인에 의해 근수축을 위한 에너지원이 공급되지 못할 때 발생한다[7-12]. 근피로의 결과는 불쾌, 능률 저하 및 외부자극에 대한 반응 능력 상실, 피로물질이 혈액에서 헤리 또는 뇌와 반응에 의한 통증, 메스꺼움, 그리고 어지러움 등으로 나타날 뿐 아니라 근피로가 축적될 경우 근육질환으로 발전할 수 있기 때문에 가벼운 또는 일시적 근피로에 대한 주의가 필요하다[13]. 건강한 사람의 근피로 뿐 아니라 근골격계 질환을 가진 환자도 높은 근피로도를 겪게 되고 이들의 근피로 완화는 병변 치료에 크게 기여한다. 만성 근피로를 겪는 섬유근육통 환자의 경우 저출력 레이저의 적용을 통해

Corresponding Author : 윤종인  
대구가톨릭대학교 의료과학대학 의공학과  
TEL: +82-53-850-3445 / FAX: +82-53-850-3292  
E-mail: jyoun@cu.ac.kr  
본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(2010-0008977).

근피로를 완화함으로써 섬유근육통을 완화시킨다는 보고가 있으며, 특히, 뇌성마비 환자는 정상인에 비해 높은 근육 긴장도 및 경직, 근피로도를 가지며 이러한 근피로로 인해 기능적 생활 및 생활 만족도에까지 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다[14-16].

생체 조직은 조사되는 광원의 파장에 따라 흡수도 차이를 가지므로 적용하고자 하는 병변에 대해 최대의 치료효과를 기대할 수 있는 적절한 파장을 선택하는 것이 중요하다[17-24]. Simpson *et al.*,은 몬테카를로 기술을 이용하여 600-1000 nm 파장 대에서 피부조직의 광학적 특성을 나타내었는데, 진피층에서 탈산화헤모글로빈과 물에 의해 각각 765 nm 대역과 965 nm 대역에서 높은 흡수계수(absorption coefficient)를 나타내었으며 두 대역 사이의 800 nm 대역에서는 낮은 흡수계수를 나타내었다. 진피층 아래 위치한 진피하층(subdermis)에서는 지방에 의해 765 nm 대역과 물에 의해 965 nm 대역에서 높은 흡수계수를 가지며 800 nm 대역에서는 진피층에서와 같이 낮은 흡수계수를 나타내었다[20]. 따라서 다른 대역의 광원에 비해 진피층과 진피하층에서 낮은 흡수계수를 가지는 800 nm 대역의 광원이 진피하층 아래의 근육층에 높은 광원의 에너지를 전달할 수 있음을 알 수 있다. 또한 임상 연구에서 Leal Junior *et al.*,은 건강한 피실험자를 대상으로 655 nm와 830 nm의 파장에 대해 LLLT 실험을 각각 수행하였고, 동일한 프로토콜로 진행된 두 실험을 통해 타 파장에 비해 830 nm에서 LLLT의 높은 효과를 나타냄을 보고하였다[23,24].

일반적인 근피로도의 측정은 리커트 척도(Likert scale), 근생검(Muscle biopsy), 생화학물질(Biochemical marker) 측정, 근전도(Electromyography, EMG) 등 많은 평가방법들이 이용되어 왔으나 LLLT의 효과를 정량적으로 평가하기 위한 연구는 매우 제한적으로 이루어져 왔다[14,21-27]. Gur *et al.*,은 섬유근육통 환자에게 LLLT를 적용하여 고통, 피부 압통, 근경련 및 근피로를 항목으로 한 리커트 척도를 적용하였는데, 이는 응답자가 제시된 문장에 대해 얼마나 동의를 하는지에 대한 질의 답변서로 객관적이고 정량적인 평가로는 부적합하다는 한계를 가지고 있다[14]. 또한 Leal Junior *et al.*,은 건강한 피실험자를 통해 근피로를 유발시킨 후 젖산의 농도 변화를 통해 LLLT가 근피로 완화에 효과가 있음을 입증하였고, LLLT 효과와 생화학물질간의 관계를 설명하기 위해 젖산 뿐 아니라 근수축시 다량의 ATP 소모를 보충하기 위한 ATP 생성 및 공급에 관여하는 효소인 크레아틴키나아제의 농도변화를 통해 입증하였다[17,23]. 그러나 근육의 활동 여부(muscle on-off), 근육 사용 정도(muscle activity), 및 근육 피로(muscle fatigue)에 대한 직접적인 다양한 생리학적 정보를 비침습적으로 측정 가능한 근전도를 통한 피로도 해석연구는 아직까지 이루어지지 않았다. 따라서 본 연

구는 근피로 완화에 이용되는 LLLT의 효과 규명을 위해 저출력 레이저를 조사하면서 얻어진 근전도 신호를 분석하여 근피로도 완화를 관찰하고자 하였다.

근전도를 통한 근육 측정에 관한 초기 연구는 근피로에 집중되었으며 Knowlton *et al.*,에 의해 처음으로 근전도 진폭과 근피로 관계에 대해 연구되었다. Kogi와 Hakamada는 주파수 분석을 통한 근피로 평가에 대해 연구하였으며 Cooley와 Tukey는 효율적인 고속 푸리에 변환(Fast Fourier transform, FFT) 알고리즘을 적용하여 근전도 신호를 평가하였다[26]. 다른 연구들에서도 근피로에 따른 중앙주파수 감소를 관찰하였으며 근전도 신호의 국소 푸리에 변환(Short-time fourier transform, STFT)와 웨이블릿(Wavelet) 해석을 통해서도 근피로도에 따라 낮은 주파수 대역이 강화되는 현상을 관찰하였다[27]. 근피로가 높을수록 근전도의 주파수는 고주파에서 저주파로 이동하는 주파수 천이 현상(Frequency shift)이 관찰된다. 주파수 천이현상에서 고주파 영역 신호의 감소는 근육활동전위의 전도속도가 감소하기 때문에 나타나며 저주파 영역 신호의 증가는 운동단위의 동기발동(synchronization)의 증가, 활성속도 감소, 근육 자체 길이 증가 등의 원인에 의한 것으로 알려져 있다[28-30]. 특히 근전도 신호의 주파수 스펙트럼은 평균 주파수(mean power frequency, MPF)와 중앙주파수와 같은 피로 평가 척도로 표현되며 특히 중앙주파수는 근전도상에서 주파수 변동을 가장 잘 반영하는 척도로 여겨진다. 뿐 아니라 국소 푸리에 변환은 시간에 따른 주파수 관찰이 가능하여 근육 정보를 해석하는 또 다른 주파수 분석법으로 사용된다.

