

심박변화율을 이용한 최대지방연소 운동강도
유도 방법에 관한 연구

연세대학교 대학원

의 공 학 과

박 성 준

심박변화율을 이용한 최대지방연소 운동강도
유도 방법에 관한 연구

지도 윤 형 로 교수

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2008년 12월 일

연세대학교 대학원

의 공 학 과

박 성 준

박성준의 석사 학위논문을 인준함

심사위원 _____ 인

심사위원 _____ 인

심사위원 _____ 인

연세대학교 대학원

2008년 12월 일

감사의 글

본 논문이 있기까지 아낌없이 가르침을 주시고 자상한 격려와 조언으로 이끌어 주신 윤형로 교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 가운데서도 부족한 저의 논문을 살펴주시고 지도해 주신 이경중 교수님과 신태민 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 학부와 대학원 생활동안 많은 가르침을 주신 이윤선 교수님, 김동윤 교수님, 윤영로 교수님, 김영호 교수님, 김법민 교수님, 김한성 교수님, 김정환 교수님, 정병조 교수님, 김지현 교수님, 이상우 교수님, 임창환 교수님, 윤대성 교수님, 서종범 교수님, 이용흙 교수님, 권기운 교수님, 임도형 교수님, 백주열 교수님께 감사의 말씀을 올립니다.

2년간의 대학원 생활동안 많은 조언을 해주신 의용계측 연구실의 많은 선배님께 감사드립니다. 또한 박성빈 선배님, 정인철 선배님, 서광석 선배님, 이계형 선배님, 고재일 선배님의 많은 조언에 감사드리고, 동고동락을 함께했던 동희형, 기태형, 연식형, 한윤형, 신우, 준섭형께도 감사드립니다. 같이 대학원에 입학해서 많은 도움을 주신 석환형과 명현형, 많은 도움을 준 상오형, 옥진에게도 고마움을 표합니다. 특히, 항상 저를 믿어주고 아껴준 연식형에게 깊은 감사의 마음을 다시 한번 전합니다. 그리고 모든 의공학과 대학원 선, 후배님들께 감사하며 이들에게 학문적 성공과 행복을 진심으로 기원합니다. 그리고, 이 논문을 위해 많은 도움을 주신 의용컴퓨터 연구실의 태균형, 용현형, 현학형, 동국형, 우혁, 동수와 김현석, 박동규, 심홍석, 이원남, 이주형, 전상민에게 큰 감사를 전합니다. 그리고 실험을 도와 주신 원주 의과대학 운동의학연구실의 공인덕 교수님, 심윤복 선생님, 준흠형, 김대식 선생님께 특별히 감사의 뜻을 전합니다.

대학 생활동안 많은 힘이 되고 의지가 되었던 연세대학교 사진동아리 FOA의 23기 동기인 득환이, 숙정이, 주연누나, 하나, 인철형, 민재, 우승이, 철희, 태희, 윤영에게도 고마움을 전합니다. 그리고 언제나 우리들의 정신적 지주가 되어주었던 영민형에게도 미안함과 함께 감사하다고 말하고 싶습니다. 또한 동아리 선배님들

과 잊지 않고 언제나 찾아준 후배들에게 고마움을 전합니다.

자주 연락은 못하지만 언제나 나를 믿고 기다려준 고등학교 동창 유경호, 김민호, 이윤섭에게 언제나 고맙다고 전하고 싶습니다. 그리고 이제 결혼을 하게되는 친구 민규 에게도 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 오빠 대신 부모님께 효도해준 제 동생 새미에게 고마움을 전하며, 오늘이 있기까지 못난 아들을 믿고 지켜봐주신 아버지와 어머니께 이 작은 노력의 결실을 바칩니다.

2008년 겨울
박성준 올림

차 례

그림 차례	iii
표 차례	iv
국문 요약	v
제1장 서론	1
제2장 이론적 배경	4
2.1. 운동 중 생리적 변화	4
2.1.1. 심박수의 변화	4
2.1.2. 호흡의 변화	5
2.1.2.1. 환기량의 변화	5
2.1.2.2. 환기량과 무산소성 역치	7
2.1.2.3. 호흡교환율	8
2.1.3. 자율신경계의 변화	9
2.2. 에너지 대사	10
2.2.1 에너지원	10
2.2.2. ATP 생산	11
2.2.2.1. 무산소 대사	12
2.2.2.2. 유산소 대사	13
2.3. 최대 지방연소 운동강도	14
제3장 연구 방법	15
3.1. 피실험자 및 실험 프로토콜	15
3.2. 시스템 하드웨어 구성	17
3.3. 운동 중 지방연소량 측정	19
3.4. 심전도 신호처리 구성	20

3.4.1. R과 검출	20
3.4.2. 심박 변화율 추출	22
3.4.3. 심박 변화율 분석	23
3.5. 심박 변화율을 이용한 자율신경계의 변화 검출	24
3.6. 심박 변화에서의 최대 지방연소 시점 검출	26
3.7. 통계 분석	28
제4장 실험 결과	29
4.1. 지방연소량 및 탄수화물 연소량의 변화	29
4.2. 심박변화율을 통한 자율신경계의 변화	30
4.3. 가스분석을 통한 최대지방연소 시점 검출	31
4.4. 심박변화에서의 최대지방연소 시점 검출	32
4.5. 심박변화에서 검출된 최대지방연소 시점의 검증	33
제5장 고찰	37
제6장 결론	40
제7장 향후 과제	41
참고 문헌	42
ABSTRACT	46

그림 차례

그림 2.1 심장 조절 기전	4
그림 2.2 운동시 산소결핍과 초과산소섭취	7
그림 2.3 ATP의 3가지 공급방법	11
그림 3.1 전체 시스템 구성도	17
그림 3.2 심전도 측정부 블록 다이어그램	18
그림 3.3 R과 검출 과정	21
그림 3.4 심박 변화율에서의 분석 과정	24
그림 3.5 운동 중 심박변화에서의 심박변화율 간격 변화	26
그림 3.6 R과 간격들의 분포 및 % 별 분포 형태	27
그림 4.1 운동 중 지방 연소량과 탄수화물 연소량의 변화	29
그림 4.2 운동 중 SDNN의 변화	30
그림 4.3 운동 중 LF와 HF power의 변화	30
그림 4.4 피검자별 각 최대지방연소 시점 비교	33
그림 4.5 운동 중 최대지방연소 시점 검출 산점도	33

표 차례

표 3.1 피험자의 신체적 특성	15
표 3.2 Modified Bruce Protocol	16
표 3.3 Lusk Table	19
표 4.1 가스 분석을 통한 최대지방연소 시점 검출	31
표 4.2 심박변화에서의 최대지방연소 시점 검출	32
표 4.3 검출된 최대지방연소 시점 비교	34
표 4.4 검출된 최대지방연소 시점의 평균과 표준편차	34
표 4.5 검출된 최대지방연소 시점의 비모수적 방법에 따른 상관관계 분석	35
표 4.6 검출된 최대지방연소 시점의 Wilcoxon 부호순위 검정	35

국 문 요 약

심박변화율을 이용한 최대지방연소 운동강도 유도 방법에 관한 연구

본 논문은 운동 중에 측정되는 심박 변화율을 이용하여 최대 지방연소가 이루어지는 운동 강도를 검출함으로써 비만을 위한 운동 처방 지표로 사용할 수 있는 방법에 대한 연구이다.

현대인들의 생활 수준의 질적 향상과 과학·기술 발전에 의해 신체 활동이 감소하게 되었고, 경제발전과 더불어 지방 섭취량이 증가하면서 비만율이 증가하는 추세이다. 이에 따라 비만의 치료 및 해결방안으로 식이요법, 운동요법, 약물요법, 그리고 수술요법 등 다양한 처치 방법이 제시되고 있다. 본 연구에서는 비만을 위한 운동처방에서 최대 지방을 연소할 수 있는 운동 강도 설정에 있어서, 가스 분석기를 통한 지방 연소량의 변화를 측정하는 방법을 대신한 간편하고 일상생활에 적용이 용이한 새로운 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 운동 중 심전도 신호를 측정하여 심박 변화율을 검출하고, 운동 중의 자율신경계의 변화를 관찰하였다. 또한 이와 비교하기 위해서 가스 분석기를 통한 운동 중 실제 지방의 연소량을 측정하여 최대 지방연소 시점을 검출하였다. 자율신경계의 변화에서 교감신경과 부교감신경이 감소하는 시점을 R-R 간격 값이 $-0.01 \sim 0.01\text{ms}$ 의 범위안에 60% 이상 포함되기 시작하는 시점을 통해서 검출하였고, 그 결과 피검자들의 최대지방연소 시점들의 평균과 표준편차는 가스분석을 통한 경우, 564.38 ± 43.77 초, 심박변화를 이용한 경우, 570 ± 41.47 초임을 보였다. 두 방법의 결과의 상관관계를 분석한 결과 비모수적 방법의 Kendall의 tau-B 방법의 경우 상관계수는 0.855이고, Spearman의 rho의 경우 0.950으로 모두 $p < 0.01$

의 유의한 결과를 보였다. Wilcoxon 부호 순위 검정을 통해 분석한 결과, 유의확률이 $p=0.115(>0.05)$ 로 유의하지 않은 결과를 보였다.

따라서, 본 논문에서는 심박변화율을 통해서 최대 지방연소 시점을 검출하는 방법은 기존의 가스 분석을 통한 최대 지방연소 시점과 유의한 결과를 보였으며, 가스 분석을 통한 방법에 비해서 심전도만을 측정함으로써 원하는 결과를 얻어낼 수 있는 간편함을 보였다.

핵심되는 말 : 지방연소, 최대운동, 심박변화율, 비만, 호흡교환율

제 1 장 서 론

본 논문은 운동 중에 측정되는 심박 변화율을 이용하여 최대 지방연소가 이루어지는 운동 강도를 검출함으로써 비만을 위한 운동 처방 지표로 사용할 수 있는 방법에 대한 연구이다.

현대인들의 생활 수준의 질적 향상과 과학·기술 발전에 의해 신체 활동이 감소하게 되었고, 경제발전과 더불어 지방 섭취량이 증가하면서 비만율이 증가하는 추세이다. 비만(obesity)이란, 섭취 칼로리가 기초대사 및 신체활동 등에 의한 소비 칼로리보다 많은 경우에 과잉 섭취된 칼로리가 피하 등에 지방으로 축적됨으로써 일어나는 과체중 현상을 의미하며 일반적으로 체질량지수(Body Mass Index, BMI)가 30 kg/m^2 이상일 때를 비만으로 정의하고, $25 \sim 29.9 \text{ kg/m}^2$ 일 때를 체중과다(overweight)로 정의한다[1]. 비만은 각종 성인병의 원인으로 오늘날에 들어서 체중관리의 필요성이 점차 커지고 있다.

