



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2015年 8月
博士學位論文

실시간 생체정보 측정을 통한
회귀분석 기반
에너지 소비 예측알고리즘

朝鮮大學校大學院

I T 融 合 學 科

姜 庚 鎬

실시간 생체정보 측정을 통한
회귀분석 기반
에너지 소비 예측 알고리즘

Energy Expenditure Prediction Algorithm based
on Regression Analysis through Real-time
Biometric Information Measurement

2015年 8月 25日

朝鮮大學校大學院

I T 融 合 學 科

姜 庚 鎬

실시간 생체정보 측정을 통한
회귀분석 기반
에너지 소비 예측 알고리즘

指導教授 金潤泰

이 論文을 工學博士學位 申請 論文으로 提出함

2015年 4月

朝鮮大學校大學院

I T 融合學科

姜庚鎬

姜庚鎬의 박사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 金正和 (인)

위원 조선대학교 교수 潘聲範 (인)

위원 조선대학교 조교수 吳淳洙 (인)

위원 ETRI 책임 연구원 형창희 (인)

위원 조선대학교 교수 金潤泰 (인)

2015년 6월

조선대학교 대학원

목 차

목 차	i
표 목 차	iv
그 립 목 차	v
약 어	vii
요 약	viii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 에너지소비평가 연구배경	1
제 2 절 에너지소비 평가를 위한 연구방법	3
1. 직접 열량 측정	3
가. 정의	3
나. 방법	3
다. 장점 및 단점	3
2. 간접 열량 측정	4
가. 정의	4
나. 방법	4
다. 장점 및 단점	4
3. 가속도 동작감지기를 이용한 에너지소비측정	4
가. 정의	4
나. 방법	5
다. 장점 및 단점	6
4. 심박수를 이용한 에너지소비측정	6
가. 정의	6
나. 방법	6
다. 장점 및 단점	7

5. 심박수와 동작센서를 결합한 에너지소비측정	7
가. 정의	7
나. 방법	8
다. 장점 및 단점	8
제 3 절 연구 목적	10
제 4 절 논문 구성	10
제 2 장 시스템 설계 및 최적의 알고리즘 구현	11
제 1 절 AIRBEAT 시스템	11
1. 시스템 구조 및 설명	11
2. 심박수 내장 알고리즘	13
3. 운동지수 내장 알고리즘	16
제 2 절 최적의 제안 에너지소비예측알고리즘 구현	18
1. 제안 알고리즘 흐름도	18
2. 최적의 제안 알고리즘	20
제 3 장 실험 설계 및 방법	23
제 1 절 실험 설계	23
1. 실험 참가자	23
2. 운동 프로그램	23
제 2 절 실험 방법	29
1. 건강과 웨이트트레이닝	29
2. 운동 실험 방법	29
가. 스트레칭	29
나. 유산소 운동	30
다. 지구력 운동	31
라. 근력 운동	31

제 3 절 통계 분석	35
제 4 장 에너지소비예측 알고리즘 실험 결과 및 검토	36
제 1 절 실험 결과	36
1. 시계열분석 결과	36
2. 상관계수 분석 결과	46
가. 연관성 척도	46
나. 상관계수	48
3. 회귀분석 결과	50
가. 회귀분석	50
나. 회귀계수	54
다. 회귀모형	55
제 2 절 실험 결과 검토	56
1. 10가지 실험 운동에 대한 검증결과	56
2. 연령별 실험 운동에 대한 검증결과	59
제 5 장 결 론	68
참고문헌	70
발간저널목록	80
요약	81

표 목 차

표 1.1	에너지소비와 활동대사량	2
표 1.2	에너지소비측정방법의 장점 및 단점 비교	9
표 2.1	에어비트시스템 개요설명	13
표 3.1	실험 참가자 설명	23
표 3.2	미국스포츠의학학회 운동 처방 지침	24
표 3.3	실험 운동프로그램	25
표 3.4	스트레칭 실험방법	30
표 3.5	트레이드 밀 실험방법	30
표 3.6	사이클링 실험방법	31
표 3.7	체스트 프레스 실험방법	31
표 3.8	인클라인 프레스 실험방법	32
표 3.9	버터플라이 실험방법	32
표 3.10	롱 폴 실험방법	33
표 3.11	숄더 프레스 실험방법	33
표 3.12	레그 프레스 실험방법	34
표 3.13	레그 익스텐션 실험방법	34
표 4.1	상관계수 실험 분석 결과	49
표 4.2	선형회귀분석 결과	53
표 4.3	선형회귀분석 계수	53
표 4.4	10가지 운동에 대한 회귀계수 결과 값 비교	54
표 4.5	10가지 운동에 에너지소비 회귀방정식	55
표 4.6	측정 에너지소비와 예측 에너지소비의 오차율	57
표 4.7	연령별 실제에너지소비와 예측 에너지소비 오차	67

그림 목 차

그림. 1.1	에너지 불균형과 고질병	1
그림. 1.2	에너지소비 측정의 새로운 방안 제시	10
그림. 2.1	에어비트시스템 구조도	12
그림. 2.2	심박수 검출 재처리과정	14
그림. 2.3	심박수 검출 흐름도	15
그림. 2.4	운동지수 계산 흐름도	16
그림. 2.5	로버스트 부호변환점 탐지 알고리즘설명도	17
그림. 2.6	가속도와 면적 초당 합계의 운동지수	18
그림. 2.7	에너지소비예측 알고리즘 흐름도	20
그림. 2.8	에너지소비 예측 알고리즘 의사코드	21
그림. 3.1	웨이트트레이닝 실험 설명	26
그림. 4.1	스트레칭 운동에 대한 시계열분석 결과	36
그림. 4.2	사이클링 운동에 대한 시계열분석 결과	37
그림. 4.3	트레이드 밀 운동에 대한 시계열분석 결과	38
그림. 4.4	버터플라이 운동에 대한 시계열분석 결과	39
그림. 4.5	인클라인 프레스에 대한 시계열분석 결과	40
그림. 4.6	체스트 프레스에 대한 시계열분석 결과	41
그림. 4.7	쇼울더 프레스에 대한 시계열분석 결과	42
그림. 4.8	롱 폴 운동에 대한 시계열분석 결과	43
그림. 4.9	레그 익스텐션에 대한 시계열분석 결과	44
그림. 4.10	레그 프레스 운동에 대한 시계열분석 결과	45
그림. 4.11	에너지소비와 심박수 연관성 척도 분석	47
그림. 4.12	에너지소비와 운동지수 연관성 척도 분석	48
그림. 4.13	평균에너지소비와 심박수,운동지수의 선형회귀분석	52
그림. 4.14	실제 측정값과 예측 값의 오차율 비교	58

그림. 4.15	스트레칭 연령별 연관성 척도 분석	59
그림. 4.16	트레이드 밀 연령별 연관성 척도 분석	60
그림. 4.17	사이클링 연령별 연관성 척도 분석	61
그림. 4.18	가슴운동 연령별 연관성 척도 분석	62
그림. 4.19	어깨운동 연령별 연관성 척도 분석	64
그림. 4.20	다리운동 연령별 연관성 척도 분석	65
그림. 4.21	연령별 에너지소비와 심박수, 운동지수 연관성 비교	66

약어

BMI	Body Mass Index
BMR	Basal Metabolic Rate
ECG	Electrocardiography
DLW	Double Labeled Water
EE	Energy Expenditure
EEPA	Energy Expenditure Prediction Algorithm
FPCB	Flexible Printed Circuit Board
HR	Heart Rate
HRR	Heart Rate Reserve
MCU	Micro Controller Unit
MI	Movement Index
MLR	Multiple Linear Regression
PAL	Physical Activity Level
RM	Repetition Maximum
RQ	Respiratory Quotient
VO ₂ R	Maximal Oxygen Consumption Reserve

ABSTRACT

Energy Expenditure Prediction Algorithm based on Regression Analysis through Real-time Biometric Information Measurement

Kang Kyeung Ho

Advisor : Prof. Kim Youn-Tae , Ph. D.

Department of IT Fusion Technology, Graduate School
of Chosun University

In recent years, as healthcare is perceived as important, exact information on the proper amount of exercise is necessary. Therefore, if an algorithm can predict real-time energy expenditure and be used in portable equipment, it can help athletes, the general public, and patients to create individualized exercise plans. Physical activities must be evaluated to accurately predict energy expenditure.

This study propose a new energy expenditure prediction algorithm (EEPA) of combining the heart rate and movement index and applying them simultaneously to several anaerobic exercises to address the disadvantages of preceding energy expenditure prediction studies.

A total of 53 subjects (43 males and 10 females) were recruited for this study. The participants used a wireless patch-type sensor (AIRBEAT System) and a wireless gas analyzer (K4b2: Cosmed, Srl, Italy). AIRBEAT system consists of a

sensor board, rubber board, and communication module. The sensor is patched onto the participant's chest to obtain physical activity data, including heart rate, movement index, humidity, and temperature. The system was only applied to measurement of heart rate and movement index, and application of energy expenditure prediction algorithm has been limited so far.

The relation test for energy expenditure prediction algorithm proposed in this study yields an error rate within $\pm 5\%$ compared with the gas analyzer (K4b2: Cosmed, Srl, Italy) and proves to be more accurate algorithm to estimate physical activity EE. The algorithm developed for energy expenditure prediction is applied not only to anaerobic exercise but also to every exercise. It is expected that the algorithm developed for estimating energy expenditure will present new application areas for portable heart-rate measurement equipment, such as the AIRBEAT system, and wireless healthcare monitoring devices.

제 1 장 서 론

제 1 절 에너지소비 평가 연구 배경

전 세계적으로 경제 및 기술 발전에 의한 삶의 질이 높아지면서 개인 건강에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러나, 경제적인 풍요와 헬스 케어 시스템의 향상에도 불구하고 대사 장애를 비롯한 고혈압, 당뇨, 비만, 심장병과 같은 고질병으로부터 고통 받고 있는 비율이 급속히 증가하였다[1, 2].

이러한 고질병들의 가장 중요한 원인은 그림. 1. 1과 같이 과도한 칼로리 섭취와 음주, 흡연 등과 스트레스와 비만 등 신체활동과 운동 부족으로 인한 에너지 불균형에서 비롯된다. 에너지 불균형은 개인의 에너지 소비, 칼로리 섭취와 밀접한 관련이 있다.

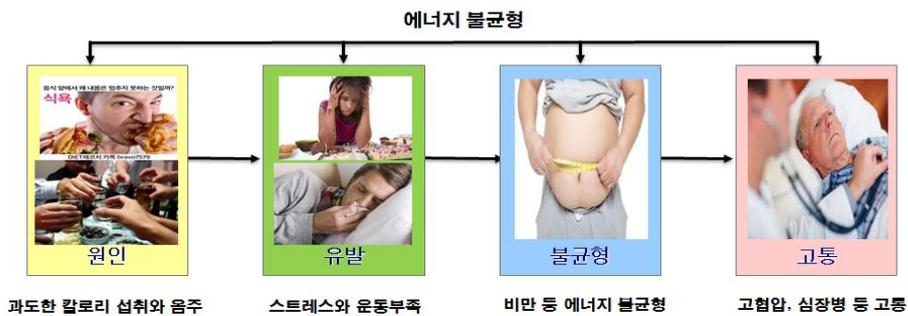


그림. 1.1. 에너지 불균형과 고질병

Figure. 1.1. Energy imbalance and chronic disease

에너지는 일(work)을 할 수 있는 능력 + 열(heat)이며, 에너지 단위는 열을 측정하는 단위 【Calorie / kilocalorie (kcal)】 를 사용한다. 1 kcal = 4.18 kilojoules(kJ)을 나타낸다.

섭취하는 에너지와 소비하는 에너지 사이의 균형은 건강을 유지시키는 데 필수적이다. 표 1. 1과 같이 에너지를 섭취하였을 때 다이어트 등 운동 요법으로 에너지를 소비하면 체중 등이 감소하여 건강을 유지할 수 있지만 과도한 에너지 섭취 후 운동 부족

은 체중이 증가하여 비만 등 고질병의 원인이 된다.

표 1.1 활동 대사량 : 활동 단계별 에너지

Table 1.1 The activity metabolism : energy for stage of activity

활동수준	기초대사량 백분율(%)
앉아서 활동	20-30
가벼운 활동(산책)	30-45
중등 활동(가볍게 걷기)	45-65
심한 활동(몇 시간 지속되는 운동)	65-90
극심한 활동(시합, 고강도 훈련 등)	90-120
식품 이용을 위한 에너지 소비량 = 기초 대사량 + 활동 대사량 + (기초대사량+활동 대사량) × 0.1	

신체의 에너지는 기초 대사량 60%~65%, 활동 대사량 25%~35%, 식품을 이용한 에너지 소비량 5%~10%가 필요하다. 에너지 불균형으로 인한 고질병 예방을 위해서 신체활동 수준(PAL: Physical Activity Level)평가가 중요하다. 신체활동수준은 총 에너지 소비량을 기초 대사량으로 나눈 것으로 1.0 이상 1.4 미만은 비활동적, 1.4 이상 1.6 미만은 저 활동적, 1.6 이상 1.9 미만은 활동적, 1.9 이상 2.5 미만은 매우 활동적인 것으로 보고되고 있다.(한국인 영양섭취 기준에서 제시)

신체활동을 통한 인체 에너지 대사량을 측정하기 위해 심박수와 운동 지수를 사용한다. 심박수와 운동지수 그리고 에너지 소비에 대한 정확한 평가와 이들 상호간의 연관성을 분석하는 것이 필요하다[3, 4].

제 2 절 에너지소비 평가 연구 방법

최근 건강을 위해 다이어트, 특히 에너지 소모량에 대한 기대가 높아지면서 고질병 예방을 위한 에너지 소모량 측정 무선 건강 모니터링 기기, 유비쿼터스 건강 시스템이 개발 되고[5, 6], 에너지 소모를 예측하는 알고리즘이 연구되고 있다[7-13]. 에너지소비량 측정 방법은 직접열량측정, 간접열량측정, 심박수 측정, 동작센서를 이용한 측정, 심박수와 운동지수를 결합한 혼합형 등이 있다.

1. 직접열량측정 방법

가. 정의

직접 열량 측정은 열량 측정을 위하여 전기적 에너지를 열에너지로 변환시켜 생긴 열과 측정 시 발생한 열을 동일조건에서 열량 측정 장치로 비교하는 방법이다.

나. 방법

열량계 안에서 사람이 활동을 할 때 발산되는 탄산가스 생성이나 산소 소비가 측정 [14]되어 열에 의해 방안의 온도가 높아지고, 주위에 흐르고 있는 물의 온도를 높이므로 상승되는 물의 온도를 측정 한다. 산소는 산화분해 연료에 쓰이고, 생성된 탄산가스는 상승하여 생성된 총 에너지를 측정한다.

다. 장점 및 단점

에너지 소비를 측정하기 위한 가장 정확한 방법이나 실험자가 24시간 동안 장치 안에서 취침, 식사, 운동 등 모든 활동을 해야 하는 불편이 따르며, 높은 비용과 일상생활에서는 측정이 불가능하다.

2. 간접열량측정 방법

가. 정의

간접열량측정은 에너지 소비 열량 측정을 위하여 체내에서 영양소가 연소되어 소모된 산소량과 발생한 탄산가스량을 가스 분석에 의해 측정하고 생체 내에서 발생한 열량을 간접적으로 측정하는 방법이다.

나. 방법

간접 열량측정은 호흡 시의 산소 소모량(VO_2)이나 이산화탄소(CO_2)나 질소의 배출량을 측정해 에너지 소모량을 측정하고, 산화작용의 열 방출량(칼로리 소비)을 산출하여 측정한다. 측정 방법에는 베네딕트 칼로리미터와 니핑 칼로리미터 방법, 더글라스낭 칼로리미터 측정 방법이 있다. 최근에는 호흡당 시스템 측정 방법의 사용이 증가되고 있다[15]. 이 방법은 생물의 호흡으로 방출한 이산화탄소가스(CO_2)량과 호흡으로 사용한 산소(O_2)량과의 비(CO_2/O_2)를 의미하는 호흡계수(respiratory quotient)를 사용 한다.

다. 장점 및 단점

에너지 소비를 측정하는데 있어서 휴식 상태나 기초 대사량, 정상상태의 가벼운 운동을 측정하는데 어느 정도 정확성을 나타내며 호흡 당 분석이 가능하다. 정상상태는 기도에 있는 가스 교환 측정을 통하여 세포의 신진대사를 예측하는데 필수적이다[16]. 반면, 측정 가격이 비싸며 얼굴이나 입에 장치를 착용하여 환기후드나 호흡실에서 측정해야하기 때문에 오래 지속된 측정을 할 수 없다[17].

3. 동작 감지기를 이용한 방법

가. 정의

동작 감지기는 일상생활에서 신체활동을 측정 가능 하도록 모니터를 신체에 부착하여 몸체의 동작이나 가속도를 감지하는 신체활동 측정 장치이다. 동작 감지기는 휴대하기 쉽고 저렴한 계보기와 3축 가속도계[18] 등 다양한 종류가 있다. 최근에는 다양한 생리현상과 움직임까지도 측정 가능한 SenseWear Armband(SWA)[19]기기가 개발되어 상용되고 있다. 이 기기는 환자들에게 일상생활의 하루 신체활동에 대한 정보를 쉽고, 간편하게 수집하고 분석하는데 사용된다. 또한, 3축 가속도 동작 감지기 액티그래프(Model GT3X, LLC, USA)는 60여 개 국가에서 신체활동과 관련된 고질병, 수면, 재활, 스포츠 의학 등의 분야에서 광범위하게 사용되고 있다[20]. 국내에서도 3축 가속도 동작 감지기 피트미터(Model Fitmeter, Fit.Life, Korea)를 개발하여 가정의학과, 신경정신과, 재활의학과 등의 연구 분야에 이용되고 있다[21].

나. 방법

3축 가속도 동작 감지기는 허리와 손목 등 신체 부위에 착용 신체 활동 에너지를 측정 한다. 신체활동 측정 데이터에 대해서 정제된 값과 정제되지 않은 값을 얻을 수 있으며, x, y, z축의 가속도의 cm/s^2 값을 얻을 수 있다. 내장된 자체 메모리를 이용하여 신체활동을 연속적으로 20일 정도 측정할 수 있으며 USB케이블을 이용하여 데이터를 컴퓨터에 저장할 수 있다. 측정된 데이터는 활동 상태에 따라 카운터 값과 cm/s^2 값의 가속도 값을 이용하여 신체 활동 에너지 소비량, 신체 활동 강도 등을 계산한다 [22, 23].

가속도 동작 감지를 이용한 신체활동 에너지 예측 알고리즘 연구는 카운터 방식을 중심으로 연구가 진행됐다. 대표적인 알고리즘으로는 Freedson, Hendelman, Leenders, Yngve 알고리즘[24-26]이 있다. SenseWear Armband(SWA)기기는 우 상완 삼두근에 착용하여 쉽게 부착이 가능하게 인체공학적으로 설계되었다[27]. 이 기기는 신체 표면 온도, 피부 혈관확장, 2축 가속계 등 다양한 생리학적 및 운동 변수까지 동시에 측정할 수 있는 복합 센서들을 가지고 있다. 데이터는 성, 나이, 키, 몸무게 등 정보들로 구성되며 이런 정보 변수는 에너지 소비를 예측하는데 범용 알고리즘으로 사용된다. 열 유속(Heat Flux)센서는 신진대사 결과로 인하여 발생된 열의 변화를 감지하는 기능이 내 표되어 있어 기존 기기들과 근본적인 차이가 있다[28].