본 연구는 LLLT에 의한 근피로 완화 효과 규명을 위해 비침습적이고 객관적인 근전도 신호를 통해 분석하고자 하였다. 현재 근피로에 대한 LLLT 효과 관찰을 위한 비침습적 모니터링 방법은 이루어지지 않은 상태이므로 저출력 레이저의 조사 시 근피로의 변화를 직접 확인할 수 있는 근전도 신호를 중앙주파수 분석과 국소푸리에 변환법을 이용하여 근피로 완화현상을 확인하고자 본 연구를 수행하였다.

## II. 재료 및 방법

본 연구는 신경계 및 근골격계 질환이 없는 23-26세의 건강한 남자 피실험자들 10명을 대상으로 하였다. 10명 모두 active LLLT와 placebo LLLT 두 실험에 참여 하였으며, 본 연구 실험자는 피실험자들에게 실험 참여 전 본 연구의 목적과 방법에 대해 충분한 설명을 한 후 자발적 동의를 얻었다. 실험은 피실험자들로 하여금 운동을 통한 높은 근피로 상태가 재현되도록 유도하여 운동 후 Placebo LLLT와 Active LLLT로 진행하였다. 근전도 신호 측정은 Ag/AgCl 표면전극을 사용하였으며, 상완근 측정을 위해 (+)전극은 이두박

근(biceps) 위 부분에 (-)전극은 이두박근 아래 부분에 (G) 접지전극은 (+)전극과 (-)전극 사이에 부착하였고 피부 표면은 전극을 부착하기 직전 청결하게 유지하도록 하여 피부 저항을 최소화 하였다. 우선 피실험자는 높이 조절이 되는 의자에 착석하였으며 가슴 높이가 보다 낮은 실험대에 전완근을 올려두어 편안한 상태를 유지하여 안정된 상태의 근전도 신호를 측정하였다. 편안한 상태에서 근육의 정상 상태를 측정 후 팔꿈치는 실험대에 붙인 채로 아령을 이용하여 충분한 무게의 물체를 들었다 놓았다를 반복함으로써(Flexion-Extension motion) 근육 강직을 재현하도록 하였다. 이때 운동의 횟수는 최소 100회로 정하였으며 100회 이상 운동이 가능한 피실험자의 경우 더 이상 운동 지속이 불가능하다는 의사표현을 한 시점에서 운동을 중지하고 근전도 신호를 측정하였다. 이후 Placebo LLLT의 경우는 레이저 off 상태의 probe를 상완근에 위치하도록 하여 10분간 휴식을 취한 뒤 후 근전도 신호를 측정하였다. 최소 6시간 이상의 충분한 휴식을 취하게 하여 다시 안정 상태가 되었을 때 Active LLLT 실험을 진행하였다. Active LLLT 실험은 Placebo LLLT와 동일한 방법으로 안정된 상태에서 신호와 운동 수행 후 신호를 각각 측정하였다. 그 후 레이저 on 상태의 probe를 상완근에 위치하여 830 nm 파장을 80 mW의 에너지로 1분간 LLLT를 적용하였고 그 후 피로 회복을 유도한 후 근전도 신호를 측정하였다(그림 1). Leal Junior *et al.*,의 실험에서 830 nm 파장을 100 mW의 에너지로 30초 또는 40초를 조사하여 LLLT효과를 나타내었으므로 1분이라는 시간은 광 에너지를 근육까지 전달하는데 충분한 시간이라고 판단하였다[31]. 근피로에 대한 의미있는 근전도 신호 주파수 대역은 주로 30 Hz에서 500 Hz미만으로 여겨진다[32]. 따라서 Nyquist 주파수를 고려하여 근피로 측정표본 추출률(sam-

pling rate)은 1000 Hz로 설정하고, 근전도 데이터를 수집하였다(HK-214, iWorx systems, Inc., Dover NH, USA).

본 실험에서는 근전도 신호를 중앙주파수(Median Frequency, MNF)와 국소 푸리에 변환 분석을 통해 주파수 천이에 근거하여 해석하였다. 중앙주파수 분석은 근피로 지수(Fatigue index, FI)의 해석이 가능한 수치적인 정보로 객관적 해석이 가능하며 국소 푸리에 변환은 시간대별 주파수 스펙트럼을 관찰이 가능하다. 본 논문에서는 국소 푸리에 변환 해석을 통해 시간대별 전체 주파수 스펙트럼을 통해 주파수 천이 현상을 관찰하고 중앙주파수 분석을 통해 수치적, 통계적 해석을 수행하였다. 수집된 근전도의 Time domain 신호는 고속 푸리에 변환을 통해 Frequency domain 신호로 변환될 수 있고, 디지털 노치 필터(Digital notch filter)를 적용하여 60 Hz에 해당하는 근전도 신호를 제거하였다. 각 구간마다 1분에 해당하는 데이터를 추출하여 Matlab을 통해 중앙주파수와 국소 푸리에 변환 신호로 나타내었다. 특히, 중앙주파수 그래프는 Matlab을 통해 계산된 중앙주파수 변화 그래프와 Lowpass Filter를 거친 그래프, 각 구간별 평균 중앙주파수 그래프로 나타내었다. Lowpass Filter는 Parks McCellan Filter를 통한 FIR(Finite impulse response) lowpass filter로 구현하여 실행하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 국소 푸리에 변환

국소 푸리에 변환을 통해 Placebo LLLT와 Active LLLT의 결과를 나타내었다. 국소 푸리에 변환은 시간에 따른 주파수의 신호 강도를 동시에 표현할 수 있어 주파수 천이 양상을 관찰할 수 있다. 그림 2(a)는 Matlab을 이용하여 도출한 국소 푸리에 변환의 결과로 time과 frequency에 따른 power intensity에 대한 정보를 3D로 표현한 결과이다. 본 연구에서는 명확한 관찰을 위해 그림 2(b)와 같이 2D로 나타내었다. 본 그래프는 time을 x축, frequency를 y축에 나타내었으며 3D에서 y축에 해당된 power intensity에 대한 정보는 time과 frequency에 따른 color변화로 나타난다. 각 그래프에서 오른쪽에 위치한 color bar가 power intensity에 대한 지표이며 color bar에서 색깔이 빨간색에 가까울수록 power intensity가 강한 상태를 나타낸다.