비만의 치료 및 해결방안으로는 식이요법, 운동요법, 약물요법, 그리고 수술요법 등 다양한 처치 방법이 제시되고 있다. 그러나 근래에 들어서 식이요법과 운동요법의 병행이 권장되고 있으며, 특히 운동요법은 제지방 조직(lean body tissue)을 감소시키지 않고 에너지 대사를 증가시키면서 지방만을 선택적으로 감소시키는 것과 동시에 체력을 유지 및 증진시켜 주는 방법이다. 운동을 통해서 지방 산화를 증가시키기 위한 연구들이 여러 가지 방법으로 활발히 수행되고 있지만, 지방이 운동 중 에너지원으로 조절되는 기전들은 아직 명확하게 제시되지 않고 있는 실정이다[2].

운동 중 인체 내에서 에너지원으로 사용되는 열량 영양소는 탄수화물, 지방, 단백질 등이다. 이 중, 단백질은 에너지원으로 사용되는 비율이 5-10%로 매우 낮고 [3], 주로 탄수화물과 지방이 운동 시의 에너지원으로 사용된다. 운동시 에너지원의 결정에 영향을 미치는 요인은 운동강도와 운동시간이다. 탄수화물은 운동 강도가 높고 단시간의 고강도 운동일 경우에 주 에너지원으로 사용되고[4], 장시간의 저강도 운동일 경우, 특히 운동시간이 30분 이상 지속되는 경우에는 지방이 에너

지원으로 차지하는 비율이 점차적으로 증가하게 된다[5]. 또한, 지구성 운동으로 훈련된 선수들이 낮은 운동강도에서 보다 많은 에너지를 지방의 연소로 얻게 된다고 알려져 있다. 이러한 정보를 통하여 이산화탄소 배출량과 산소섭취량의 비율인 호흡교환율과 Lusk table[6]에 의한 운동시 사용되는 탄수화물과 지방의 비율을 산출해 낼 수 있다.

지방을 에너지원으로 최대로 이용되는 지점을 찾기 위해 지금까지 국내·외에서 운동을 통하여 지방을 효과적으로 산화시키기 위한 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국 스포츠의학회(American College of Sports Medicine; ACSM)에서는 건강과 심폐기능 유지 및 증진을 위한 운동강도로 최대산소섭취량의 50~60%를 권장하고 있으며, 국내에서는 이용수 등에 의해서 일반 대학생과 지구성 훈련 선수 간에서와 성별의 차이에서의 최대지방연소 운동강도에 대한 비교 연구가 진행되었고[7][8][9], 김창균 등에 의해서 걷기 운동강도와 시간이 통제된 상태에서의 운동중 지방연소의 변화를 통해서 최대 지방연소 운동강도를 찾는 연구가 진행되었다[10]. 또한 국외에서는 운동강도에 따른 운동 중 에너지 소비량과 운동 후 회복기동안의 초과 산소소비량 및 운동 전후의 에너지 동원 비율에 대한 연구가 지속되어 왔다[11][12][13]. 더욱이 운동 후 초과 산소소비량은 체중 조절을 위하여 중요한 의미를 가지고 있다고 보고되었다[14][15].

기존 연구 결과들에 의하면 최대지방연소 운동강도는 $\dot{V}O_{2max}$ 의 50~80%로 성별, 체력수준 등에 따라 다양하게 나타나지만, Astorino에 연구에서 최대지방연소의 비율이 가장 큰 지점은 환기역치가 일어나는 지점과 일치한다는[16] 연구가 보고된 바 있다.

이와 같이 기존의 선행연구들은 최대지방연소 운동강도 및 초과 산소소비량 등에 관련된 운동 중 일어나는 가스교환 정보에 의한 연구들이 많이 이루어졌으나, 이러한 방법들은 가스분석을 위한 마스크의 착용으로 운동자의 불편함과 번거로움을 갖게 된다. 이와 같은 불편함 없이 보다 효율적이고 간편하게 최대 지방연소 시점을 알 수 있다면 운동 처방을 함에 있어 다방면의 개선을 줄 것으로 생각된다.

따라서 본 논문에서는 운동 중 심전도 신호를 획득하여, 심박 변화율을 추출하고, 이를 통해서 간접적으로 자율신경계의 변화를 관찰하고, 개인마다 차이가 있는 최대 지방연소가 일어나는 지점에서의 운동 강도를 심박변화율을 이용하여 검출하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

2.1. 운동 중 생리적 변화

2.1.1. 심박수의 변화

심박수는 동방결절(S-A node)에 대한 자율신경계의 영향에 의해 결정된다. 심장의 박동조절기(pacemaker)인 동방결절은 보통 역치(자극이 자극으로서의 효력을 나타내는 최소치)까지는 가장 빠르게 탈분극을 하게 된다. 동방결절이 이 역치에 도달하게 되면 활동전위(action potential)는 심장으로 퍼지기 시작하여 심장을 수축하도록 만든다[17].

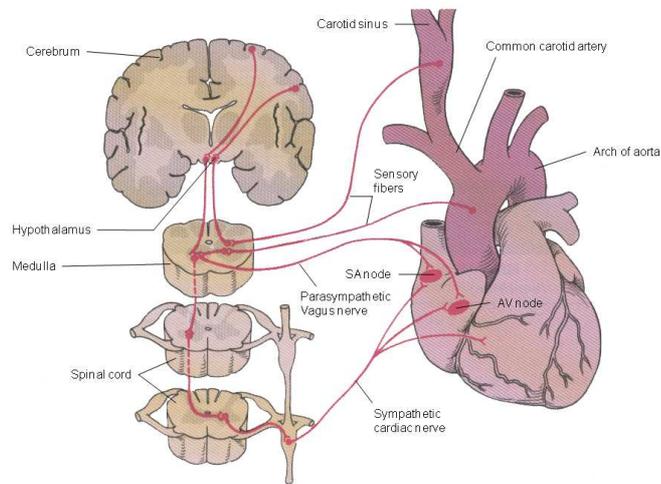


그림 2.1 심장 조절 기전

운동 중 심장에서 공급되는 혈액의 양은 골격근의 산소요구량 상승에 따라 변화해야 하고, 운동강도에 따라 비례해서 증가한다[18]. 심박수의 증가는 주로 교감신경의 영향을 받아 분비되는 호르몬인 에피네프린(epinephrine)과 노르에피네프린(norepinephrine)에 의해 증가되며, 심박수의 감소는 부교감신경의 영향을 받는 아세틸콜린에 의해서 이루어진다. 운동 중의 심박수 증가는 교감신경의 항진에 의해서 이루어지기도 하나 주로 부교감신경 즉, 미주신경(vagus)에 의한 미주신경 긴장이 감소하므로 일어난다. 이 외에도 심박수 증가는 체온상승, 혈액 내 산소압의 감소 및 탄산가스압의 증가, 혈액 pH 감소 및 젖산의 증가 그리고 환경의 변화 등에 영향을 받는다[19].

성인의 안정시 심박수는 분당 약 60~80회 정도이며, 장기간 훈련을 통해 안정시 심박수가 점차 감소하게 된다. 특히, 장거리 선수는 주로 지구력 훈련을 하므로 안정시 심박수가 분당 60회 이하로 낮아지는 서맥(bradycardia)을 이루게 되며 마라톤 선수 중에는 안정시 심박수가 40회 이하인 선수도 있다[20]. 장기간에 걸친 훈련은 미주신경 긴장이 항진되고 심장근의 수축력이 강하며 1회 박출량이 크므로 서맥인데도 인체에 순환하는 혈액량은 감소하지 않는다.

2.1.2. 호흡의 변화

2.1.2.1. 환기량의 변화

운동시 환기량 변화는 운동 전·중·회복기의 3단계로 구분할 수 있다. 이러한 환기조절은 신경요소와 함께 체액요소에 의해 이루어진다.

(1) 운동 전의 환기량 변화

정상적인 안정상태에서 분당 환기량은 사람에 따라 다양하게 나타난다. 일

반적으로 안정시 1회 호흡량은 400~600ml이고, 호흡수는 분당 10~25회이다.

(2) 운동 중의 환기량 변화

운동 중에는 2가지 주요한 환기량의 변화가 일어난다.

첫째, 운동 시작 후 몇 초 이내에 급격한 증가가 일어난다. 이러한 증가는 활동근의 운동 결과로 일어나는 관절에서의 자극과 관계가 있다. 둘째, 급격한 증가가 끝난 후 최대수준의 항정상태까지의 느린 증가가 나타난다.

환기량의 변화는 동맥의 이산화탄소분압의 증가에 의해서 일어나며, 이산화탄소가 경동맥 소체와 중추 화학수용기를 자극하는 것에 기인한다. 또한, 운동피질에서 시작된 신경자극은 연수를 통과하게 되고 운동 중 사용된 근육의 운동단위가 어느 정도인지에 대한 정보에 따라 환기량이 증가한다.

(3) 회복기의 환기량 변화

회복기에는 2가지 주요한 환기량 변화가 일어난다. 첫째, 운동 종료 직후 환기량이 급격히 감소한다. 이러한 감소는 운동이 끝나서 근육에 대한 관절의 자극이 중단되었기 때문이다. 둘째, 환기량이 급격히 감소한 후에 안정시 수준으로 천천히 감소한다. 이 변화는 이산화탄소 생성의 감소로 인한 자극의 감소와 관련이 있다.

2.1.2.2. 환기량과 무산소성 역치

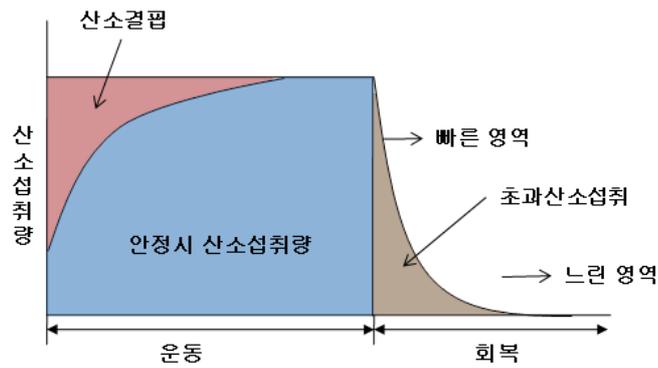


그림 2.2 운동시 산소결핍과 초과산소섭취

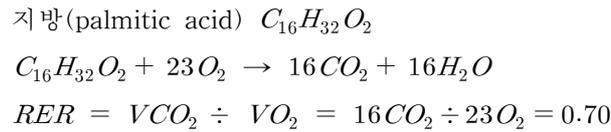
운동시 신체에서 증가된 대사활동을 안정시 수준으로 되돌리기 위한 항상성 작용으로 인해 지속적인 대사작용이 이루어지고 이 때문에 산소소비량이 증가하게 되는데 이러한 현상을 초과 산소 섭취량(Excess Post-exercise Oxygen Consumption, EPOC)라 한다[21].

