

군사용 착용로봇의 동작성능 측정을 위한 심박수 활용방안 연구

A Study on the Utilization of Heart Rate for Operation Performance Measuring of Military Exoskeleton

김현석^{1,2,#}, 김진오¹
Hyeon Seok Kim^{1,2,#} and Jin Oh Kim¹

¹ 광운대학교 대학원 방위사업학과 (Department of Defense Acquisition Program, Graduate School, Kwangwoon University)
² 국방과학연구소 제5기술연구본부 (The 5th R&D Institute, Agency for Defense Development)
Corresponding Author / E-mail: khstank@add.re.kr, TEL: +82-42-821-0766
ORCID: 0000-0002-5101-888X

KEYWORDS: Military exoskeleton (군사용 착용로봇), Metabolic cost (운동대사 비용), HRI (인간-로봇 상호작용), Motion intent synchronize (동작의도 동기화)

To solve the limitation of motion synchronization measurement method applied to medical rehabilitation in most laboratories, a new method to measure the change of metabolic costs with or without a military exoskeleton on an external field environment has been proposed. The relationship between oxygen consumption and heart rate in male subjects aged 20-30 years is analyzed and an equation that estimates oxygen consumption by heart rate was derived using a multiple regression analysis. An evaluation model which verifies the effectiveness of military exoskeleton was established for specific military scenarios utilizing exoskeleton. As a result, the proposed method is simple and effective for quantitative evaluation of exoskeleton system and can be a substitute of the evaluation methods for the metabolic costs or movement synchronization between human and exoskeleton.

Manuscript received: October 29, 2018 / Revised: December 1, 2018 / Accepted: December 04, 2018

NOMENCLATURE

$\dot{V}O_2$ = Oxygen Consumption (ml/min)
 R = Respiratory Exchange Ratio
 HR = Heart Rate (bpm)
 W = Weight (kg)
 ϵ = Error term

1. 서론

주로 의료 재활용으로 개발되고 활용되던 착용로봇은 관련 요소기술에 발전에 의해 군사용 무기체제로 변환하는 단계에 있으며, 작전반경의 확대와 개별 전투원의 전투하중이 증가하고 있는

현대 전장에서 그 필요성이 증대되고 있다. 외부의 부하를 지지하거나 상쇄하여 착용자의 동작을 지원하는 착용로봇은 인간과 로봇의 상호작용(HRI, Human-Robot Interaction)이 중요하며, 착용자의 동작의도를 파악하여 이를 동기화하는 것이 핵심 성능지표이다. 가장 이상적인 경우에 착용자는 맨몸 동작과 같이 불편함을 느끼지 않아야 하나, 동기화되지 않은 착용로봇은 체결부 압력과 운동부하가 발생하여 불편함을 초래하고 에너지 소모 및 근피로도가 증가하게 되며 동적 안정성을 저해한다. 즉 인간의 운동의도 감지 기술과 인체와 로봇의 연동 제어기술은 착용로봇의 핵심기술이며, 물리 센서와 근전도(EMG) 등의 생체신호를 복합한 동작의도 인식기술이 계속 발전하고 있다.

착용로봇의 동작의도 동기화 성능을 평가하기 위하여 다양한 방법의 연구가 수행되었다. Gwak,¹ Marco²에 의하면 동작의도 생성모듈을 이용한 구동모터의 구동 토크 량을 측정하거나, 소프트 실리콘 압력센서를 이용한 인간 로봇 상호작용의 분산도를 측

Table 1 Level for determination of the metabolic rate

Level	Method	Accuracy	Inspection of the work place
1 Screening	1A: Classification according to occupation	Rough information Very great risk of error	Not necessary, but information needed on technical equipment, work organization
	1B: Classification according to activity		
2 Observation	2A: Group assessment tables	High error risk Accuracy: ±20%	Time and motion study necessary
	2B: Tables for specific activities		
3 Analysis	Heart rate measurement under defined conditions	Medium error risk Accuracy: ±10%	Study required to determine a representative period
4 Expertise	4A: Measurement of oxygen consumption	Errors within the limits of the accuracy of the measurement or of the time and motion study Accuracy: ±5%	Time and motion Study necessary
	4B: Doubly labeled water method		Inspection of work place not necessary, but leisure activities must be evaluated.
	4C: Direct calorimetry		Inspection or work place not necessary

