≪研究論文≫

Journal of the Human Engineering Society of Korea
Vol. 3 No. 1 June 1984

정적 자세에 있어서의 산소 흡입량과 맥박에 관한 연구

(A Research on Oxygen Uptake and Heart Rate in Static Working Postures)

林 鉉 教† 朴 景 洙†

As in dynamic muscular activity, to support one's body may be regarded as the static workload. An examination is made of the relationship between heart rate and oxygen uptake of three male graduate students in static working postures (sitting, squatting and standing).

T ough it has been believed that there exists a linear relationship between heart rate and oxygen uptake, this thesis shows that both have no relationship in the case of static postures, and that they may depend upon the characteristics of postures rather than the static workload. These results are discussed analytically.

The additivity between static body postures and holding up one's hands at his maximum height is tested. Compared with the sum of energy expenditure in balancing one's body and holding up hands, the net rate of energy expenditure in performing them simultaneously is equivalent.

In the case of static postures, the importance of the awareness of the characteristics and relevance of the measures is dicussed.

Ⅰ. 서 론

작업 중에 있어서 에너지 소비의 평가는 영양학적인 필요 에너지나 작업 부하의 평가라는 측면에서 매우 중요하다.

에너지 소비의 직접적인 추정은 배기 호흡량의 측정 및 분석 또는 산소 흡입량의 측정을 통해 이루어진다.

이제까지, 여러 가지 다른 강도의 운동에 있어서 산소 흡입량(oxygen uptake V_{O_2})과 맥박수(heart rate HR) 사이에는 선형 관계가 있다고 알려져 왔다(Scherrer 1967, Astrand and Rodahl 1970). 이 산소 흡입량과 맥박수는 쉽게 측정할 수 있으며 작업 수행에 따르는 에너지 소비량과 physical strain에 대한 정보를 제공하므로, 작업 부하에 대한 좋은 척도(measure)로 사용되어 왔다. 그림 1은 이들 사이의 관계를 나타낸다.

† 韓國科學技術院 産業工學科

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

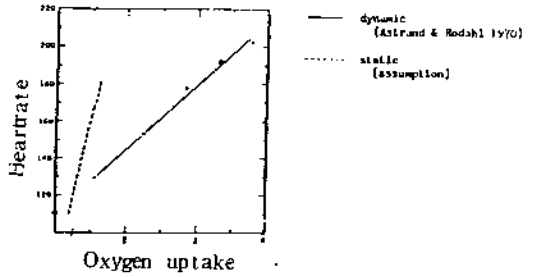

그림 1. 산소 흡입량과 맥박수의 관계

그런데 맥박수의 측정은 단순하며, 30초 측정시 기록에 따른 오차는 1～2%에 지나지 않는다(Docter et al. 1967)는 정확성의 장점 때문에, 많은 학자들은 에너지 소비와 작업 부하의 예측에 단일 척도로서 맥박수의 사용을 제안하였다(Berggren and Christensen 1950, Booyens and Hervey 1960, Malhotra 1963, Müller 1942).

한편 또 다른 사람들은 육체적인 기능을 더 중시하여 산소 흡입량의 사용을 주장하였다(Durnin and Edwards 1955, Ford and Hellerstein 1959, Malhotra 1962, Sartorelli 1956).

그러나, 이 연구들의 대부분은 주로 하나의 척도에 대해서만 관심이 있었으므로, 더 좋은 예측 방법에 대해서는 논란의 여지가 있다.

근육 운동은 靜的 運動(static activity)과 動的 運動(dynamic activity)으로 구분된다(Monod 1972). 動的 作業이라 함은 비교적 큰 근육들이 율동적으로 수축하여 근육의 길이가 변화하는 작업을 의미하며(isotonic), 반면 靜的 作業이라 함은 筋肉의 길이 변화없이 근육 수축이 비교적 장시간 지속되는 것을 말한다(isometric). 최근의 연구에서는 작업을 할 때, 체중 자체도 작업 부하로 고려하기 시작하였다(Katch 1972, Kamon 1973, Datta et al. 1973). 인간이 자신의 신체의 균형을 유지한다는 것 자체가 에너지 소비를 필요로 하므로, 어떤 자세를 유지한다는 것도 이러한 점에서는 비교적 낮은 작업 부하라고 해석될 수 있다.