EPOC는 운동직후부터 1시간 내에 두드러지며 운동 후의 빠른 영역(2~3분)과 운동 후 30분 이상 지속되는 느린영역이라는 두 가지 영역으로 분류된다. 빠른 영역에서는 산소섭취량이 빠르게 감소하고 산소가 저장된 ATP와 인산크레아틴(PC)을 재합성하고 조직에 저장된 산소와 교체되면서 나타나는 것이며[22], 느린영역에서는 산소소비량이 서서히 감소하고 간에서 젖산이 포도당으로의 산화적으로 전환된다.

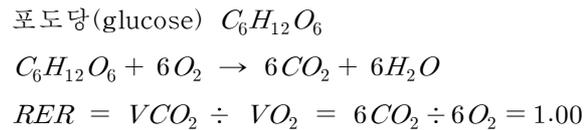
2.1.2.3. 호흡 교환율

운동 중 탄수화물이나 지방의 에너지대사량에 대한 백분율 기여도를 평가하는데에 일반적으로 사용하는 비침습적(noninvasive)인 기술로는 이산화탄소생성(VCO_2)에 대한 산소소비량(VO_2)의 비율($\frac{VCO_2}{VO_2}$)을 호흡교환율(respiration exchange ratio, RER)이라 부른다.

호흡교환율을 이용하여 에너지원의 사용비율을 예측할 수 있다. 지방에 대한 경우, 지방이 산화될 때 O_2 는 탄소와 결합하여 CO_2 를 형성하고, 수소와는 물을 형성한다. 화학반응식은 다음과 같다.



또한 탄수화물도 산화나 소비된 산소량에 대해 생성된 CO_2 양의 예상비율이 있다.



지방의 산화는 탄수화물의 산화보다 더 많은 O_2 를 요구한다. 이것은 탄수화물이 지방보다 더 많은 O_2 를 갖고 있음을 의미한다[23]

2.1.3. 자율신경계의 변화

자율 신경계는 신체의 호흡, 순환, 소화, 대사, 분비, 체온, 생식 등의 내부환경을 일정하게 유지시키는 데 있어서 가장 중요한 역할을 한다. 이러한 자율신경계는 해부학적으로 교감신경(sympathetic)과 부교감신경(parasympathetic), 두 부분으로 나눌 수 있다. 교감신경은 심박수를 증가시키는 것과 같이 기관을 활성화시키는 반면에 부교감신경은 심박수를 감소시켜 억제하는 경향이 있다. 결국, 특정 기관의 활동은 조직을 자극하는 교감신경과 부교감신경의 비율에 의하여 조절되고, 이러한 형태로 자율신경계는 신체의 필요에 따라 불수의적인 근육과 내분비선의 활동을 조절한다.

신체의 운동 중에는 자율신경계의 교감신경과 부교감신경 모두에 변화가 일어난다[24]. 운동 중 인체에서 심박출량 증가가 요구되기 때문에 부교감신경계의 활성은 약화되고 교감신경계가 활성화되어 심박동수, 전부하(preload), 그리고 전신혈관 저항이 증가되어 심박출량과 대사작용이 활발한 세포로 가는 혈류를 증가시킨다. 운동을 마친 후 회복기 동안에는 부교감신경계가 다시 활성화되고 교감신경계 작용이 약화되는데 운동 직후 일어나는 심박수 감소는 이와 관련이 깊다[25].

2.2. 에너지 대사

인간이 활동하기 위해서는 산소와 음식물이 있어야만 한다. 에너지는 탄수화물, 단백질, 지방의 형태로 음식물에 들어 있다가 세포내에서 분해되면서 저장되어 있던 에너지를 방출하게 된다. 이러한 에너지는 세포활동에 직접적으로 이용되지 못하고 분자상태로 결합되어 풍부한 화학적 에너지를 갖고 있는 아데노신 3인산(adenosine triphosphate; ATP)이라는 고에너지 인산 형태로 저장된다.

2.2.1. 에너지원

1) 탄수화물

탄수화물은 근육과 간에 당원 형태로 저장되어 있다. 근육 속의 당원은 근에너지 대사에 있어 직접적인 탄수화물의 연료로 이용되는 반면에, 간의 당원은 혈중 포도당의 유지수단으로 이용된다. 운동 중에 기질로 이용되는 탄수화물은 근육에 저장된 당원과 혈중 포도당에서 생성된다.

탄수화물의 사용은 운동의 강도와 관계가 있다. 운동의 강도가 높을수록 더 많은 양의 에너지가 탄수화물에서 공급된다[26]. 탄수화물은 휴식시에 신체가 필요로 하는 에너지의 약 35~40%를 공급한다. 가벼운 운동을 하는 경우에는 50% 이상 공급한다. 70~80% 이상의 강도로 운동을 하는 동안에는 탄수화물이 더 많은 에너지가 사용된다. 최대로 아주 격렬한 운동을 하면 대부분의 에너지가 탄수화물에서 공급된다.

2) 지방

인체는 탄수화물을 저장하는 것보다 훨씬 더 많은 양의 지방을 저장할 수 있다. 그러나 지방은 복잡한 형태인 트리글리세라이드(triglyceride)에서 글리세롤(glycerol)과 유리지방산(free fatty acid; FFA)의 기본적인 구성요소로 먼저 바뀌어져야만 하기 때문에 세포의 신진대사에 사용되기가 탄수화물에 비해서 용이하

지 않다.

일반적으로 같은 무게의 탄수화물($4kcal/g$)보다 지방($9kcal/g$)에서 훨씬 더 많은 양의 에너지가 제공된다.

3) 단백질

단백질 분자의 가장 기본적인 조성을 아미노산이라 하며, 여기에는 22개의 종류가 있다. 이러한 아미노산들은 신체 내에서 다른 아미노산으로 합성되기도 하여 신체의 기능과 구조에 필요한 다양한 단백질의 형태로 합성된다.

단백질은 운동 중 에너지원으로서의 사용은 제한된다. 정상적인 운동을 하는 동안에는 탄수화물과 지방이 주요 에너지원으로 사용되고, 단백질은 1~2% 정도만 에너지원으로 사용된다[3].

2.2.2. ATP 생산

근세포에 저장되어 있는 에너지의 양은 극히 제한되어 있다. 따라서 근의 운동, 장시간의 근수축을 유지하기 위해서는 지속적으로 빠르게 에너지를 생산할 수 있는 능력을 지닌 대사 경로가 세포에 존재해야만 한다.

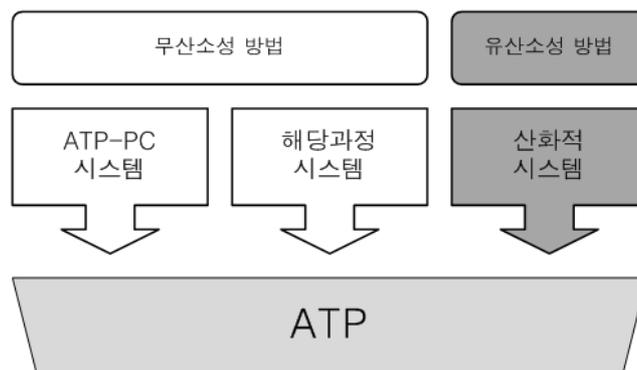


그림 2.3 ATP의 3가지 공급방법

근세포는 한 가지 또는 세 가지의 대사 경로에 의해서 ATP를 생산한다. ① 크레아틴 인산(creatine phosphate; PC)에 의한 ATP의 생산, ② 글리코겐(해당작용) 또는 글루코스 분해에 의한 ATP의 생산, ③ 산화(oxidation)에 의한 ATP의 생산이다.

2.2.2.1. 무산소 대사

ATP를 재합성하는 세 가지 대사 방법 중 ATP-PC 시스템과 무산소성 해당작용(젖산 시스템)은 무산소성 에너지 시스템이다. 무산소성 대사(anaerobic metabolism)란 우리가 호흡하는 산소를 사용하지 않고도 화학적 반응을 통하여 ATP를 재합성할 수 있다는 것을 의미한다.

1) 인원질(ATP-PC) 시스템

가장 단순하면서 빠르게 ATP를 생산할 수 있는 방법은 크레아틴 인산(creatine phosphate; PC)과 아데노신 이인산(adenosine diphosphate; ADP)의 화학적 결합에 의해서 ATP를 생산하는 과정이다.



이러한 반응은 크레아틴 키나아제에 의해 촉진되며 ATP는 운동이 시작될 때 $\text{ADP} + P_i$ 로 빠르게 분해되며 PC 반응을 거쳐 ATP로 재합성된다. 그러나 근세포는 단지 적은 양의 PC를 저장하기 때문에 이 반응으로 생산되는 ATP양은 제한적일 수 밖에 없다. 저장된 ATP와 PC의 결합을 ATP-PC 시스템 또는 인산시스템(phosphagen system)이라 하며 5초 이내의 고강도 운동이나 운동을 시작할 때의 근수축에 필요한 에너지를 제공한다. 오직 운동이 끝난 후 휴식시간에 사용할 PC를 다시 보충할 수 있으며 이때 ATP가 필요하다.

2) 무산소성 해당작용(젓산 시스템)

해당과정은 포도당 또는 당원을 분해시켜 젓산 또는 피루브산을 형성한다. 이 과정을 단순하게 표현하면 무산소성과정이므로 포도당의 결합에너지를 이용하여 인산과 ADP를 결합하며, 이를 위해서는 여러 단계의 효소가 촉매작용을 연결반응을 일으킨다. 이 과정은 아직 산화작용이 진행되기 전이며 대체로 세포내 저산소증 상태에서 ATP 소요량이 많아질 때 해당 작용만이 급속하게 진행되어 근육에 젓산을 생성한다[17].

2.2.2.2. 유산소 대사

산소를 이용한 산화작용에 의한 ATP 생성과정을 유산소성 대사(aerobic metabolism)라 한다. ATP의 유산소적 생산은 미토콘드리아에서 만들어지며 크렘스 사이클(Krebs cycle)과 전자전달체계(ETC)의 두 가지 대사경로들이 상호 협력하여 이루어진다.

장시간의 신체활동에 요구되는 힘을 계속해서 발휘하기 위해서는 에너지의 지속적인 공급이 필요하다. 무산소적 ATP 생산과는 달리, 산화적 시스템은 많은 양의 에너지를 생산하기 때문에 유산소적 대사는 지구력 운동 시 주된 에너지 생산 방법이다[17].