Placebo LLLT 실험 결과는 안정 상태와 비교해 볼 때, 운동 후의 결과가 저주파를 중심으로 하여 전체적으로 붉은 양상이 뚜렷하게 나타나 저주파 대역의 신호가 강해지는 주파수 천이 현상이 반영되었고 휴식 후에는 붉은 양상이 안정 상태만큼 완전히 사라지는 않았으나 전체적으로 power intensity가 약해진 것을 통해 근피로가 완화된 것을 관찰할 수 있었다(그림 3). Active LLLT 실험 결과도 안정된 상태에

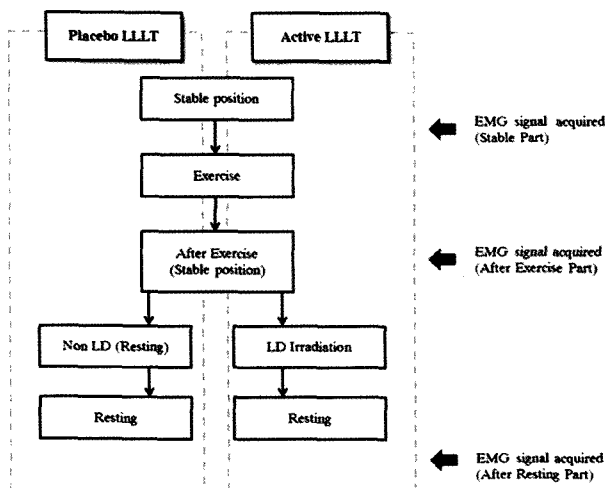


그림 1. 실험절차 블록 다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of experimental protocol

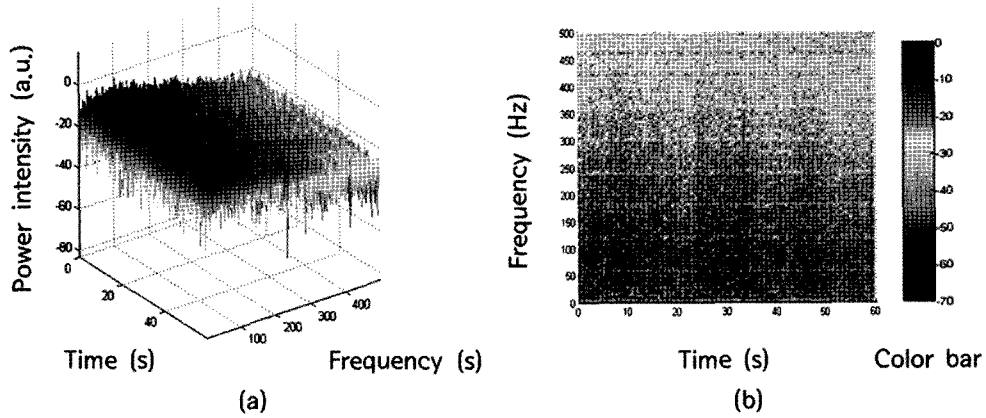


그림 2. 국소 푸리에 변환 결과. (a) 3D 그래프, (b) 2D 그래프  
 Fig. 2. Results of Short time fourier transform. (a) 3D graph, (b) 2D graph

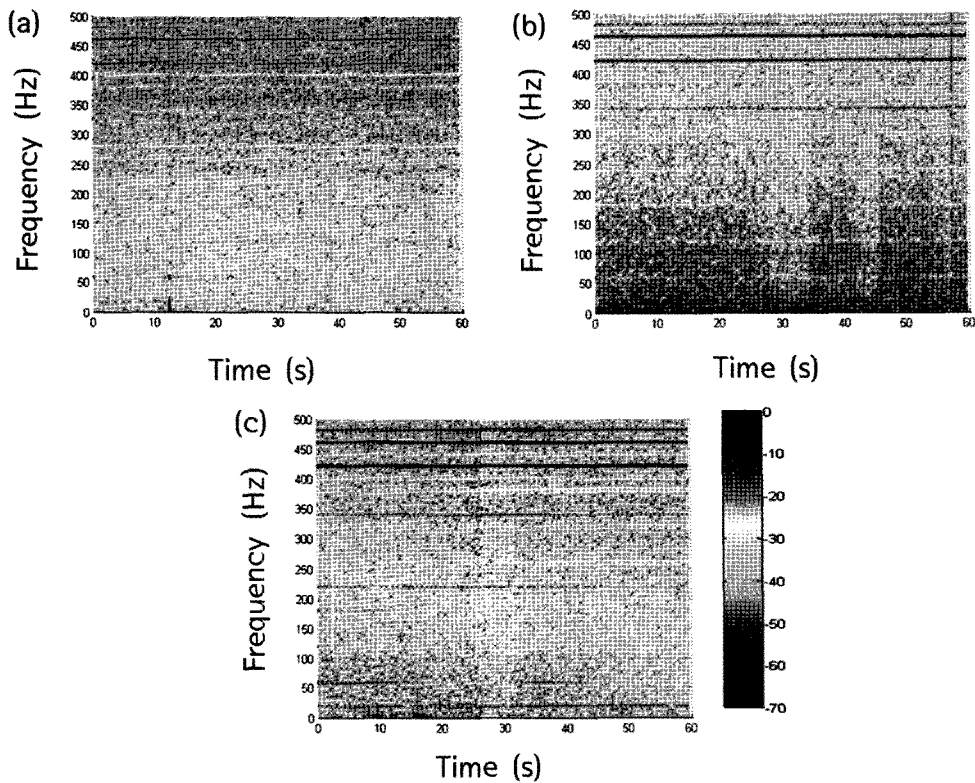


그림 3. Placebo LLLT 실험의 고속 푸리에 변환 결과  
 Fig. 3. Results of Short time fourier transform from Placebo LLLT experiment

비해 운동 직후의 그래프가 뚜렷하게 붉은 양상을 나타내며 근피로 상태가 재현된 것을 관찰할 수 있으며 레이저 조사 후 붉은 양상이 약해지면서 근피로가 완화된 것을 관찰할 수 있었다(그림 4).