전술한 바와 같이, "운동의 여러가지 다른 강도에 있어서 산소 흡입량과 맥박수에는 선형 관계가 있다."는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 이러한 주장에는 작업 부하나 운동 강도(intensity)의 범위가 명시되어 있지 않다. 작업 부하의 범위의 명시없이 일반적으로 사실로 받아들여지기는 하지만, 실제로 알려진 증거는 보행, 주행 또는 사이클링 등의 動的 作業에 대한 것뿐이다. 그러므로 위와 같은 일반적인 명제는 부당한 것이다.

感者는 이러한 견해를 지적하였다. Sharkey(1965)는 靜的 作業에 있어서는 호흡 배기율(ventilation rate)과 산소 소비량(oxygen consumption)이 더 좋은 척도임을 주장하였고, Datta와 Ramanathan(1969)도 그것을 지지하였다. 또 Hansen과 Maggio(1960), Müller(1942), Sharkey et al.(1966)도 靜的 作業은 맥박수를 지나치게 증가시킴으로써 실제의 代謝率(metabolic rate)을 과대 추정하는 경향이 있다는 것을 지적하였다.

맥박수는 전체적이거나 국부적인 動的 筋肉 運動이나, 高溫에서의 靜的 筋肉 運動에, 또 情緒的인 스트레스에 민감하게 반응하여 증가한다. 動的 作業에 있어서 맥박수는 신체의 소비량과 선형 관계에 있지만, 周知한 바와 같이 모든 作業 强度에 대한 一般化는 그릇된 것일 수 있다. 따라서 靜的 筋肉 運動에서도 두 척도의 선형 관계가 유지되는가(특히 정적 자세의 경우-신체의 균형을 유지하는 것 자체를 작업 부하로 간주할 경우, 그 부하는 극히 낮다) 또 맥박수 하나만으로 인체의 생체 반응을 추정할 수 있는가 하는 의문이 제기된다.

한편 合同 作業(combined work)에 대해서도 많은 연구가 선행되었다.; 즉, hand ergometer에서 한 손은 動的 作業을, 다른 한 손은 靜的 作業을 수행하는 경우(Hellebrandt et al. 1956); 팔이 靜的 作業을 하는 경우의 사이클링(Hansen and Maggio 1960); 손이 靜的 作業을 하는 경우의 사이클링(Haissly et al. 1974, Wiley and Lind 1975, Kilbom and Brundin 1976); 손이 靜的 作業을 수행할 때의 보행(Lind and McNicol 1967); 손으로 당기는 靜的 作業을 할 때의 보행과 크랭킹(cranking)작업(Andrews 1966) 등이 그것이다.

合同 作業의 生理學的인 반응을 평가하는 데 있어서, "두 活動이 각각 독립적으로 수행될 때의 生理的 반응의 合이, 合同 作業의 生理的 반응과 같다"는 假說을 세울 수 있는데, 이것을 "에너지 소비의

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

加算性(additivity of energy expenditure)" 이라고 한다.

Andrews(1966)는 이 加算性이 成立되려면, 다음과 같은 두 가지 조건이 만족되어야 한다는 것을 지적하였다.

(1) 그 직무의 수행이 독립적이든 동시 합동 수행이든, 각 단순 직무(simple tasks)를 특성짓는 筋肉 運動의 행태가 불변이어야 한다.

(2) 두 단순 직무의 筋肉 運動 형태에 공통 요소가 없어야 한다.

이 논문은 靜的 作業 姿勢에서의 맥박수와 산소 흡입량에 중점을 두고 그 선형 관계의 유무를 검증하고자 하며, 각 척도의 효능도 실험적으로 비교하고자 한다. 또 靜的인 姿勢의 유지와 靜的인 손 위치의 유지 작업(手作業)에 대해 加算性이 存在하는가에 대해서도 밝히고자 한다.

