

성별에 따른 트레드밀 기반 총 운동부하량과 심폐체력 반응의 차이 성별에 따른 트레드밀 운동 반응

옥현태¹, 손현준^{1,2}

¹충북대학교 의과대학 해부학교실, ²충북대학교병원 의생명연구원

Sex Differences in Treadmill-Based Total Workload and Cardiorespiratory Fitness Responses

Hyun Tae Ok¹, Hyun Joon Sohn^{1,2}

¹Anatomy, Medical School, Chungbuk National University

²Biomedical Research Institute, Chungbuk National University Hospital

Abstract : This study aimed to investigate sex differences in treadmill-based total workload, maximal oxygen uptake (VO₂ max), and cardiorespiratory fitness responses, and to evaluate the association between total workload and VO₂ max from an anatomical and physiological perspective. Sixteen healthy adults (8 males and 8 females) participated in graded exercise testing using the Modified Bruce protocol. Exercise duration, speed, incline, heart rate, and directly measured VO₂ max were obtained during treadmill testing. Total workload was calculated by integrating body weight, exercise speed, incline, and exercise duration. Independent t-tests, Pearson correlation analysis, ANCOVA, and Cohen's d effect size analysis were performed. Additional Spearman correlation and sensitivity analyses were conducted to evaluate the robustness of the findings. Males demonstrated significantly higher VO₂ max and METs than females ($p < .001$). Mean VO₂ max was 46.69 ± 4.89 mL/kg/min in males and 35.89 ± 2.28 mL/kg/min in females. Exercise duration and total workload were also higher in males; however, these differences did not reach statistical significance ($p = .058$ and $p = .077$, respectively). Effect size analysis revealed very large effects for VO₂ max ($d = 2.80$) and METs ($d = 3.20$), and a large effect for total workload ($d = 0.92$). A strong positive correlation was observed between total workload and VO₂ max ($r = .86$, $p < .001$), which remained consistent across Spearman correlation and sensitivity analyses. The present findings suggest that sex-related differences in cardiorespiratory fitness may be associated with underlying morphological and physiological characteristics, including skeletal muscle mass, cardiac size, and oxygen transport capacity. In addition, total workload demonstrated a strong association with VO₂ max, indicating its potential usefulness as a workload-based indicator of exercise performance. Although this exploratory pilot study was limited by a small sample

저자(들)는 '의학논문 출판윤리 가이드라인'을 준수합니다.

저자(들)는 이 연구와 관련하여 이해관계가 없음을 밝힙니다.

Received: May 21, 2026; **Revised:** June 5, 2026; **Accepted:** June 10, 2026

Correspondence to: 손현준 (충북대학교 의과대학 해부학교실) **E-mail:** hjsohn@chungbuk.ac.kr

size, the findings provide preliminary evidence supporting the relationship between morphological characteristics and functional exercise responses and may serve as a foundation for future investigations of workload-based cardiorespiratory fitness assessment.

Keywords : Cardiorespiratory fitness, VO_2 max, Total workload, Sex differences, Sexual dimorphism, Treadmill exercise

서론

심폐지구력은 심혈관질환 발생 위험, 대사성 질환, 기능적 수행능력 및 전체 사망률과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되어 왔으며[1,2], 최근에는 임상적 활력징후(clinical vital sign)의 하나로 평가되어야 한다는 중요성이 강조되고 있다[4,13].

최대산소섭취량(maximal oxygen uptake, VO_2 max)은 심폐지구력을 대표하는 가장 신뢰도 높은 지표로 알려져 있으며, 인체가 최대 운동 시 단위 시간당 섭취하고 이용할 수 있는 산소의 최대량을 의미한다[3]. VO_2 max는 심박출량(cardiac output)과 동정맥 산소차(arteriovenous oxygen difference)에 의해 결정되며, 심장의 구조적 특성, 혈액의 산소운반능력, 골격근량 및 말초 조직의 산소 이용 능력과 같은 다양한 형태학적·생리학적 요인의 영향을 받는다[9]. 특히 성별은 인체의 형태와 기능에 영향을 미치는 대표적인 생물학적 요인 중 하나이다. 인간은 성별에 따라 체격, 체성분, 골격근량, 심장 크기, 혈액량 및 헤모글로빈 농도에서 차이를 나타내며, 이러한 차이는 운동 수행 과정에서 다양한 생리적 반응의 차이로 나타날 수 있다[10,11]. 생물인류학에서는 이러한 성별에 따른 구조적 차이를 성적 이형성(sexual dimorphism)의 개념으로 설명하며, 형태학적 특성과 기능적 적응 사이의 관계를 이해하는 중요한 연구 주제로 다루고 있다.