2.3. 최대 지방연소 운동강도

운동을 통해 지방산화를 증가시키는 것은 근육내 글리코겐의 절약, 체지방 감소, 이상적인 체성분 유지 등으로 인해 지구성 운동수행능력을 향상시킬 수 있다. 이러한 메카니즘 때문에 비만치료나 체중조절을 위한 다른 여러 가지 대체요법 중에서 운동요법이 일반인들에게 더 많이 권장되고 있다[27].

미국스포츠의학회(American College of Sports Medicine; ACSM)에서는 정상인들의 최대지방연소 운동강도를 최대산소섭취량($\dot{V}O_{2max}$)의 50~60%로 권장하고 있다[28]. 이것은 항정상태의 운동 중 동원되는 에너지원의 비율은 호흡교환율(respiratory exchange ratio; RER)과 Lusk table[6]을 이용하여 산출할 수 있다. 즉, 운동 중 이산화탄소 배출량과 산소섭취량을 측정하여 운동시 사용되는 탄수화물과 지방의 비율을 산출해 낼 수 있다. 이러한 방법을 통해서 운동 중 지방의 연소량을 측정하여 최대로 지방이 연소되는 시점의 운동강도를 최대지방연소 운동강도라 한다[29].

제 3 장 연구 방법

3.1. 피실험자 및 실험 프로토콜

본 연구의 피험자는 유전적, 체격적인 특별한 비선정 사유가 없고 운동 실험에 참여하지 못할 병력 사유가 없으며, 본 연구에 자발적으로 참여하길 희망한 건강한 성인 남자 16명을 선정하여 실험에 대한 설명 후 동의서를 작성하였다. 피검자의 신체적 특성은 표 3.1과 같다.

표 3.1 피험자의 신체적 특성

Variable	Mean±SD ¹⁾	Range
나이	27±2.21	32-24
키(cm)	174.05±3.98	184-167
몸무게(kg)	68.75±6.5	85-59
$\dot{V}O_{2max} (ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1})$	46.14±6.17	55.96-33.61

¹⁾ SD : standard deviation

실험은 피검자를 대상으로 하여 연세대학교 원주 의과대학 운동의학 연구실에서 이루어졌다. 건강한 20대 남성 16명을 대상으로, 트레드밀을 이용하는 운동부하 검사 방법 중 하나인 modified bruce protocol을 사용하였다.

실험 중에는 트레드밀(TM55, Quinton)과 호흡가스분석기(True One 2400, Parvo Medics)를 이용하여 피험자의 호흡 가스 변화 데이터를 15초마다 한번씩 획득하였으며, 그 중 산소섭취량, 호흡교환율, 운동강도, 심박수를 추출하였다. 검사 중에 3분마다의 혈압 측정과, 심장부하검사장비(Q-Stress, Quinton)를 이용하여 지속적인 심전도와 심박수, 호흡교환율의 결과, 피검자의 안색, 그리고 Gunner

Borg에 의해 개발된 자각 운동 강도(RPE)를 종합적으로 평가하여, 다음 항목 중 최소 4가지 이상 해당할 경우를 $\dot{V}O_{2max}$ 라 정하고 실험을 실시하였다[30].

- 1) 운동강도가 증가함에도 불구하고 더 이상 심박수가 증가하지 않는 경우
- 2) 운동부하가 증가함에도 불구하고 산소소비량이 더 이상 증가하지 않는 경우
- 3) 호흡교환율이 1.1이상인 경우
- 4) 실험 대상자들의 주관적 평가에 따라 RPE 17(매우 힘들다) 이상인 경우
- 5) 운동강도 유지를 못하는 경우

표 3.2 Modified Bruce Protocol

단 계	시 간(min)	속 도(mile/h)	경사도(%)
1	3	1.7	0
2	3	1.7	5
3	3	1.7	10
4	3	2.5	12
5	3	3.4	14
6	3	4.2	16
7	3	5.0	18
Recovery	3	1.7	0

운동 부하 검사 중에 심전도 신호를 얻기 위해서 개발된 모듈을 피검자의 상완에 부착하고, 양쪽 가슴에 전극을 부착시켜 LEAD I의 심전도 신호를 동시에 획득하였다.

실험에서 얻어진 데이터의 처리는 National Instruments사의 LabVIEW 8.2를 이용하였으며, 통계적인 분석을 위해서 SPSS 12.0, Windows를 사용하였다.

3.2. 시스템 하드웨어 구성

본 연구에서 사용된 심전도 신호를 얻기 위한 모듈의 하드웨어 구성은 그림 3.1과 같다.

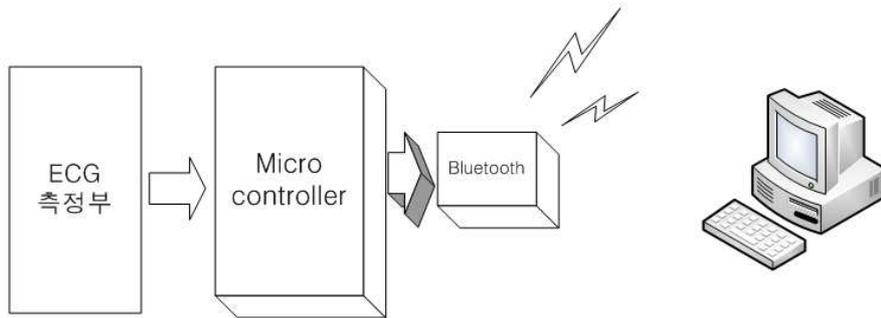


그림 3.1 전체 시스템 구성도

전체의 시스템은 모듈의 전원 공급을 위한 전원부, 심전도 신호를 측정하기 위한 심전도 측정부, 측정된 신호를 PC로 전송하기 위한 무선 전송부, 그리고 전체 모듈을 제어할 수 있는 마이크로컨트롤러부로 이루어져 있다.

심전도 측정부에서는 차동증폭기를 거친 신호가 0.5Hz 고역통과 필터와 50Hz 저역통과 필터를 거쳐 Patient Simulator(PS420, FLUKE)의 심전도를 원신호로 사용하였을 때, 출력 신호가 약 1V(약 1000배 증폭)가 되도록 설계하였다. 설계된 심전도 측정부의 블록 다이어그램은 그림 3.2와 같다.

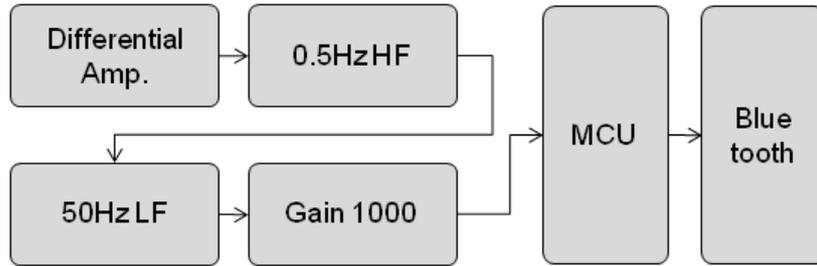


그림 3.2 심전도 측정부 블록 다이어그램

심전도 측정부로부터 측정된 신호는 마이크로프로세서(MSP430F149)에서 8bit 해상도의 240Hz의 샘플링 주파수로 A/D 변환하여 PC로 신호를 전송한다.

3.3. 운동 중 지방연소량 측정

운동 중의 지방연소량은 modified bruce protocol을 이용한 운동부하 검사에서 얻은 산소섭취량을 호흡교환율과 Lusk table을 이용하여 지방연소량(fat kilocalorie; *Fkcal*)으로 변환하여 구하였다[29].

표 3.3 Lusk Table

RER	Heat per liter of O_2 (kcal/ O_2)	% of total heat	
		탄수화물	지방
0.707	4.686	0.0	100.0
0.75	4.739	14.7	85.3
0.80	4.801	31.7	68.3
0.85	4.862	48.8	51.2
0.90	4.924	65.9	34.1
0.95	4.985	82.9	17.1
1.00	5.047	100.0	0.0

3.4. 심전도 신호처리 구성

본 연구에서는 심박수 변화를 검출하기 위해서 피검자의 상완에 부착된 모듈을 통해서 얻어지는 심전도 신호에 대한 처리를 수행하였다.

심전도 신호는 240Hz의 샘플링 주파수로 A/D 변환 되었으며, 8bit 데이터로 RS232 시리얼 타입의 Bluetooth(Parani-ESD200, SENA Technology)를 통해 PC로 전송되었다. 전체적인 심전도 신호의 처리는 LabVIEW 8.2를 사용하였다.

3.4.1. R파 검출

심박의 변화를 추출하기 위해서는 정확한 R파 검출이 필요하다. 본 연구에서는 R파 검출 과정 이전에 모듈로부터 전송되어지는 심전도 신호에서 notch filter를 사용하여 60Hz 전원 잡음을 제거 한 후, 20점 메디안 필터(20 point median filter)를 이용하여 기저선 변동(baseline wandering)을 제거하였다[31].

R파 검출을 위하여 본 연구에서는 그림 3.3 에서와 같이 수정된 가변문턱치 방법을 적용하였다. 수정된 가변문턱치 방법은 심전도 신호의 매 샘플마다, 200 샘플 길이의 값 중에서 가장 큰 값을 추출하면서 그 값을 250 포인트 이동평균필터를 취한다. 필터를 거친 값들은 R파를 검출하기 위한 문턱치 값으로 사용된다. 운동의 강도가 심해질 수록 R파의 크기보다 T파의 크기가 커지기 때문에 R파를 검출하는데 있어서 T파나 다른 잡음에 의한 잘못된 검출을 막기 위해서 일정 제한 간격을 설정하여 그 간격 이상의 값을 R파로 잡는다. R파간의 제한 간격은 운동을 하게 될 경우 심박이 빨라지기 때문에 평균 심박에 반비례하게 심박이 증가할 수록 제한 간격은 짧아지도록 설정하였다.