## 2. 중앙주파수

10명의 피실험자 결과 중 1명의 피실험자 결과로서 중앙주파수를 통한 근피로의 양상을 관찰하였다. Placebo LLLT

와 Active LLLT에 대한 중앙주파수의 결과는 그림 5에 나타내었으며 동일한 신호를 lowpass filter처리 후 그림 6에 나타내었다.

Placebo LLLT와 Active LLLT에 대한 중앙주파수의 비교 관찰 결과, Placebo LLLT 실험에서 편안한 자세를 유지하는 안정 상태 구간의 중앙주파수는 제한된 일정한 범위 내에서 약간의 변화만 나타날 뿐 큰 변화 없이 일정한 양상을 나타내었고, 피실험자의 자발적인 운동을 통해 근피로를 유

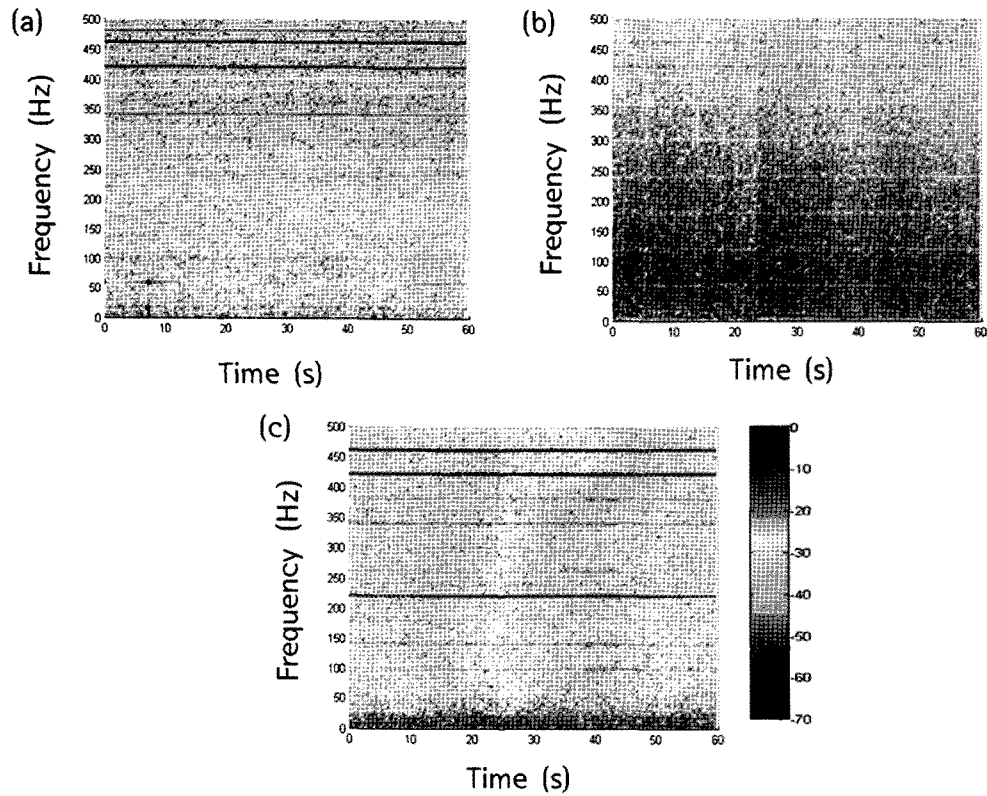


그림 4. Active LLLT 실험의 고속 푸리에 변환 결과  
 Fig. 4. Results of Short time fourier transform from Active LLLT experiment

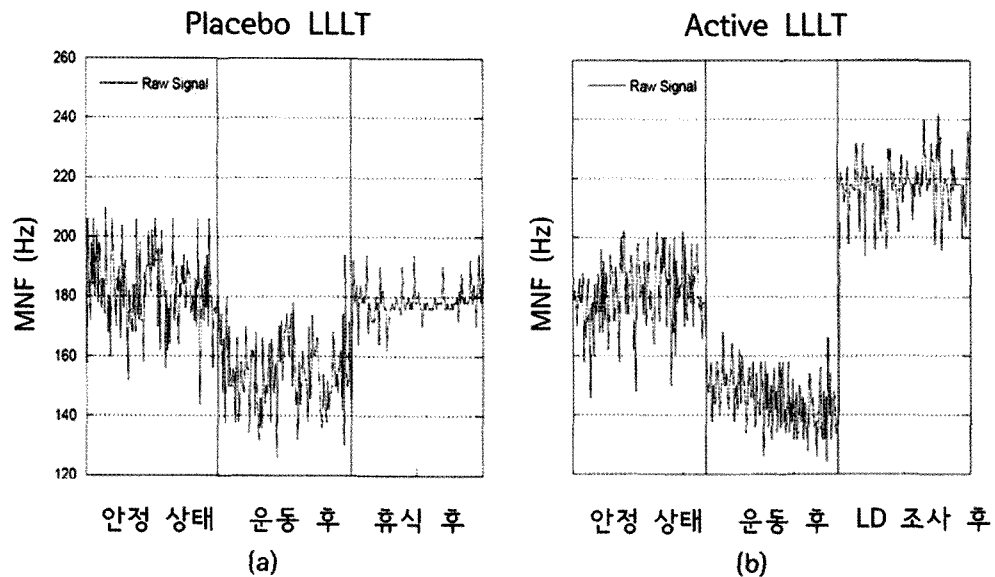


그림 5. Placebo LLLT의 중앙주파수. (a) raw MNF, (b) Filtered MNF  
 Fig. 5. Median frequency results of Placebo LLLT experiment. (a) raw MNF, (b) filtered MNF