정하는 등 물리적 센서를 이용하여 동기화 성능을 평가하였으며, Yun,³ Jang⁴은 근육 피로누적에 따라 고주파 대역의 근섬유 활용이 감소하고 저주파 대역의 근섬유 활동이 증가하는 현상에 기인하여 착용 전후 근전도 신호의 MPF (Mean Power Frequency)를 이용한 근피로도를 측정하거나, 피시험자 해당 근육의 최대 수축 대비 착용 전후의 EMG 신호 제곱평균제곱근(RMS)을 비교하여 동기화 여부를 판단하였다. 또한 Sawicki⁵등은 착용 전후 호흡가스 측정 및 산소소모량(VO_2) 분석을 통해 운동대사비용(Metabolic Cost) 변화를 측정하여 착용로봇의 동기화 성능을 평가하는 모델을 제시하였으며, Malcolm⁶등은 이 모델을 이용하여 약 $6 \pm 2\%$ 효율의 발바닥 굴곡을 보조하는 간단한 공압식 착용로봇을 제시하였다.

물리적 힘센서를 이용한 동기화 측정방법은 주로 의료 재활용 등 간단한 착용로봇을 대상으로 실험실 내에서 해당 관절 및 근육에 대한 동기화 효율을 측정하는 방법으로 시스템 전체의 동기화 측정에는 제한되고, 인체를 대신할 별도의 더미(Dummy)와 센서 등이 필요하다. EMG 신호를 이용한 동기화 측정은 마찬가지로 해당 근육만 대상으로 하여 전체 동기화 지표로의 사용이 제한되고, 땀에 취약하고 시간 변화에 따른 근육피로 누적 시 잡음(Noise)에 의한 오차 가능성이 높아 신뢰도가 저하되는 단점이 있으며, 실험실 내 측정방법으로 고려된다. 반면 착용 전후(With/Without) 호흡가스 분석을 통한 산소소모량을 측정 및 비교하는 방법은 “불편하면 에너지 소모가 증가한다.”는 논리에 따라 직관적이고 이해가 쉬우며, 적은 에너지를 소모한다는 착용로봇의 목적에도 부합하므로 범용 지표로 사용되고 있다. 그러나 고가의 호흡가스 분석 장치가 필요하고, 사전 준비 소요가 과다하며, 측정 장비 자체가 부하로 작용하여 피로가 누적될 수 있다. 무엇보다 측정장비의 통신 거리 및 군사용 착용로봇의 활용 범위 등을 고려시 실험실 외부 환경에서 착용자의 호흡가스를 측정하기는 쉽지 않다. 20여 중 이상의 군사용 착용로봇 평가 경험을 기초로 용어정의, 개발 고려요소, 성능척도 등에 대해 기술한 미 육군연구소(ARL, Army Research Laboratory)⁷보고서에는 야전(Field) 환경에서의 호흡가스 분석기 등의 부가장비 착용은 병사의 동작을

방해하고, 부하로 작용되며, 통신에 제한되어 측정 신뢰도가 저하된다고 지적하였다.

따라서 군사용 착용로봇은 기존 동기화 성능 평가 지표를 적용하기는 한계가 있으며, 야전 환경에서 적용 가능한 운동대사량(Metabolic Cost) 측정을 위한 대체 수단의 연구가 필요하였다.

2. 동작성능 측정지표

2.1 운동대사량 측정방법

국제표준화기구(ISO, International Organization for Standardization)⁸는 화학물질을 기계 및 열에너지로 변환시키는 운동대사량(Metabolic Cost) 측정에 대한 다양한 방법을 Table 1과 같이 제시하고 있는데 직접측정 방식과 이중표식수법 및 산소소모량 측정 방법이 비교적 정확한 반면 심박수(Heart Rate)는 ±10%의 정확성으로 비교적 간단한 측정이 가능한 특성이 있다.