Ⅱ. 실험 방법

1. 가정 사항

휴식 상태나 가벼운 강도의 작업에 대해서는 특히 온도나 정서 스트레스 및 精神 活動이 산소 흡입량과 맥박수에 영향을 미친다(Astrand and Rodahl 1970). 그러므로 이러한 영향이 극소화되어야 하는데, 실험의 준비가 체계적으로 random 하게 수행되고 실험 지속 시간도 짧으므로 이 목적을 달성하였다고 생각되었다.

따라서 이외의 요인은 일정하다고 가정하고, 변수 요인은 피실험자에 따른 요인(subject factor)과 姿勢 요인(postural factor) 및 반복 요인(replication factor)인 것으로 하였다.

2. 실험 진행

어떤 특정한 작업 부하에 대해 작업을 시작한지 3분 이상 경과한 후의 산소 흡입량과 맥박수는 呼氣性 소비(aerobic cost)로 인정되고(Astrand and Saltin 1961), 운동 후 산소 흡입량은 맥박수 보다 빨리 휴식 수준에 도달한다(Brouha 1967, Lythgoe and Pereria 1925). 그러므로 맥박수를 사용하여 피실험자가 휴식 수준에 도달하였는지를 확인하였다.

실험은 다섯 가지 자세를 4회씩 반복하도록 하되, 1회 시행에 다섯 자세를 모두 시행하도록 random 化 하였다. 그림 2에 그 자세를 표시하였는데, 자세의 표준화는 보는 바와 같다.

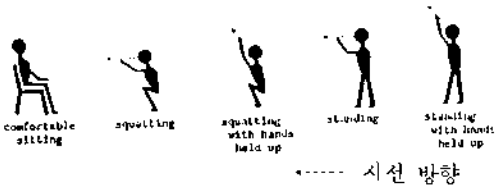

그림 2. 5가지 정적 자세의 모식도

모든 자세에 대해 산소 흡입량과 맥박수를 측정하였다. 각 자세에 대한 실험은 3분 30초간 계속되었는데, 산소 흡입량은 마지막 1분 30초간을 측정하였고 맥박수는 2분, 3분되는 시점에서 30초씩 측정하였다. 휴식은 15분 정도로, 각 자세로 실험하는 사이 사이에 휴식상태(안정 수준)를 확인하기 위하여 삽입되었다.

산소 흡입량은 MARK-Ⅲ spirometer를 이용하여 부피를 측정하고 그 결과를 chart recorder에 기록하였다. 맥박은 손가락에 부착된 전극으로부터 맥박 신호를 증폭시켜 그 수효를 세는 Pulse Rate Counter를 사용하였다.

측정을 하기 전에 각 피실험자마다 자세를 숙지시키고 산소 마스크에 대한 적응도 충분하도록 하여 실험 조건에 유리한 피실험자는 없도록 하였으며, 피실험자는 체중 63~75 kg의 23세 전후의 남자 대학원생 3명으로 선택하였다.

Ⅲ. 실험결과

반복이 있는 2원 배치법의 모델은 다음과 같다.

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + e_{ijk}$$

A_i : 자세(postures)의 수준 $i = 1, 2, \cdots, 5$

B_j : 피실험자(subject)의 수준 $j = 1, 2, 3$

C_k : 반복(replication)의 수준 $k = 1, 2, 3, 4$

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

μ : 전체 모집단의 실제 평균

여기에서 A_i는 母數 요인이고 B_j, C_k는 變量 요인이며,

$e_{ijk} \sim N(0, \sigma_e^2)$ $B_j \sim N(0, \sigma_B^2)$

$C_k \sim N(0, \sigma_C^2)$ $AB_{ij} \sim N(0, \sigma_{A\times B}^2)$

$AC_{ik} \sim N(0, \sigma_{A\times C}^2)$ $BC_{jk} \sim N(0, \sigma_{B\times C}^2)$

이다. 따라서

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{A\times B} + SS_{A\times C} + SS_{B\times C} + SS_E$$

의 모델에 따라 ANOVA 분석을 행하였다. 표 1은 $\alpha = 0.01$ 에서의 유의한 인자를 나타내는데 증가량이란 피실험자에 따른 영향을 최대로 줄이기 위해 定規化 (normalizing) 한 증가량에 대한 것이다. 즉 어떤 자세의 측정치에서 휴식 상태의 측정치를 빼고 증가량만으로 분석한 것이다.