발한 운동 후 상태 구간의 중앙주파수는 안정 상태에 비해 중앙주파수가 상대적으로 감소하여 근피로가 높은 상태에서 중앙주파수가 감소하는 주파수 천이현상을 나타내었다. 휴식 후 구간의 중앙주파수는 운동 전의 중앙주파수 정도까지 증

가하는 것을 통해 운동 후의 휴식시간동안 근피로가 회복되었음을 나타내었다. Active LLLT 실험에서 중앙주파수는 안정 상태 구간에서 일정한 양상을 보이는 중앙주파수를 관찰할 수 있었으며 근피로를 유발한 운동 직후 구간의 중앙주파

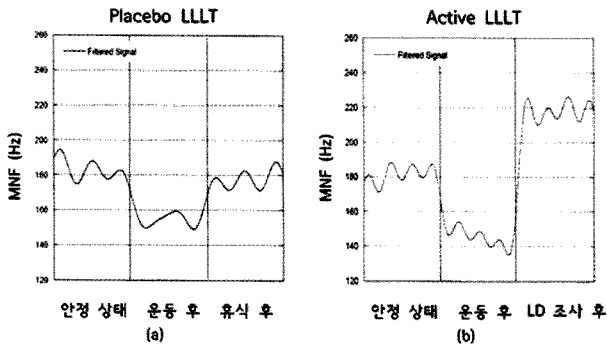


그림 6. Active LLLT 실험의 중앙주파수. (a) raw MNF, (b) Filtered MNF

Fig. 6. Median frequency results of Active LLLT experiment. (a) raw MNF, (b) filtered MNF

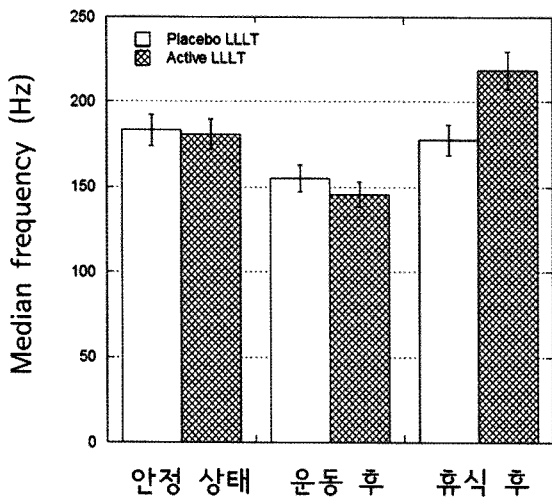


그림 7. 중앙주파수 평균값  
Fig. 7. Mean values of Median frequency

수는 안정 상태에 비해 감소하였다. 레이저 조사 후 구간의 중앙주파수는 안정 상태의 중앙주파수는 운동 후 구간의 중앙주파수에 비해 증가하였으며 안정 상태 구간의 중앙주파수 이상으로 증가하여 레이저 조사에 의해 근피로가 회복되었음을 나타내었다(그림 6).

그림 7은 모든 피실험자들의 Placebo LLLT와 Active LLLT간의 정량적 결과를 제시하기 위해서 구간별 중앙주파수 평균값으로 나타내었다. Blank square는 Placebo LLLT에 해당하는 값을 나타내며 Filled square는 Active LLLT에 해당하는 값을 나타낸다. Placebo LLLT와 Active LLLT의 안정 상태 구간의 중앙주파수 평균값은 각각  $183.26 \pm 5.59$  Hz와  $180.89 \pm 4.61$  Hz로 유사한 값을 나타내었다. 운동 후 Placebo LLLT와 Active LLLT의 중앙 주파수 평균값은 각각  $155.03 \pm 4.58$  Hz와  $145.79 \pm 4.30$  Hz로 운동 전과 비교하였을 때 각각  $28.2 \pm 5.09$  Hz와  $35.10 \pm 4.46$  Hz씩 감소하였다. 중앙주파수의 감소는 근피로가 유발될 경우 고

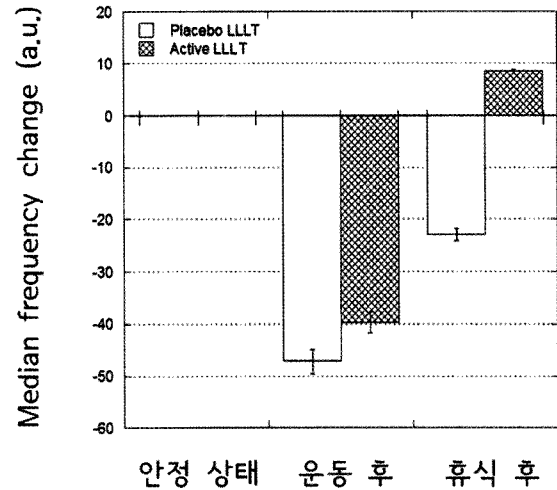


그림 8. 중앙주파수 평균값의 변화량  
Fig. 8. Median frequency changes

주파의 신호가 약해지고 저주파 신호가 강해지는 주파수 천이에 의한 것이다. Placebo LLLT의 휴식 후와 Active LLLT의 휴식 후의 중앙주파수 평균값은 각각  $177.63 \pm 5.03$  Hz와  $218.52 \pm 4.70$  Hz로 나타났다. Placebo LLLT의 휴식 후 중앙주파수는 운동 후에 비해 증가된 중앙주파수로 재현된 근피로의 회복 정보를 포함하고 있으나 운동 전 안정 상태의 중앙주파수에 비해서 낮은 수치를 가지므로 10분의 휴식 후에도 재현된 근피로가 완전히 회복되지 못함을 관찰할 수 있으며 근피로 회복이 진행 중임을 판단할 수 있다. Active LLLT의 레이저 조사 및 10분간 휴식에 따른 중앙주파수 평균값은 운동 후에 비해  $72.72 \pm 4.50$  Hz만큼 향상하였으며 안정 상태와 비교하였을 때도  $37.62 \pm 4.66$  Hz만큼 증가하여 레이저 조사와 휴식 후 완전한 근피로 회복이 이루어졌음을 알 수 있다.