다. 장점 및 단점

동작 감지기는 에너지 소비를 측정하는데 매우 쉽고, 휴대하기 간편하고, 저렴하나 가속도 동작감지기를 이용한 선행연구는 각 제품 별로 정해진 계산 알고리즘이 있어 결과 값을 서로 비교하기가 어렵고, 통일 되지 못한 신체활동 표현 방식으로 신체활동에 대한 에너지 소비를 결정하기 어려운 한계가 있다. 또한 기존의 알고리즘은 하부 운동을 중심으로 측정된 알고리즘이 대부분이어서 일상생활에서 폭넓게 적용하여 사용하기가 어려운 단점이 있다. 일상생활에서 다양한 움직임을 보이는 피트니스 클럽에서 수행되는 다양한 운동의 경우 각 가속도 동작감지기로는 에너지 소비를 측정하기 어렵다.

4. 심박수를 이용한 방법

가. 정의

심박수(HR)란 심장의 박동수를 말하는 것으로 보통요골동맥에서 느끼는 맥박수와 일치한다. 심박수는 신생아에서는 1분간에 약 130회로 연령과 함께 감소하여 5~13세에서는 약 80~90회, 20세 이상에서는 약 70~75회이다. 심박수는 일반적으로 신체가 작을수록 많다. 또 체온 1°C상승에 대하여 보통 약 8박동의 증가를 가져온다. 그 외에 호흡운동이나 아드레날린, 이산화탄소(CO₂)등의 화학물질에도 영향된다. 신경자격으로서 교감신경에서 촉진적으로 미주신경(迷走神經)에서 억제적으로 된다. 심박수(HR)는 심장의 전기적 활동을 증폭하여 나타난 심전도(ECG)를 통해 기록되어왔다. 신체활동 에너지와 활동 상태에 따른 강도 등은 심박수 (HR), 에너지 소비(EE), 산소소모량(VO₂)과 밀접한 관계가 있다.

나. 방법

심박수를 이용한 신체활동 에너지 측정 방법에는 심장 박동에 기초로 한 측정과 개인 실험보정과 일반 방정식을 사용하여 심박수 수준에 기초로 한 평가, 그리고 이중수

검사법(DLW)등이 있다. 심장 박동을 이용한 신체활동량은 측정하기 쉽고 저렴하며 상대적으로 높은 정확도를 나타낸다. 그러나 열량 측정이나 이중수검사법 등과 비교해서 상대적으로 정확성이 떨어지는 것과 충분한 심장박동 데이터 수집을 요구한다. 개인 실험 보정과 일반 방정식 심박수 측정 방법은 저렴하며 일반 방정식 측정 방법보다 더 정확하며 심장 박동 데이터가 아닌 평균 심박수만 저장된다. 반면에 복잡한 보정 절차로 인하여 많은 피험자의 측정이 불가능하고, 심박수는 신체활동 보다도 다른 환경적인 요인에 의하여 영향을 받는다. 이중수검사법(DLW)은 동위 원소가 함유된 물을 이용하여 신체활동량을 정확히 측정하는 방법으로 일상생활에서 대사율을 측정하는데 사용된다[29].

다. 장점 및 단점

심박수를 이용한 에너지소모 예측 선행 연구는 일상생활 동안의 심박수(90-150b/m) 안에 일어나는 운동에 대해서만 선형 관계 (Ceesay et al., 1989 ; Renneie, Hennings, Mitchell, & Wareham, 2001 ; Spurr et al., 1988)[30, 31]로 예측이 가능하지만, 일상생활 (누워 있음, 앉음, 서있음 등)에서 감정, 자세, 환경적인 조건 (Hebestreit & Bar-Or, 1998)에 의해 심박수가 변화하여 운동과는 상관없이 증가하는 경우 에너지 소비 측정에 사용할 수 없는 단점이 있다[32]. 또한, 모든 사람에게 동일하게 적용하여 신체활동 에너지를 계산하기 때문에 개인별 신체 능력에 따른 정확한 에너지 소비를 측정할 수 없었다.

5. 심박수와 동작감지기 결합

가. 정의

신체활동량과 에너지 소비량을 측정하기 위하여 동작감지기와 심박수를 결합한 방법들이 사용되고 있다. 심박수와 동작 감지 데이터를 동시에 저장하며, 활동 데이터는 에너지 소비 측정을 위하여 심박수 데이터를 활동과 비활동 데이터로 구분하여 사용한다.

나. 방법

심박수와 동작 감지기를 결합한 시스템과 일반 방정식 모델들이 신체활동 에너지 소비량을 직접 측정하기 위하여 개발되어 왔다. 심박수와 동작 감지기의 운동지수를 실시간으로 동시에 측정이 가능하며, 하나의 데이터를 사용했던 이전 기기들의 단점들을 보완하였다. AIRBEAT와 Actiheart가 대표적인 시스템들이다. 먼저, 에어비트는 신체활동 데이터를 측정하기 위하여 피험자 가슴에 부착한다. 심박수 측정은 심전도(ECG) 모니터를 사용하였으며, 동작센서는 3축 가속계를 사용하여 획득된 데이터는 지그베 통신으로 데이터를 송신한다. 이 기기는 실시간으로 동시에 400m 이내 거리에 8명까지 실시간 멀티 통신 가능하다. 그러나 에어비트 시스템의 발전에도 불구하고 에너지 소비를 예측 알고리즘의 구현은 일부 제한된 운동에만 적용된 예측 방정식이어서 아직 미비하다[4].

다. 장점 및 단점

심박수와 각 가속도 동작감지기를 이용한 에너지 소비 예측 방법의 단점을 보완하기 위하여 심박수와 가속도 동작감지기를 결합한 시스템과 알고리즘이 연구되고 있다 [33-35]. 그러나 일부 결합된 시스템은 많은 연구에도 불구하고 일부 특정 운동의 신체활동에서는 정량적으로 가용 데이터를 측정 하지 못하는 단점을 갖고 있어 일부 국한된 운동에만 적용되고 있다[36, 37].

동작 감지기는 측정하기 쉽고 저렴하나 하부 운동을 중심으로 측정된 알고리즘이 대부분이어서 일상생활에서 폭넓게 적용하여 사용하기가 어려운 단점이 있다. 심박수는 일상생활에서 감정, 자세, 환경적인 조건과 나이, 성 등 신체적 조건에 의해 심박수가 변화하여 운동과는 상관없이 증가하는 경우 에너지 소비 측정에 사용할 수 없는 단점이 있다.

에너지 소비 측정 방법의 장점과 단점의 비교 요약은 표 1.2와 같다.

표 1.2 에너지소비 측정 방법의 장·단점 비교

Table 1.2 An evaluation of the advantages and limitations of methods to measure energy expenditure

방법	장점	단점	에러율
직접/간접 열량측정	· 에너지 소비 측정이 정확함	· 측정가격 고가임 · 일상생활 측정 불가능 · 측정하기 불편성 · 오래 지속 측정 불가능	5%
심박수	· 측정하기 쉽고, 가격이 저렴함	· 높은 에러율 · 신체활동 보다 개인 감정에 영향을 받음	20-35%
동작센서	· 측정하기 쉽고, 가격이 저렴함 · 휴대 가능하고 사용이 간편함	· 높은 에러율 · 신체의 센서 부착 위치 에 따라 측정이 다름	20-35%
심박수와 운동지수 결합	· 측정 가격이 저렴함 · 낮은 에러율	· 특정 운동의 신체활동 측정 불가능	5-10%

제 3 절 연구목적

본 논문은 지정된 장소에서 복잡하고, 측정 가격이 비싼(그림. 1. 2. A) 에너지 소비 측정 대신 장비 착용 없이 단순한 장비로 장소와 시간에 구애받지 않고 쉽고, 가격이 저렴(그림. 1. 2. B)하게 에너지 소비를 측정할 수 있는 방법을 제시하고, 지금까지 걷기, 트레이드 밀, 달리기 등 단순한 운동에만 적용되어 에너지 소비 예측이 제한적이었던 에어비트 시스템에 다양한 운동에 대한 에너지 소비 예측 알고리즘을 적용하여 새로운 응용분야를 제시하고자 한다.



(A) 기존 에너지 소비 측정 방식

(B) 새로운 에너지 소비 측정 방식

그림. 1.2. 에너지 소비 측정 방식의 새로운 방안 제시

Figure. 1.2. New design presentation for energy expenditure measurement

제 4 절 논문구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1장에서는 에너지 소비 평가에 대한 연구 배경과 연구 방법에 대해 소개하고, 연구 목적과 필요성에 대해서 설명한다. 제 2장에서는 에너지 소비 측정을 위한 에어비트 시스템에 대해서 살펴본다. 제 3장에서는 에너지 소비 측정 및 평가를 위한 실험 방법을 논의한다. 제 4장에서는 에너지 소비 측정 평가 실험 결과를 기술하고, 마지막 5장에서는 결론을 기술한다.

제 2 장 에너지소비 평가를 위한 시스템설계

본 논문에서 제안한 에어비트 시스템[4]은 에너지 소비량을 추정하기 위하여 결합된 심박수와 운동지수를 적용하였다. 인체에 부착되어 있는 하드웨어는 신체에서 발생하는 심박수와 인체의 움직임에 의해 발생하는 신호를 측정한다. 측정된 신호는 아날로그로 되어 있어 에어비트 장치 내에 있는 컨버터를 이용하여 디지털 신호로 변화 후 데이터를 패킷화 한다. 패킷이 완성되면 하드웨어는 Zigbee 통신을 통하여 데이터를 보낸다. 내장된 소프트웨어에서 수신된 데이터를 운동지수 알고리즘과 심박수 알고리즘을 통해 윈도우 화면에 표현하도록 설계하였다.

에어비트 시스템 알고리즘은 심박수와 운동지수만 측정이 가능하도록 설계되어 상업화가 아닌 연구목적으로 사용되고 있다. 일부 선행 연구에서 이 시스템을 사용하여 에너지 소비 예측 알고리즘을 적용하였으나 실험 참여 인원과 달리기, 러닝머신 등 운동의 제한으로 인하여 대중적 기반 연구에 사용이 제한적 이었다 [3, 4, 6]. 따라서 본 논문은 결합된 심박수와 운동지수를 이용한 에어비트 시스템에 다양한 운동에 대한 에너지 소비 예측 알고리즘을 구현하여 적용하고자 한다.

제 1 절 AIRBEAT 시스템

1. 시스템 구조 및 설명

AIRBEAT 시스템은 심박수와 운동지수의 무선 모니터 부착형 센서 모듈이 내재되어 있다[4, 6]. 그림. 2. 1과 같이 이 시스템 모듈은 전원부, 가속도 센서, 심전도 아날로그 회로, 마이크로 컨트롤러, ZigbeeTM무선 전송 모듈로 구성된다. 전원부는 휴대용 전원으로 사용하기 위해 리튬 이온 배터리를 이용한다. 가속도 측정은 운동 정도를 평가하는데 사용되는 3축 가속도 신호를 얻기 위해 가슴에 부착되는 측정 모듈에 몸통 가속도를 측정하게 된다.

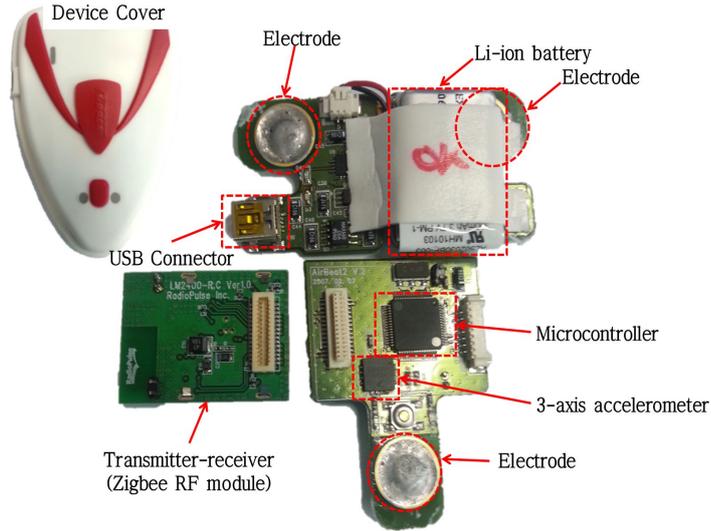


그림. 2.1. 에어비트 디바이스와 3축 가속도 동작감지기, 심전도의 패치 타입 센서 보드

Figure. 2.1. ARIBEAT device and patch-type sensor board with 3-axis accelerometer, ECG

마이크로 컨트롤러는 초소형 타입의 8비트 마이크로프로세서를 사용하였으며, 저 전력으로 동작하게 하였다. 심전도 측정은 사용자의 왼쪽 가슴에 부착되고, 3전극을 사용하여 심전도를 측정한다. 심박수 검출 절차의 진행 평가는 상업적인 ECG 모니터 (CASE system, GE Medical, USA)를 사용하여 실행하였다.

무선으로 운동 관리를 가능하게 하기 위해서는 획득된 데이터들은 Zigbee™ telecommunication module[38]을 통하여 중앙 모니터 장치로 보내진다. 에어비트 기기는 두 개의 반 삼각형 연성회로기판(FPCB)센서에 결합되어있다. 이 디바이스는 아날로그, 디지털 전기 회로망과 센서를 내재한 유연한 인쇄회로기판으로 구성하였다. 표 2. 1과 같이 동시에 400m 이내 거리에 있는 8명까지 실시간으로 멀티 통신이 가능하다[4, 6].

표 2.1 에어비트 시스템의 설명
 Table 2.1 The specification of AIRBEAT system

Items	Performance
Channel	8ch
Resolution	12bit
Sampling Rate	200/s
Frequency B.W.	1Hz~50Hz
Power	LI-ION
Max HR	250/m
HR Detection Error	Below 10%
Power	±3.3V, 3.3V
Comm. Module	ZigBee
Comm. Distance	400m
MCU	MSP430(TI,USA)
Electrode	Jumper setting available
Size	6cm*9cm, 20g

2. 심박수 내장 알고리즘

심전도 측정 알고리즘은 운동 중에 심장의 리듬을 분석하기 위해 적용된다. 심전도 측정은 사용자의 왼쪽 가슴에 부착되고, 3전극을 사용하여 심전도를 측정한다. 운동에 따른 신체 부하를 모니터링하기 위해서는 측정된 심전도로부터 심박수를 검출해내는 과정을 거쳤다. 심전도는 사용자의 움직임으로 인한 노이즈, 즉 동적잡음의 영향을 많이 받기 때문에 그 영향을 최소화하는 과정을 거쳤다. 먼저, 물리적인 영향을 최소화하기 위하여 가슴에 부착하는 모듈의 인터페이스를 최대한 움직임이 적도록 구성한다. PCB 기반의 하드웨어를 최대한 유연성을 갖도록 제작하여 가슴의 모양에 맞게 밀착할 수 있게 하였고, 맞춤형 Ag/AgCl 전극을 가슴에 강하게 부착하였다.

그림. 2. 2에서 나타낸 것처럼 이러한 구성의 심전도 모듈을 통해 얻어진 심전도 신호를 동적잡음 제거 알고리즘을 거쳐 동적잡음의 영향을 감소시킨 후 심박수를 계산한다[4,6].

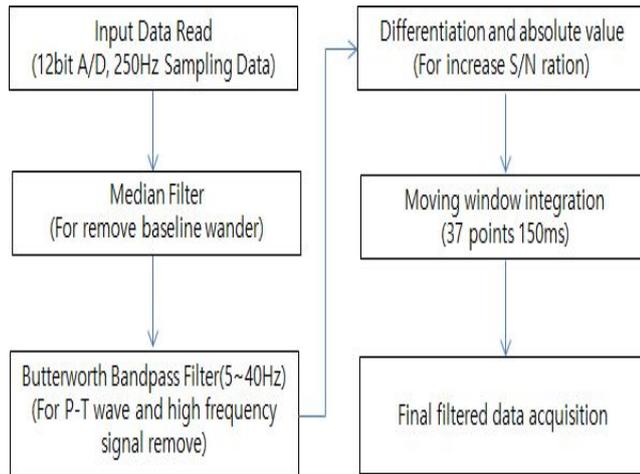


그림. 2.2. 심박수 검출 전처리

Figure. 2.2. Preprocessing for detection of heart rate

검출된 QRS피크 값, 즉 3초간 얻은 값들의 최대값을 저장한 후 다시 3초간 심전도 데이터를 받는다. 그 이후 심박수를 계산해내는 단계로 들어가게 되는데 여기에 동적 잡음을 제거하고 실제 심박만을 검출하기 위한 3가지 방법이 순차적으로 적용된다.

첫째는 이전 양의 피크 값, 즉 이전 QRS 파가 발생되었을 때의 값의 50%를 역치로 설정하여 이보다 작은 피크 값들은 무시된다. 이는 문턱 값이 이전 피크 값에 따라 바뀌는 효과를 가져 오게 되어 일종의 적응 필터와 같은 개념으로 문턱 값이 설정되게 된다. 두 번째로는 심박수 계산 시 일반적으로 심박수의 범위로 여겨지는 분당 30에서 250 사이를 벗어나는 값으로 계산될 때 그 값을 버리고 다시 3초간 데이터를 얻어 심박수를 계산한다. 마지막으로는 계산된 심박수가 이전 심박수에 비해 그 크기가 15이상 변화하였을 때는 마찬가지로 그 값을 버리고 다시 3초간 데이터를 얻어 심박수를 계산한다. 이것은 심박수의 크기나 변화가 위의 설정된 값들에 제한된다는 생리학적인 근거를 토대로 한 것임을 의미한다.

알고리즘은 그림. 2. 3에서 나타낸 흐름도에 따라 획득한 신호를 처리하여 최종 검출되는 심박을 사용하여 심박수를 계산한다[4, 6]. 심박수 검출 절차의 진행 평가는 상업용 심박수 모니터(CASE system, GE Medical, USA)를 사용하여 실행하였다.