산소소모량과 호흡교환비율 측정을 통해 에너지 소모량을 측정하는 방법은 1949년 Weir⁹에 의해 공식화 되었는데 이를 Weir의 공식이라고 한다.

$$E(\text{kcal/min}) = VO_2(\text{mL/min}) (3.9 + 1.1 R) \quad (1)$$

James¹⁰에 의하면 가스교환에 의한 산소소모량을 측정하는 간접방식은 직접측정방식과 유의미한 차이가 없음을 확인하였다. 따라서 현재 운동의학계에서는 산소소모량 자체를 운동대사량으로 범용 사용하고 있다. 운동생리학회¹¹에 의하면 운동 시작 시 빠르게 산소를 섭취하기 시작하여 1 - 4분 사이에 신체 요구에 따른 반응의 균형인 항정상태(Steady State)에 도달하게 되고 운동 부하가 동일할 경우 일정한 상태를 유지하게 되는데 이 시점의 분당 산소 소모량(VO_2 , mL/min)이 운동대사량의 대표 측정지표이다. 반면 복잡한 부가 장비가 필요하므로 실험실 외부에서 군사용 착용로봇을 착용한 병사를 대상으로 측정하는 데는 상당한 제한이 있다.

Table 2 The physical characteristics of the subject

Sex (N)	Age	Height (cm)	Weight (kg)	BMI	
Male	Mean	28.6	176.5	79.9	25.6
(10)	SD	4.86	4.86	13.10	3.34

따라서 산소소모량을 대체할 수 있는 수단으로 간단하게 측정 가능한 또 다른 생체신호인 심박수(Heart Rate)에 주목하였다. 최근 상용화된 손목 착용형 스마트 기기에서도 심박수 측정이 가능하므로 야전에서 간단한 사용이 가능하다. 심박수는 운동시 산소 운반 및 이산화탄소 배출을 위해 증가하게 되고, 이론적으로 산소소모량과 정비례의 관계를 나타낸다. 산소소모량과 심박수의 비례관계는 문헌을 통해 확인할 수 있으나, 군사용 착용로봇에 적용하기 위해서는 실험을 통해 관계성을 확인하고자 하였다.

2.2 실험 모형

군사용 착용로봇은 야전의 병사를 대상으로 한다는 특성을 고려하여 20 - 30대 다양한 체중 분포의 남성 10명을 실험대상으로 선정하였다.

피실험자는 각각 트레드밀을 사용하여 4 km/h, 6 km/h 보행 및 10 km/h 달리기 후 4 km/h보행으로 회복기를 거치는 각각 5분간의 프로토콜을 연속하여 수행하면서 Cosmed사(Italy)의 K5를 이용하여 10초 단위로 호흡가스 분석과 심박수를 측정하였다.

2.3 실험 결과

실험을 위해 피실험자는 가슴에 심박수측정기를 부착하고 호흡 마스크를 착용한 후 측정기를 등에 부착하기 위한 별도의 하네스를 착용해야 하는 등 야전환경에서 병사의 동작을 방해할 수 있다고 보였으며, 실험 전 측정기 교정(Calibration)을 위한 준비소요가 과다하고, 피실험자의 호흡교환비가 안정될 때까지 기다려야 하는 등 20분 실험을 위해서 약 30 - 40분의 시간이 소요되었다. 호흡가스 분석을 통한 산소소모량 측정은 비교적 정확한 운동대사 생체 데이터를 확인할 수 있는 반면 실험실 외부환경에서 군용 장비를 착용하고 비교적 격렬한 활동이 필요한 병사를 대상으로 신속한 데이터를 확인하기에는 제한이 있을 것으로 판단된다.

운동부하 변화에 따른 산소소모량과 심박수의 변화를 확인하기 위하여 임의의 피실험자 1명에 대한 추세를 확인한 결과 운동부하가 증가 또는 감소함에 따라 산소소모량과 심박수는 동일한 패턴으로 변화하였다. 운동부하가 변하지 않는 각각의 구간에서는 1 - 2분 사이에 항정상태에 도달하여 일정한 상태를 유지하였으며, 이는 운동능력이 뛰어난 젊은 층에서 좀 더 분명한 특성이 확인되었다. Fig. 2와 같이 산소소모량 변화에 앞서 심박수가 약 1분 내외의 먼저 증가 또는 감소하는 현상을 확인할 수 있는데 이는 운동부하의 변화에 따라 외부의 산소를 흡입하기에 앞서 인체 내부의 산소를 먼저 공급하기 위하여 심박수가 변하는 현상으로 추정되며, 회복기를 거치면서 전체적인 변화 추세는 동일하게 된다.