표 1. 생리학적 척도와 유의 인자

Measures	Significant Factors
oxygen uptake	posture, posture*subject
oxygen uptake increment	posture, subject, posture*subject
heart rate	posture, subject, posture*subject
heart rate increment	posture

실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

i) squatting 과 sitting

sitting 에 비해 맥박수는 증가하지 않았지만 산소 흡입량은 증가하였다.

ii) standing 과 sitting

sitting에 비해 두 가지 모두 증가하였다.

iii) squatting 과 standing

산소 흡입량은 거의 비슷하였지만, 맥박수는 standing의 경우가 더 높았다.

iv) 靜的 手作業의 유무

手作業이 있는 경우가 모두 증가하였다.

v) standing에서의 증가량과 squatting에서의 증가량

standing 자세에서의 手作業에 따른 산소 흡입량과 맥박수의 증가량은 squatting 자세에서의 그것과 비슷하였다. 따라서 몸통의 균형을 靜的으로 유지하는 것과 靜的 手作業과는 공통 요소가 없으며 에너지 加算的이라는 결론을 얻을 수 있었는데, 이것은 예측하였던 결과와 같다.

최저 맥박수는 squatting자세와 sitting자세에 있어서 측정되었으며 최저 산소 흡입량은 sitting 자세에서 측정되었다. 한편 squatting 자세에서의 산소 흡입량은 standing자세와 거의 비슷하였다.

Ⅳ. 고 찰

작업 부하를 평가하는 데에는 두 가지 생리학적 기준이 있다.

i) 맥박수의 증가량과 산소 흡입량의 증가량

ii) 산소 흡입량 증가량에 대한 맥박수 증가량의 比 (또는 에너지 소비 증가량에 대한 맥박수 증가량의 比).

먼저, sitting에서보다 squatting 의 경우에 산소 흡입량이 증가하였으므로 작업 부하가 높아졌다고 할 수 있다. 반면 맥박수는 증가하지 않고 오히려 감소한 피실험자도 있는 것으로 미루어 작업 부하는 相異하지 않다고 볼 수 있다.

결과적으로, 두 척도는 일치하지 않으며 선형 관계는 존재하지 않는다는 것을 나타내는 것이다.

靜的 手作業이 동시에 행해졌을 때에는 두 척도가 모두 증가하여, 일치된 결과를 얻었다.