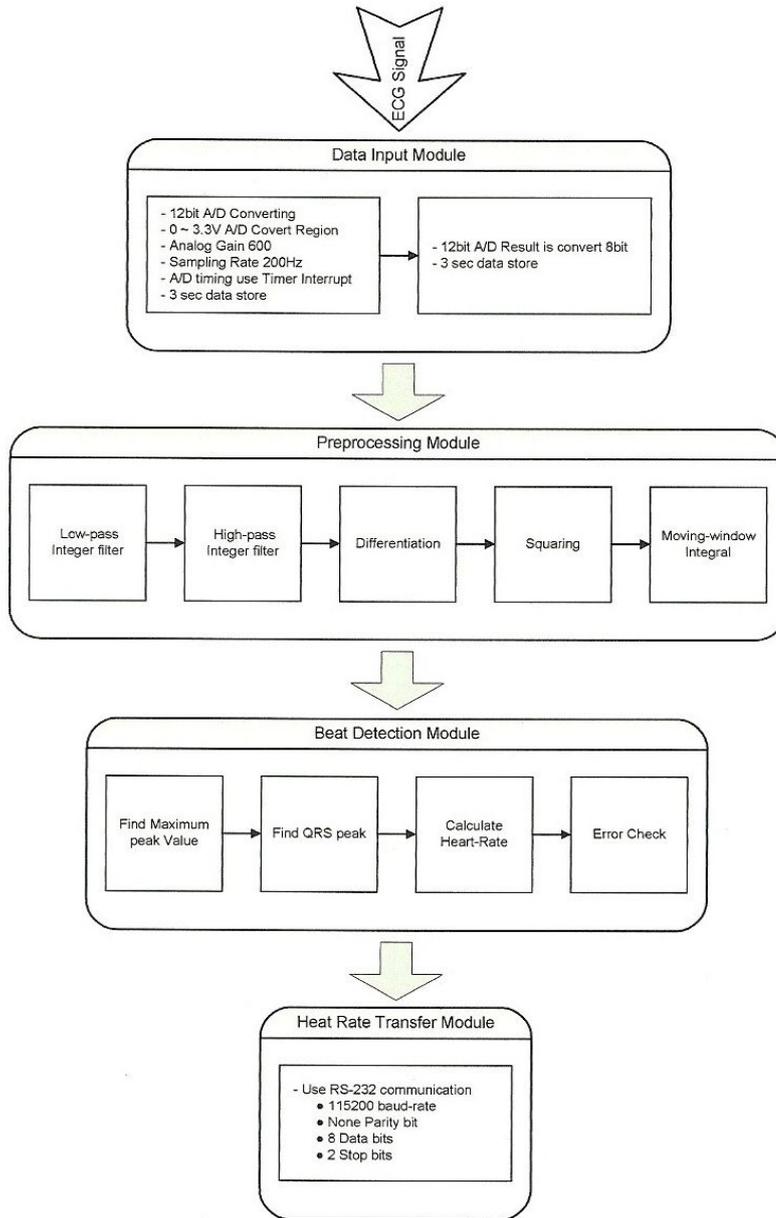


그림. 2.3. 심박수 검출 흐름도

Figure. 2.3. Flowchart for heart rate detection

3. 운동지수 내장 알고리즘

운동지수 알고리즘은 운동 중 운동지수 산출을 위해 적용된다. 운동지수 알고리즘은 1)거친(raw) 데이터에서 특징 포인트 추출, 2)추출된 특징 포인트를 이용하여 특징 계산, 3)특징을 기반으로 기본 운동 지수 계산, 4)각각의 지수 환산 방식으로 계산한다.

에어비트 하드웨어에서의 신호처리와의 연관성을 고려하여 디자인 된 그림. 2. 4에서 나타낸 것처럼 운동 지수는 몇 단계의 절차를 거쳐 계산된다[4, 6]. 먼저, 가속도 신호는 100Hz 샘플링 비율을 가진 12비트 아날로그 - 디지털 컨버터를 사용하여 디지털화된다. 그런 후, 각 채널별 필터링을 거쳐 실시간 로버스트 부호 변환 점 탐지 과정을 거친다. 이 과정은 복잡한 운동 패턴에서 특징 포인트를 정확하게 검출하기 위하여 노이즈를 고려한 2단계 부호 변환 점 검출 과정이며 여기서 구해진 값을 기반으로 운동 지수 환산을 위한 기본 특징 값을 계산해 낸다.

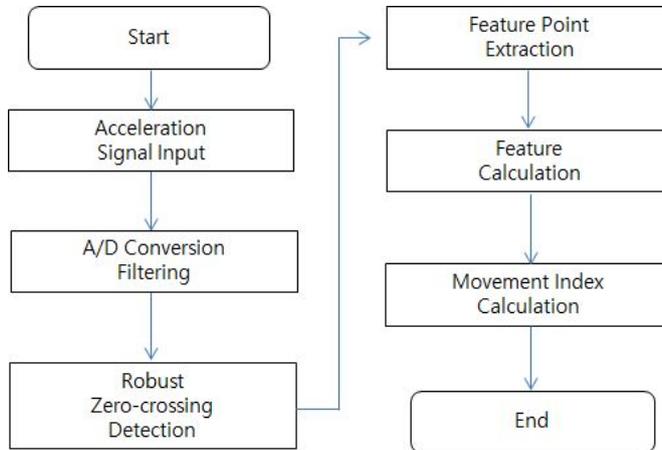


그림. 2.4. 운동지수 계산 플로차트

Figure. 2.4. Flowchart of the movement index calculation

그림. 2. 5에서 보여진 것처럼 로버스트 부호 변환 점 탐지 알고리즘은 7단계로 구성되었다[4, 6].

- (1) 노이즈 마진을 감안하여 양, 음수의 역치를 정한다. 기호로는 +thr, -thr
- (2) +thr을 기준으로 변환이 되면 거꾸로 내려가서 부호가 바뀌는 바로 전 포인트에

서 ASP를 찾는다.

- (3) ASP 찾은 뒤엔 변환 포인트에서부터 순차적으로 ASP를 찾는다.
- (4) ASP 찾은 뒤엔 순차적으로 올라가서 AEP를 찾는다.
- (5) AEP가 찾아지면 +thr를 기준으로 변환이 될 때 거꾸로 내려가며 ASP를 찾는다.
- (6) ASP 찾은 뒤엔 변환 포인트에서부터 순차적으로 APP 찾는다.
- (7) APP 찾고 AEP를 찾는다.

ASP : Acceleration Start Point

AEP : Acceleration End Point

APP : Acceleration Peak Point

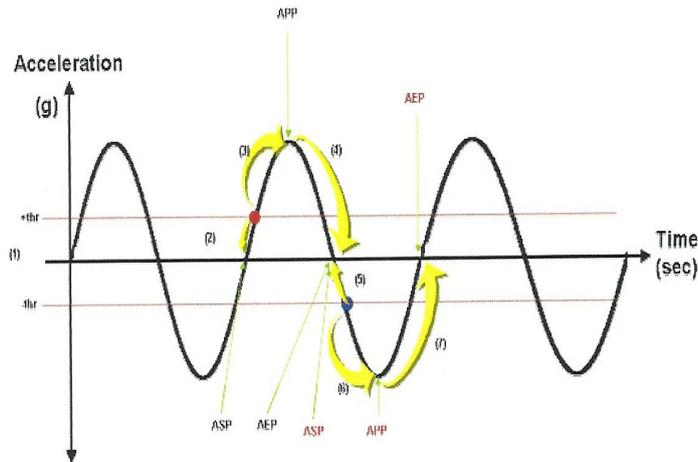


그림. 2.5. 로버스트 부호 변환 점 탐지 알고리즘 도표

Figure. 2.5. Diagram of the robust zero-crossing detection algorithm

이와 같은 알고리즘으로 각 특징 포인트를 검출해 내게 되어 노이즈가 있는 환경에서도 특징 포인트를 정확하게 검출할 수 있다. 알고리즘 검증 테스트 결과 추출된 특징 포인트와 시뮬레이터 입력 포인트의 일치도가 99%에 달했다.

로버스트 부호 변환 점 탐지기[26]를 사용한 알고리즘을 통해 추출된 특징은 그림. 2. 6에서 보여진 것처럼 ASP, AEP, APP의 값을 통해 이 세 점이 이루는 삼각형의 면적을 계산해내고, 이를 누적시켜서 단위시간(1초 혹은 단위 운동시간)의 누적 값으로 환산해 낸다. 특징 추출 알고리즘 방식의 장점은 계산량을 최소화시킬 수 있으며, 계

산 결과만 전송 시 무선 전송 비율을 낮출 수 있다[4, 6].

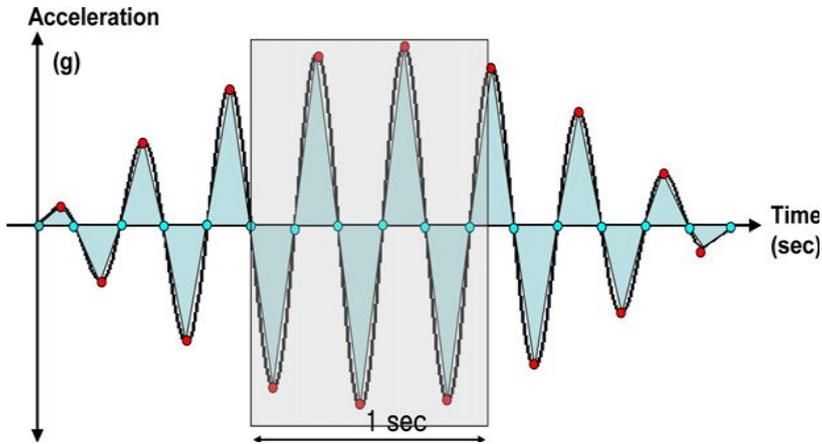


그림. 2.6. 특징 점과 특징 가치의 가속도 파동 형태를 가진 가속도와 면적 초당
 합계의 운동지수

Figure. 2.6. Theoretical acceleration waveforms with feature points, feature values,
 and Movement index(the sum of area per second)

제 2 절 최적의 제안 에너지소비예측알고리즘 구현

1. 제안 알고리즘 흐름도

본 논문에서 제시하는 에너지 소비량 평가를 위한 알고리즘은 그림 .2. 7에서와 같이 데이터 수집, 데이터 재처리, 데이터 분석, 에너지 소비 평가 알고리즘 모델 구축 등으로 구성된다. 먼저, 데이터 수집과정은 무선 부착 형 센서를 통한 실험자들의 운동 지수와 심박수 신호를 취합한다. 각각의 요구된 데이터는 센서 모듈에 저장되어, 에어비트의 상업적 ZigbeeTM 통신 모듈을 사용하여 중앙 컴퓨터로 보내진다.

데이터 재처리 과정은 심박수(ECG) 신호의 검출을 위하여 심전도 신호를 3초간 얻은 후 디지털신호로 바꾸어 필터링하며, 그 출력신호는 미분, 제곱, 평균 움직임 단계를 순차적으로 거친다. 이 과정을 통해서 심전도 신호 중 QRS 파의 부분의 값들이 양의 피크 값을 갖게 되고, 동적잡음을 제거하고 실제 심박만을 검출하는 것을 나타낸다. 심박수 계산 시 수차례 에러 보정을 수행한다.

동작 가속도 감지기(Acceleration) 신호는 100-Hz 샘플링 비율을 가진 12비트 아날로그-디지털 컨버터를 사용하여 아날로그 신호를 디지털화한 후, 각 채널별 필터링을 거쳐 실시간 로버스트 부호 변환 점 탐지 과정을 거친다. 이 과정은 복잡한 운동 패턴에서 특징 포인트를 정확하게 검출하기 위하여 노이즈를 고려한 2단계 부호 변환 점 검출 과정이며 여기서 구해진 값을 기반으로 운동지수 환산을 위한 기본 특징 값을 계산해 낸다[39].

윈도우 분할 과정은 데이터의 원활한 분석을 위해 운동지수와 심박수를 다수의 연속적인 윈도우로 분할하는데 사용된다. 데이터 분석 과정은 윈도우 분할 측정된 심박수와 운동지수는 데이터 분석 통계 프로그램인 SPSS(V2.0)을 사용하여 상관계수와 회귀 분석을 실시하였다.

마지막으로, 에너지소비량 예측 평가를 위한 알고리즘을 구축하는 것을 보여준다. 이 과정은 동작 가속도 감지기와 심박수 신호로부터 획득된 운동 데이터를 수치화하는 새로운 에너지 소비 예측 평가를 위한 새로운 모델을 구축 한다.

이 에너지 소비 예측 평가 모델은 지금까지 에어비트에서 에너지 소비 평가를 위해 적용된 알고리즘들이 미비 되어 새로운 알고리즘을 보완하기 위해 본 논문을 수행하였으므로 대단히 필수적이다.

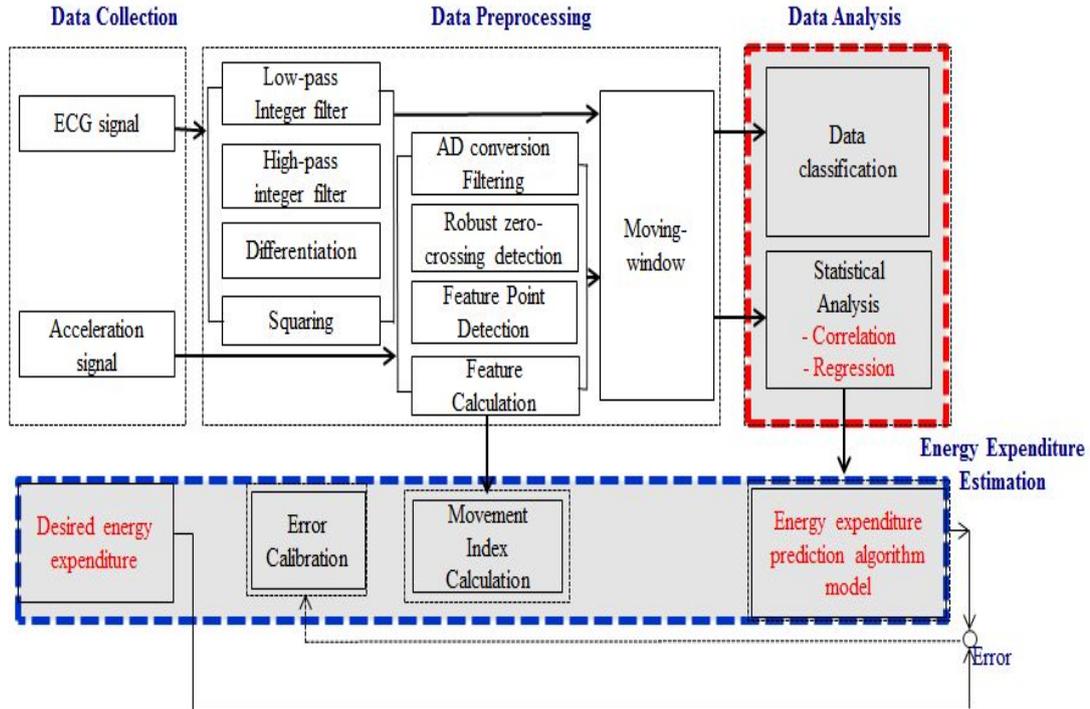


그림. 2. 7. 에너지소비예측 알고리즘 흐름도

Figure. 2. 7. Flowchart of the algorithm for energy expenditure estimation

2. 최적의 알고리즘 제안

10가지 실험운동에 대한 평균 에너지소비와 심박수, 평균 에너지소비와 운동지수 간의 상관관계를 구하기 위하여 선형회귀분석을 실행하였다. 전체 적합 선은 선형 관계를 나타내고 있다.

선형회귀 방적 식은 에너지소비량 = A · 운동지수 × B · 심박수 + C로 표현되는데 직선의 절편 C에 해당하는 값은 상수로 표시된 1.381이며 직선의 기울기 A, B에 해당하는 값은 비 표준화계수 B인 0,47(심박수), 0,32(운동지수)이다. 따라서 심박수와 운동지수간의 선형 회귀분석의 계수를 이용하여 두 변수 간의 관계는 에너지소비량(EE) = 운동 지수(MI) 0.32 × 심박수(HR) 0.47 + 1.381 같은 결과를 얻을 수 있었다.

심박수 및 운동 지수에 대한 에너지 소비 알고리즘은 관계식 2. 1로 표현하였다.

$$EE = (A * HR) + (B * MI) + C \quad (2.1)$$

여기에서 A, B는 운동지수 및 심박수가 한 단위 변함에 따라 에너지소비에 미치는 영향력 크기를 의미한다. 그림. 2. 8과 같이 에너지 소비량을 예측하기 위한 알고리즘으로 의사코드(pseudo code)을 사용하였다.

```

Find item of exercise{
  If exercise = treadmill
    C <- 0.308;
  If exercise = stretching
    C <- 0.020;
  If exercise = butterfly
    C <- 0.344;
  If exercise = chest press
    C <- 2.122;
  If exercise = shoulder press
    C <- -0.706;
  If exercise = long pull
    C <- -4.152;
  If exercise = leg press
    C <- 0.117;
  If exercise = leg extension
    C <- -0.817;
  If exercise = Incline press
    C <- 0.218;
  If exercise = cycling
    C <- 2.317;
}
    
```

그림. 2. 8. 에너지소비 예측 알고리즘 Pseudo code

Figure. 2. 8. Pseudo code of energy expenditure prediction algorithm

여기에서 EE는 에너지 소비량을 저장하는 변수이며 begin은 변수를 사용하기 위한 선언 및 초기화이다. I는 1분 동안 심박수 값과 운동 지수 값을 누적하기 위한 반복문 변수이며, 1부터 60까지 증가하도록 설정했다. 운동 종목에 관련된 변수는 10개의 종목을 설정하였다. 각 종목을 선택하면 C값이 결정될 수 있으며, 1분 동안 누적된 심박수 값과 회귀계수 A값, 운동 지수 값과 회귀계수 B값이 계산되고 운동 종목에 따른 C값이 결정되어 EE 변수에 대입함으로써 에너지 소비량 알고리즘을 구할 수 있다.

관계식 2. 2는 의사코드로 알고리즘을 설계하여 에너지 소비를 예측하는 구현 공식을 나타낸다. 에너지 소비 예측 구현 공식은 표본 데이터의 심박수와 운동지수를 수집하여 에너지 소비를 예측하기 위해 사용된다. 여기에서 표본 집단에는 나이에 따른 나머지 데이터를 없애기 위해 적분을 하였다. 에너지 소비 예측 구현 공식은 다음과 같다 :

$$\int_{\alpha}^{\beta} (x - m)^2 f(x) dx \quad (2.2)$$

여기에서 $x - m$ 는 실험자의 수를 의미하며, $f(x)$ 함수에 따라 dx 값은 0으로 되어 나머지 나이는 없어진다.

관계식 2. 3은 에너지 소비를 예측하는 알고리즘을 나타냈다. 에너지 소비 예측 알고리즘 구현 식은 다음과 같다 :

$$EE_x = \sum_{i=0}^{Min} \left(\frac{HR + MI}{N} \right) + \alpha \quad (2.3)$$

여기에서 EE 는 운동 간 총 에너지 소비량을 의미하며, N 은 표본 데이터, α 는 회귀 변수를 나타낸다. 먼저, 구하고자 하는 평균 집단의 표본 데이터를 얻은 다음, 실험군 N 에서 표본 집단을 구한다. 그리고, 심박수와 운동지수를 표본데이터로 나뉘고, 각각 운동에 맞는 변수를 더하여 각각의 운동이 끝날 때까지 종합한 것을 에너지소비량으로 나타낸다. 이 공식은 각각의 운동에 맞게 표현된 알고리즘이다.

제 3 장 실험 설계 및 실험 방법

제 1 절 실험 설계

1. 실험 참가자

실험은 표 3. 1과 같이 남자의 경우 나이는 26세에서 52세, 신장은 160cm에서 180cm, 몸무게 65kg에서 80kg과 여자의 경우 나이는 24세에서 32세, 신장은 150cm에서 165cm, 몸무게 45kg에서 56kg의 신체적 특성을 갖는 참가자들이 참여 하였다.

표 3.1 실험 참가자 설명
 Table 3.1 Description of Subjects

	남자(n=43)		여자(n=10)	
	평균편차(±)	범위	평균편차(±)	범위
나이(years)	32±8.9	26~52	27±2.4	24~32
키(cm)	172±6.8	160~180	160±4.9	150~165
몸무게(kg)	70±6.5	65~80	50±3.2	45~56

모든 참가자들은 실험의 일관성을 위해 식사 후 2시간이 지난 뒤 개인별 정상 심박수를 측정 하고 실험을 실시하였다.