성별에 따른 심폐지구력 차이에 관한 연구는 지속적으로 수행되어 왔으며, 일반적으로 남성이 여성보다 높은 VO_2 max를 나타내는 것으로 보고되고 있다[9,10]. 그러나 대부분의 연구는 VO_2 max 자체 또는 운동 수행시간의 차이를 중심으로 분석하였으며, 실제 운동 과정에서 발생하는 총 물리적 부하(total workload)와 심폐지구력 간의 관계를 함께 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 전통적으로 사용되는 Bruce protocol 및 Cooper test와 같은 심폐지구력 평가는 주로 운동시간 또는 운동 지속 능력을 기준으로 평가된다[5,6]. 그러나 운동시간은 운동 수행 과정에서 실제로 발생한 기계적 부하를 충분히 반영하지 못할 수 있으며, 동일한 운동시간이라 하더라도 체중, 운동속도, 경사도에 따라 인

체에 가해지는 물리적 부하는 달라질 수 있다. 따라서 최근에는 운동속도(speed), 경사도(grade), 체중(body weight), 운동시간(duration)을 통합적으로 반영한 총 운동부하량(total workload) 기반 접근이 보다 실제적인 운동 수행 능력을 평가할 수 있는 방법으로 관심을 받고 있다.

총 운동부하량은 운동 중 수행된 기계적 작업량을 반영하는 지표로서 단순한 운동시간 기반 평가를 보완할 수 있으며, 심폐지구력 수준과 밀접한 관련성을 가질 가능성이 있다. 특히 총 운동부하량과 VO_2 max 간의 관계를 분석하는 것은 형태학적 특성이 기능적 운동 반응으로 어떻게 표현되는지를 이해하는 데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

따라서 본 연구는 건강한 성인 남녀를 대상으로 트레드밀 기반 점증운동부하검사를 실시하여 성별에 따른 총 운동부하량과 심폐지구력 반응의 차이를 분석하고, 총 운동부하량과 최대산소섭취량 간의 관련성을 평가하고자 하였다. 또한 본 연구는 이러한 결과를 인간의 성적 이형성(sexual dimorphism)과 형태-기능 관계(morphology-function relationship)의 관점에서 해석함으로써 성별에 따른 생물학적 다양성과 운동 반응 간의 관계를 탐색적으로 규명하고자 하였다.

연구 대상 및 방법

1. 대상

본 연구는 건강하며 기능적 제한이 없는 성인 남성 8명과 여성 8명, 총 16명을 대상으로 실시하였다. 모든 대상자는 심혈관계, 호흡기계 및 근골격계 질환의 병력이 없었으며, 최대 운동부하검사 수행에 의학적 제한이 없는 자로 선전하였다. 연구 참여 전 모든 대상자에게 연구의 목적과 절차에 대하여 충분히 설명하였으며, 자발적인 참여 동의서를 받은 후 연구를 진행하였다. 본 연구는 충북대학교 생명윤리위원회의 승인(CBNU-202310-HR-0237)을 받아 수행되었다. 대상자의 일반적 특성은 Table 1에 제시하였다. 연구 대상자는 비교적 동질적인 연령대의 건강한 젊은 성인으로 구성되었으며, 성별에 따른 심폐지구력 반응과 총 운동부하량의 차이를 비교

Table 1. General characteristics of participants

Variable	Male (n = 8) Mean $\pm$ SD	Female (n = 8) Mean $\pm$ SD	t	p
Age (years)	23.00 $\pm$ 1.60	21.50 $\pm$ 1.60	1.90	.08
Height (cm)	174.38 $\pm$ 7.24	160.88 $\pm$ 2.64	5.00	< .001
Weight (kg)	75.41 $\pm$ 13.90	57.91 $\pm$ 7.30	3.16	< .05

Values are presented as mean $\pm$ standard deviation. p-values were obtained using independent t-test. p < .05 was considered statistically significant.

하기 위하여 모집되었다.

2. 연구 설계

본 연구는 성별에 따른 총 운동부하량(total workload)과 심폐지구력(cardiorespiratory fitness)의 차이를 분석하기 위한 단면 비교 연구(cross-sectional comparative study)로 설계되었다. 연구의 주요 목적은 다음과 같다.

첫째, 남성과 여성 간 최대산소섭취량(VO_2 max), METs, 운동지속시간 및 총 운동부하량의 차이를 확인한다.

둘째, 연령과 체중의 영향을 통제된 상태에서 성별이 심폐지구력에 미치는 영향을 평가한다.

셋째, 총 운동부하량과 최대산소섭취량 간의 관련성을 분석하여 총 운동부하량 기반 평가의 활용 가능성을 탐색적으로 검토한다.

3. 측정 방법

1) 사전 준비

모든 대상자는 검사 전 24시간 동안 격렬한 신체활동을 제한하였으며, 검사 당일에는 카페인 및 음주 섭취를 금지하였다. 또한 검사 전 충분한 휴식을 취하도록 하여 측정 환경을 표준화하였다. 신장과 체중은 자동 신체계측기를 이용하여 측정하였으며, 측정된 신체정보는 심폐지구력 분석과 총 운동부하량 산출에 활용하였다.