Fig. 1 Experimental environment and progress

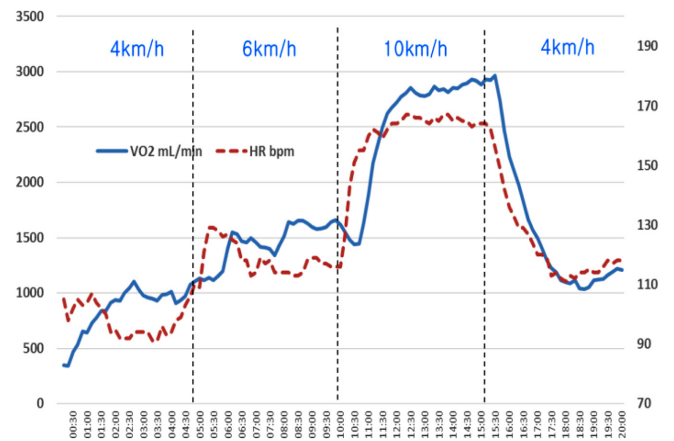


Fig. 2 Comparison of heart rate change versus oxygen consumption

산소소모량에 비해 운동부하에 먼저 반응하는 심박수는 향후 추가적인 연구를 통해 착용로봇의 제어에도 활용할 수 있을 것으로 보인다.

심박수가 산소소모량과 일치하는 시점을 확인하기 위해서는 항정상태 도달시간 및 심박수와 산소소모량의 동기화 시간 등을 고려시 동일한 부하로 최소 3분 이상 지속적인 운동이 필요하며, 총 산소소모량과 심박수를 일치하기 위해서는 반드시 회복기를 거쳐야 할 것으로 판단된다.

2.4 다중 회귀분석을 통한 관계식 도출

군사용 착용로봇이라는 운용 예상 인원의 특성을 고려하여 병사 평균연령인 20 - 30대 남성을 대상으로 운동 시간, 운동량 및 거리를 고정하여 동일한 조건으로 실험하였다. 따라서 고정변수를 제외한 산소소모량, 심박수 및 체중을 가변요소로 한정하여 관계식을 도출하고자 하였다.

먼저 피실험자 10명에 대해 10초 단위로 측정된 산소소모량과 심박수의 관계는 일정한 분포를 유지하면서 신뢰도(R²) 0.73의 관계성이 확인되었으며, 산소소모량과 체중과의 관계는 특정한 관계성을 확인하기는 어려웠으나, 고체중의 피실험자가 대체로 최대 산소호흡량의 수치가 높은 경향을 보였다.