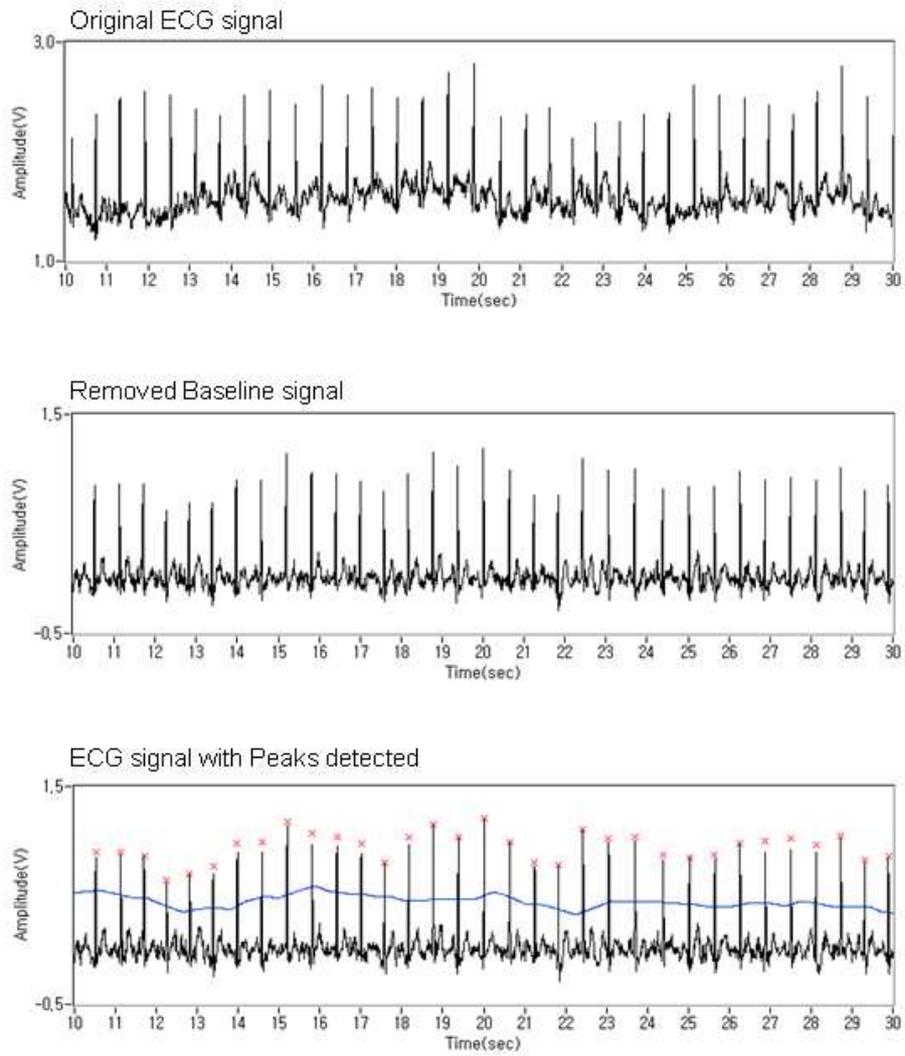


그림 3.3 R파 검출 과정

3.4.2. 심박 변화율 추출

심박변동을 획득하기 위해서는 심전도 신호에서 검출된 R파를 가지고 R파간의 간격을 계산한 후 이를 연속적인 시계열 데이터로 변환하여 재구성해야 한다. 먼저 심전도 신호의 R파를 검출하여 심전도 데이터 상에서 k 번째의 R파의 위치를 $R(k)$ 라 하면 $R(k-1)$ 에서 $R(k)$ 까지의 구간에 $I(k)$, $R(k)$ 에서 $R(k+1)$ 까지의 구간에서는 $I(k+1)$, \dots 을 반복함으로써 R파간의 간격 시계열 시리즈를 얻을 수 있다. 즉 $R(k-1)$, $R(k)$, $R(k+1)$ 을 각각 $k-1$, k , $k+1$ 번째의 검출된 R파라고 하면 각 심박동 간의 시간 간격(RRI)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I(k) = R(k) - R(k-1), I(k+1) = R(k+1) - R(k), \dots$$

RRI 시리즈는 주로 시간 영역에서 심박변동의 통계적 특성을 관찰하는데 이용된다.

이렇게 얻어진 심박동열은 등간격(evently spaced)의 신호가 아니라 심박동이 발생할 때마다 생기기 때문에 간격이 서로 다르다. 따라서 이 신호를 바로 주파수 분석에 의한 파워 스펙트럼 분석을 할 수 없다. 심박동열의 주파수 분석을 위해서는 심박동열로부터 등간격의 심박변화율을 유도하여야 한다

3.4.3. 심박 변화율 분석

심박 변화율 분석은 보간된 R-R 간격 데이터를 가지고 분석 하였다. 본 연구에서는 운동 중 자율신경계의 변화를 심박 변화율로서 알아보기 위해서 시간 영역 변수로는 3분간의 R-R 데이터 표준편차(SDNN)를 사용하였다. 또한, 주파수 분석에서는 저주파수 영역을 나타내는 LF와, 고주파수 영역을 나타내는 HF를 사용하였다.

주파수 분석에 적용되는 데이터의 각각 구획들은 그 구획의 길이보다 더 긴 주기를 가지는 저주파 성분을 포함하고 있으며 이러한 저주파 성분을 선형 성분이라 부른다. 선형 성분은 전력 스펙트럼 상의 저주파 대역에서 중첩을 일으켜 스펙트럼의 왜곡을 일으킨다[32]. 본 연구의 스펙트럼 분석은 초저주파 대역의 신호를 반영하지 않는 단시간 구간에 대한 분석을 목적으로 하므로 선형 성분으로 나타나는 초저주파 성분은 의미를 가지지 못한다. 따라서 심박변화율의 주파수 분석을 하기 이전에 전처리 과정으로 선형성분의 제거를 거친다.

3.5. 심박 변화율을 이용한 자율신경계의 변화 검출

본 연구에서는 운동 중 심박 변화율을 통해서 자율신경계의 변화를 간접적으로 알아보았다. 심박 변화율의 시간영역 분석을 통해서 자율신경계의 활성도를 나타내는 지표인 SDNN과 주파수 분석을 통해 교감신경의 활동을 나타내는 지표인 LF 영역과 부교감신경의 활동을 나타내는 HF 영역의 변화를 검출하였다.

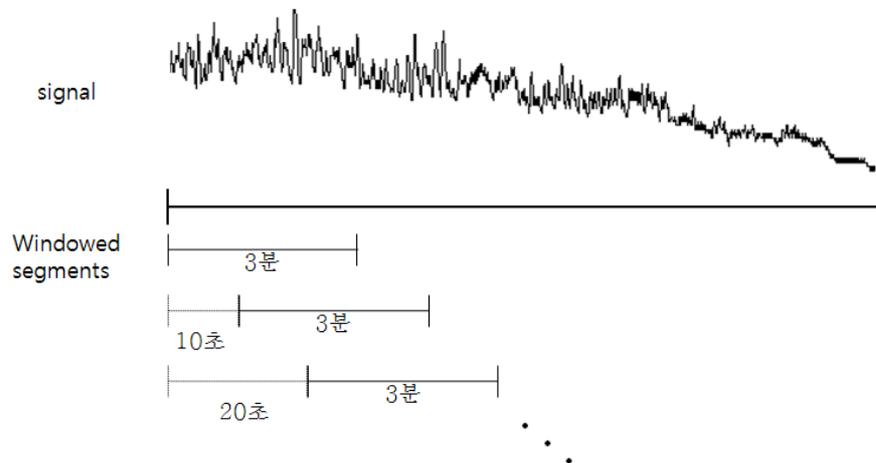


그림 3.4 심박 변화율에서의 분석 과정

시간영역 분석은 보간된 R-R 간격을 이용하여 분석을 하였다. 3분간의 길이의 심박 변화율에서 R-R 간격들의 평균과 표준편차를 구하였으며, 매 10초마다 같은 과정을 반복하였다. 이러한 과정을 통해서 운동 중 심박 변화에서 R-R 간격들의 표준편차의 변화를 연속적으로 알 수 있도록 하였다.

주파수영역 분석은 보간된 R-R 간격을 이용하여 5Hz로의 재샘플링의 과정을 거치도록 하였다. 재샘플링 과정을 거친 신호는 저주파 성분을 제거하기 위해서 본 연구에서는 3차 다항식 근사화에 의해 심박변동의 저주파 성분을 제거하였다. 시간영역 분석에서와 같이 3분간의 길이의 신호를 매 10초마다 주파수 분석을 하

였으며, Burg method를 사용하여 AR 모델에 의한 전력스펙트럼을 추정하였다. Burg Method는 격자 구조의 선형 예측기에서 전방, 후방의 오차를 최소화하는 방법에 기반한 최소 자승 오차법의 하나이다.

AR 모델에 의해서 구한 전력스펙트럼에서 LF와 HF의 각 파라미터를 구하기 위해 주파수 범위를 정하여 적분을 통하여 면적값을 계산하였다. LF 성분은 0.04~0.15Hz의 범위로 하고, HF 성분은 0.15~0.4Hz의 범위로 하였다.

3.6. 심박 변화에서의 최대 지방연소 시점 검출

본 연구에서 심박변화에서의 최대 지방연소 시점을 검출하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다.

먼저, 그림 3.5 (a)에서와 같이 심박변화율을 검출하였다. 검출된 심박변화의 저주파 성분을 제거하기 위하여 detrend의 과정을 거쳤다. detrend과정은 심박변화의 3차 다항식 근사화 방법을 적용하여 원 신호에서 저주파 성분을 제거해 주었다.

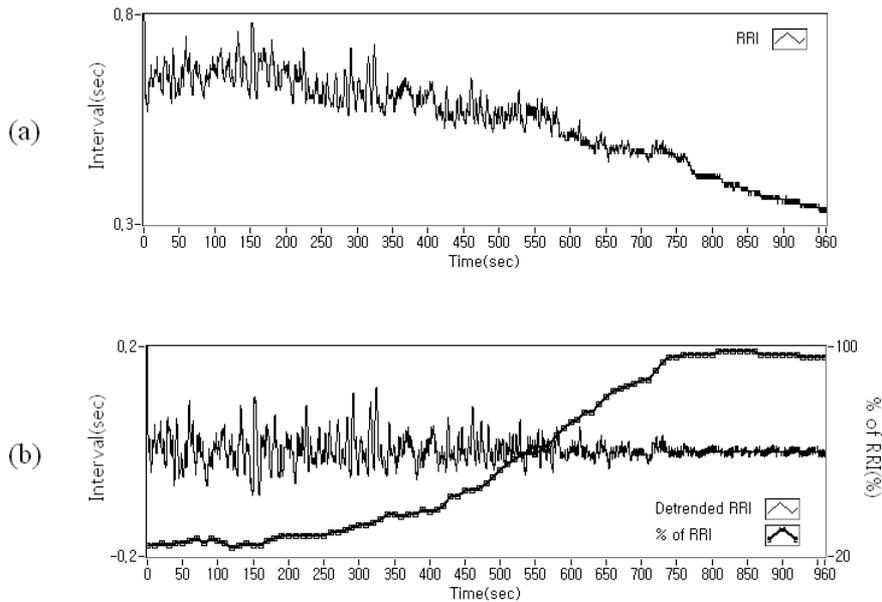


그림 3.5 운동 중 심박변화에서의 심박변화율 간격 변화

저주파 성분이 제거된 심박변화의 신호에서 10초 간격으로 1분 동안의 신호 중에서 시간간격이 -0.01 에서 0.01 의 범위안에 해당하는 신호의 비율을 그림 3.5의 (b)와 같이 검출하였다. 이 중 잡음을 고려하여 심박변화가 -0.01 에서 0.01 의 범

위안에 60% 이상 해당하기 시작하는 지점을 최대 지방연소 시점으로 가정하였다.