2) 심폐지구력 검사

심폐지구력 평가는 Modified Bruce protocol (Table 2)을 적용한 트레드밀 기반 점증운동부하검사(graded exercise test, GXT)를 이용하여 실시하였다.

검사는 초기 저강도 단계에서 시작하여 단계별로 속도(speed)와 경사도(grade)를 증가시키는 방식으로 진행하였다. 각 단계는 3분 동안 유지하였으며, 대상자가 자발적으로 운동을 중단할 때까지 검사를 지속하였다.

운동 중에는 심박수, 운동시간, 속도 및 경사도를 실시간으로 기록하였다.

Table 2. Modified Bruce protocol used in this study

Stage	Speed (mph)	Gradient (%)	Duration (min)
1	1.7	10	3
2	2.5	12	3
3	3.4	14	3
4	4.2	16	3
5	5.0	18	3
6	5.5	20	3
7	6.0	22	3

Each stage was performed for 3 minutes with incremental increases in speed and gradient. The test was continued until volitional exhaustion or termination criteria were met.

3) 최대산소섭취량 측정

최대산소섭취량(maximal oxygen uptake, VO_2 max)은 운동 중 인체가 단위 시간당 섭취하고 이용할 수 있는 최대 산소량을 의미하며, 심폐지구력을 대표하는 지표로 사용된다.

본 연구에서는 호흡가스 분석기(Quark CPET, COSMED, Italy)를 이용하여 breath-by-breath 방식으로 산소섭취량을 직접 측정하였다. 최대운동 도달 여부는 다음 기준을 종합적으로 고려하여 판단하였다.

1. 연령예측 최대심박수의 90% 이상 도달
2. 자각적 운동강도(RPE) 17 이상
3. 운동 중 자발적 탈진(volitional exhaustion)
4. 호흡교환율(RER) 증가

측정된 최대산소섭취량은 mL/kg/min 단위로 산출하였다.

4) METs 산출

대사당량(Metabolic Equivalents, METs)은 안정 시 산소섭취량을 기준으로 운동강도를 표현하는 대표적인 운동생리학 지표이다[7]. 본 연구에서는 직접 측정된 VO_2 max를 이용하여 다음 식을 적용하였다.

$$METs = VO_2 \text{ max} / 3.5$$

여기서 1 MET는 안정 시 산소섭취량인 3.5 mL/kg/min을 의미한다.

5) 총 운동부하량(Total Workload) 산출

총 운동부하량(total workload)은 운동 수행 과정에서 발생한 기계적 부하를 반영하기 위하여 산출하였다. 기존 Bruce protocol 기반 평가는 운동시간 중심으로 심폐지구력을 평가하지만, 실제 수행된 물리적 부하를 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 체중, 운동속도, 경사도 및 운동시간을 통합적으로 고려하여 총 운동부하량을 계산하였

다. 총 운동부하량은 다음 식을 이용하여 산출하였다.

$$TW = BW \times g \times V \times T \times (\text{Grade} / 100)$$

본 식은 체중을 이동시키기 위해 수행된 기계적 일을 기반으로 운동속도, 경사도 및 운동시간을 통합 반영하도록 구성하였다. 여기서 BW는 체중(kg), g는 중력가속도(9.81 m/s^2), V는 운동속도(m/s), T는 운동시간(s), Grade는 경사도(%)를 의미한다.

6) 측정 장비

트레드밀은 STARTRAC E-TRx (Star Trac, USA)를 사용하였으며, 심박수는 Polar H10 (Polar Electro, Finland)을 이용하여 측정하였다. 최대산소섭취량은 Quark CPET (COSMED, Italy)를 이용하여 측정하였으며, 속도와 경사도 정보는 KOLAS 검증을 받은 디지털 센서 시스템을 통해 수집하였다(Table 3).

4. 자료처리

모든 자료는 SPSS Statistics 27 (IBM Corp., USA)을 이용하여 분석하였다. 기술통계는 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)로 제시하였다. 성별 간 평균 차이를 비교하기 위하여 독립표본 t-test를 실시하였다. 연령과 체중의 영향을 통제한 상태에서 성별이 $\text{VO}_2 \text{ max}$ 에 미치는 영향을 확인하기 위하여 공분산분석(ANCOVA)을 수행하였다. 총 운동부하량과 $\text{VO}_2 \text{ max}$ 간의 관련성을 평가하기 위하여 Pearson 상관분석을 실시하였다. 또한 표본 수가 제한적인

파일럿 연구의 특성을 고려하여 결과의 안정성을 검증하기 위해 Spearman 순위상관분석과 이상치 제거 후 민감도 분석(sensitivity analysis)을 추가로 수행하였다. 성별 차이의 실제적 의미를 평가하기 위하여 Cohen의 d를 이용한 효과크기(effect size)를 산출하였다. 모든 통계적 유의수준은 $p < .05$ 로 설정하였다.