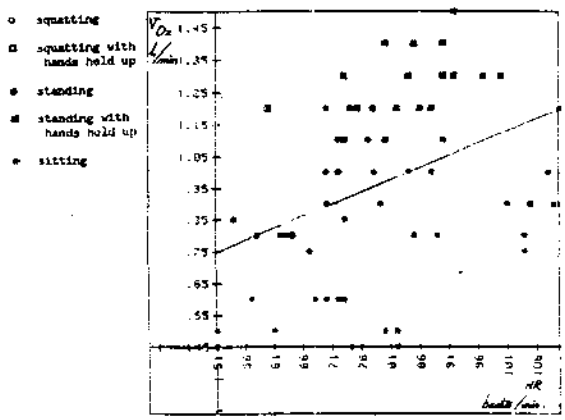

그림 3. 정적자세에서의 산소흡입량과 맥박수

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

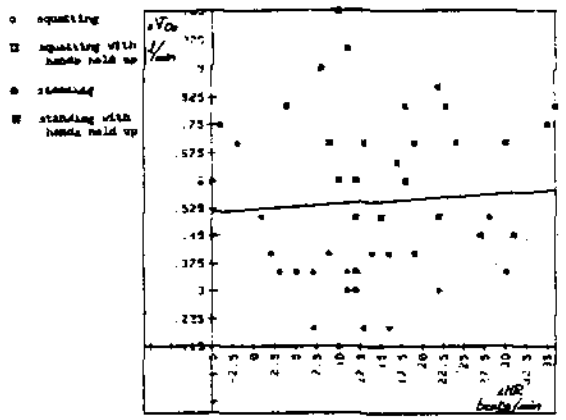

그림 4. 정적 자세에서의 산소 흡입량 증가와 맥박수의 증가량

그림 3은 靜的 姿勢에 따른 산소 흡입량과 맥박수를 표시한다. 이 그림에 따르면 standing자세에서는 산소 흡입량보다 맥박수가 증가하였고, squatting에서는 맥박수보다 산소 흡입량이 증가하였다. 선형 관계는 매우 조악하여 $r = 0.3$ 인데 定規化된 그림 4를 보면 더욱 명확하다.

산소 흡입량을 작업 부하에 대한 척도로사용할 경우에는, 산소 흡입량이 신체의 종합적인 척도로써 전체적인 筋肉 運動에 더 적합하다는 사실을 기억하여야 한다. 그러나 사용되는 筋肉의 질량을 정확히 알 수 없기 때문에 충분히 구체적인 정보를 제공하지는 못한다. 따라서 靜的 筋肉 運動에는 적합하지 못하며, 국부적인 부하가 걸리는 작업에 대해 순환계의 스트레스는 산소 흡입량만으로 추론할 수가 없는 것이다.

한편, 맥박수는 복잡한 인체 반응을 지나치게 단순화시킨다는 결점이 있다. 그러므로 맥박수를 사용할 때에는 자세 변화, 안구 운동, 정서 변화 등 말초적인 변화도 고려되어야 한다.

따라서 인체 전반에 대한 척도 기능으로서는 맥박수가 더 제약이 많으며, 측정치 뿐만 아니라 척도 기능의 중요성과 적절성을 숙지하는 것이 중요하다.

전술한 기준에서 이미 선형 관계가 없다는 것이 논의되었으므로 ii)의 기준은 靜的 자세에 대해 아무런 의미가 없다.

이상의 실험 측정치에 대해 세 가지 설명 요인이 있을 수 있다.

(i) 胸腔의 변화로 인한 맥박수의 변화

(ii) 橫隔膜의 압력 변화로 인한 산소 흡입량의 변화

(iii) 靜的 作業負荷의 변화

예를 들면 squatting의 경우 sitting에 비해 胸腔이 증가하여 맥박수는 감소하고, 橫隔膜에 대한 압력과 지지해야 할 筋肉 질량의 증가 때문에 산소 흡입량은 증가하였다고 설명할 수 있다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 靜的 姿勢에 있어서는 산소 흡입량과 맥박수가 作業負荷 자체 보다는 자세의 生理學的인 特性에 더 좌우된다고 결론지을 수 있다. 더 정확하고 구체적인 정보를 얻으려면 血壓, 부정맥(sinus arrhythmia) 또는 血流의 젖산 농도를 측정하는 등의 노력이 필요하다.

그런데 靜的 筋肉 運動을 定性化·定量化하는 것이 미해결된 문제이다. 動的 筋肉 運動을 할 때에는 에너지 소비량과 작업 부하가 비교적 선형 관계이므로 용이하지만, 靜的인 경우에는 生理學的인 개인 인자(연령, 성별, 신체 충실도 등)에 좌우되는 정도가 높기 때문이다.

한편 靜的 作業끼리의 同時 合同作業의 에너지 加算性은 주지한 바와 같다.

표 1에 따르면 맥박수의 증가량이나 산소 흡입량의 증가량에 피실험자 요인은 유의인자에 포함되지 않는다. 이것은 증가량이 피실험자 개개인의 특성에 크게 영향받지 않는다는 것을 뜻하며, 맥박수나 산소 흡입량 자체의 수치보다는 증가량이 더 객관적 척도임을 나타내는 데 좀 더 정확한 논의를 위해서는 더욱 많은 피실험자의 참여가 요구된다.