2. 운동 프로그램

실험 프로그램은 미국 대학 스포츠 의학 학회인 ACSM' Guidelines for Exercise Testing and Prescription(2000)[40] 프로토콜을 참고 하였다. 표 3. 2는 세계 웨이트 트레이닝의 프로토콜 권고안이다. 이 권고안에 따르면 스트레칭은 순서에 따라 10에서

30초 동안 3~4번의 반복 동작을 실시한다. 유산소 운동인 트레이드 밀은 시간당 3km에서 6km를 걸도록 권장하고 있다. 근력 운동은 1시간 이내에 8에서 10가지의 근력 운동을 1세트로 설정하여 반복할 수 있는 일정한 중량을 최대 8에서 12회까지 들어 올리도록 하고 있다. 지구력 운동인 사이클링은 일정한 근력이나 스피드를 20분에서 60분 동안 40%에서 80%의 여유심박수와 여유산소소비량까지 시행하도록 권고하고 있다.

표 3.2 미국스포츠의학학회 운동 처방 지침
 Table 3.2 ACSM' Guidelines for Exercise Testing

분 류	빈 도	ACSM 운동처방원리	
		강 도	시 간
스트레칭	매일	각 3~4회 반복	10~30초간
유산소 운동	2~3일 이상/주	10~50미터 (3~6km/심박수)	걸기 1분당
근력운동	2~3일/주	8~10가지 운동을 1세트	1시간 이하
지구력 운동	3~5일/주	40/50~80%의 여유심박수 또는 여유산소소비량	20~60분

실험 프로토콜은 표 3. 3과 같은 실험 프로그램으로 진행되었으며, 조선대학교 IT융합 신기술 연구센터(IFRC - 2013-01) 윤리위원회에 의해 승인되었다.

표 3.3 실험 프로그램
 Table 3.3 Training Program for Tests

분류	운동	운동 프로그램	시간
위밍업	스트레칭	①어깨, ②팔, ③대퇴부 후면, ④대퇴부 전면, ⑤서혜부, ⑥배부, ⑦요부 순으로 한 세트	각 운동 마다 20초 씩 총 2분 20초
유산소 운동	트레이드 밀	1~5분 3km/h 6~15분 4km/h 16~20분 5km/h	20 분
근력 운동	버터플라이	가슴 운동	7가지 운동을 1세트로 하여 20kg중량을 12회 들어 올림 (50분)
	체스트 프레스		
	인클라인 프레스		
	롱 풀	배부 운동	
	레그 프레스	다리 운동	
	레그 익스텐션		
	쇼울더 프레스	어깨 운동	
지구력 운동	사이클링	60% VO ₂ R	20 분

그림 3-1처럼 모든 실험 참가자들은 호흡을 통해 에너지 소모량을 측정하기 위하여 휴대용 무선 가스분석기(K4b² : Cosmed, Srl, Italy)[41]을 얼굴에 착용하였으며, 실시간으로 심박수와 운동 강도를 측정하기 위하여 무선 패치 형 센서를 가슴에 부착하였다. 이를 통해 산소소모량과 이산화탄소 생성량을 실시간으로 측정하여 에너지 소모량을 계산하였다.

위밍업-스트레칭



유산소운동-트레드밀



지구력운동-사이클링



근력운동-버터플라이



근력운동-체스트 프레스



근력운동-쇼울더 프레스



근력운동-인클라인 프레스



근력운동-롱폴



근력운동-레그 프레스



근력운동-레그익스텐션



그림. 3.1. 웨이트트레이닝 운동
Figure. 3.1. Traditional exercises

제 2 절 실험 방법

1. 건강과 웨이트트레이닝

모든 참가자들은 운동 에너지 소비량을 얻기 위해서 과부하와 소수의 반복 등 근력 운동과 유산소 운동을 실시하였다. 웨이트 트레이닝 운동은 근력과 심폐능력에 효과적인 것으로 되어 있다[42-44]. 웨이트트레이닝의 정확한 효과에 대한 많은 연구들은 최대 근력(1RM) 40%의 웨이트트레이닝은 비록 심박수 측정이 약 60% HR_{max} (Wilmoretal. 1978, Hurleyetal. 1984)이더라도 산소 운송시스템을 자극하지 못한다고 제시된다[45, 46]. 여기에는 참가자들의 운동 유형, 부하, 세트 시간 사이의 휴식, 운동 환경, 약물 치료 가능성 등 심박수(HR)와 산소소모량(VO_2)관계에 영향을 주는 많은 요인이 작용하기 때문인 것으로 나타내고 있다[47-49].

2. 실험 운동

본 논문의 실험은 웨이트트레이닝 10가지 운동에 대해서 실시되었다. 실험 순서는 워밍업인 스트레칭을 시작으로 유산소 운동인 트레드 밀, 근력 운동, 지구력 운동인 사이클링, 그리고 마지막으로 스트레칭을 마무리하였다.

가. 스트레칭

스트레칭은 모든 운동의 기본으로서 몸을 쭉 펴거나 굽혀 근육을 이완시켜 몸을 부드럽게 하는 맨손 체조이다. 스트레칭 실험은 어깨, 팔과 대퇴부 후면, 대퇴 전면부, 서혜부, 배부·요부 순으로 20초 3번을 반복하였다.

표 3.4 스트레칭 실험 방법

Table 3.4 Experimental Method for Stretching Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
워밍업	스트레칭	<ul style="list-style-type: none"> ·어깨, 팔 ·대퇴부 후면 ·대퇴 전면부 ·서혜부 ·배부·요부 	20초 3번 반복	

나. 트레이드 밀

유산소 운동인 트레이드 밀은 1분에서 5분은 3km, 6분에서 15분은 4km, 16분에서 20분은 5km로 속도를 높여 빠르게 걸으면서 총 20분 동안 실시하였다.

표 3.5 트레이드 밀 실험 방법

Table 3.5 Experimental Method for Treadmill Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
유산소 운동	트레이드 밀	1~5min 3km/h 6~15min 4km/h 16~20min 5km/h	20분	

다. 지구력 운동

지구력 운동인 사이클링은 여유산소소비량과 여유 심박수가 60%까지 20분 동안 실시하였다.

표 3.6 사이클링 실험 방법

Table 3.6 Experimental Method for Cycling Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
지구력 운동	사이클링	60%의 여유산소소비량 또는 여유 심박수	20분	

라. 근력 운동

근력운동은 가슴과 어깨, 배부 등 상체 운동과 다리 운동인 하체 운동 등 총 7개 운동을 1세트로 하여 50분 동안 반복할 수 있는 일정한 중량을 최대 12회까지 들어 올리도록 설정하여 실험을 실시하였다.

(1) 가슴운동

표 3.7 체스트 프레스 실험 방법

Table 3.7 Experimental Method for Chest press Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
근력 운동	체스트 프레스	<ul style="list-style-type: none"> · 벤치에 앉아 바를 가슴 옆으로 세트 · 팔굽을 수평으로 하고 숨 쉬면서 바를 앞으로 내민 다음 서서히 원점 · 동작 반복 	12회	

표 3.8 인클라인 프레스 실험 방법

Table 3.8 Experimental Method for Incline press Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
근력운동	인클라인 프레스	<ul style="list-style-type: none"> · 벤치에 앉아 바를 가슴 위 높이 세트 · 팔꿈치를 뒤로 당겨 숨 쉬고 바를 들어 올리고 서서히 원점 · 동작 반복 	12회	

표 3.9 버터플라이 실험 방법

Table 3.9 Experimental Method for Butterfly Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
근력운동	버터플라이	<ul style="list-style-type: none"> · 시트에 앉아 패드에 팔 위 세트 · 팔꿈치의 각도를 80~90°로 하고 숨을 쉬면서 패드를 몸쪽으로 당긴 후 원점 · 동작 반복 	12회	

(2) 배부 운동

표 3.10 롱 풀 실험 방법

Table 3.10 Experimental Method for Long pull Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
근력운동	롱 풀	<ul style="list-style-type: none"> · 시트에 앉아 핸들을 잡음 · 스텝에 발을 올려놓고 숨 쉬면서 핸들을 당긴 후 서서히 원점으로 돌림 · 동작 반복 	12회	

(3) 어깨운동

표 3.11 숄더 프레스 실험 방법

Table 3.11 Experimental Method for Shoulder press Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
근력운동	숄더 프레스	<ul style="list-style-type: none"> · 시트에 앉아 바를 잡음 · 팔꿈치를 몸쪽으로 세트해서 숨을 쉬면서 바를 들어 올리고 원점 · 동작 반복 	12회	

(4) 다리 운동

표 3.12 레그 프레스 실험 방법

Table. 3.12 Experimental Method for Leg press Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
근력운동	레그 프레스	<ul style="list-style-type: none"> · 시트에 앉아 양다리를 롤러 안으로 넣음 · 양쪽의 클립을 잡고 발목을 굽혀 롤러를 감아 올리며 서서히 원점 · 동작 반복 	12회	

표 3.13 레그 익스텐션 실험 방법

Table. 3.12 Experimental Method for Leg extension Exercise

단계	구성	운동 프로그램	시간	운동사진
근력운동	레그 익스텐션	<ul style="list-style-type: none"> · 시트에 앉아 바를 잡음 · 팔꿈치를 몸쪽으로 세트해서 숨 쉬면서 바를 들어 올리고 원점 · 동작 반복 	12회	

제 3 절 통계분석

모든 데이터 분석을 위하여 SPSS(v20.0) 통계 소프트웨어를 사용하였다[50]. 참가자들의 신체적 특성은 평균 \pm 표준편차로 나타났다. 상관관계는 적률 상관 계수를 사용하여 에너지소비량, 심박수, 운동 지수 값의 크기에 대한 연관성의 정도를 분석했다. 실험 데이터를 근거로 각 운동별, 개인의 운동 강도를 고려한 개인별, 개인과 운동 별 상관관계를 제시하였다[51, 52].

운동 및 개인별 신체 활동의 다양성을 나타내기 위해서 선형 회귀 방정식[53, 54]을 사용하여 심박수 및 운동지수의 변화와 에너지 소비량 간의 어떤 영향을 미치는 지를 비교, 분석하였다. 그리고 가스분석기와 에어비트시스템을 이용한 운동 별 에너지소비량 측정값과 본 논문에서 제안한 에너지소비량 예측 추정 값과의 차이가 있는지를 나타내기 위하여 오차율 검증을 하였다. 유의수준 (significance level) 은 유의확률(P-Value)이 0.05일 때 유의하며[55], 평균 오차율은 신뢰 수준(CI : Confidence Level) 95%, 표준오차 ± 5 에 허용하였다[56].

제 4 장 실험결과

제 1 절 실험결과

1. 시계열(Time Series)분석 결과

가. 스트레칭 결과

그림. 4. 1은 스트레칭 시계열 패턴 분석결과를 나타낸다. 워밍업 운동인 스트레칭은 시간의 경과에 따라 스트레칭 부위별 운동 강도에 비례하여 심박수가 증가하면 에너지소비량도 증가하는 패턴을 나타냈다. 스트레칭은 트레이드 밀의 운동 강도, 에너지소비량 변화와 비슷한 결과를 보이지만 다리가 아닌 온몸을 움직이므로 심박수 변화는 증가하였다.

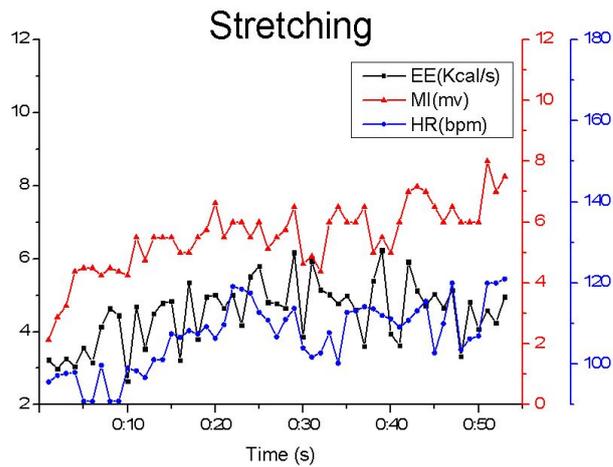


그림. 4. 1. 스트레칭의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과
Figure. 4. 1. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during Stretching

나. 지구력 운동-사이클링 결과

그림. 4. 2는 사이클링 시계열 패턴 분석 결과를 나타낸다. 지구력 운동인 사이클링은 설정된 시간(20분)의 경과와 운동 강도(각각 3~5km, 60%~80%)의 증가에 따라 심박수가 증가하면 에너지 소비량도 증가하는 패턴을 나타냈다. 사이클링은 체자리에 서 운동하는 형태로 인하여 심박수와 에너지 소비량은 증가하는 반면 운동지수는 완만하게 증가하는 것으로 나타났다.

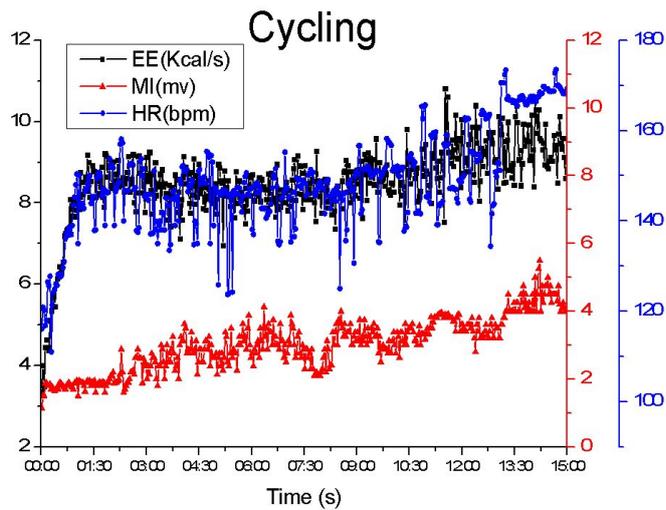


그림. 4. 2. 사이클링의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과
 Figure. 4. 2. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during Cycling

다. 유산소 운동-트레이드 밀 결과

그림. 4. 3은 트레이드 밀 시계열 패턴 분석 결과를 나타낸다. 시계열 패턴 분석결과 유산소 운동인 트레이드 밀은 설정된 1분에서 5분은 3km, 6분에서 15분은 4km, 16분에서 20분은 5km로 속도를 높여 빠르게 걸을수록 전신을 이용하는 운동 형태로 인하여 운동지수와 심박수가 증가하면 에너지 소비량도 증가하는 패턴을 나타냈다.

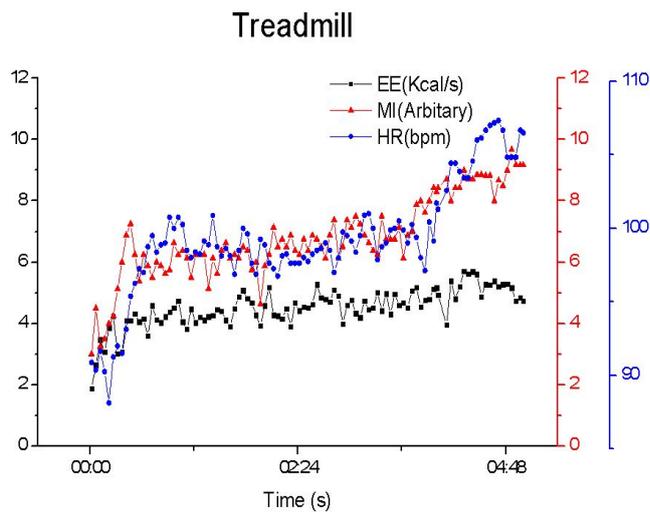


그림. 4. 3. 트레이드 밀의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과

Figure. 4. 3. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during Treadmill

라. 근력 운동

(1) 가슴운동

그림. 4. 4는 버터플라이 시계열 패턴 분석 결과를 나타낸다. 근력의 가슴 운동인 버터플라이는 운동 강도(20kg 부하, 12 반복 횟수)를 실행하면 시간의 경과에 따라 운동 강도의 변화는 낮으나 심박수와 에너지 소비량은 증가하는 패턴을 나타냈다. 즉, 모든 근력 운동 중에서 가슴 운동은 앞서서 하는 운동으로 운동 강도의 변화가 낮은 대신, 시간에 따른 근력의 사용량에 따라 심박수와 에너지소비량은 증가하는 특성을 나타냈다.

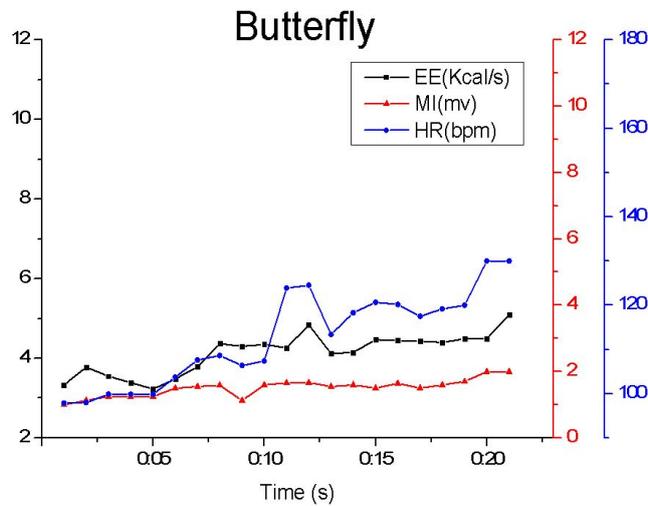


그림. 4. 4. 버터플라이의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과
Figure. 4. 4. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during Butterfly

그림. 4. 5는 인클라인 시계열 패턴 분석 결과를 나타낸다. 인클라인 프레스는 운동 강도(20kg 부하, 12 반복 횟수)를 실행하면 시간의 경과에 따라 운동 강도의 변화는 낮으나 심박수와 에너지 소비량은 증가하는 패턴을 나타냈다. 즉, 모든 근력 운동 중에서 가슴 운동은 앞서서 하는 운동으로 운동 강도의 변화가 낮은 대신, 시간에 따른 근력의 사용량에 따라 심박수와 에너지소비량은 증가하는 특성을 나타냈다.

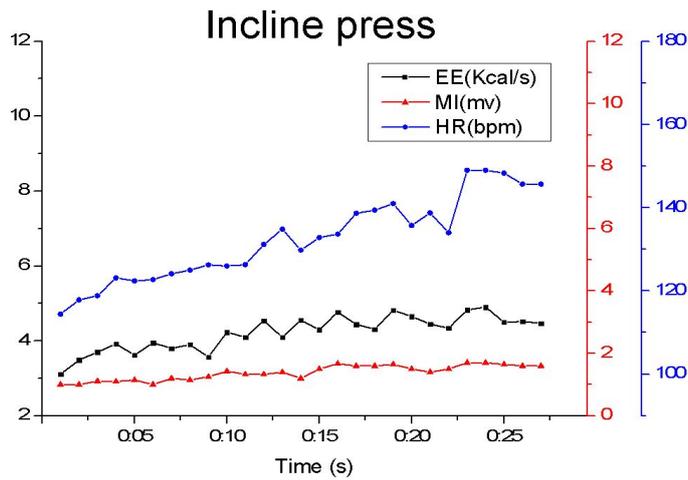


그림. 4.5. 인클라인 프레스의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과

Figure. 4.5. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during Incline press

그림. 4. 6은 체스트 프레스 시계열 패턴 분석 결과를 나타낸다. 운동 강도(20kg 부하, 12회 반복 횟수)를 실행하면 시간의 경과에 따라 운동 강도의 변화는 낮으나 심박수와 에너지 소비량은 증가하는 패턴을 나타냈다. 즉, 모든 근력 운동 중에서 가슴 운동은 앞서서 하는 운동으로 운동 강도의 변화가 낮은 대신, 시간에 따른 근력의 사용량에 따라 심박수와 에너지소비량은 증가하는 특성을 나타냈다.