연구 결과

1. 성별에 따른 심폐지구력 및 총 운동부하량 비교

성별에 따른 심폐지구력 관련 변수의 차이를 분석한 결과는 Table 4에 제시하였다.

남성의 최대산소섭취량($\text{VO}_2 \text{ max}$)은 $46.69 \pm 4.89 \text{ mL/kg/min}$ 로 여성의 $35.89 \pm 2.28 \text{ mL/kg/min}$ 보다 유의하게 높게 나타났다($t = 5.37, p < .001$). 또한 METs 역시 남성(13.44 ± 1.14)이 여성(10.25 ± 0.65)보다 유의하게 높은 값을 나타냈다($t = 6.77, p < .001$). 운동지속시간(exercise time)은 남성에서 18.21 ± 3.11 분, 여성에서 15.36 ± 2.49 분으로 남성이 더 높은 값을 보였으나 통계적 유의성에는 도달하지 않았다($t = 2.06, p = .058$). 총 운동부하량(total workload) 역시 남성($1858.63 \pm 877.52 \text{ J/kg}$)이 여성($1207.75 \pm 436.18 \text{ J/kg}$)보다 높은 값을 나타냈으나 통계적으로 유의하지 않았다($t = 1.91, p = .077$). 그러나 운동시간과 총 운동부하량 모두 남성에서 일관되게 높은 경향을 나타냈으며, 통계적 유의성에는 도달하지 않았음에도 비교적 큰 차이가 관찰되었다. 이

Table 3. Measurement equipment used in this study

Equipment	Model	Manufacturer	Measurement variables
Treadmill	STAR TRAC E-TRx	Star Trac, USA	Speed, incline
Metabolic analyzer	Quark CPET	COSMED, Italy	$\text{VO}_2 \text{ max}$, ventilation
Heart rate monitor	Polar H10	Polar Electro, Finland	Heart rate
Digital workload sensor	KOLAS verified sensor	Kanghan Innosys, Korea	Speed, incline, workload

All measurements were obtained using an integrated cardiorespiratory fitness assessment system. $\text{VO}_2 \text{ max}$ was directly measured using breath-by-breath gas analysis.

Table 4. Comparison of physiological variables between males and females

Variable	Male (Mean $\pm$ SD)	Female (Mean $\pm$ SD)	t	p
$\text{VO}_2 \text{ max}$ (mL/kg/min)	46.69 ± 4.89	35.89 ± 2.28	5.37	< .001
METs	13.44 ± 1.14	10.25 ± 0.65	6.77	< .001
Exercise time (min)	18.21 ± 3.11	15.36 ± 2.49	2.06	.058
Total workload (J/kg)	1858.63 ± 877.52	1207.75 ± 436.18	1.91	.077

Values are presented as mean $\pm$ standard deviation. p-values were obtained using independent t-test.

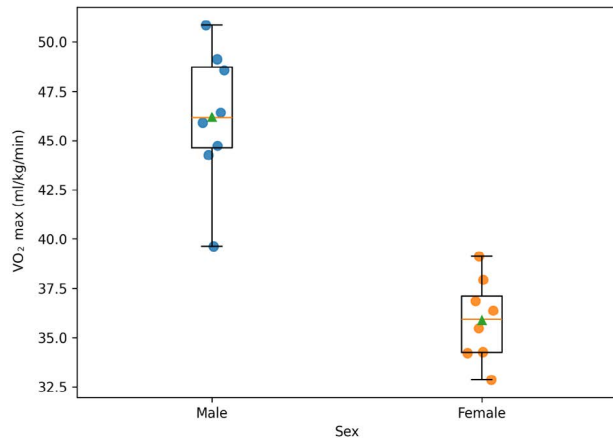


Fig. 1. Distribution of VO₂ max according to sex.

는 제한된 표본 수로 인해 통계적 검정력이 충분하지 않았을 가능성을 시사한다. Fig. 1은 성별에 따른 VO₂ max 분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 남성이 여성보다 높은 VO₂ max 값을 나타냈으며, 개인 간 변동성은 존재하였으나 두 집단 간 분포 차이가 비교적 뚜렷하게 확인되었다.