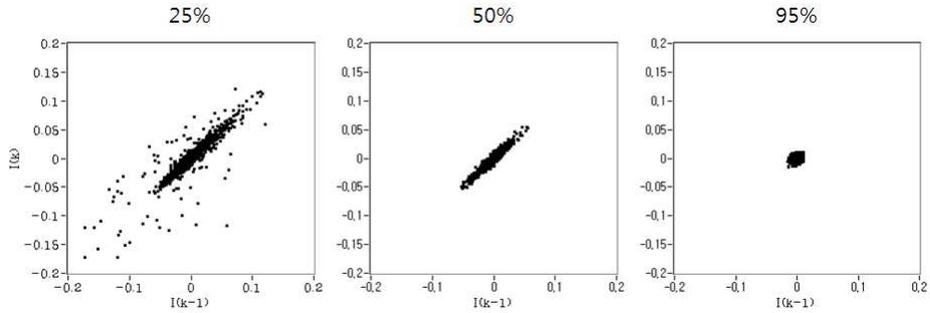


그림 3.6 R과 간격들의 분포 및 % 별 분포 형태

그림 3.6에서와 같이 RRI의 R과 간격값인 $I(k)$ 와 $I(k-1)$ 의 산점도로써 나타내었을 경우, -0.01에서 0.01의 범위에 해당하는 간격값들의 % 값을 구한다.

3.7. 통계 분석

본 연구를 위한 자료의 처리는 SPSS 12.0, Windows를 사용하였으며, 모든 통계적 유의 수준은 $p < 0.05$ 로 설정 하였다.

16명의 피검자를 대상으로 가스 분석기에서 얻어진 데이터를 통하여 검출된 지방 연소량의 변화에서 최대 지방 연소량의 시간값과 본 연구에서 제안하는 심박변화율을 통해서 검출되는 최대 지방연소 시점의 시간값을 통계적으로 분석하였다.

비모수적 방법은 모수적 방법과는 달리 어떤 가정을 갖지 않고, 연속변수인 실측치가 아니라 순위를 다루고 있기 때문에 쉽게 계산이 가능하다. 그리고 측정 오차에 대해서도 비교적 덜 민감하게 반응을 할 수 있다. 또한 Wilcoxon signed rank test는 각 쌍의 차들의 부호와 크기를 동시에 고려하여 검정통계량을 산출함으로써 부호검정(sign test)이 부호만을 고려하는 것에 비해 더 좋은 검정력을 가진다. 따라서 Paired T-Test의 비모수적 방법 중 Wilcoxon signed rank test를 통하여 두 변수의 유의성을 검정하였다.

제 4 장 실험 결과

4.1. 지방연소량 및 탄수화물 연소량의 변화

그림 4.1은 강도가 3분단위로 증가하는 운동 중 지방과 탄수화물의 연소량의 변화를 분 단위로 나타내는 그래프이다.

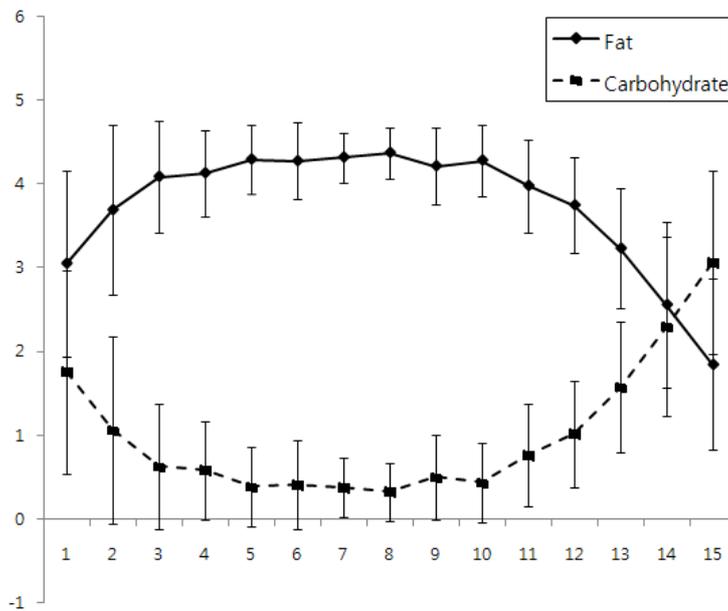


그림 4.1 운동 중 지방 연소량과 탄수화물 연소량의 변화

전체 피검자의 운동 중 지방의 연소량은 약 5분에서 10분까지 경과한 운동 강도에서 $4\text{Kcal}/\text{min}$ 이상의 지방 연소($4.4797\text{Kcal}/\text{min}$)를 보였고, 탄수화물은 반비례적인 변화를 보였다. 운동의 강도가 점점 증가할수록 탄수화물의 연소량은 점차 늘어났다.

4.2. 심박변화율을 통한 자율신경계의 변화

운동 중 심박변화율을 통해서 간접적으로 알아본 자율신경계의 변화는 그림 4.2, 그림 4.3과 같다. 운동의 강도가 점점 증가할 수록 R-R 간격의 표준편차는 점점 감소하는 경향을 보였다.

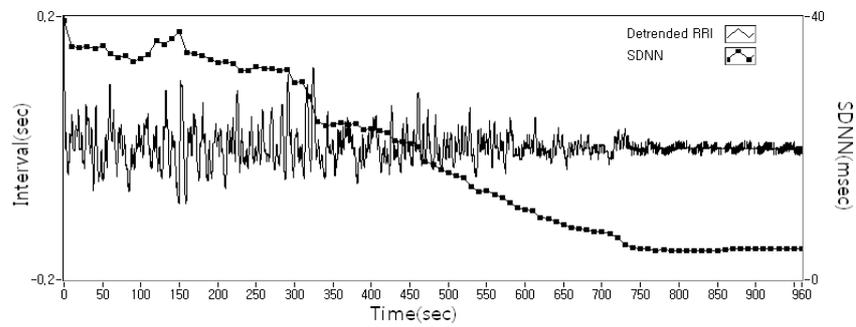


그림 4.2 운동 중 SDNN의 변화

자율신경계의 교감신경과 부교감신경의 지표인 LF와 HF의 파워는 운동의 강도가 증가함에 따라 감소하고, 약 500초 부근에서 급격한 감소를 보였다.

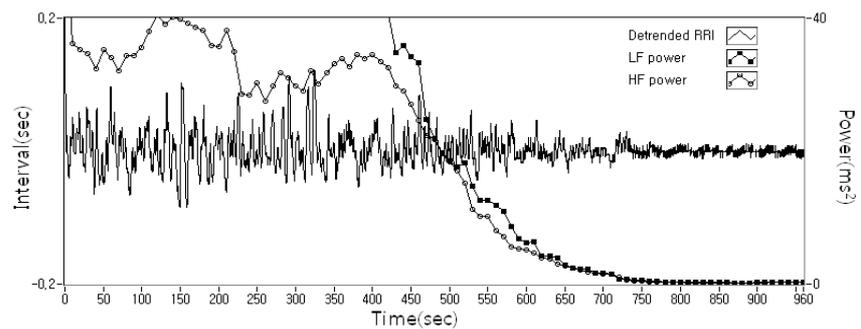


그림 4.3 운동 중 LF와 HF power의 변화

4.3. 가스분석을 통한 최대지방연소 시점 검출

운동 중 가스분석을 통해서 검출한 각 피검자들의 최대 지방연소의 시간은 표 4.1과 같다. 최대 지방연소 시점에서의 $\% \dot{V}O_{2max}$ 는 $36.50 \pm 4.67\%$ 이고, 지방연소율은 $4.61 \pm 0.58 \text{ Kcal}$ 였다.

표 4.1 가스 분석을 통한 최대지방연소 시점 검출

피검자	최대지방연소 시점	$\% \dot{V}O_{2max}$	지방연소율
Sub 1	630	47.49	4.34
Sub 2	615	42.07	4.62
Sub 3	615	39.61	4.25
Sub 4	600	28.47	4.63
Sub 5	630	34.25	4.99
Sub 6	570	35.88	4.29
Sub 7	525	33.84	3.99
Sub 8	555	34.05	5.04
Sub 9	555	33.90	5.79
Sub 10	555	36.09	5.13
Sub 11	510	33.85	4.92
Sub 12	525	31.82	4.63
Sub 13	525	38.16	4.04
Sub 14	585	38.49	3.30
Sub 15	540	42.22	5.02
Sub 16	495	33.86	4.74
평균±표준편차	564.4±43.77	36.50±4.67	4.61±0.58

4.4. 심박변화에서의 최대지방연소 시점 검출

운동 중 심박변화에서 검출한 각 피검자들의 최대 지방연소의 시간은 표 4.2와 같다. 최대 지방연소 시점에서의 $\% \dot{V}O_{2max}$ 는 $37.16 \pm 4.63\%$ 이고, 지방연소율은 $4.49 \pm 0.56 \text{ Fkcal}$ 였다.

표 4.2 심박변화에서의 최대지방연소 시점 검출

피검자	최대지방연소 시점	$\% \dot{V}O_{2max}$	지방연소율
Sub 1	630	47.49	4.34
Sub 2	610	42.07	4.62
Sub 3	600	39.61	4.25
Sub 4	620	28.47	4.63
Sub 5	620	34.25	4.99
Sub 6	560	35.88	4.29
Sub 7	540	33.84	3.99
Sub 8	570	34.05	5.04
Sub 9	580	33.90	5.79
Sub 10	570	36.09	5.13
Sub 11	530	33.85	4.92
Sub 12	500	31.82	4.63
Sub 13	540	38.16	4.04
Sub 14	600	38.49	3.30
Sub 15	550	42.22	5.02
Sub 16	500	33.86	4.74
평균±표준편차	570±41.47	37.16±4.63	4.49±0.56

4.5. 심박변화에서 검출된 최대지방연소 시점의 검증

운동 중 가스분석을 통한 최대 지방연소 시점과 본 연구에서 제시하는 방법을 통한 심박변화에서의 최대 지방연소 시점을 비교한 결과는 그림 4.4 같다. 그리고, 그림 4.5는 가스분석과 심박변화를 통해서 구한 최대 지방연소 시점을 산점도를 통해서 나타낸 결과이다.