그림 8은 안정 상태를 기준으로 근피로 증가 수치와 회복에 따른 수치를 관찰하였는데, 피실험자 전체 데이터 정보는 중앙주파수 변화량으로 표현하였다. 모든 피실험자의 근육 정보는 다르므로 운동 전 안정 상태의 구간을 기준으로 두어 운동 직후와 휴식후의 중앙주파수 평균의 변화량을 나타내었다. Blank square는 Placebo LLLT에 해당하는 값을 나타내며 Filled square는 Active LLLT에 해당하는 값을 나타낸다. 운동 후 Placebo LLLT의 중앙주파수는  $-47.16 \pm 7.91$  Hz, Active LLLT의 중앙주파수는  $-39.74 \pm 8.63$  Hz의 변화값을 가졌다. 김형돈 외의 연구에서 하퇴부의 족저굴근의 근피로 유발 전·후 중앙주파수는 최대 50 Hz까지 감소한 것에 비추어 볼때 충분한 근피로가 유발되었다고 판단되었다[33]. 휴식 후 Placebo LLLT의 중앙주파수 변화값은  $-22.95 \pm 2.92$  Hz로 중앙주파수가 운동 후 구간에 비해 증가하였지만 안정 상태만큼 증가하지는 못했다. 그에 반해

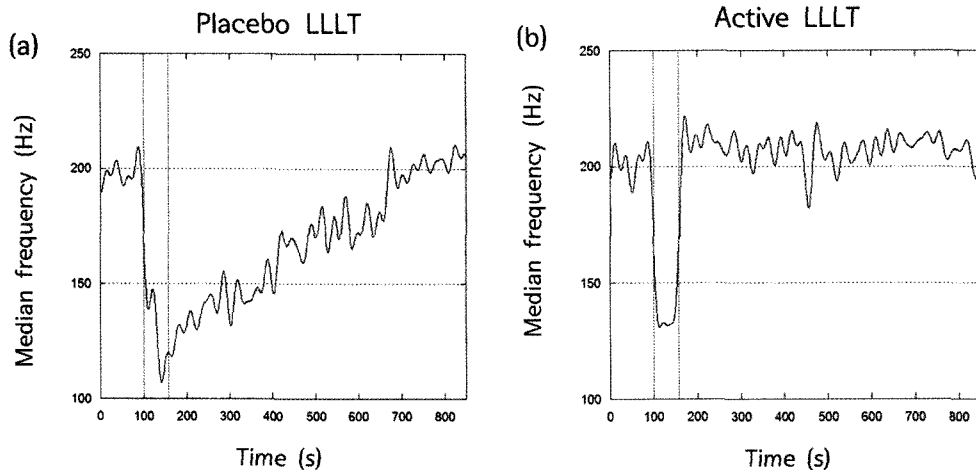


그림 9. 실시간 중앙주파수 관찰. (a) Placebo LLLT, (b) Active LLLT

Fig. 9. Real time monitoring median frequency (a) Placebo LLLT, (b) Active LLLT

Active LLLT는 운동 후  $-39.74 \pm 4.63$  Hz로 중앙주파수가 감소하고 휴식 후에는  $8.51 \pm 1.46$  Hz로 중앙주파수의 변화가 48.25 Hz 이상 증가하였다. 따라서 Placebo LLLT의 경우, 운동으로 유발된 피로가 관찰 시간 내에 완전한 회복이 이루어지지 못한 반면 Active LLLT의 경우, 운동으로 유발된 피로가 레이저 조사 및 휴식을 통해 완전히 회복되었음을 알 수 있다.

그림 9는 연속적인 시간에 따른 LLLT효과에 의한 근피로 회복을 중앙주파수 그래프를 통해 관찰하였다. 단, 레이저 조사 시에는 근전도와의 간섭으로 인해 정확한 근육 정보의 결과가 반영되지 않으므로 그래프에 포함하지 않았다. 그림 9(a)는 Placebo LLLT의 경우로 0~100초의 안정 상태에서 운동 직후 100~160초 구간은 중앙주파수가 급격히 감소하였고 휴식 중에 서서히 중앙주파수가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 반면, Active LLLT의 경우 그림 9(b)에서 나타나는 것과 같이 0~100초의 안정 상태에서 운동 직후 100~160초 구간에서 중앙주파수가 감소하였고, 레이저 조사 바로 직후인 160초부터는 거의 안정 상태와 유사한 중앙주파수 값을 나타내는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 Active LLLT 경우, Placebo LLLT에 비해 빠른 시간 내에 근피로가 회복되었음을 관찰할 수 있었다.

근피로는 근육 내 불충분한 산소 공급 및 대사 물질의 축적에 의해 발생된다[8-12]. 따라서 LLLT에서 주어지는 광원 에너지의 미토콘드리아 흡수에 의해 산소 공급과 활발한 신진대사에 따른 대사 물질 제거를 통해서 근피로 완화를 기대할 수 있다[8-12]. 미토콘드리아 호흡 연쇄가 광수용체로서 막 전위를 변화시키고 ROD와 황산화제 형성, 세포적 산화환원 반응 상태의 변화, 산화 스트레스 감소, ATP 생성 증가 등의 생물학적 반응을 유도하여 임상 효과를 나타낸다고 알려져 있으며, Passarella *et al.*,의 동물실험을 통해 He-

Ne laser가 ATP 합성을 향상시킨다는 것을 입증하였다[34-36]. 기존에 행해지고 있는 LLLT를 통한 근피로에 대한 평가법은 운동 전·후의 크레아틴 및 젖산 농도를 측정하는 혈액 화학적 방법이나 문진을 통한 리커트 척도로 주로 이용되어왔으나 이는 침습적인 방법으로 혈액 채취하거나 환자의 개인적인 상태를 주관적으로 반영하며 실시간 및 장시간 관찰이 불가능하다는 한계를 가진다[17,23]. 따라서 이에 본 연구는 운동 후 발생한 근피로에 대해 LLLT를 적용할 때, 그 효과를 근전도 신호를 이용하여 실시간으로 관찰하였고 효과의 수치화 및 객관화를 위해 근전도의 국소 푸리에 변환과 중앙주파수를 이용하였다.