2. 효과크기 분석

성별에 따른 차이의 실제적 의미를 평가하기 위하여 Cohen의 d를 이용한 효과크기 분석을 실시하였으며, 결과는 Table 5에 제시하였다. VO₂ max와 METs의 효과크기는 각각 $d = 2.80$ 및 $d = 3.20$ 으로 매우 큰 효과크기(very large effect size)를 나타냈다. 이는 성별 차이가 통계적 유의성을 넘어 실제적인 생리학적 차이를 반영함을 의미한다. 또한 운동지속시간($d = 0.95$)과 총 운동부하량($d = 0.92$) 역시 큰 효과크기(large effect size)를 나타냈다. 비록 통계적 유의성은 확보되지 않았지만, 효과크기 분석 결과는 성별에 따른 차이가 실제적으로 존재할 가능성을 시사한다. Fig. 2는 주요 변수에 대한 Cohen의 d 값을 시각적으로 제시한 것이다. VO₂ max와 METs는 매우 큰 효과크기를 나타냈으며, 운동시간과 총 운동부하량 또한 큰 효과크기를 보여 성별 차이가 실제 운동 수행능력에 의미 있는 영향을 미칠 수 있음을 시사하였다.

3. 공변량 통제 후 성별 효과

체중과 연령의 영향을 통제한 상태에서 성별이 VO₂ max에 미치는 영향을 평가하기 위하여 공분산분석(ANCOVA)을 실시하였으며, 결과는 Table 6에 제시하였다. 분석 결과 성별은 VO₂ max에 유의한 영향을 미치는 요인으로 확인되었다($F = 9.12, p < .05$). 또한 체중 역시 유의한 영향을 나타냈으며($F = 4.36, p < .05$), 연령은 통계적으로 유의하지 않았

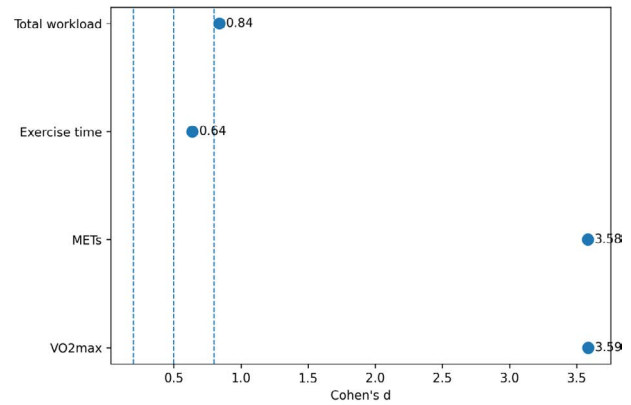


Fig. 2. Effect sizes (Cohen's d) for physiological variables between males and females.

Table 5. Effect size analysis (Cohen's d) between males and females

Variable	Cohen's d	Interpretation
VO ₂ max (mL/kg/min)	2.80	Very large
METs	3.20	Very large
Exercise time (min)	0.95	Large
Total workload (J/kg)	0.92	Large

Effect sizes were calculated using Cohen's d. Interpretation: small (0.2), medium (0.5), large (0.8).

Table 6. ANCOVA results controlling for age and body weight

Source	F	p
Sex	9.12	< .05
Weight	4.36	< .05
Age	3.11	.09

ANCOVA was performed to control for age and body weight. $p < .05$ was considered statistically significant.

다($F = 3.11, p = .09$). Fig. 3은 연령과 체중을 공변량으로 통제한 후의 VO₂ max 보정평균(adjusted mean)을 나타낸 것이다. 공변량을 통제한 이후에도 남성이 여성보다 높은 VO₂ max를 유지하는 것으로 나타났으며, 이는 성별에 따른 VO₂ max 차이가 체중과 연령만으로는 충분히 설명되지 않을 가능성을 시사한다. 다만 본 연구는 표본 규모가 제한적인 탐색적 연구이므로, 이러한 결과는 신중하게 해석될 필요가 있다.

4. 총 운동부하량과 최대산소섭취량의 관련성

총 운동부하량과 최대산소섭취량 간의 관련성을 분석한 결과, 두 변수 간에는 높은 정적 상관관계가 확인되었다(Table 7). Pearson 상관분석 결과 총 운동부하량과 VO₂ max

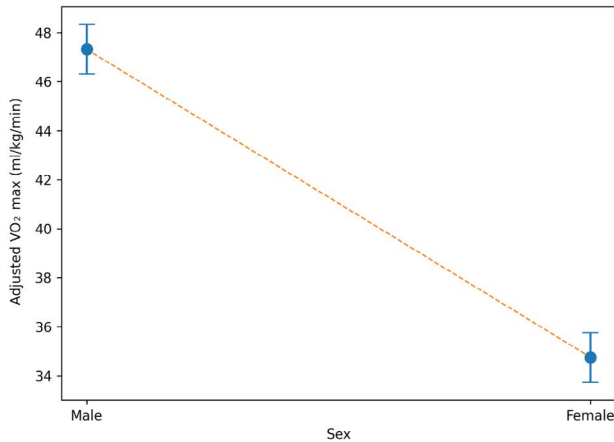


Fig. 3. Adjusted mean VO₂ max by sex after controlling for age and body weight.