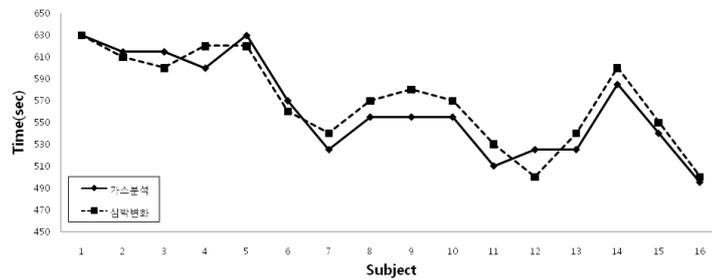


그림 4.4 피검자별 각 최대지방연소 시점 비교

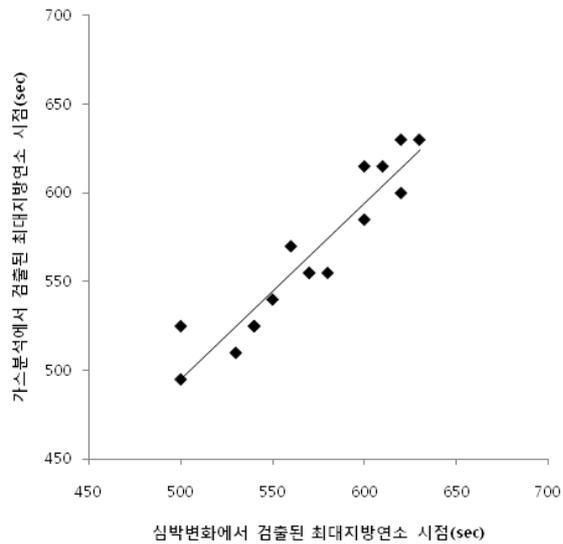


그림 4.5 운동 중 최대지방연소 시점 검출 산점도

검출된 각 최대지방연소 시점의 상관관계의 비교를 위해서 오차를 측정한 결과는 표 4.3과 같다.

표 4.3 검출된 최대지방연소 시점 비교(단위 : 초)

피검자	가스분석	심박변화	오차
Sub 1	630	630	0
Sub 2	615	610	5
Sub 3	615	600	15
Sub 4	600	620	20
Sub 5	630	620	10
Sub 6	570	560	10
Sub 7	525	540	15
Sub 8	555	570	15
Sub 9	555	580	25
Sub 10	555	570	15
Sub 11	510	530	20
Sub 12	525	500	25
Sub 13	525	540	15
Sub 14	585	600	15
Sub 15	540	550	10
Sub 16	495	500	5

표 4.4는 두 방법을 통해 검출된 최대지방연소 시점의 평균과 표준편차를 나타내었다.

표 4.4 검출된 최대지방연소 시점의 평균과 표준편차(단위 : 초)

	N	평균	표준편차	최소값	최대값
가스분석	16	564.38	43.77	495.00	630.00
심박변화	16	570.00	41.47	500.00	630.00

두 방법을 통해 검출된 각 시점들의 상관관계를 확인하기 위해서 상관관계를 분석하였다. 결과의 자료들은 정규분포를 따르지 않으며 자료의 수가 30 예가 넘지 않으므로 비모수적 방법을 이용하였다.

표 4.5 검출된 최대지방연소 시점의 비모수적 방법에 따른 상관관계 분석

	Kendall의 tau-B		Spearman의 rho	
	상관계수	유의확률	상관계수	유의확률
가스분석-심박변화	0.855	p<0.01	0.950	p<0.01

Kendall과 Spearman의 방법을 사용하여 상관관계를 관찰한 결과 0.855와 0.95로 모두 유의한 상관관계를 보였다. Spearman 상관계수는 두 변수 X, Y 각각에서 순위를 구하고 두 변수의 순위간에 직선적 관계가 있는지의 여부를 Pearson 상관계수법과 동일한 방법으로 산출하는 것이다. 또한 Kendall의 tau-B는 두 변수의 순위가 서로 일치하는 쌍의 수와 일치하지 않는 쌍의 수의 차와 합의 비로 나타낸 것이다.

표 4.6 검출된 최대지방연소 시점의 Wilcoxon 부호순위 검정

		N	평균순위	순위합	유의 확률
Wilcoxon 부호순위 검정	음의 순위	5 ^a	6.50	32.50	0.115
	양의 순위	10 ^b	8.75	87.50	
	동률	1 ^c			
	합계	16			

a. 가스분석 < 심박변화

b. 가스분석 > 심박변화

c. 가스분석 = 심박변화

또한, 두 방법을 통해서 검출한 시점들의 차이를 확인하기 위해서 Paired

T-test의 비모수 방법 중 Wilcoxon 부호순위 검정을 통해 분석하였다. 이 방법은 각 쌍의 차들의 부호와 크기를 동시에 고려하여 검정통계량을 산출하는 방법으로 그 결과는 $p=0.115(>0.05)$ 로서 차이가 없음을 확인하였다.

제 5 장 고 찰

본 논문에서는 심박변화율에서의 운동 중 최대로 지방이 연소되는 시점을 검출하기 위하여 운동 중 가스분석을 통하여 지방의 연소량 변화를 확인하였고, 심박 변화율을 통해서 자율신경계의 변화를 알아보았다. 이를 바탕으로 심박변화율에서의 최대 지방연소 시점을 추정함으로써 유의한 결과를 얻게 되었다.

본 연구에서는 운동 능력을 나타내는 지표로서 활용되는 최대산소섭취량의 수준이 $46.14 \pm 6.17 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 인 일반 대학생 16명을 대상으로 운동 능력이 비슷한 수준의 피검자들에게서 개인에 따른 차이가 있는 최대 지방연소의 시점을 검출하기 위해 운동 부하검사를 실시하였다.

먼저, 운동 중 지방연소량의 변화를 알아보았다. 지방연소량의 변화는 이용수 등에 의해서 연구된 일반 대학생과 지구성 훈련 선수 간에서의 최대지방연소 운동강도의 차이에서 일반인의 최대 지방연소 운동강도가 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ 의 50%보다 낮은 운동 강도에서 지방의 연소량이 크다고 보고되었다.

Romijn 등의 연구에서 25, 65, 85% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ 에서 각각 120, 120, 30분 동안 자전거 에르고미터 운동 중 간접적인 열량추정 방법으로 지방산화를 측정된 결과, 지방을 통한 가장 높은 비율의 열량은 가장 낮은 강도의 운동 중이었으나, 30분 운동에서, 지방산 산화율은 65% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ 강도의 운동 중에 가장 높았음을 제시하였다.

본 연구에서도 가스분석을 통한 최대지방연소 시점은 564.4 ± 43.77 초로써, $36.50 \pm 4.67 \% \dot{V}O_{2\text{max}}$ 에 해당하여 이전의 일반인들을 대상으로 한 연구에서와 유의한 결과를 얻어내었다. 또한, 심박변화율을 이용한 최대 지방연소 시점은 570 ± 41.47 초로, $37.16 \pm 4.63 \% \dot{V}O_{2\text{max}}$ 의 운동강도에 해당하였다. 위의 결과에서 가스분석을 통해서 얻어지는 데이터들은 15초에 한번씩 저장되기 때문에 최대 지방연소 시점의 표준편차가 43.77초로 다소 큰 차이를 보인다.

그림 4.1에서와 같이 3분 단위로 점차 강도가 증가하는 운동 중 지방과 탄수화

물의 연소량의 변화에서 대부분의 피검자들의 지방의 연소량은 약 5~10분에서 가장 높았고, 탄수화물의 연소량은 그와 반대로 가장 낮았다. 운동의 강도가 점차 증가 할수록 탄수화물의 연소량은 증가하고, 지방의 연소량은 작아지게 되는데, 이는 낮은 강도에서의 호흡교환율은 유산소 대사에 의한 산소섭취량이 이산화탄소 생성량에 비해서 크고, 강도가 증가 할수록, 운동에 필요한 많은 에너지의 생성을 위해서 무산소 대사의 비율이 증가하면서 이산화탄소의 생성량이 급속도로 증가함에 따르는 결과로 보인다.

다음으로, 운동 중 심박변화율을 통해서 알아본 자율신경계의 변화는 그림 4.2와 그림 4.3과 같다. 운동의 강도가 증가 할수록 처음 안정시에서의 자율신경계의 활성도가 점차 감소하기 시작한다. 이것은 항상 인체가 내·외적인 환경변화에 대하여 내적 환경의 균형을 유지하기 위해 자율신경에 의해서 조절되는데, SDNN을 통해서 이러한 자율신경에 의해 조절되는 정도를 추정할 수 있다. 항상성을 유지하기 위해서는 교감신경과 부교감신경 모두 활성화되어 심박의 변화가 크고 복잡하다. 그러나 운동을 하게 되면 심박수가 증가하고, 이것은 주로 부교감신경 활동의 퇴축과 교감신경활동의 항진과의 균형에 의해서 조절된다[33][34]. 심박 변화율의 주파수 분석에서 검출한 교감신경과 부교감신경에 해당하는 LF와 HF 영역의 변화는 그림 4.3과 같이 운동의 강도가 점차 증가하면서 감소하기 시작한다. 약 500초 정도에서 LF와 HF 영역의 파워가 급속도로 감소하기 시작하는데 이는 가스분석을 통한 분당 지방 연소량의 변화에서 운동 시작 후 8분 정도에서 최대인 것과 유의한 결과를 보인다. 이전의 연구에서 심박수로 100 *bit/min* 이하에서는 부교감신경 활동의 퇴축 효과에 의해서 이루어지며, 이 이상의 강도에서는 교감신경의 항진에 의해서 심박수가 높아진다고 제시되었다[35]. 또한 교감신경과 부교감신경의 기여가 크게 변하는 시점은 무산소작업역치(anaerobic threshold; AT)에 해당한다는 보고가 있다[36][37][38]. 이와 함께, Astorino에 연구에서 최대지방연소의 비율이 가장 큰 지점은 환기역치가 일어나는 지점과 일치한다는[16] 연구가 보고된 바 있다. 본 연구에서도 이와 마찬가지로 가스분석을 통해서 검출한 지방연소량의 변화에서 최대의 연소량을 보이는 약 5~10분에서와 자율신경계의 변화에서 교감·부교감신경의 감소가 크게 변하는 시점인 약 400~

600초에서와 근접한 결과를 보였다.

그러므로, 본 연구에서는 운동 시 가스분석을 통하지 않고 최대지방연소 시점을 심박변화율을 통해서 추정하는 방법을 제안한다.