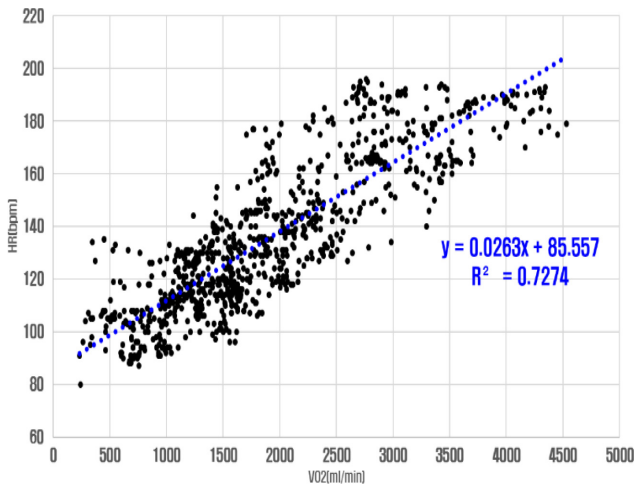


Fig. 3 Oxygen consumption and heart rate distribution

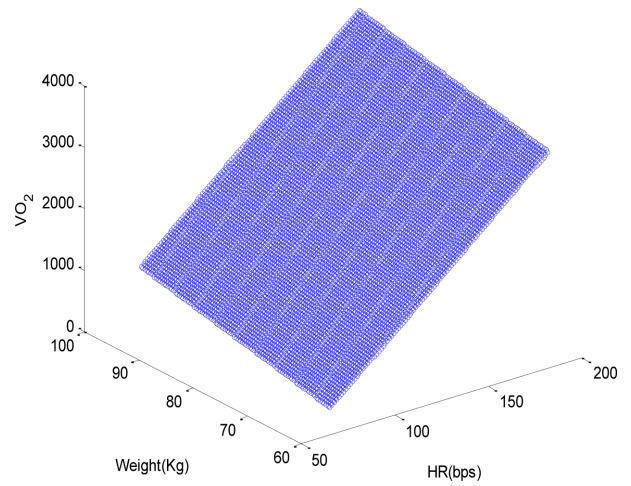


Fig. 5 Multiple regression analysis result

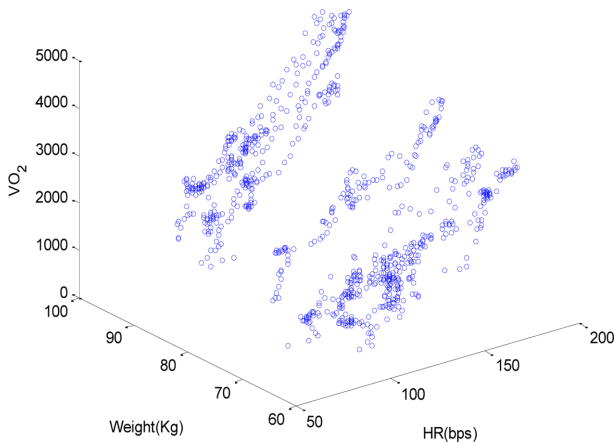


Fig. 4 Oxygen consumption, heart rate and weight distribution

오차항(ϵ)의 값을 줄이고 분석 내용의 향상을 위해 산소소모량과 심박수 외에 추가 독립변수인 체중을 추가하여 다중 선형회귀 분석을 수행하였다.

Matlab을 이용하여 3개 변수를 통한 관계를 설정하기 위해 다중 선형회귀분석의 모델을 다음과 같이 선정하였다.

$$y = \alpha + \beta x_1 + \gamma x_2 + \epsilon$$

$$VO_2(\text{mL}/\text{min}) = \alpha + \beta \cdot HR(\text{bpm}) + \gamma \cdot W(\text{kg}) + \epsilon \quad (2)$$

이 회귀분석 모델의 각 계수는 Chapra¹²에서 제시한 다음의 최소자승법(Least Square Method) 연산을 통해 구할 수 있다.

$$[\alpha, \beta, \gamma]^T = (Z^T \cdot Z)^{-1} Z^T y \quad (3)$$

여기서 계측 데이터 $Z = [1, HR(\text{bpm}), W(\text{Kg})]$, $Z \in R^{n \times 3}$ n은 획득한 데이터의 수로 오류를 제외한 2883이며, 이렇게 얻게 된 α, β, γ 는 각각 -3315.1, 26.5082 및 19.728이다. 이를 적용한 회귀분석 관계식 및 결과는 다음과 같다. 2차원의 선형 회귀분석은 “직선”

인 반면, 3차원 다중 선형 회귀분석은 “평면”으로 분석된다.

$$VO_2(\text{mL}/\text{min}) = 26.5082 HR(\text{bpm}) + 19.728 W(\text{kg}) - 3315.1 \quad (4)$$

회귀 관계식(4)는 결정계수(Coefficient of Determination) $r^2 = 0.81$, 표준오차 399.2271의 신뢰도를 보인다. 다만 이는 실험 대상으로 선정한 체중 65 - 100 kg의 20 - 30대 남성을 대상으로 한 결과이므로 이외의 인원을 대상으로 이 관계식을 적용하기는 제한된다. 그러나 우리 군에 복무 중인 병사의 나이와 체중을 고려 시 이 관계식을 활용하여 군사용 착용로봇의 측정지표로 사용하는 것에는 무리가 없을 것이다.

3. 심박수를 활용한 동작성능 평가모델

3.1 실험실 내

실험실 내부 환경은 군사용 착용로봇의 성능을 확인하기 위해 트레드밀을 이용하여 운동부하 및 시간을 조절할 수 있는 장점이 있다. 군사용 착용로봇 착용(With) 및 미착용(Without) 상태에서 각각 동일한 시간, 운동량의 트레드밀 걷기 및 뛰기를 수행하면서 휴대용 심박수 측정기를 통해 분당 심박수를 측정한다. 이후 항정 상태 도달시간 및 심박수와 산소소모량 동기화 시간을 고려하여 동일한 운동부하 마지막 1분의 심박수를 도출하고 이를 식(4)를 적용하여 산소소모량으로 변환한 후 착용로봇 미착용(Without) 상태 대비 착용(With) 상태의 운동대사량 비교를 통해 착용로봇의 성능지표로 활용할 수 있다. 운동부하 및 시간을 조절하기 힘든 계단오르기, 경사로 등반 등은 외부 환경과 동일한 방법으로 측정 및 평가한다.