본 연구에서는 국소 푸리에 변환의 결과로 근피로에 대한 저출력레이저의 치료 효과를 뚜렷하게 관찰할 수 있었다. Active LLLT 실험이 Placebo LLLT 실험에 비해 레이저 조사 및 휴식 후 근피로에 의해 높아졌던 power intensity가 낮아지는 결과를 나타내었다. 이 결과는 저출력레이저를 조사한 경우, 근피로의 완화 정도가 더 크다는 것을 의미한다. 중앙주파수를 통한 근육 신호를 분석한 결과, Active LLLT 실험과 Placebo LLLT 실험 모두 운동 후 동일한 시간의 휴식시간을 가졌음에도 불구하고 레이저를 조사한 Active LLLT 실험이 Placebo LLLT 실험에 비해 더 높은 중앙주파수 결과를 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 저출력레이저를 근육에 조사할 경우 근피로가 더욱 뚜렷하게 완화된다는 의미이다. 또한 실시간 정보를 반영한 결과를 통해 Placebo LLLT의 경우는 회복 속도가 느림에 반해 Active LLLT의 경우 레이저 조사 후 근피로가 빠르게 회복되었음을 관찰할 수 있었다(그림 9).

따라서 근전도 측정을 통해 붉게 나타나는 국소 푸리에 변환의 결과와 감소되는 중앙주파수 결과를 통해 피실험자에 의해 재현된 근피로를 확인할 수 있었고, 붉은 색이 차지하

는 면적이 줄어들고 파란색에 가까운 색을 나타내는 국소 푸리에 변환 그래프와 증가되는 중앙주파수 결과를 통해 레이저에 의한 근피로 완화를 정량적으로 평가할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 연구는 근피로에 대한 LLLT 효과 평가를 위해 근전도 신호를 관찰하였다. LLLT를 적용하기 위해 근피로를 임의로 발생시켜 근육 깊이까지 광원의 에너지를 전달할 수 있는 830 nm 파장의 레이저를 조사하였다. LLLT 치료 효과는 근전도 신호를 통해 분석하였는데, 국소 푸리에 변환과 중앙주파수를 통한 수치적 결과를 토대로 placebo LLLT와 Active LLLT로 나누어 제시하여 LLLT의 효과를 관찰하였다. 따라서 본 연구는 LLLT 적용 시 정량적인 근전도 신호 분석을 통하여 근피로도 진단 및 치료 효과 평가에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] B. Bigland-Ritchie, E. Cafarelli, N. K. Vollestad, "Fatigue of submaximal static contractions," *Acta physiol Scand Suppl*, vol. 556, pp. 137-148, 1986.
- [2] N. K. Vollestad, O. M. Sejersted, R. Bahr, J. J. Woods, B. Bigland-Ritchie, "Motor drive and metabolic responses during repeated submaximal contractions in humans," *J Appl Physiol*, vol. 64, no. 4, pp. 1421-1427, 1998.
- [3] N. K. Vollestad, "Measurement of human muscle fatigue," *J Neurosci Methods*, vol. 74, no. 2, pp. 219-227, 1997.
- [4] J. R. Double, J. M. Walsh, "Muscle fatigue and muscle length interaction: effect on the EMG frequency components," *Electromyogr Clin Neurophysiol*, vol. 35, no. 6, pp. 331-339, 1995.
- [5] R. Merletti, P. Parker, "Electromyography: Physiology, Engineering, and Non-Invasive Applications," *Wiley-IEEE Press*, pp. 1-24, 2004.
- [6] H. Westerblad, J. D. Bruton, D. G. Allen, J. Lannergren, "Functional significance of Ca<sup>2+</sup> in long-lasting fatigue of skeletal muscle," *European Journal of Applied Physiology*, vol. 83, no. 2-3, 166-174, 2000.
- [7] 김성수, 정일규, *운동생리학*, 서울: 대경북스, 2001.
- [8] I. Y. Paik, J. K. Kim, Y. S. Chun, H. J. Oho, "Verifying the validity of fatigue elements changes following absolute exercise intensities," *Kor J Physical Edu*, vol. 36, pp. 218-223, 1997.
- [9] H. B. Rossiter, E. R. Cannerll, P. M. Jakeman, "The effects of oral creatine supplementation on the 1000-m performance of competitive rowers," *J Sports Sci*, vol. 14, pp. 175-179, 1996.
- [10] 차광석, 김은희, 김재호, 김창규, 신상규, 순종일, 윤재량, 이원재, 이종각, 정동식, 조성계, 진영수, 황수관, 현우영, *전문가를 위한 최신 운동 처방론*, 서울: 21세기교육사, 1999.
- [11] D. L. Costill, *Inside running: Basis of sports physiology*, Indianapolis: Benchmark press, 1986.
- [12] K. B. Wasserman, J. Whipp, S. N. Koyal, W. L. Beaver, "Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise," *J. Apple. Physiol.*, vol. 35, no. 2, pp. 236-243, 1973.
- [13] 이우주, *표준의학사전*, 서울: 아카데미서적, 2000.
- [14] A. Gur, M. Karakoc, K. Nas, R. Cevik, J. Sarac, E. Demir, "Efficacy of Low Power Laser Therapy in Fibromyalgia: A Single-blind, Placebo-controlled Trial," *Lasers Med Sci*, vol. 17, pp. 57-61, 2002.
- [15] J. G. Becher, A. Beelen, G. J. Lankhorst, "Clinical assessment of spasticity in children with cerebral palsy: a critical review of available instruments," *Developmental Medicine & Child Neurology*, vol. 48, no. 1, pp. 64-73, 2006.
- [16] J. Reidun, V. Lisbeth, K. S. Johan, H. Inger, "Fatigue in adults with cerebral palsy in Norway compared with the general population," *Developmental Medicine & Child Neurology*, vol. 45, pp. 296-303, 2003.
- [17] E. C. P. Leal Junior, R. A. B. L. Martins, L. Frigo, T. D. Marchi, R. P. Rossi, V. D. Godoi, S. S. Tomazoni, D. P. Silva, M. Basso, P. L. Filho, F. D. V. Corsetti, V. V. Iversen, J. M. Bjordal, "Effect of low level laser therapy (LLL) in the development of exercise induced skeletal muscle fatigue and changes in biochemical markers related to postexercise recovery," *J Orthop Sports Phys Ther.*, vol. 40, no. 8, pp. 524-532, 2010.
- [18] B. Rodrigo Alvaro, M. Lopes, L. M. Rodrigo, S. L. Patricia, C. P. Antonio, N. M. Marcelo, A. Flavio, F. Lucio, V. I. Vegard, M. B. Jan, "Effect of low level laser (Ga-Al-As 655nm) on skeletal muscle fatigue induced electrical stimulation in rats," *American Physiological Society*, vol. 101, pp. 283-288, 2006.
- [19] Chukuka S. Enwemeka, "Intricacies of Dose in Laser Phototherapy for tissue repair and pain relief," *Photomedicine and Laser Surgery*, vol. 27, no. 3, pp. 1-7, 2009.
- [20] C. R. Simpson, M. Lohl, M. Essenpreis, M. Cope, "Near-infrared optical properties of ex vivo human skin and subcutaneous tissues measured using the Monte Carlo inversion technique," *Phys. Med. Biol.*, vol. 43, no. 9, pp. 2465-2478, 1998.
- [21] W. J. Kraemer, J. A. Bushb, R. U. Newton, N. D. Duncand, J. S. Volekb, C. R. Denegarb, P. Canavanb, J. Johnstone, M. Putukianb, W. J. Sebastianellib, "Influence of a compression garment on repetitive power output production before and after different types of muscle fatigue," *Sports Medicine, Training and Rehabilitation*, vol. 8, no. 2, pp. 163-184, 1998.
- [22] N. P. Buller, D. Jones, P. A. Poole Wilson, "Direct measurement of skeletal muscle fatigue in patients with chronic heart failure," *Br Heart J*, vol. 65, no.1, pp. 20-24, 1991.
- [23] E. C. P. Leal Junior, R. A. Lopes Martins, A. A. Vanin, B. M. Baroni, D. Grosselli, T. De Marchi, V. Iversen, J. M. Bjordal, "Effect of 830 nm low level laser therapy in exercise induced skeletal muscle fatigue in humans," *Lasers Med Sci.*, vol. 24, no. 3, pp. 425-231, 2008.
- [24] E. C. P. Leal Junior, R. A. Lopes Martins, F. Dalan, M. Ferrari, F. M. Sbabo, R. A. Generosi, B. M. Baroni, S. C. Penna, V. V. Iversen, J. M. Bjordal, "Effect of 655-nm low-level laser therapy on exercise-induced skeletal muscle fatigue in humans," *Photomed Laser Surg.*, vol. 26, no. 5, pp. 419-424, 2008.
- [25] N. Strimpakosa, G. Georgiosb, K. Elenib, K. Vasiliosc, O. Jacquelinea, "Issues in relation to the repeatability of and correlation between EMG and Borg scale assessments of neck muscle fatigue," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 15, no. 5, pp. 452-465, 2005.
- [26] M. Cifrek, V. Medved, S. Tonković, S. Ostojić, "Surface