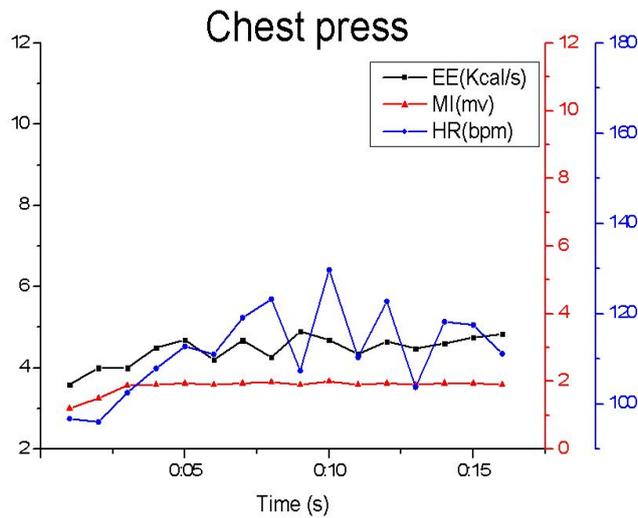


그림. 4. 6. 체스트 프레스의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과

Figure. 4. 6. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during Chest press

(2) 어깨운동

그림. 4. 7은 쇼울더 프레스 시계열 패턴 분석 결과를 나타낸다. 쇼울더 프레스는 운동 강도(20kg 부하, 12회 반복 횟수)를 실행하면 시간의 경과에 따라 운동 강도의 변화는 낮으나 심박수와 에너지 소비량은 증가하는 패턴을 나타냈다. 즉, 쇼울더 프레스는 앉아서 상체 즉, 가슴 위의 근육을 늘리는 운동으로 운동 강도의 변화는 가파른 증가를 보인 반면, 시간에 따른 근육의 사용량에 따라 심박수와 에너지소비량은 비례하여 증가하는 특성을 나타냈다.

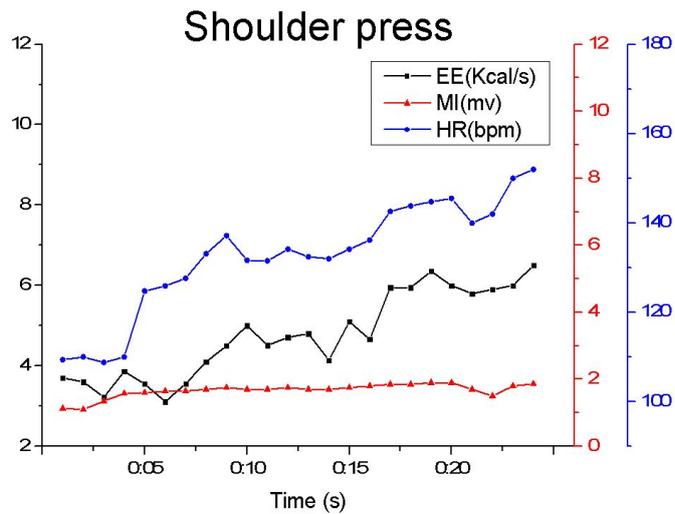


그림. 4.7. 쇼울더 프레스의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과

Figure. 4.7. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during Shoulder press

(3) 배부운동

그림. 4. 8은 롱 풀 운동의 시계열 패턴 분석 결과를 나타낸다. 근력 운동 중 배부 운동은 몸통에서 가슴과 배의 반대쪽 부분인 등 근력을 말한다. 분석결과 운동 강도(20kg 부하, 12회 반복 횟수)를 실행하면 시간의 경과에 따라 운동 강도, 심박수 및 에너지 소비량은 증가하는 패턴을 나타냈다. 즉, 롱 풀 운동은 앉아서 상체 근력을 늘리는 운동이나 전신을 사용하는 운동으로 시간에 따른 근력의 사용량에 따라 심박수, 운동지수 및 에너지소비량은 비례하여 증가하는 특성을 나타냈다.

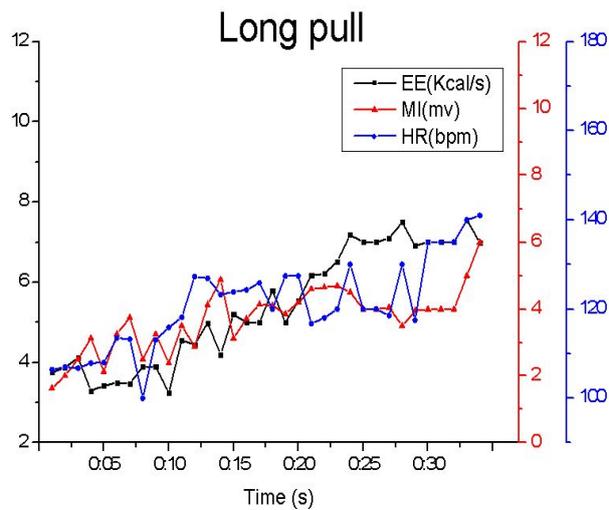


그림. 4. 8. 롱 풀의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과
Figure. 4. 8. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during long pull

(4) 다리운동

그림. 4. 9는 레그 익스텐션 운동의 시계열 패턴 분석 결과를 나타낸다. 근력의 다리 운동인 레그 익스텐션의 경우 운동 강도(20kg 부하, 12회 반복 횟수)를 실행하면 시간의 경과에 따라 운동 강도와 에너지 소비량의 변화는 낮으나 심박수는 증가하는 패턴을 나타냈다. 즉, 레그 익스텐션은 앉아서 하체 즉, 다리의 근력을 늘리는 운동으로 운동 강도와 에너지 소비량의 변화는 가파른 증가를 보인 반면, 시간에 따른 근력의 사용량에 따라 심박수는 증가하는 특성을 나타냈다.

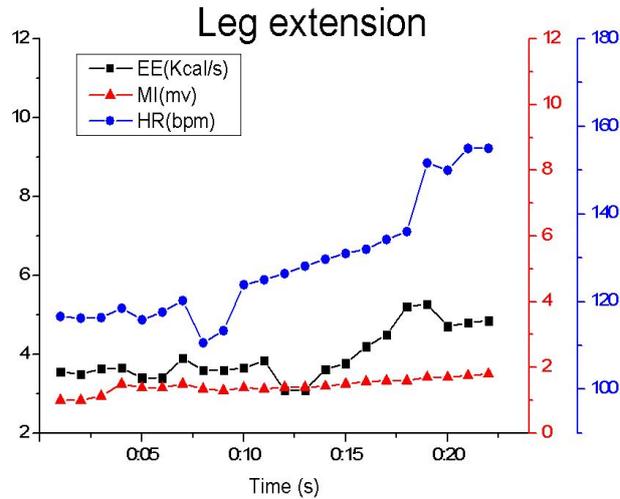


그림. 4. 9. 레그 익스텐션의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과

Figure. 4. 9. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during Leg extension

그림. 4. 10은 레그 프레스 운동의 시계열 패턴 분석 결과를 나타낸다. 근력의 다리 운동인 레그 프레스의 경우 운동 강도(20kg 부하, 12회 반복 횟수)를 실행하면 시간의 경과에 따라 운동 강도와 에너지 소비량의 변화는 낮으나 심박수는 증가하는 패턴을 나타냈다. 즉, 레그 프레스는 앉아서 하체 즉, 다리의 근력을 늘리는 운동으로 운동 강도와 에너지 소비량의 변화는 가파른 증가를 보인 반면, 시간에 따른 근력의 사용량에 따라 심박수는 증가하는 특성을 나타냈다.

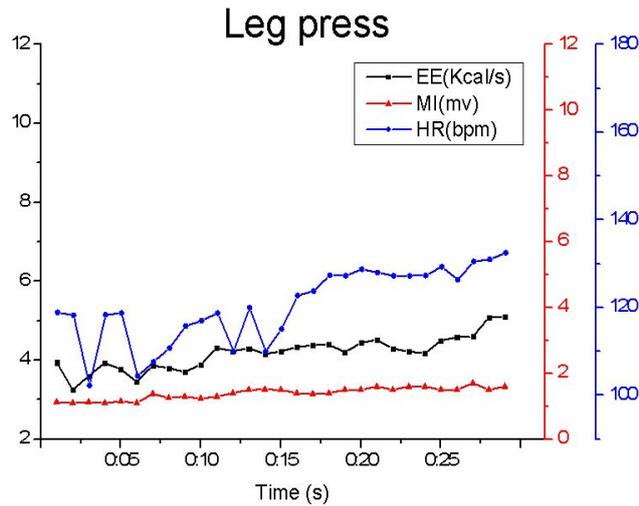


그림. 4. 10. 레그 프레스의 에너지소비량, 심박수, 운동지수 시계열 패턴 운동 분석 결과

Figure. 4. 10. Result of analyzing the time series pattern of energy expenditure, heart rate, movement indexes during Leg press

따라서 모든 실험 운동 패턴 분석 결과는 시간의 경과에 따른 에너지소비량과 심박수 및 운동 강도가 증가하는 패턴을 나타냈으며, 운동 강도 및 심박수가 증가하면 에너지 소비량도 증가 하는 것으로 나타났다.

2. 상관관계 분석 결과

10가지 실험 운동에서 에너지소비량과 심박수, 에너지소비량과 운동 지수, 연령별 선형 관련성의 정도를 측정하여 분석하는 상관관계를 분석하였다.

가. 연관성 척도

선형 관계의 연관성 척도로는 공분산과 상관 계수(Correlation Coefficient)를 사용하였다. 공분산(Covariance)은 다음과 같은 관계식 4. 1을 가지며 두 변수가 어느 방향으로 얼마나 변동 하는지, 또는 퍼져 있는 지를 부호(sign)와 크기(magnitude)로 나타낸다. 이때 공분산의 부호는 양의 관계(Positive Relationship)인 경우 x와 y가 평균에 대하여 서로 같은 값을 가지며, 음의 관계(Negative Relationship)는 x와 y가 평균에 대하여 서로 반대 값을 가진다.

$$s_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (4. 1)$$

$\bar{x} = x$ 의 표본평균(sample mean), $\bar{y} = y$ 의 표본평균(sample mean)

상관계수는 공분산을 각자의 표준편차로 나눈 값 즉, 공분산을 표준화한 것으로 다음과 같은 관계식 4. 2으로 나타낸다.

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (4. 2)$$

이 식에 대한 x와 y의 상관계수 성질은 $-1 \leq r \leq +1$, $0 < r \leq +1$ 일 때 x와 y는 양의 선형 관계를, $-1 \leq r < 0$ 이면 x와 y는 음의 선형관계를 의미하며, $r = 0$ 은 x와 y는 선형관계가 존재하지 않는 것을 의미한다.

(1) 에너지소비량과 심박수

10가지 실험 운동에 대한 평균 에너지 소비량과 심박수(HR)의 선형 연관성 척도 분석 결과는 그림. 4. 11에서 나타났다. 분석결과 각 운동별 심박수와 에너지소비량과의 선형 관련 연관성 척도는 $0 < r \leq +1$ 로 절대 값 1에 가까워 높은 것을 나타냈으며 이들의 연관성은 양의 선형 관계를 나타냈다.

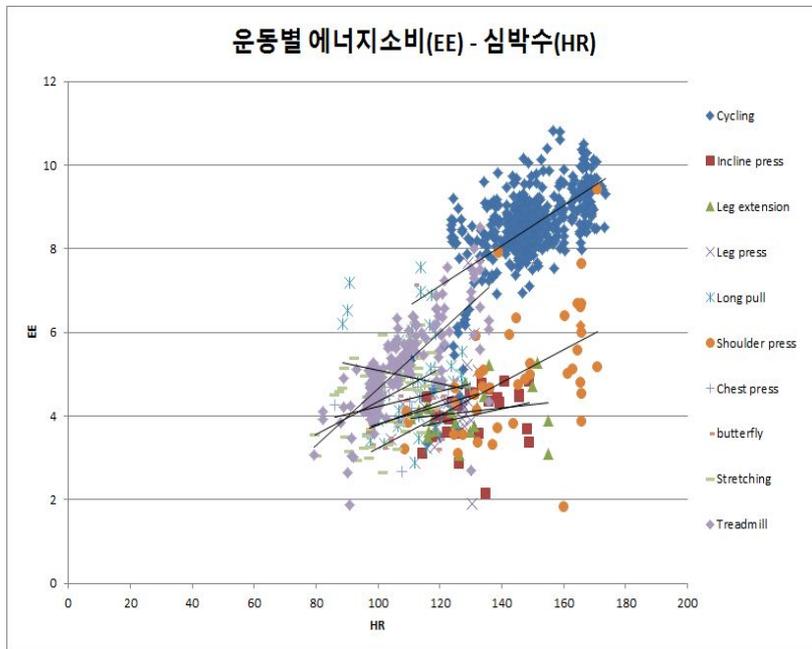


그림. 4. 11. 10가지 운동에 대한 에너지소비와 심박수의 선형연관성 척도
Figure. 4. 11. The measurements of linear correlation for EE-HR during ten different exercises

(2) 에너지소비량과 운동지수

10가지 실험 운동에 대한 평균 에너지 소비량과 운동지수(MI)의 선형 연관성 척도 분석 결과는 그림. 4. 12에서 나타났다. 운동지수와 에너지소비량과의 선형 관련 연관성 척도 또한 $0 < r \leq +1$, $-1 \leq r \leq +1$ 로 이들의 연관성은 양의 선형 관계를 나타냈다.

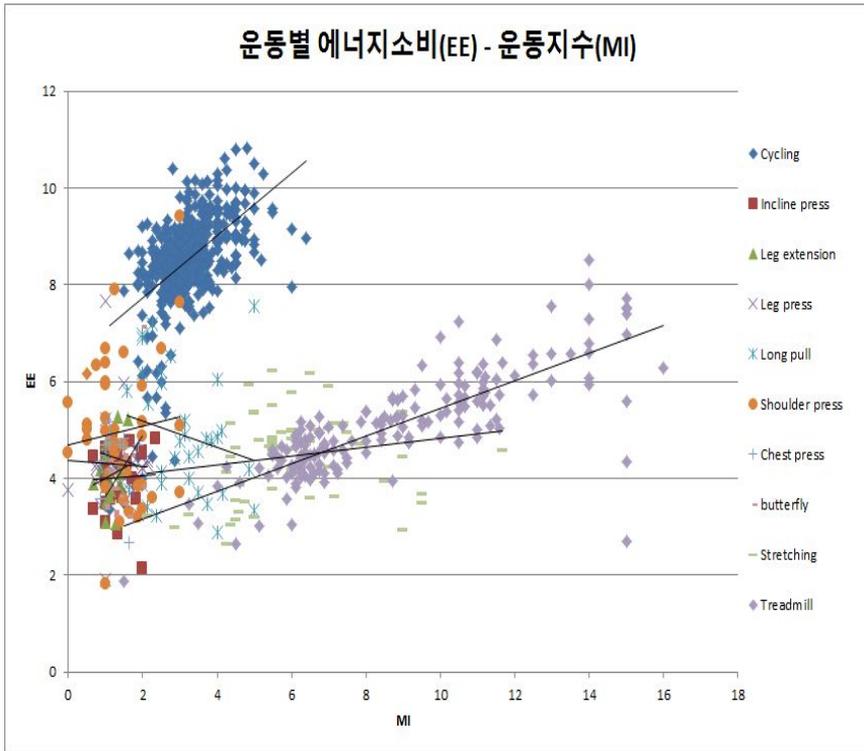


그림. 4. 12. 10가지 운동에 대한 에너지소비와 운동지수의 선형연관성 척도
Figure. 4. 12. The measurements of linear correlation for EE-MI during ten different exercises

나. 상관계수

실험 결과 값의 크기가 각 변수들 간 연관성의 정도를 나타낸 상관계수를 분석하였다. 일반적인 상관계수 크기의 통계학적 해석은 상관계수가 ± 0.9 이상 일 때 상관관계가 아주 높고, $\pm 0.7 \sim 0.9$ 미만은 높은 정도, $\pm 0.4 \sim 0.7$ 미만은 다소 높음, $\pm 0.2 \sim 0.4$ 미만은 상관관계가 있으나 낮은 것으로 나타난다.

10가지 실험 운동에 대한 상관계수 값은 표 4.1과 같이 나타났다. 모든 운동 시 측정된 평균 심박수(HR), 평균 운동지수(MI), 평균 에너지소비량(EE)간의 상관계수(correlation coefficient) 값 분석 결과 10가지 실험 운동에서 평균 심박수와 에너지소비

량, 평균 운동 지수와 에너지소비량 간의 상관 계수는 ± 0.4 이상으로 나타나 다소 높은 상관관계를 보였으며, 유의확률이 $p < 0.05$ 로 나타나 모든 운동이 유의한 결과를 보였다.

표 4.1 상관계수 결과

Table 4.1 Statistical Results of Correlation Coefficients

운동	심박수와 에너지 소비	운동지수와 에너지 소비	P-Values
트레이드 밀	0.780	0.830	<0.001
스트레칭	0.469	0.428	<0.01
버터플라이	0.863	0.748	<0.003
체스트 프레스	0.335	0.404	<0.05
쇼울더 프레스	0.457	0.447	<0.05
롱 풀	0.648	0.683	<0.001
레그 프레스	0.524	0.359	<0.05
레그 익스텐션	0.804	0.725	<0.001
인클라인 프레스	0.770	0.698	<0.001
사이클링	0.605	0.529	<0.001

3. 회귀분석 결과

각 운동 별 심박수, 운동강도, 에너지소비량의 회귀계수 값을 구하여 변수들 간의 함수적 관계식을 통계적 방법으로 추정하는 회귀분석(Linear Regression)을 사용하여 분석하였다.

회귀분석은 둘 또는 그 이상의 변수들 간에 존재하는 관련성을 분석하기 위하여 실험 데이터에서 이들 간의 함수적 관계식을 통계적 방법으로 추정하는 방법이다. 특히 함수적 관계식을 추정하기 위하여 여러 개의 독립변수(심박수와 운동 강도)가 동시에 종속 변수(신체 활동에 따른 에너지 소비량)에 미치는 영향을 분석하는 중다선형 회귀 분석 (Multiple Linear Regression)을 사용하였다.