3.2 실험실 외부 이전환경

야전에서 병사들이 특정 군사임무를 수행하는 과정은 운동부

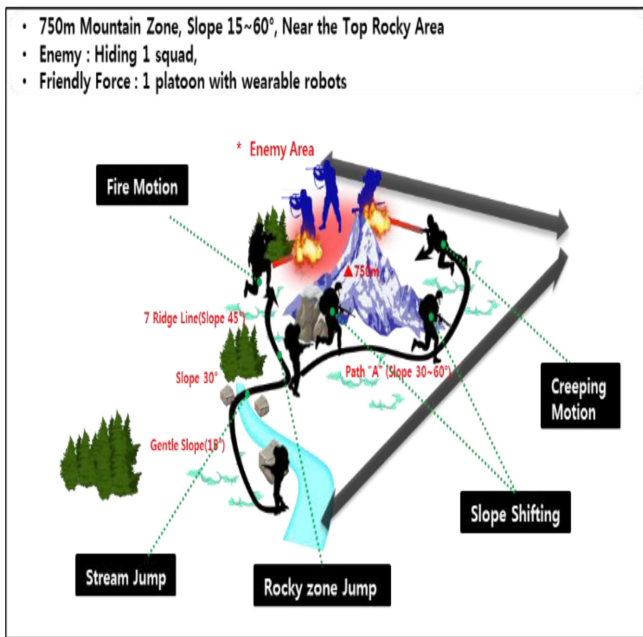


Fig. 6 Scenario where military exoskeleton operation is expected

Table 3 Assessment method application example

	Without Exo.	With Exo.
Avg. HR (bpm)	135	132
Weight (kg)	75	
Estimated avg. VO_2 (mL/min)	1743.107	1663.582
Time (min)	45	40
Total VO_2 (mL)	78439.82	66543.3
Metabolic rate	100	84.83

하량, 시간 등을 고정하기가 매우 어려우며, 다양한 동작과 활동으로 운동부하가 수시로 변한다. 따라서 임무수행 기간 중 평균 심박수와 산소소모량을 측정하여 임무수행시간을 곱해 총 산소소모량을 비교함으로써 운동대사량 감소 효율을 통해 성능지표로 활용할 수 있다.

각개전투 교장 또는 산악 수색정찰 코스 등 군사용 착용로봇의 운용이 예상되는 시나리오를 선정한 후에 먼저 군사용 착용로봇을 미착용(Without)한 상태에서 임무형 군장을 휴대하고 심박수 측정기를 부착한 후 해당 임무를 1회 수행하며, 이때 심박수 측정기의 시작 및 종료시간을 확인한다. 충분한 휴식 후에 로봇을 착용(With)한 상태에서 동일한 군장을 휴대하고 동일한 임무를 한번 더 수행하게 하며, 마찬가지로 심박수 측정기의 시작 및 종료시간을 일치시켜 심박수 및 임무수행 시간을 측정한다.

각각의 평균심박수에 대해 실험을 통해 도출한 식(4)로 평균 산소소모량을 추정한 후에 이를 임무수행시간을 곱하여 총 산소소모량으로 환산할 수 있으며, 군사용 착용로봇 착용 전후의 총 산소소모량을 비교하여 운동대사량 비교를 통해 착용로봇의 성능지표로 활용할 수 있다.

예를 들어 Table 3과 같이 야전에서 특정 임무 수행을 위해 특

정 병사가 임무수행에 필요한 장비를 휴대하고 착용로봇을 착용하지 않은 상태에서 평균 심박수 135로 45분간 해당 임무를 수행하였고, 동일한 병사가 군사용 착용로봇을 착용한 상태에서 평균 심박수 132로 40분간 해당 임무를 완수하였다고 가정하여 미착용 대비 군사용 착용로봇 착용시 평균 심박수가 3회 감소하였고 임무수행 시간이 5분 감소하였다면 실험을 통해 도출한 관계식과 상기 평가 모델을 적용하여 환산할 경우 약 15%의 운동대사량 감소효과가 있다고 판단할 수 있다.