제 6 장 결 론

운동을 통해서 지방연소를 증가시키는 것은 체중조절을 위해서 권장되는 바람직한 방법이다. 많은 선행연구들은 유산소성 트레이닝을 통해서 안정시와 최대 운동 중에 지방 이용의 증가를 제시하였다[39][40]. 그러나 이러한 연구들은 운동 중 피검자의 열량이나 가스교환을 측정하기 위하여 가스분석을 위한 부수적인 장비들이 필요하게 된다. 이러한 장비들은 운동자에게 불편함을 주거나, 많은 비용이 들게 된다. 이러한 불편함 없이 지방을 효율적으로 연소시키기 위한 운동을 유도할 수 있도록 하는 방법을 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 운동능력이 비슷한 피검자를 대상으로 운동부하 운동을 실시하여 가스분석기를 통해서 지방의 연소 변화를 살펴보고, 동시에 심전도 신호를 측정하여 심박변화율의 변화를 통해 자율신경계 및 R-R 간격의 변화 정도를 알아보았다. 가스분석을 통하여 얻은 피검자별 최대 지방연소 시점과 본 연구에서 제시하는 심박 변화에서 R-R 간격들의 값들이 -0.01에서 0.01 초의 범위에 60%가 해당하기 시작하는 시점의 상관 관계는 비모수적 방법의 Kendall의 tau-B 방법의 경우 상관계수는 0.855이고, Spearman의 rho의 경우 0.950으로 모두 $p < 0.01$ 로 유의한 결과를 보였고 Wilcoxon 부호 순위 검정을 통해 분석한 결과, 음의 순위는 5, 양의 순위는 10, 그리고 동률은 1로써, 유의확률이 $p = 0.115 (> 0.05)$ 인 유의하지 않은 결과를 보여 두 방법 간의 결과값의 차이가 없음을 증명하였다.

그러므로, 본 논문에서 제시하는 심박변화율을 통해서 최대 지방연소 시점을 검출하는 방법은 기존의 가스 분석을 통한 최대 지방연소 시점과 유의한 결과를 보였으며, 가스 분석을 통한 방법에 비해서 심전도만을 측정함으로써 원하는 결과를 얻어낼 수 있는 간편함을 갖는다. 제시된 방법의 사용은 비만을 위한 운동 처방에 긍정적인 영향을 미칠것이다.

제 7 장 향후 과제

본 연구에서 제시하는 방법은 운동 중 가스 분석을 통해 지방연소량을 측정하지 않아도, 간접적인 방법을 통해서 최대 지방연소 시점을 알 수 있다.

앞으로 실시간으로 심박변화율을 검출하여, 운동부하 검사를 통하지 않고도 지방이 최대로 연소되는 운동 강도를 추정할 수 있다면, 비만을 위한 운동 처방에 다방면으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 그러기 위해서는 향후에 장기적인 실험을 통하여 본 연구에서 제시된 방법을 통해 운동을 시행했을 경우, 실제로 체지방의 변화를 알아보고 시스템을 검증해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] World Health Organization, "Technical report series 894: Obesity: Preventing and managing the global epidemic", Geneva: World Health Organization, ISBN 92-4-120894-5, 2000
- [2] Romolo, F.R., and Edward, C.R., "Lipid metabolism during exercise", Sports Medicine, 26(1): 29-42, 1998
- [3] Brooks, G.A., and Mercier, J., "Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: The "crossover" concept", J. Appl. Physiol., 76: 2253-2261, 1994
- [4] Bennett, E.M., "Weight-loss practices of overweight adults", Am. J. Clin. Nutr., 53(6): 1519S-1521S, 1991
- [5] Gollnick, P., and Saltin, B., "Fuel for muscular exercise: Role of fat", Exercise, Nutrition and Energy Metabolism, (Eds.) E.S. Horton and R.L. Terjung, 72-88, New York: Macmillan Publishing Co., 1988
- [6] Fox, E.L., Bowers, R.W. and Foss, M.L., "The physiological basis for exercise and sports", Dubuque: Wm. C. Brown Co., 70-80, 1993
- [7] 이용수, "최대지방연소 운동강도의 결정 및 평가", 운동과학회지, 7(1): 11-18, 1998
- [8] 이용수, 이상현, "성별에 따른 최대지방연소 운동강도의 비교", 한국체육과학회지, 11(1): 555-562, 2002
- [9] 이용수, 오동근, "일반 대학생과 지구성 훈련선수간의 최대지방연소 운동강도 비교", 한국체육과학회지, 39(1):467-475, 2000
- [10] 김창균, 김용안, "걷기 운동에 따른 지방연소의 변화", 한국스포츠리서치, 17(6): 35-44, 2006
- [11] Bryner, R.W., Yeater, R.A., Ullrich, I.H. and Toffle, R.C., "The effects of exercise intensity on body composition, weight loss, and dietary

- composition in women", *J. Am. Coll. Nutr.*, 6(1):68-73, 1997
- [12] Phelain, J.F., Melby, C.L., Harris, M.A., and Reinke, E., "Postexercise energy expenditure and substrate oxidation in young women resulting from exercise bouts of different intensity", *J. Am. Coll. Nutr.*, 16(2): 140-146, 1996
- [13] Tsetsonis, N.V. and Hardman, A.E., "Reduction in postprandial lipemia after walking influence of exercise intensity", *Med. Sci. Sports Exerc.*, 28(1): 1235-1242, 1996
- [14] Bahr, R., and Sejersted, O.M., "Effects of supermaximal exercise on excess post-exercise oxygen consumption", *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24(1): 66-71, 1992
- [15] Sedlock, D.A., Fissinger, J.A., and Melby, C.I., "Effect of exercise intensity and duration on postexercise energy expenditure", *Med. Sci. Sports Exerc.* 21(6): 662-666, 1989
- [16] Astorino, T.A., "Is the ventilatory threshold coincident with maximal fat oxidation during submaximal exercise in women?", *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 40:209-216, 2000
- [17] Powers, Scott K., Howley, Edward T., "Exercise Physiology", McGraw-Hill College, 2007
- [18] Ekblom, B., Goldbarg, A.N., Kilom, A., and Astrand, P.O., "Effect of atropine and propranolol on the oxygen transport system during exercise in man", *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, 30: 35-42, 1972
- [19] 정기삼, "심박변동신호에 의한 자율신경 기능 해석 시스템 설계", 연세대학교 박사학위논문
- [20] Wilmore, J.H., and Costill, D.L., "Physiology of sport and exercise", Human Kinetics, 1999
- [21] Speakman, J.R. and Selman, C., "Physical activity and resting metabolic rate", *Proc. Nutr. Soc.*, 62(3): 621-634, 2003

- [22] Gaesser, G.A., and Brooks, G.A., "Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review", *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 16(1): 29-43, 1984
- [23] Stryer, L., "Biochemistry", New York, W.H. Freeman, 1995
- [24] Rosenwinkel E.T., Bloomfield D.M., Arwady M.A., and Goldsmith R.L., "Exercise and autonomic function in health and cardiovascular disease", *Cardiol. Clin.* 19: 369-387, 2001
- [25] 최환석, "운동과 HRV(심박수 변이도)", *가정의학회지*, 25(11): S547-S550, 2004
- [26] Ball-Burnett, M., Green, M.H., and Houston, M., "Energy metabolism in human slow and fast twitch fibers during prolonged cycle exercise", *Journal of Physiology(London)*, 437: 257-267, 1991
- [27] 박희석, 김병로, 이동규, "여성의 체지방율과 연령별 최대지방연소 운동강도 비교", *한국체육학회지 자연과학편*, 제 45권, 제 6호, pp.533-540, 2006
- [28] Baltimore Williams and Wiliins. "ACSM's guidelines for exercise testing ,and prescription 5th ed.", American College of Sports Medicine, pp.97-102
- [29] Ferrannini, E., "The theoretical basis of indirect calorimetry: A review", *Metabolism*, 37: 287-301, 1988
- [30] Borg G, "Perceived exertion as an indicator of somatic stress", *Scan. J. Rehab. Med.*, 2: 92-8, 1970
- [31] 노연식, "Heart Instantaneous Frequency 신호를 이용한 운동 중 실시간 자율신경계 시스템 개발", 연세대학교, 석사학위논문
- [32] 길정수, 권호열, "Heart Rate Variability 신호의 시간 및 주파수 영역 분석", 강원대
- [33] Robinson, B., Epstein, S.E., Beiser, G.D., and Braunwald, E., "Chronic heart rate by the autonomic nervous system", *Circ. Res.*, 29: 400-411
- [34] Ekblom, B., Goldbarg, A.N., Kilom, A., and Åstrand, P.O., "Effect of

- atropine and propranolol on the oxygen transport system during exercise in man", *Scand. J. Clin. Lab. Invest.*, 30: 35-42, 1972
- [35] Rowell, L.B., "Human cardiovascular control", Oxford University Press, 172-175, 1993
- [36] Yamamoto, Y., Hughson, R.L. and Nakamura, Y., "Autonomic nervous system response to exercise in relation to ventilatory threshold", *Chest*, 105(suppl): 206S-210S, 1992
- [37] Nakamura, Y., Yamamoto, Y., and Muraoka, I., "Autonomic control of heart rate during physical exercise and fractal dimension of heart rate variability", *J. Appl. Physiol.*, 74:875-881, 1993
- [38] 강희성, "일과성 운동시 운동강도의 차이가 자율신경계의 활동에 미치는 영향", *운동과학*, 7(1):1-10, 1998
- [39] Brooks, G.A., "Amino acid and protein metabolism during exercise and recovery", *Med. Sci. Sports Exerc.*, 19(5): S150-S156, 1987
- [40] Martin, W.H., Dalsky, B.F., Hurley, D.E., Mathews, D.M., Bier, J.M., Hagberg, M.A., and Holloszy, J.O., "Effect of endurance training on plasma free fatty acid turnover and oxidation during exercise", *Am. J. Physiol.*, 265: E380-E391, 1993

ABSTRACT

Assessment of maximum fat oxidation exercise intensity using Heart rate variability

Park, Sung Jun

Dept. of Biomedical Engineering

The Graduate School

Yonsei University

Increasing fat oxidation through exercise for body weight adjustment is a recommended favorable method. In this study, exercise load experiment was performed on subjects with similar exercise capacity to examine changes in fat oxidation through gas analysis and to find the degree of changes in autonomic nervous system and R-R intervals from changes in heart rate variability by measuring electrocardiogram signals. Correlation between maximum fat oxidation point for each subject obtained through gas analysis and the point in which 60% of R-R interval values corresponded to the range between -0.01 and 0.01 from heart rate changes suggested in this study showed statistically significant results with $p < 0.01$ with correlation coefficient of 0.855 for tau-B method of Kendall and 0.950 for rho of Spearman. As a result of analysis through Wilcoxon signed rank test, rank was 5 for negative sign, 10 for positive sign and 1 for identical rank, which was a result insignificant with $p = 0.115$ (> 0.05). Results of two methods were verified to have no differences.

Therefore, the method of detecting maximum fat oxidation point through heart rate variability suggested by this study showed similar results as maximum fat oxidation point through existing gas analysis method.

Key words : Fat oxidation, Maximum exercise, Heart rate variability(HRV), Obesity, Respiration Exchange Ratio(RER)