Table 7. Correlation between total workload and VO₂ max

Variable	r	p
Workload vs VO ₂ max	0.86	< .001

Pearson correlation coefficients were calculated. $p < .05$ was considered statistically significant.

간의 상관관계수는 $r = .86$ 으로 매우 높은 수준의 양의 상관관계를 나타냈으며($p < .001$), 총 운동부하량이 증가할수록 최대산소섭취량 또한 증가하는 경향이 확인되었다. Fig. 4는 총 운동부하량과 VO₂ max 간의 산점도와 회귀선을 나타낸 것이다. 대부분의 자료가 회귀선 주변에 분포하여 두 변수 간의 강한 선형 관계를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 총 운동부하량이 심폐지구력 수준과 밀접하게 관련되어 있음을 시사하며, 실제 운동 수행 과정에서 발생한 물리적 부하를 반영하는 지표로 활용될 가능성을 보여준다.

5. 민감도 분석 및 결과의 안정성 검증

총 운동부하량과 VO₂ max 간 상관관계의 안정성을 확인하기 위하여 Spearman 순위상관분석과 이상치 제거 후 재분석을 실시하였다(Table 8). Spearman 상관분석 결과 상관관계수는 $r = .83$ ($p < .001$)으로 나타났으며, 이상치를 제거한 후 수행한 Pearson 상관분석에서도 $r = .81$ ($p < .001$)의 높은 상관관계가 유지되었다. 이와 같은 결과는 분석 방법의 차이나 일부 자료의 영향에도 불구하고 총 운동부하량과 VO₂ max 간의 관련성이 일관되게 유지됨을 의미한다. 따라서 본 연구에서 확인된 두 변수 간의 관계는 비교적 안정적이고 재현 가능한 결과로 판단된다.

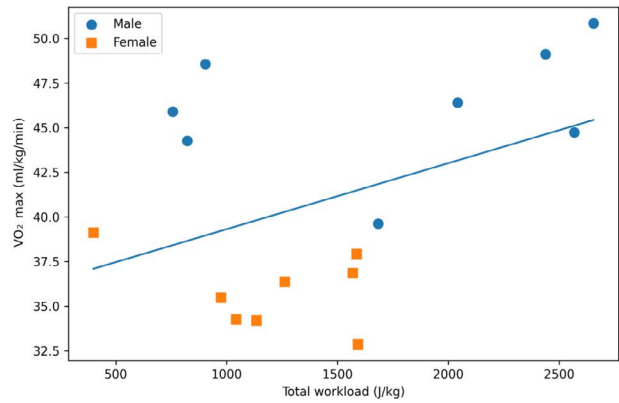


Fig. 4. Relationship between total workload and VO₂ max with linear regression line.

Table 8. Robustness analysis of correlation results

Analysis method	r	p
Pearson correlation	0.86	< .001
Spearman correlation	0.83	< .001
Outlier removed (Pearson)	0.81	< .001

Correlation analyses were conducted using Pearson and Spearman methods. Outlier removal was performed to evaluate the robustness of the results.

논 의

본 연구는 건강한 성인 남녀를 대상으로 트레드밀 기반 점층운동부하검사를 실시하여 성별에 따른 심폐지구력 반응과 총 운동부하량(total workload)의 차이를 분석하고, 총 운동부하량과 최대산소섭취량(VO₂ max) 간의 관련성을 평가하고자 하였다. 연구 결과 남성은 여성보다 VO₂ max와 METs에서 유의하게 높은 값을 나타냈으며, 운동지속시간과 총 운동부하량 역시 높은 경향을 보였다. 또한 총 운동부하량과 VO₂ max 간에는 매우 높은 정적 상관관계($r = .86$)가 확인되었다. 기존 연구들이 VO₂ max 자체의 성별 차이에 주로 초점을 맞추었다면, 본 연구는 실제 운동 수행 과정에서 발생한 총 운동부하량과 VO₂ max 간의 관계를 함께 분석하였다는 점에서 차별성을 가진다.

본 연구에서 남성의 VO₂ max는 46.69 ± 4.89 mL/kg/min, 여성은 35.89 ± 2.28 mL/kg/min로 나타나 유의한 성별 차이를 보였다. 이러한 결과는 성인 남성이 여성보다 높은 최대산소섭취량을 나타낸다는 기존 연구 결과와 일치한다[9,10]. Loe 등(2013)은 건강한 성인 3,816명을 대상으로 한 연구에서 남성이 여성보다 유의하게 높은 유산소성 운동능력을 나타낸다고 보고하였으며, 이러한 차이는 성별에 따른 형태학

적 및 생리학적 특성의 차이와 관련된 것으로 설명하였다.