가. 회귀분석

회귀분석 과정은 종속변수가 가진 정보의 표현에 대한 설명을 먼저 분석한다. 통계학에서는 관계식 4. 3처럼 종속변수가 가진 정보를 변수의 변동(분산)으로 간주한다.

$$\text{종속변수(Y) 변동 } \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (4. 3)$$

그리고 관계식 4. 4와 같이 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 분석한다. 이때 변수의 선택은 이론이나 경험에 의해 분석자가 선택하게 되며, 영향을 미치는 모든 독립변수를 고려하는 것은 불가능하므로 항상 오차항(error term)이 존재한다.

$$\text{종속변수(Y) 변동 } \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad \dots\dots\dots \blacktriangleright X_1, X_2, \dots, X_P \quad (4. 4)$$

또 관계식 4. 5와 같이 독립변수와 종속변수간의 함수관계를 분석한다. 실제 함수 f 의 형태는 알 수 없거나 이론 모형은 복잡한 비선형 회귀모형(nonlinear)인 관계로 함수 관계를 단순화한 선형함수를 선택하게 된다.

$$\text{종속변수(Y) 변동 } \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad \dots\dots\dots \blacktriangleright X_1, X_2, \dots, X_P \quad (4. 5)$$

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$$

관계식 4. 6의 선형 함수관계를 설정하여 i) 독립변수는 종속변수에 영향을 미치는가? ii) 미친다면 어떻게 미치는가? iii) 독립변수 값에 따라 종속변수 값을 예측한다. 종속변수에 대한 독립 변수의 유의성과 영향력은 회귀계수를 이용 한다. 여기에서 회귀계수는 회귀 방정식에서 변량(variate)에 대한 변수(variable)에 따라 첨가되는 계수와 상수인 α , β_1 , β_2 , β_p 를 나타낸다.

$$y_i = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + e_i \quad (4. 6)$$

마지막으로 통계적 모형은 과학적 진실이기 보다는 사실의 대표적 모형인 관계로 독립변수에 의해 설명되지 못한 부분에 대해 오차항으로 보고 iid $\sim N(0, \sigma^2)$ 을 가정한다. 그런 후 최종 회귀모형을 이용하여 데이터($y_i, x_{1i}, x_{2i}, x_{pi}$), $i=1, 2, \dots, n$ 으로부터 주어진 독립변수에 대한 종속변수 예측 치를 구한다. 이에 대한 회귀방정식은 관계식 4. 7과 같이 정의된다.

$$\hat{y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_1 x_{1i} + \hat{\beta}_2 x_{2i} + \dots + \hat{\beta}_p x_{pi} \quad (4. 7)$$

그림. 4. 13은 10가지 실험운동에 대한 평균 에너지소비와 심박수, 평균 에너지소비와 운동지수 간의 선형회귀분석을 실행한 두 변수 간의 관계를 나타내고 있다. 전체 적합 선은 선형 관계를 나타내고 있다.

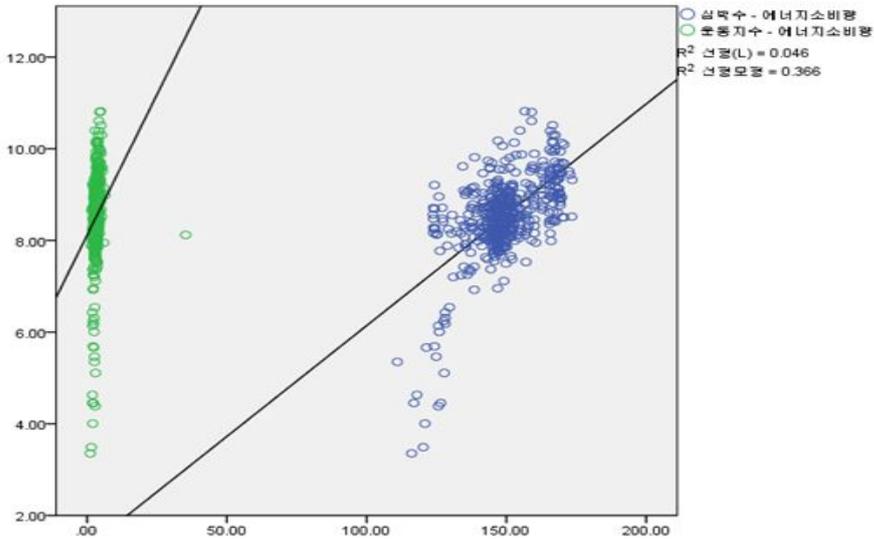


그림. 4. 13. 평균 에너지소비와 심박수, 평균 에너지소비와 운동지수의 선형회귀분석
 Figure. 4. 13. The measurements of linear regression analysis for average EE-HR, average EE-MI during ten different exercises

통계결과 표 4. 2와 같이 상관계수(R)은 0.607, 결정계수(R^2)0.369, 회귀모형 유의성 값은 0.000으로 유의하다는 결과를 얻었다. 또한, 표 4.3의 회귀분석 계수는 심박수와 운동지수 두 변수 간의 $t=15.523$, $1,480$ 으로 나타났으며, 유의수준(P)0.000으로 회귀계수 0,47(심박수), 0,32(운동지수)의 값은 통계적 유의성을 확인할 수 있었다.

표 4.2 선형회귀분석 결과

Table 4.2 Statistical Results of linear regression analysis

모형	R	R 제곱	수정된 R 제곱	추정값의 표준오차	통계량변화량				
					R 제곱변화량	F 변화량	df1	df2	유의 확률 F 변화량
1	.607 ^a	.369	.366	.74849	.369	137.797	2	472	.000

선형회귀 방적 식은 에너지소비량 = A · 운동지수 × B · 심박수 + C로 표현되는데 , 표 4.3에서 직선의 절편 C에 해당하는 값은 상수로 표시된 1.381이며 직선의 기울기 A, B에 해당하는 값은 비 표준화계수 B인 0,47(심박수), 0,32(운동지수)이다. 따라서 심박수와 운동지수간의 선형 회귀분석의 계수를 이용하여 두 변수 간의 관계는 식 4.8과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

$$\text{에너지소비량(EE)} = \text{운동지수(MI)}0.32 \times \text{심박수(HR)}0.47 + 1.381 \quad (4.8)$$

표 4.3 선형회귀분석 계수

Table 4.3 Statistical Results of linear regression analysis Coefficients

모형		비표준화계수		표준화 계수	t	유의 확률	B에 대한 95.0% 신뢰구간	
		B	표준 오차	베타			하한 값	상한 값
1	(상수)	1.381	.441		3.136	.002	.516	2.247
	운동지수	.032	.022	.056	1.480	.140	-.010	.075
	심박수	.047	.003	.590	15.523	.000	.041	.053

나. 회귀계수 결과 값

표 4. 4는 각 운동 별 심박수, 운동지수, 에너지소비량의 회귀계수 결과 값을 나타냈다. 회귀계수를 이용한 각 운동 별 영향력과 유의성 분석결과 유의확률이 0.05 이내로 나타나 10가지의 모든 운동에서 에너지소비량에 대한 운동지수와 심박수의 유의성이 유의하는 것으로 나타났으며, 영향력 또한 운동지수가 에너지소비량에 가장 영향을 미치고, 심박수는 그 다음으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

표 4. 4 10가지 운동에 대한 회귀계수 값 비교

Table 4. 4 Comparison of regression coefficient value of during ten different exercises

운동	심박수	운동지수	에너지소비량	P-Values
트레이드 밀	0.027	0.225	0.308	0.006
스트레칭	0.035	0.133	0.020	0.001
버터플라이	0.028	0.214	0.344	0.003
체스트 프레스	0.004	0.980	2.122	0.306
쇼울더 프레스	0.029	0.863	-0.706	0.082
롱 풀	0.056	0.774	-4.152	0.000
레그 프레스	0.029	0.430	0.117	0.010
레그 익스텐션	0.030	0.592	-0.817	0.000
인클라인 프레스	0.025	0.493	0.218	0.000
사이클링	0.037	0.240	2.317	0.000

다. 선형 회귀방정식

심박수 및 운동지수의 변화에 따른 에너지소비량 증가에 대한 회귀방정식은 $Y = AX + BZ + C$ 관계식으로 표현하였다. 여기에서 Y는 에너지소비량(EE), X는 운동지수(MI), Z는 심박수(HR), C는 상수, 회귀계수는 A, B를 나타낸다.

여기에서 회귀계수 A, B는 운동 강도 및 심박수가 한 단위 변함에 따라 에너지소비량에 미치는 영향력 크기를 의미하기 때문에 매우 중요한 값이며, 회귀상수 C는 적합한 회귀선을 추정하기 위한 절편에 해당되므로 중요한 의미를 갖지 않는다.

표 4. 5는 관계식을 이용한 각 운동 별 추정된 표본회귀선을 나타낸다. 본 논문에서는 추정 표본회귀선을 에너지 소비량 실험 알고리즘이라 명명한다.

표 4. 5 각 운동에 대한 에너지소비 회귀방정식

Table 4. 5 Equation for energy expenditure according to each exercise

운동	예측 방정식
트레이드 밀	$0.225 \times MI + 0.027 \times HR + 0.308$
스트레칭	$0.133 \times MI + 0.135 \times HR + 0.020$
버터플라이	$0.214 \times MI + 0.028 \times HR + 0.344$
체스트 프레스	$0.980 \times MI + 0.004 \times HR + 2.122$
쇼울더 프레스	$0.863 \times MI + 0.029 \times HR - 0.706$
롱 폴	$0.774 \times MI + 0.056 \times HR - 4.152$
레그 프레스	$0.430 \times MI + 0.029 \times HR + 0.117$
레그 익스텐션	$0.592 \times MI + 0.030 \times HR - 0.817$
인클라인 프레스	$0.493 \times MI + 0.025 \times HR + 0.218$
사이클링	$0.240 \times MI + 0.037 \times HR + 2.317$

제 2 절 실험 결과 검토

10가지 실험에서 측정된 실제 에너지소비량과 본 논문에서 제시한 에너지소비량 예측 알고리즘간의 정확성을 측정하기 위해 검증과정을 수행 하였다. 표준 오차율은 예측한 값과 실제 실험에서 관찰되는 값의 차이를 다룰 때 실시하는 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)를 사용하여 검증하였으며 다음과 같은 관계식(4.9)으로 나타냈다.

$$RMSE = \sqrt{MSE(\hat{Y})} = \sqrt{E((\hat{Y}_i - y_i)^2)} \quad (4.9)$$

관계식 4. 9에서 추정 값의 표준오차는 실제 값이 회귀식으로 추정한 값으로부터 떨어져 있는 잔차를 제곱한 값의 평균, 즉 잔차 평균 제곱(MSE: mean of squared error)의 제곱근 값이다. 일반적인 모델의 적합성 평가는 추정 값의 표준오차가 작을수록 적합하다고 판단한다. 본 논문에서는 모형의 표준오차 허용 기준을 $\pm 5\%$ 이내로 하여 회귀식의 적합성 여부를 평가하였다.

1. 10가지 실험운동에 대한 검증결과

10가지 실험 운동의 가스 분석기를 이용한 평균 실제 에너지소비량 측정값은 본 논문에서 구현된 관계식 7을 이용한 알고리즘의 타당도를 검증하기 위하여 신체활동 수행 후 본 논문의 알고리즘을 적용하여 신체 활동 에너지 소비량 예측 값을 비교 하였다. 비교 검증 결과 표 4. 6과 같이 10가지 운동의 가스 분석기를 이용한 에너지소비량 측정값과 새로운 알고리즘을 이용한 에너지소비량 예측 값은 표준오차가 모든 운동에서 $+5\%$ 이내로 나타났다. 본 논문에서 제시하는 에너지소비량 예측 알고리즘은 실제 실험에서의 에너지 소비량과의 평균 오차율이 낮아 에너지소비량 예측 알고리즘의 정확성이 매우 높은 것을 알 수 있다.

표 4. 6 10가지 운동의 측정된 에너지소비량과 예측 에너지소비량과의 오차율
Table 4. 6 Error ratio between measured EE and estimated EE during testing.

운동	실제 평균 에너지소비 (Kcal/min)	예측 평균 에너지소비 (Kcal/min)	에러율 (%)
트레이드 밀	10.625	10.610	0.146
스트레칭	3.984	3.830	3.872
버터플라이	1.446	1.514	4.712
체스트 프레스	1.186	1.169	1.365
쇼울더 프레스	1.909	1.829	4.207
롱 풀	3.055	3.086	0.991
레그 프레스	2.020	2.037	0.853
레그 익스텐션	1.446	1.425	1.496
인클라인 프레스	1.898	1.895	0.112
사이클링	17.592	17.839	1.405

운동별 에너지 소비량 측정 결과와 에너지 소비량 예측 결과의 오차율 검증 결과를 그래프로 나타내면 그림. 4. 14와 같다.

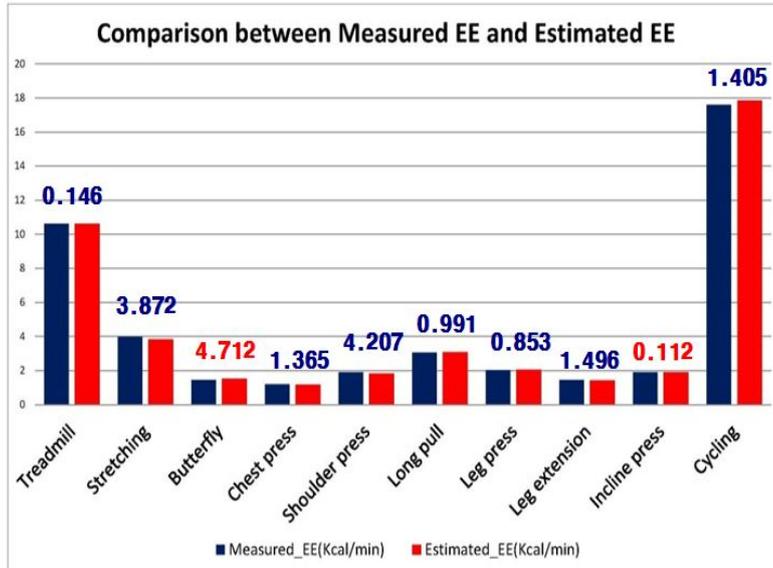


그림. 4. 14. 10가지 운동에 대한 실제 측정 에너지소비량과 예측 에너지소비량의 오차율 비교

Figure. 4. 14. Comparison between measured EE and estimated EE during ten different exercises

2. 연령별 실험운동에 대한 검증결과

10가지 운동 실험 운동에 대한 에너지 소비 예측 알고리즘의 정확성을 비교 검증하기 위해 측정된 데이터에서 연령별(40대 이상 5명, 20~30대 5명)간 데이터를 무작위로 추출하여 데이터 상관관계를 구하였다.

가. 스트레칭

그림. 4. 15는 스트레칭의 연령별 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도의 상관관계 분석결과를 나타냈다. 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도 상관 연관성 분석에서 점선은 40대 이상 연령, 실선은 20대에서 30대의 연령을 나타내며, 기울기의 방향은 양(+)으로 연령별 심박수와 운동지수는 모두 에너지 소비량과 선형관계를 나타냈다.

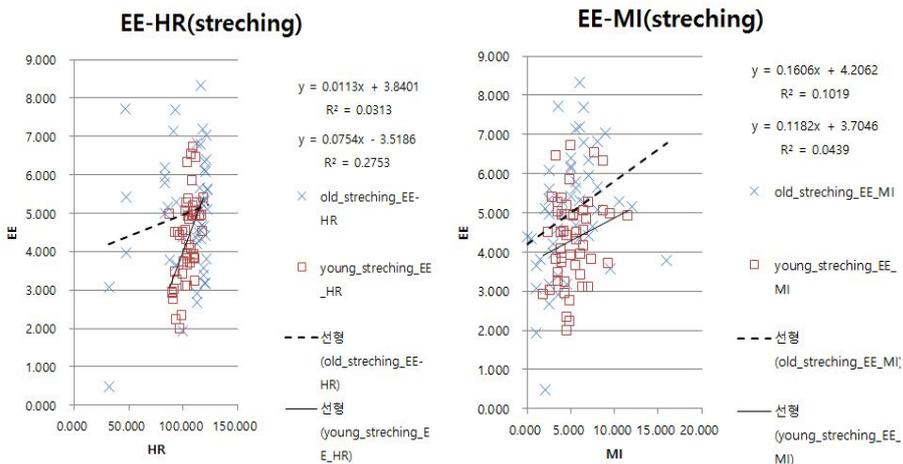


그림. 4. 15. 스트레칭의 연령별 선형연관성 척도

Figure. 4. 15. The measurements of linear correlation by age during stretching exercise

나. 트레이드 밀

그림. 4. 16은 트레이드 밀의 연령별 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도의 상관관계 분석결과를 나타냈다. 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도 상관 연관성 분석에서 점선은 40대 이상 연령, 실선은 20대에서 30대의 연령을 나타내며, 기울기의 방향은 양(+)으로 연령별 심박수와 운동지수는 모두 에너지 소비량과 선형관계를 나타냈다.

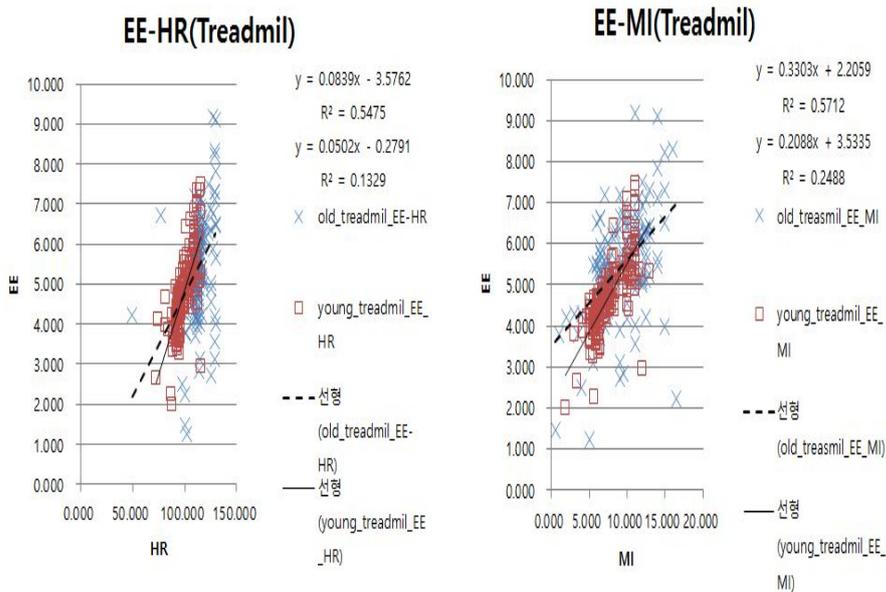


그림. 4. 16. 트레이드 밀의 연령별 선형연관성 척도

Figure. 4. 16. The measurements of linear correlation by age during treadmill exercises

다. 지구력 운동- 사이클링

그림. 4. 17은 사이클링의 연령별 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도의 상관관계 분석결과를 나타냈다. 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도 상관 연관성 분석에서 점선은 40대 이상 연령, 실선은 20대에서 30대의 연령을 나타내며, 기울기의 방향은 양(+)으로 연령별 심박수와 운동지수는 모두 에너지 소비량과 선형관계를 나타냈다.