4. 결론

과학기술이 무기체계 소요제기를 선도하는 선도형 핵심기술은 실제 운용 경험이나 시나리오가 없고 해당 기술의 군사적 목적이 분명하지 않기 때문에 개발 목표성능을 설정하기 어렵고 시험평가 기준을 수립하기 또한 쉽지 않다.

심박수를 활용한 동작성능 평가 방법은 야전 환경에서 간단하면서도 경제적으로 군사용 착용로봇의 동작의도 동기화 및 운동대사량 측정이 가능하여 기존 산소소모량 측정방법을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 착용로봇을 실제 적용하여 본 연구에 대한 검증을 통해 실효성을 입증할 필요가 있으며, 실험실 외부 환경에서 야전의 병사를 대상으로 유사한 실험을 통해 적용성을 추가 고찰한 후에 충분한 데이터가 축적된다면 군사용 착용로봇에 대한 군의 소요제기 시 정량적인 목표성능으로 사용될 수 있으며, 체계개발 간에는 시험평가 기준 설정 및 평가모델로 활용이 가능할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2017년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017S1A5B8060156).

REFERENCES

1. Gwak, K.-W., "Test Methods for Motion Intent Synchronization Performance of the Wearable Robots," Proc. of the KSME Conference, pp. 3073-3075, 2013.
2. De Rossi, S. M. M., Vitiello, N., Lenzi, T., Ronsse, R., Koopman, B., et al., "Sensing Pressure Distribution on a Lower-Limb Exoskeleton Physical Human-Machine Interface," Sensors, Vol. 11, No. 1, pp. 207-227, 2011.
3. Yun, D., Han, C., Ryu, D., Whang, S., and Han, J., "A Research of Performance Evaluation for Upper Limb Exoskeleton Robot," Proc. of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 869-870, 2012.
4. Jang, H.-Y., Han, C.-S., Kim, T.-S., Jang, J.-H., and Han, J.-S.,

- “Development of Wearable Robot for Elbow Motion Assistance of Elderly,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 141-146, 2008.
5. Sawicki, G. S. and Ferris, D. P., “Mechanics and Energetics of Level Walking with Powered Ankle Exoskeletons,” Journal of Experimental Biology, Vol. 211, No. 9, pp. 1402-1413, 2008.
 6. Malcolm, P., Derave, W., Galle, S., and De Clercq, D., “A Simple Exoskeleton that Assists Plantarflexion Can Reduce the Metabolic Cost of Human Walking,” Plos One, Vol. 8, No. 2, pp. 1-7, 2013.
 7. Crowell, H. P., Kanagaki, G. B., O'Donovan, M. P., Haynes, C. A., Park, J.-H., et al., “Methodologies for Evaluating the Effects of Physical Augmentation Technologies on Soldier Performance,” US Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground United States, 2018.
 8. ISO8996:2004, “Ergonomics of the Thermal Environment - Determination of Metabolic Rate,” 2004.
 9. Weir, J. D. V., “New Methods for Calculating Metabolic Rate with Special Reference to Protein Metabolism,” The Journal of Physiology, Vol. 109, Nos. 1-2, pp. 1-9, 1949.
 10. Seale, J. L. and Rumpler, W. V., “Synchronous Direct Gradient Layer and Indirect Room Calorimetry,” Journal of Applied Physiology, Vol. 83, No. 5, pp. 1775-1781, 1997.
 11. Korean Society of Exercise Physiology, “Exercise Physiology,” Hanmibook, 2015.
 12. Steven, C. C., “Applied Numerical Methods with Matlab: For Engineers and Scientists,” Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2007.



Hyeon Seok Kim

Principal Engineer in the 5th R&D institute of Agency for Defense Development. His research interests are Defenses Robots and HRI.

E-mail: khstank@add.re.kr



Jin Oh Kim

KwangWoon University's Division of Robotics. His research interests are Defenses Robots, Robot Design and HRI.

E-mail: jokim@kw.ac.kr