VO₂ max는 심박출량(cardiac output)과 동정맥 산소차(arteriovenous oxygen difference)에 의해 결정되며[3,14], 심장의 구조적 특성, 혈액의 산소운반능력 및 골격근량과 밀접하게 관련되어 있다. 일반적으로 남성은 여성보다 더 큰 심장 크기와 높은 혈액량, 높은 헤모글로빈 농도 및 더 많은 골격근량을 가지는 것으로 알려져 있으며[9,11], 이러한 특성은 최대 운동 시 산소 공급과 이용 능력의 향상으로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구에서 관찰된 성별 차이는 단순한 운동 수행능력의 차이를 넘어 형태학적 특성과 기능적 반응 간의 연관성을 반영하는 결과로 해석될 수 있다.

본 연구에서 METs 또한 남성이 여성보다 유의하게 높게 나타났다. METs는 안정 시 산소섭취량을 기준으로 운동강도를 표현하는 지표로서 VO₂ max와 밀접한 관련성을 가진다. 따라서 남성의 높은 METs 수준은 VO₂ max 결과와 일관된 양상을 보이며, 성별에 따른 유산소성 운동능력 차이를 반영하는 결과로 판단된다. 기존 연구에서도 남성이 여성보다 높은 최대 운동능력과 에너지 소비 능력을 나타낸다고 보고되고 있으며[9], 본 연구 결과 역시 이러한 선행 연구를 지지한다. 한편 운동지속시간과 총 운동부하량은 남성에서 더 높은 값을 나타냈으나 통계적으로 유의한 차이에는 도달하지 않았다. 특히 총 운동부하량은 남성에서 약 54% 높은 평균값을 보였음에도 불구하고 $p=.077$ 로 통계적 유의성에는 도달하지 못하였다. 그러나 효과크기 분석 결과 총 운동부하량의 Cohen's d 는 0.92로 큰 효과크기를 나타냈다. 이는 통계적 유의성이 확보되지 않았더라도 실제적인 차이가 존재할 가능성을 시사한다. 본 연구는 총 16명을 대상으로 수행된 파일럿 연구이므로 통계적 검정력이 제한되었을 가능성이 있으며, 향후 보다 큰 표본을 이용한 연구를 통해 이러한 차이를 재검증할 필요가 있다.

본 연구의 가장 중요한 결과는 총 운동부하량과 VO₂ max 간의 높은 상관관계($r=.86$)가 확인되었다는 점이다. 또한 Spearman 상관분석($r=.83$)과 이상치 제거 후 분석($r=.81$)에서도 유사한 결과가 유지되어 결과의 안정성이 확인되었다. 이러한 결과는 총 운동부하량이 심폐지구력 수준과 밀접하게 관련되어 있음을 시사한다. 기존 Bruce protocol 기반 평가는 운동지속시간을 중심으로 심폐지구력을 평가하지만[5], 운동시간만으로는 실제 운동 수행 과정에서 발생한 물리적 부하를 충분히 설명하기 어렵다. 반면 총 운동부하량은 체중, 운동속도, 경사도 및 운동시간을 통합적으로 반영함으로써 실제 수행된 기계적 부하를 보다 직접적으로 평가할 수 있다는 장점을 가진다. 따라서 총 운동부하량은 기존 운동시간 기반 평가를 보완할 수 있는 잠재적 지표로 활용될 가능성이 있다. 그러나 본 연구 결과만으로 총 운동부하량을 독

립적인 심폐지구력 평가 지표로 규정하기에는 제한점이 존재한다. 심사위원들이 지적한 바와 같이 본 연구의 표본 수는 제한적이며, 연구 대상 또한 건강한 젊은 성인으로 구성되어 있어 결과를 일반화하는 데 한계가 있다. 또한 총 운동부하량 산출 방식에 대한 외부 타당성 검증이 충분히 이루어지지 않았다는 점 역시 고려되어야 한다. 따라서 본 연구의 결과는 총 운동부하량 기반 접근의 가능성을 탐색적으로 제시하는 수준으로 해석하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

Sheel의 연구[8]에서는 성별에 따른 운동생리학적 반응의 차이가 구조적 특성과 기능적 적응의 복합적인 상호작용에 의해 설명될 수 있다고 보고하였다. 인간은 성별에 따라 체격, 체성분, 골격근량 및 심혈관 구조에서 차이를 보이는 대표적인 성적 이형성(sexual dimorphism) 종으로 알려져 있다. 이러한 구조적 차이는 운동 수행 과정에서 다양한 기능적 반응의 차이로 나타날 수 있으며, 본 연구에서 확인된 VO₂ max와 METs의 차이 역시 이러한 성적 이형성의 표현형 중 하나로 해석될 수 있다. 즉, 본 연구 결과는 형태학적 특성과 생리적 기능 간의 관계를 보여주는 사례로서 인간 집단 내 존재하는 생물학적 다양성을 이해하는 데 기초자료를 제공한다는 점에서 의의가 있다.