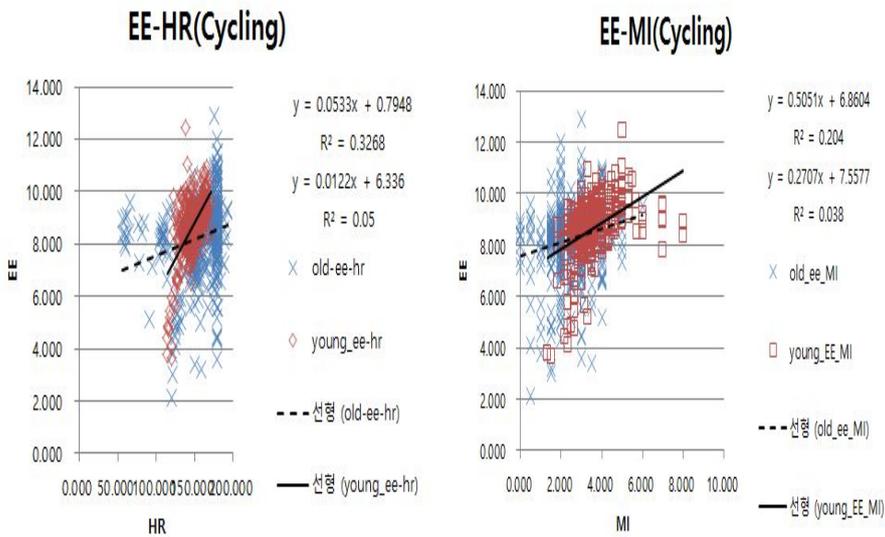
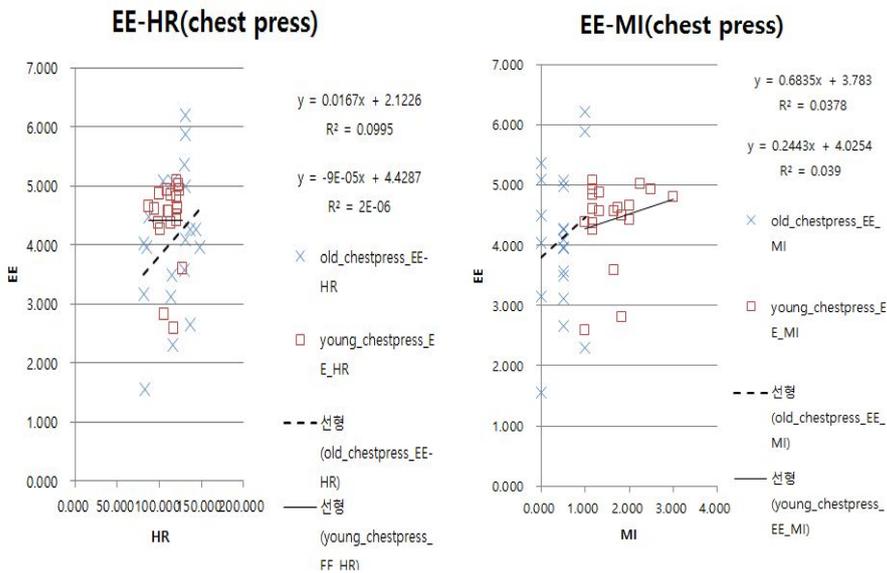


그림. 4. 17. 사이클링의 연령별 선형연관성 척도

Figure. 4. 17. The measurements of linear correlation by age during cycling exercises

라. 근력 운동-가슴운동

그림. 4. 18은 가슴 운동인 체스트 프레스, 버터플라이, 인클라인 프레스의 연령별 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도의 상관관계 분석결과를 나타냈다. 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도 상관 연관성 분석에서 점선은 40대 이상 연령, 실선은 20대에서 30대의 연령을 표현한다. 체스트 프레스의 에너지 소비와 심박수는 20~30대에서 음(-)의 상관관계를 보여 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 버터플라이는 에너지 소비와 운동지수는 20~30대에서 음(-)의 상관관계를 보여 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 인클라인 프레스는 에너지 소비와 심박수는 20~30대에서 음(-)의 상관관계를 보여 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 나머지 운동은 양(+)으로 연령별 심박수와 운동지수는 모두 에너지 소비량과 선형관계를 나타냈다.



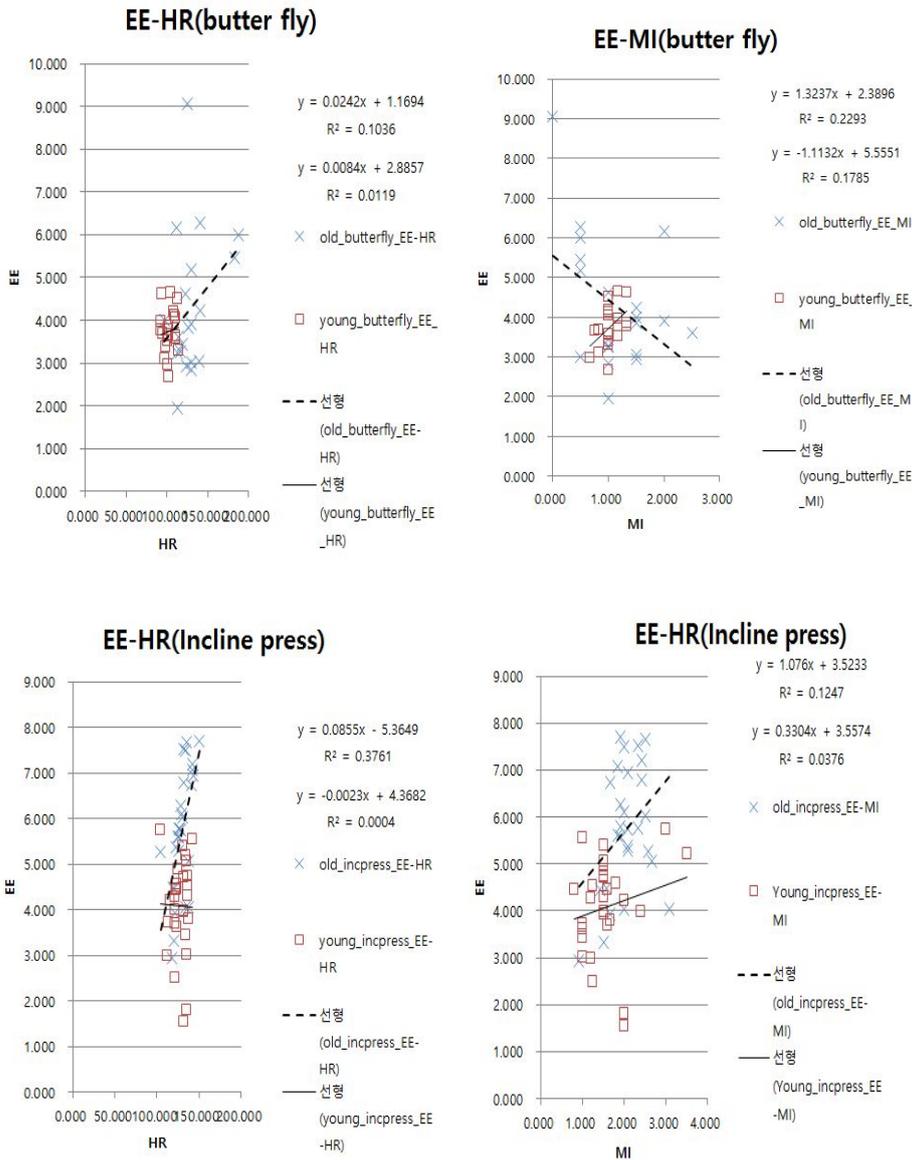


그림. 4. 18. 근력 가슴운동의 연령별 선형연관성 척도

Figure. 4. 18. The measurements of linear correlation by age during a chest muscular strength exercises

마. 근력 운동-어깨운동

그림. 4. 19는 숄더 프레스의 연령별 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도의 상관관계 분석결과를 나타냈다. 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도 상관 연관성 분석에서 점선은 40대 이상 연령, 실선은 20대에서 30대의 연령을 표현한다. 체스트 프레스의 에너지 소비와 운동지수는 20~30대에서 음(-)의 상관관계를 보여 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 그러나 연령별 심박수와 에너지 소비량은 양(+)으로 선형관계를 나타냈다.

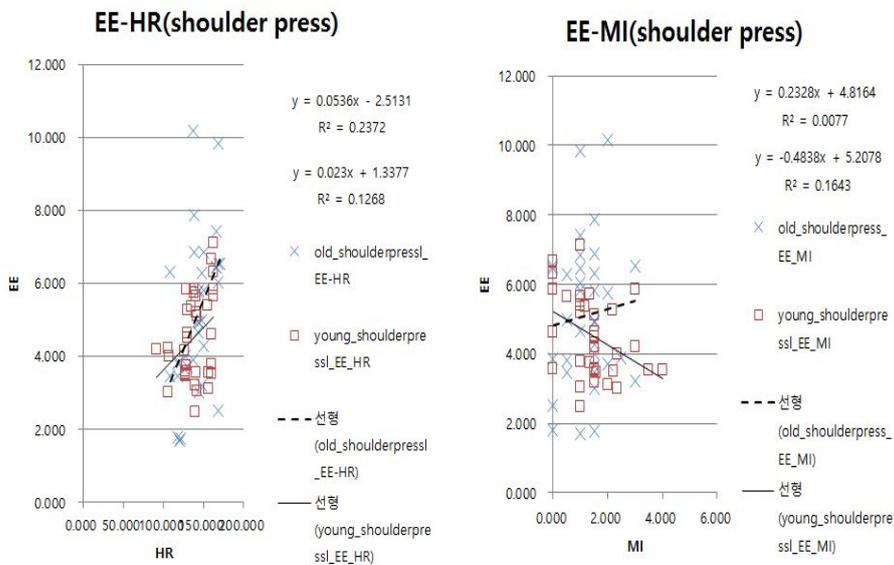


그림. 4. 19. 근력 어깨운동의 연령별 선형연관성 척도

Figure. 4. 19. The measurements of linear correlation by age during a shoulder muscular strength exercises

바. 근력 운동-다리운동

그림. 4. 20은 레그 익스텐션의 연령별 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도의 상관관계 분석결과를 나타냈다. 에너지 소비량과 심박수, 에너지 소비량과 운동 강도 상관 연관성 분석에서 점선은 40대 이상 연령, 실선은 20대에서 30대의 연령을 표현한다. 에너지 소비와 운동지수는 20~30대에서 음(-)의 상관관계를 보여 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 그러나 연령별 심박수와 에너지 소비량은 양(+)으로 선형관계를 나타냈다.

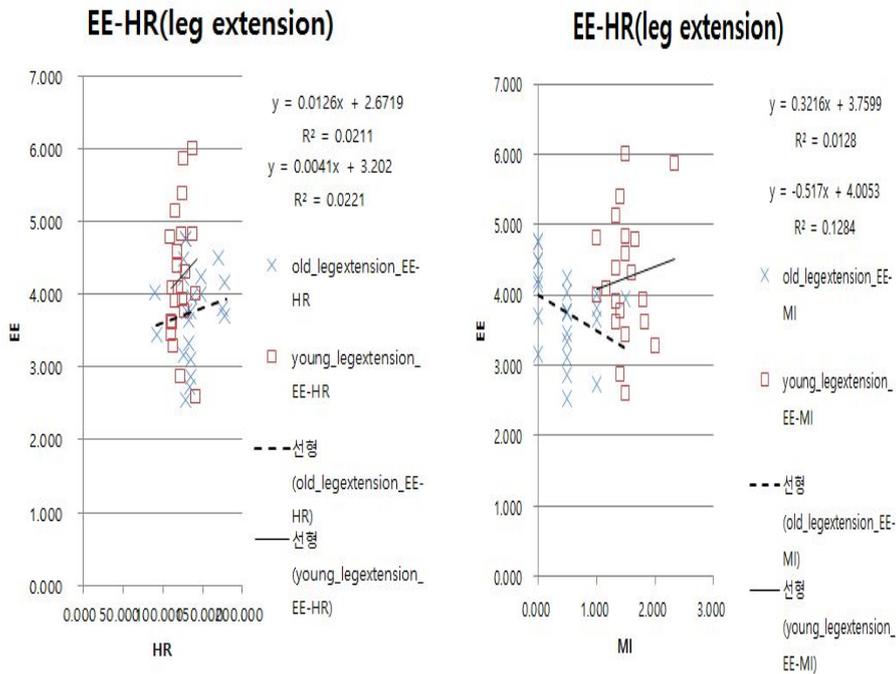


그림. 4. 20. 다리 근력 운동의 연령별 선형연관성 척도

Figure. 4. 20. The measurements of linear correlation by age during a leg muscular strength exercises

10가지 운동의 연령별(20~30대, 40대 이상) 표본 샘플 데이터를 실제 평균 에너지 소비와 예측 평균 에너지 소비 간 상관관계를 구한 후 선형회귀분석을 하였다. 그림. 4. 21은 심박수와 운동지수 간의 연령별 선형회귀분석을 실행한 두 변수 간의 관계를 나타냈다. 실선은 전체 적합 선을 나타내며 점선은 유의 확률 0.05 이내의 값을 표현했다. 분석 결과 결정계수(R²) 0.669, 회귀모형 유의성 값은 0.000으로 유의하다는 결과를 얻었다.

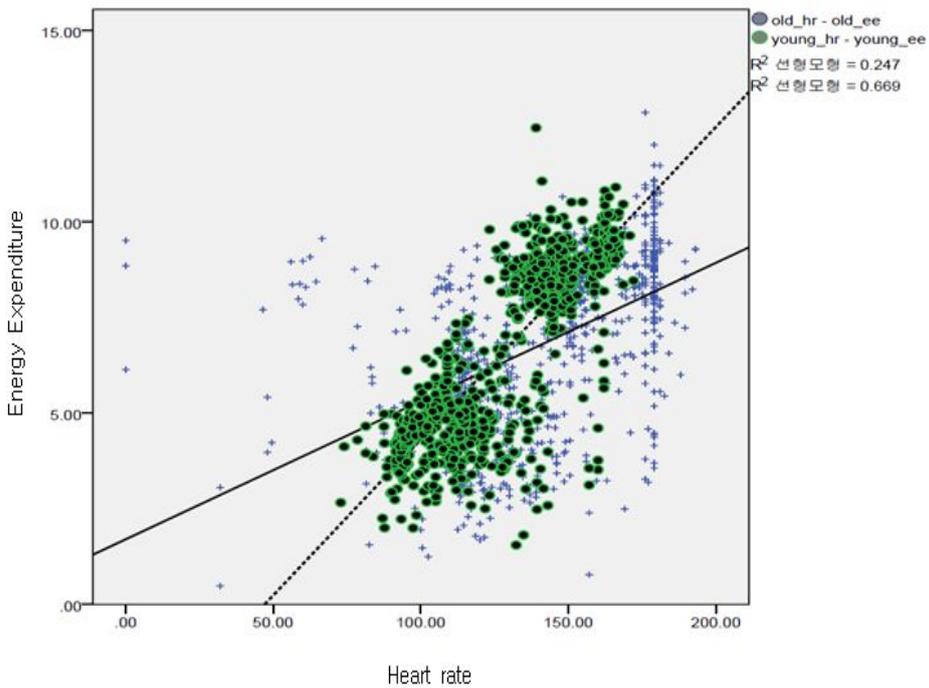


그림. 4. 21. 연령별 에너지소비와 심박수의 선형회귀분석

Figure. 4. 21. The measurements of linear regression analysis by age EE-HR during ten different exercises

10가지 실험 운동의 가스 분석기를 이용한 연령별 평균 실제 에너지 소비량 측정값은 본 논문에서 구현된 관계식 7을 이용한 알고리즘의 타당도를 검증하기 위하여 신체 활동 수행 후 연령별로 분류하여 본 논문의 알고리즘을 적용하여 신체 활동 에너지 소비량 예측 값을 비교 하였다. 비교 검증 결과 표 4. 7과 같이 각각의 구현된 연령별 (20~30대, 40대 이상) 평균 실제 에너지 소비량 측정값은 예측 에너지 소비 알고리즘을 이용하여 계산한 에너지 소비량 예측 값과 오차 ± 1 를 나타내 정확성이 매우 높은 것을 알 수 있다.

표 4. 7 연령별 실제평균에너지 소비와 예측 평균 에너지 소비 오차
 Table 4. 7 Error between by age measured EE and by age estimated EE during testing.

운동	40대 이상 실험자			20~30대 실험자		
	실제 평균 에너지소비 (Kcal/min)	예측 평균 에너지소비 (Kcal/min)	오차	실제 평균 에너지소비 (Kcal/min)	예측 평균 에너지소비 (Kcal/min)	오차
사이클링	8.25	8.23	-0.02	8.62	8.68	0.07
인클라인 프레스	5.72	5.71	-0.01	4.08	4.13	0.05
레그 익스텐션	3.77	3.84	0.07	4.24	4.26	0.02
레그 프레스	4.26	4.19	-0.07	4.18	4.16	-0.03
롱 폴	4.52	4.52	0.00	4.79	4.79	0.00
쇼울더 프레스	5.10	5.11	0.01	4.52	4.58	0.06
체스트 프레스	4.07	4.07	-0.01	4.42	4.40	-0.02
버터플라이	4.30	4.35	0.04	3.75	3.79	0.04
스트레칭	5.01	4.96	-0.05	4.33	4.32	0.00
트레이드 밀	5.45	5.42	-0.04	4.78	4.74	-0.03

제 5 장 결 론

최근 건강관리에 대한 관심이 높아짐에 따라 에너지 소비에 대한 정확한 분석이 요구 되고 있다. 과도한 칼로리 섭취와 음주, 흡연 등과 스트레스와 비만 등 신체활동과 운동 부족으로 인한 에너지 불균형은 대사 장애를 비롯한 고혈압, 당뇨, 비만, 심장병과 같은 고질병의 원인이 된다. 신체활동을 통한 인체 에너지 소비량을 측정하기 위해 심박수와 운동 지수를 사용한다. 심박수와 운동지수 그리고 에너지 소비에 대한 정확한 평가와 이들 상호간의 연관성을 분석하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 심박수와 운동지수를 결합한 에어비트 시스템을 사용하여 참가자들의 10가지 운동종류에 따른 에너지 소비량을 측정하였다. 실험 참가자들은 호흡을 통해 에너지 소모량을 측정하기 위하여 휴대용 무선 가스분석기(K4b²)를 얼굴에 착용하였으며, 실시간으로 심박수와 운동지수를 측정하기 위하여 무선 부착용 센서((ARIBEAT)를 가슴에 부착하였다. 이를 통해 산소소모량과 이산화탄소 생성량을 실시간으로 측정하여 에너지 소모량을 계산하였다. 측정된 데이터는 SPSS를 통해 심박수와 운동지수 간의 상관관계 및 회귀분석을 실시하였다.

10가지 실험 운동에 대한 평균 에너지 소비량과 평균 심박수, 평균 에너지 소비량과 평균 운동지수의 선형 연관성 척도 분석 결과는 $0 < r \leq +1$ 로 절대 값 1에 가까워 높은 것을 나타냈으며 이 둘의 연관성은 양의 선형 관계를 나타냈다. 상관계수는 ± 0.4 이상이므로 나타나 다소 높은 상관관계를 보였으며, 유의확률이 0.05로 나타나 모든 운동이 유의한 결과를 보였다.

각 운동 별 심박수, 운동지수, 에너지 소비량의 회귀계수 값을 구하여 변수들 간의 함수적 관계식을 추정하는 회귀분석(Linear Regression)을 사용하였다. 10가지 운동에 대한 평균 회귀분석 결과 상관계수(R)은 0.607, 결정계수(R²)0.369, 회귀모형 유의성 값은 0.000으로 유의하다는 결과를 얻었다. 회귀분석 계수는 심박수와 운동지수 두 변수 간의 $t=15.523, 1,480$ 으로 나타났으며, 유의수준(P)0.000으로 회귀계수 0,47(심박수), 0,32(운동지수)의 값은 통계적 유의성을 확인할 수 있었다. 선형회귀 방적 식은 에너지 소비량(EE) = A · X(운동지수) × B · Z(심박수) + C로 표현되는데 , 직선의 절편 C에 해당하는 값은 상수로 표시되며 직선의 기울기 A, B에 해당하는 값은 비 표준화계수 B인 0,47(심박수), 0,32(운동지수)임을 알 수 있다. 따라서 심박수와 운동지수 간의 선형 회귀분석의 계수를 이용하여 두 변수 간의 관계는 에너지소비량(EE)=운동지수(MI)

$0.32 \times \text{심박수(HR)} 0.47 + 1.381$ 과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 타당성이 입증된 결과를 토대로 10가지 신체활동 운동에 대한 심박수 및 운동 지수의 두 변수 간 상관관계식을 구하여 에너지소비량 예측 알고리즘을 구현하였다.