V. 결 론

이 실험에서 얻은 결론은 먼저, 靜的 作業姿勢에 있어서는 맥박수와 산소 흡입량의 선형 관계가 존재하지 않으며, 산소 흡입량이나 맥박이 각각 독립적으로 靜的 作業負荷의 척도로 사용되기에는 불충분하다는 점이다.

측정척도의 기능, 적절성 및 중요성을 숙지하고 사용할 필요가 있다.

둘째로는, 이 두 척도들이 靜的 作業負荷 그 자체보다는 靜的 姿勢의 生理學的 特性에 더 좌우된다는 결론을 얻었다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

胸腔의 변화, 橫隔膜의 압력 변화와 靜的 作業負荷의 변화로 설명이 가능하다.

세째로, 靜的 手作業과 靜的 姿勢의 유지는 에너지 加算的이라는 결론을 얻었다.

실제로 국부적인 작업 부하만이 증가하여 맥박수는 증가하였고, 산소 흡입량은 종합적인 기능 척도이기 때문에 이를 탐지하지 못한 것인지는 확실치 않으나 그것은 두 척도의 특성상 불가피한 것이었다.

선형 관계가 없는 靜的 作業負荷와 生理學的 척도를 어떻게 定性·定量化시킬 것인가는 미해결된 중요한 문제이다.

參 考 文 獻

[1] Andrews, R., "The additivity of values of energy expenditure of simultaneously performed simple muscular task", *Ergonomics*, Vol. 9, 1966.

[2] Astrand, P.O. and Rodahl, L., *Textbook of Work Physiology* (New York: McGraw-Hill), 1970.

[3] Astrand, P.O. and Saltin, B., "Maximum oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity", *J. of Appl. Physiol.*, Vol. 16, 1961.

[4] Brouha, L., *Physiology in Industry* 2nd ed., (London: Pergamon Press), 1967.

[5] Datta, S.R. and Ramanathan, N.L., "Energy expenditure in work predicted from heart rate and pulmonary ventilation", *J. of Appl. Physiol.*, Vol. 26, 1969.

[6] Datta, S.R., Chatterjee, B.B. and Roy, B.N., "The relationship between energy expenditure and pulse rates with body weight and the load carried during load carrying on the level", *Ergonomics*, Vol. 16, 1973.

[7] Gray, F.E., Hanson, J.A. and Jones, E.P., "Postural aspects of neck muscle tension", *Ergonomics*, Vol. 9, 1966.

[8] Jones, F.P., Gray, F.E., Hanson, J.A. and Shoop, J.D., "Neck muscle tension and the postural image", *Ergonomics*, Vol. 4, 1961.

[9] Kamon, E., "Laddermill and Ergometry: a comparative summary", *Human Factors*, Vol. 15, 1973.

[10] Katch, V., "Correlational v ratio adjustments of body weight in exercise-oxygen studies", *Ergonomics*, Vol. 15, 1972.

[11] Kuorinka, I., Bodily Discomfort, *Handbook of Industrial Engineering*, (New York: John Wiley & Sons, Inc.), 1982.

[12] Malhotra, M.S., Ramaswany, S.S., Ray, S.N. and Shrivastav, T.N., "Minute ventilation as a measure of energy expenditure during exercise", *J. of Appl. Physiol.*, Vol. 17, 1962.

[13] Malhotra, M.S., Sen, G.T. and Rai, R.M., "Pulse count as a measure of energy expenditure", *J. of Appl. Physiol.*, Vol. 18, 1963.

[14] Sharkey, B.J., McDonald, J.F. and Corbridge, L.G., "Pulse rate and pulmonary ventilation as predictors of human energy cost", *Ergonomics*, Vol. 9, 1966.

[15] Vos, H.W., "Physical workload in different body postures, while working near to or below ground level", *Ergonomics*, Vol. 16, 1973.

[16] Wald, A. and Harrison, L.B., "Oxygen consumption and heart rate: changes and relationships in static work", *Ergonomics*, Vol. 18, 1975.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.