- EMG based muscle fatigue evaluation in biomechanics," *Clinical Biomechanics*, vol. 24, no. 4, pp. 327-340, 2009.
- [27] P. J. Sparto, M. Parnianpour, E. A. Barria, J. M. Jagadeesh, "Wavelet and Short-Time Fourier Transform Analysis of Electromyography for Detection of Back Muscle Fatigue," *IEEE TRANSACTIONS ON REHABILITATION ENGINEERING*, vol. 8, no. 3, pp. 433-436, 2000.
- [28] 장근, 김영호, "요추 신전운동 시 중앙주파수와 웨이브렛을 이용한 근피로 분석," *J. Biomed. Eng. Res.*, vol. 25, no. 5, pp. 377-382, 2004.
- [29] B. Bigland Ritchie, E. F. Donovan, C. S. Roussos, "Conduction velocity and EMG power spectrum changes in fatigue of sustained maximal effort," *Journal of Applied Physiology*, vol. 51, no. 5, pp. 1300-1305, 1981.
- [30] B. Bigland-Ritchie, R. Johansson, O. C. Lippold, S. Smith, J. J. Woods, "Changes in motoneurone firing rates during sustained maximal contraction," *J. Physiol*, vol. 340, pp. 335-346, 1983.
- [31] E. C. P. Leal Junior, R. A. B. L. Martins, B. M. Baroni, T. D. Marchi, D. Tauffer, D. S. Manfro, M. Rech, V. Danna, F. D. V. Corsetti, R. A. Generosi, R. L. Marcos, L. Ramos, J. M. Bjordal, "Effect of 830nm low level laser therapy applied before high intensity exercises on skeletal muscle recovery in athletes," *Lasers Med Sci.*, vol. 24, no. 6, pp. 857-863, 2008.
- [32] N. K. Vollestad, "Measurement of human muscle fatigue," *Journal of neuroscience methods*, vol. 74, no. 2, pp. 219-227, 1997.
- [33] 김형돈, 유재중, 윤성원, "근피로 유발 후 Concentric과 Eccentric 근수축시 등속성 근력 및 EMG 변화," *한국체육학회지*, vol. 36, no. 2, pp. 272-282, 1997.
- [34] S. Passarella, E. Casamassima, S. Molinaria, D. Pastorea, E. Quagliariello, I. M. Catalanob, A. Cingolanib, "Increase of proton electrochemical potential and ATP synthesis in rat liver mitochondria irradiated in vitro by helium-neon laser," *FEBS LETTERS*, vol. 175, no. 1, pp. 95-99, 1984.
- [35] J. R. Carey, T. P. Burghardt, "Movement Dysfunction Following Central Nervous System Lesions: A Problem of Neurologic or Muscular Impairment?," *Physical Therapy*, vol. 73, no. 8, pp. 538-547, 1993.
- [36] M. A. Naeser, "Neurological rehabilitation: acupuncture and laser acupuncture to treat paralysis in stroke and other paralytic conditions and pain in carpal tunnel syndrome," *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, vol. 3, no. 4, pp. 425-428, 1997.