실제 에너지소비량과 본 논문에서 제시한 에너지소비량 예측 알고리즘간의 정확성을 측정하기 위해 검증 과정을 수행 하였다. 검증 결과 표준오차가 모든 운동에서 +5% 이내로 나타났다. 제안된 에너지 소비 예측 알고리즘의 정확성을 검증하기 위해 측정된 데이터에서 연령별(40대 이상 5명, 20~30대 5명) 무작위 데이터(random data)간 비교를 실시하였다. 비교 검증 결과 오차 ± 1 를 나타내 제안 에너지소비 예측 알고리즘은 정확성이 매우 높은 것을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서 제안한 에너지소비량 예측 알고리즘 적용은 아주 적절한 것으로 판단된다. 또한 구현된 알고리즘은 에어비트 시스템과 같은 에너지 소비량 예측을 위한 휴대용 측정 장비와 무선 건강 모니터 기기들에 새로운 적용 가능성을 제시할 것이며, 심박수와 운동지수 측정이 가능한 휴대용 기기들에 실시간 에너지 소비량 측정 및 이를 계산할 수 있는 본 제안 알고리즘을 이용할 경우 맞춤형 운동 계획을 세우는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] JO Hill, and JC Peters, “Environmental contributions to the obesity epidemic”, Science, Vol. 280, No. 5368, pp.1371-4, 1998.
- [2] RR Pate, M Pratt, SN Blair, WL Haskell, CA Macera, and C Bouchard, “Physical activity and public health: a recommendation from the Centers for Disease Control and Prevention and the American College of Sports Medicine”. Jama. Vol.273, No.5, pp.402-7, 1995.
- [3] L Meina, KH Byun, HJ Kim, J Kang, and YT Kim, “Patch type sensor module for estimating the energy expenditure”. Sensors, IEEE. 2009.
- [4] YT Kim, DG Park, J Kang, and KS Seo, “Development of patch type sensor module for real-time monitoring of heart rate and agility index”. Sensors, IEEE.2008.
- [5] S Bhardwaj, D-S Lee, S Mukhopadhyay, and W-Y Chung, “Ubiquitous healthcare data analysis and monitoring using multiple wireless sensors for elderly person”. Sensor & Transducer Journal, Vol.90, PP.87-99, 2008.
- [6] L Meina, and YT Kim, “Development of patch-type sensor module for wireless monitoring of heart rate and movement

- index”. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.173, No.1, pp.277-83, 2012.
- [7] CW Lin , YT Yang , JS Wang, and YC Yang, “A wearable sensor module with a neural-network-based activity classification algorithm for daily energy expenditure estimation”. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on.* vol. 16, no.5, pp. 991-998, 2012.
- [8] L Keytel , J Goedecke , T Noakes , H Hiiloskorpi , R Laukkanen, “Prediction of energy expenditure from heart rate monitoring during submaximal exercise”. *Journal of Sports Sciences.* vol. 23, no. 3, pp. 289-297, 2005.
- [9] DP Heil, and NJ Klippel, Validation of energy expenditure prediction algorithms in adolescents and teens using the Actical activity monitor. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Vol.35, No.5, pp. S285, 2003.
- [10] DR Bouchard, and F Trudeau, “Estimation of energy expenditure in a work environment : comparison of accelerometry and oxygen consumption/heart rate regression”. *Taylor & Francis*, vol. 51, no. 5, pp. 663-670, 2008.
- [11] JS Wang, CW Lin, YT Yang, C, TP Kao, WH Wang, and YS Chen, “A PACE sensor system with machine learning-based energy expenditure regression algorithm”. *Lecture Note in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg*, vol. 6840, pp. 529-536, 2011.

- [12] F Xiao, YM Chen, M Yuchi, and MY Ding, "Heart rate prediction model based on physical activities using evolutionary neural network", In Genetic and Evolutionary Computing, Shenzhen, China, pp. 198-201, Dec. 13-15, 2010.
- [13] M Yuchi, and J Jo, "Heart rate prediction based on physical activity using feedforward neural network", In Convergence and Hybrid Information Technology, pp.335-359, Dec. 15-18, 2009.
- [14] JL Seale, WV Rumpler, JM Conway, and CW Miles, "Comparision of double labeled water, intake-balance, and direct-and indirect-calorimetry methods for measuring energy expenditure in adult men", Am. J. of Clin. Nutr., vol. 52, pp. 66-71, 1990
- [15] BK Yoon, JW Kim, and DY Kim, "Historical Development of Nutrient and Calorimetry and Expired Gas Analysis Indirect Calorimetry", Journal of Life Science., vol. 20. No. 8. pp. 1159~1165, 2010
- [16] H Kumahara, Y Schutz, and H Tanaka, "The use of uniaxial accelerometry for the assessment of physical-activity-related energy expenditure: a validation study against whole-body indirect calorimetry", Br. J. Nutr., vol. 91, pp. 235-243, 2004
- [17] DC Simonson and RA DeFronzo, "Indirect calorimetry : methodological and interpretative problems", AJP - Endocrinology and Metabolism, vol. 258, pp. 339-412, 1990
- [18] A Wixted, D Thiel, D James, A Hahn, C Gore, and D Pyne, "Signal processing for estimating energy expenditure of elite

- athletes using triaxial accelerometers”, IEEE Sens., pp. 798-801, Oct. 2005
- [19] <http://www.theactigraph.com>
- [20] <http://www.fitdo.comtlife.com>
- [21] VL Hood, MH Granat, DJ Maxwell, and JP Hasler, " A new method of using heart rate to represent energy expenditure : The total heart beat index", Arch. Phys. Med. Rehabil., vol. 83, pp. 1266-73, 2002
- [22] RB Bradfield, PB Huntzicker, and GJ Fuehan, " Simultaneous comparison of respirometer and heart-rate telemetry techniques as measures of human energy expenditure", Am. J. Clin. Nutr., vol. 22, no. 6, pp. 696-700, 1969
- [23] PS Freedson, E Melanson, and J Sirard, "Calibration of the Computer Science and Applications", Inc. accelerometer. Medicine and science in sports and exercise, Vol. 30, No.5, pp.777-81, 1998.
- [24] AM Swartz, SJ Strath, Jr DR Bassett, WL O'Brien, GA King, and BE Ainsworth, "Estimation of energy expenditure using CSA accelerometers at hip and wrist sites", Medicine and science in sports and exercise, Vol. 32(9 Suppl), pp.S450-6, 2000.
- [25] SE Crouter, JR Churilla, and Jr DR Bassett. "Estimating

- energy expenditure using accelerometers”, European journal of applied physiology, Vol. 98, Vol.6 pp.601-12, 2006.
- [26] CB Liden, M Wolowicz, J Stivoric, and A Teller, “Characterization and implications of the sensors incorporated into the SenseWear armband for energy expenditure and activity detection”, Bodymedia Inc. White Papers : 1-7, 2002
- [27] JM Jakicic, M Marcus, KI Gallagher, C Randal, E Thomas, FL Goss, and RJ Robertson, “Evaluation of the SenseWear Pro Armband to assess energy expenditure during exercise”, Med. Sci. Sports Exerc., vol. 36, no. 5, pp. 897-904, 2004
- [28] G Stefano, AJM Harro, VD Gertjan, “Validity of the doubly labeled water method for estimating CO₂ production in mice under different nutritional conditions”, Am J Physiol Endocrinol Metab 305 : E317 - E324, 2013.
- [29] SM Ceesay, AM Prentice, KC Day, PR Murgatroyd, GR Goldberg, and W Scott, “The use of heart rate monitoring in the estimation of energy expenditure: a validation study using indirect whole-body calorimetry”. British Journal of Nutrition, Vol. 61, No.02, pp.175-86, 1989.
- [30] KL Rennie, SJ Hennings, J Mitchell, and NJ Wareham. “Estimating energy expenditure by heart-rate monitoring

- without individual calibration". *Medicine and science in sports and exercise*, Vol. 33, No.6, pp.939-45, 2001.
- [31] H Hiilloskorpi, M Fogelholm, R Laukkanen, M Pasanen, P Oja, and A Mänttari, "Factors affecting the relation between heart rate and energy expenditure during exercise", *International journal of sports medicine*, Vol. 20, No.07, pp.438-43, 1999.
- [32] LR Keytel, JH Goedecke, TD Noakes, H Hiilloskorpi, R Laukkanen, L van der Merwe, EV Lambert, "Prediction of energy expenditure from heart rate monitoring during submaximal exercise", *Journal of Sports Sciences*, Vol. 23, Issue 3, 2005
- [33] S Brage, N Brage, PW Franks, U Ekelund, M-Y Wong, and LB Andersen, "Branched equation modeling of simultaneous accelerometry and heart rate monitoring improves estimate of directly measured physical activity energy expenditure", *Journal of Applied Physiology*, Vol. 96, No.1, pp.343-51, 2004.
- [34] KH Kang, and YT Kim, "Energy Expenditure Prediction Algorithm Based on Correlation Analysis of Exercise Indexes", *Information Science and Applications (ICISA)*, 2014 International Conference on; IEEE, 2014.
- [35] S Brage, N Brage, P Franks, U Ekelund, and N Wareham,

- “Reliability and validity of the combined heart rate and movement sensor Actiheart”, *European journal of clinical nutrition*, Vol.59, No.4, pp. 561-70, 2005.
- [36] SJ Strath, Jr DR Bassett, DL Thompson, and AM Swartz, “Validity of the simultaneous heart rate-motion sensor technique for measuring energy expenditure”, *Medicine and science in sports and exercise*, Vol. 34, No.5, pp. 888-94, 2002.
- [37] K Rennie, T Rowsell, J S ebb, D Holburn, and N Wareham. “A combined heart rate and movement sensor: proof of concept and preliminary testing study”, *European journal of clinical nutrition*, Vol. 54, No.5, pp. 409-14, 2000.
- [38] J Lee, and Y Huang, ITRI ZBnode : A Zigbee/IEEE 802.15.4 platform for wireless sensors networks, in : *IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 1462-1467, 2006.
- [39] O Vainio, and SJ Ovaska, “Noice reduction in zero crossing detection by predictive digital filtering”, *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol.42, pp. 58-62, 1995.
- [40] *Medicine ACoS. ACSM’s guidelines for exercise testing and prescription*: Lippincott Williams & Wilkins; 2013.
- [41] C Hausswirth, and A Bigard, “The Cosmed K4 telemetry system as an accurate device for oxygen uptake

- measurements during exercise”, *International Journal of Sports Medicine*, Vol. 28, No. 06, pp. 449-53, 1997.
- [42] S Romero-Arenas, AJ Blazevich, M Martínez -Pascual, J Pérez-Gómez, AJ Luque, and FJ López-Román, “Effects of high-resistance circuit training in an elderly population”, *Experimental gerontology*, Vol.48, No.3, pp. 334-40, 2013.
- [43] H Kaikkonen, M Yrjämä, E Siljander, P Byman, and R Laukkanen, “The effect of heart rate controlled low resistance circuit weight training and endurance training on maximal aerobic power in sedentary adults”, *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, Vol. 10, No.4 , pp. 211-5, 2000.
- [44] GR Hunter, CJ Wetzstein, DA Fields, A Brown, and M. M Bamman, “Resistance training increases total energy expenditure and free-living physical activity in older adults”, *J. Appl. Physiol.* vol. 89, pp. 977-984, 2000.
- [45] K Kukkonen-Harjula , R Laukkanen, and I Vuori, “Effects of walking training on health-related fitness in healthy middle-aged adults—a randomized controlled study”, *Scand J Med Sci Sports*, vol. 10 , pp. 236-42, 1998
- [46] LR Gettman, P Ward, and RD Hagan, “A comparison of combined running and weight training with circuit weight training”, *Med. Sci. Sports Exerc.* vol. 14, pp. 229-234, 1982.
- [47] JH Wilmore , RB Parr, and P Ward, “Energy cost of circuit

- weight training”, *Med Sci Sports*, vol. 10 , pp. 75-8, 1978.
- [48] BF Hurley, DR Seals, and AA Ehsani, “Effects of high-intensity strength training on cardiovascular function”, *Med Sci Sports Exerc* . vol.16, pp. 483-8, 1984.
- [49] D Verrill, E Shoup, G McElveen, K Witt, and D Bergey, “Resistive exercise training in cardiac patients”, *Recommendations*.
- [50] MJ Norusis, *SPSS advanced statistics user’s guide: SPSS Chicago*; 1990.
- [51] S Tanachaiwiwat , A Helmy, “Correlation analysis for alleviating effects of inserted data in wireless sensor networks. *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*”, *MobiQuitous 2005 The Second Annual International Conference on: IEEE*, 2005.
- [52] N Chen , XS Chen, B Xiong, and HW Lu, “An anomaly detection and analysis method for network traffic based on correlation coefficient matrix”, *Scalable Computing and Communications; Eighth International Conference on Embedded Computing, 2009 SCALCOM-EMBEDDEDCOM’09 International Conference on: IEEE* ,2009:
- [53] RL Prentice, and LA Gloeckler, “Regression analysis of

- grouped survival data with application to breast cancer data”,
Biometrics. pp. 57-67, 1978.
- [54] M Tranmer, and M Elliot, “Multiple linear regression”, The
Cathie Marsh Centre for Census and Survey Research
(CCSR), 2008.
- [55] S Romero-Arenas, AJ Blazevich, M Martínez -Pascual, J
Pérez-Gómez, AJ Luque, and FJ López-Román, “Effects of
high-resistance circuit training in an elderly population”,
Experimental gerontology, Vol.48, No.3, pp. 334-40, 2013.
- [56] H Kaikkonen, M Yrjämä, E Siljander, P Byman, and R
Laukkanen, “The effect of heart rate controlled low
resistance circuit weight training and endurance training on
maximal aerobic power in sedentary adults”, Scandinavian
journal of medicine & science in sports, Vol. 10, No.4 , pp.
211-5, 2000.

List of Publications

1. Journal Paper

- 1) 강경호, “무산소운동의 에너지소비량을 추정하기 위해 결합된 심박수와 운동지수를 이용한 예측 알고리즘.”, 한국지식정보기술학회 저널(JKITS), vol. 10, no. 2, pp. 261-269, 2015.

2. Patent

- 1) 출원구분 : 특허출원
- 2) 출원코드 : 4-1999-026827-9
- 3) 발명명칭 : (국문)보안토큰을 이용한 인증 방법 및 인증 시스템
(영문)Authentication method and Authentication
System Using Secure Token
- 4) 발명인 : 강경호 , 박승배

3. Conference Paper

- 1) **Kyeung Ho Kang**, Li Meina, Wang Keun Oh and Youn Tae Kim, “Portable system for measuring energy expenditure in free-living adults”, IEEE AMA Conference, 2011.
- 2) Li Meina, **Kyeung Ho Kang** and Youn Tae Kim, “Monitoring Energy Cost Using a Wireless Patch Type Sensor Module with Embedded Algorithm”, IEEE Sensors Application Symposium(SAS), 2012.
- 3) **Kyeung Ho Kang** and Youn Tae Kim, “Energy Expenditure Prediction Algorithm based on correlation analysis of exercise indexes.”, IEEE International Conference on Information Science & Application(ICISA), 2014.

요약

실시간 생체정보 측정을 통한 회귀분석 기반 에너지 소비 예측알고리즘

강경호

지도교수 : 김윤태 교수, Ph. D.

조선대학교 대학원 IT융합학과

최근 헬스 케어는 중요한 것으로 인식되고 있기 때문에 적절한 운동량에 대한 정확한 정보가 필요하다. 따라서, 만약 알고리즘이 실시간 에너지를 소비를 예측할 수 있고 휴대용 장치에 사용될 수 있다면 운동선수와 일반인, 그리고 환자들이 개인적인 운동 계획을 수립하는데 도움을 줄 수 있다. 신체 활동은 에너지를 소비를 정확하게 예측하기 위해 평가되어야 한다. 심박수와 운동 지수는 일반적으로 에너지를 소비를 측정하기 위해 사용된다.

본 논문은 심박수와 운동 지수를 결합하여 선행 에너지 소비 예측 연구들의 단점들을 해결하기 위해 여러 운동에 적용하는 새로운 에너지 소비 예측 알고리즘을 제안한다. 총 53명(남자 43, 여자 10명)의 피험자들이 이 연구에 모집되었다. 참가자들은 무선

부착형 센서(AIRBEAT)와 무선 가스 분석기(K4b2)를 사용하였다. AIRBEAT는 센서 보드, 러버보드, 그리고 통신모듈로 구성되었다. 센서는 심박수, 운동지수, 습도, 온도 등 신체활동 데이터를 측정하기 위하여 피험자들의 가슴에 부착하였다. 이 시스템은 심박수와 운동지수 측정에만 적용되었으며, 지금까지 에너지소비를 예측할 수 있는 알고리즘 개발이 제한적이었다.

본 논문에서 제안한 에너지 소비 예측 알고리즘은 무선 가스분석기의 실제 신체활동 에너지 소비와 비교해서 $\pm 5\%$ 이내의 오차율을 나타내어 정확성이 매우 높은 것을 알 수 있다. 에너지 소비 예측을 위해 개발된 알고리즘은 모든 운동에 통합적으로 적용되어 AIRBEAT 시스템 과 무선 헬스케어 모니터 장치와 같은 휴대용 심박수 측정 장치를 위한 새로운 응용분야를 제시할 것으로 기대된다.

감사의 글

어느덧 시간이 흘러 본 논문이 결실을 맺기까지 논문지도에 힘써 주신 김윤태 교수님께 감사드리고 심사를 맡아주신 김정화 교수님, 반성범 교수님, 오순수 교수님, 그리고 멀리서 심사를 위해 걸음을 마다하지 않으신 한국전자통신연구원(ETRI) 형창희 책임연구원님에게 깊은 감사를 드립니다. 또한 저를 위해 항상 걱정해 주시던 윤종록 교수님, 배상현 교수님과 동신대 허기택 교수님에게도 깊은 감사를 드립니다. 힘겨움을 함께 해주셨던 박사 과정의 김익현, 이지환, 정민주, 박건호, 최아영 그리고 석사과정의 정재효, 연구에 힘들어도 실험에 적극 참여해준 우리 모든 원생들에게 고마움을 전합니다.

물심양면으로 도와준 (주)신비테크의 박승배 사장님과 초당대학교 김기현 교수님에게도 감사의 뜻을 전합니다. 더불어 살아가는 친우들과 우리 동심회 멤버들에게도 고마움을 전합니다.

사랑하는 가족이 있었기에 논문을 완성할 수 있었습니다. 4학기 박사과정 등록금을 납부해 준 셋째누나 강영숙, 정신적으로 물심양면 용기를 심어준 큰 누나 강영란, 형님, 그 외 누나 동생들과 곁에서 묵묵히 저를 믿고 지켜봐 주던 사랑하는 아내 유미영 선생에게 깊은 감사를 드립니다. 또한 자랑스러운 아빠의 모습을 곱게 잘 자라준 사랑하는 아들 강승수, 딸 강다원에게 보여줄 수 있어 한없이 기쁩니다.

이 세상에서 제일 저를 사랑해주셨던 지난해 소천하신 보고 싶은 어머님에게 이 논문을 바칩니다. 어머님, 사랑합니다.

2015년 4월 U-Healthcare 연구실에서

강 경 호