본 연구는 몇 가지 제한점을 가진다. 첫째, 표본 수가 적은 탐색적 파일럿 연구로 수행되어 결과의 일반화에 제한이 있다. 둘째, 연구 대상이 건강한 젊은 성인으로 제한되어 연령 및 건강 상태에 따른 차이를 확인할 수 없었다. 특히 심폐지구력은 연령 증가에 따라 감소하는 것으로 알려져 있으므로[12], 향후 다양한 연령층을 포함한 연구가 필요하다. 셋째, 골격근량, 헤모글로빈 농도 및 심장 크기와 같은 형태학적 변수를 직접 측정하지 못하였으므로 본 연구에서 제시한 기전은 선행 연구를 기반으로 한 해석에 해당한다. 향후 연구에서는 다양한 연령층과 임상 집단을 포함한 대규모 연구를 수행하고, 체성분 분석 및 심혈관 구조 평가를 함께 실시함으로써 형태학적 특성과 심폐지구력 반응 간의 관계를 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다. 또한 총 운동부하량의 재현성과 예측 타당도를 검증하여 심폐지구력 평가 도구로서의 활용 가능성을 지속적으로 검토할 필요가 있을 것으로 생각된다.

결론

본 연구는 건강한 성인 남녀를 대상으로 트레드밀 기반 중운동부하검사를 실시하여 성별에 따른 심폐지구력 반응과 총 운동부하량(total workload)의 특성을 분석하고, 총 운동부하량과 최대산소섭취량(VO₂ max) 간의 관련성을 평가하고자 하였다.

연구 결과, 남성은 여성보다 VO_2 max와 METs에서 유의하게 높은 값을 나타냈으며($p < .001$), 운동지속시간과 총 운동부하량 또한 높은 경향을 보였다. 그러나 운동지속시간($p = .058$)과 총 운동부하량($p = .077$)의 성별 차이는 통계적으로 유의하지 않았다. 또한 총 운동부하량과 VO_2 max 간에는 높은 정적 상관관계($r = .86, p < .001$)가 확인되었으며, Spearman 상관분석과 민감도 분석에서도 유사한 결과가 유지되어 두 변수 간의 관련성이 비교적 안정적으로 나타났다.

이러한 결과는 성별에 따른 형태학적 특성과 기능적 운동 반응 간의 연관성을 보여주는 자료로서 의미를 가진다. 특히 골격근량, 심장 크기, 혈액의 산소운반능력과 같은 구조적 특성이 심폐지구력 반응의 차이와 관련될 가능성을 시사하며, 인간 집단 내 존재하는 성적 이형성(sexual dimorphism)의 기능적 표현 양상을 이해하는 데 기초자료를 제공한다.

한편 본 연구는 건강한 젊은 성인 16명을 대상으로 수행된 탐색적 파일럿 연구이므로 결과의 일반화에는 제한이 있다. 따라서 총 운동부하량 기반 접근의 활용 가능성은 향후 보다 큰 표본과 다양한 연령층을 대상으로 한 후속 연구를 통해 추가적으로 검증될 필요가 있다. 결론적으로 본 연구에서 총 운동부하량은 최대산소섭취량과 밀접한 관련성을 나타내었으며, 향후 심폐지구력 평가를 위한 보조적 지표로서 활용 가능성을 확인하였다. 또한 성별에 따른 형태학적 특성과 심폐지구력 반응 간의 관계를 이해하기 위한 기초자료(reference data)를 제공하였다는 점에서 의의를 가진다.

REFERENCES

1. Blair SN, Kohl HW III, Barlow CE, Paffenbarger RS Jr, Gibbons LW, Macera CA. Changes in physical fitness and all-cause mortality: a prospective study of healthy and unhealthy men. *JAMA*. 1995;273:1093-98.
2. Kodama S, Saito K, Tanaka S, Maki M, Yachi Y, Asumi M, et al. Cardiorespiratory fitness as a quantitative predictor of all-cause mortality and cardiovascular events in healthy men and women. *JAMA*. 2009;301:2024-35.
3. Bassett DR Jr, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2000;32:70-84.
4. Ross R, Blair SN, Arena R, Church TS, Despres JP, Franklin BA, et al. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: a case for fitness as a clinical vital sign: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2016;134:e653-99.
5. Bruce RA. Exercise testing of patients with coronary heart disease: principles and normal standards for evaluation. *Ann Clin Res*. 1971;3:323-32.
6. Cooper KH. A means of assessing maximal oxygen intake: correlation between field and treadmill testing. *JAMA*. 1968;203:201-4.
7. McArdle WD, Katch FI, Katch VL. *Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance* (8th ed.). Lippincott Williams & Wilkins; 2015.
8. Sheel AW. Sex differences in the physiology of exercise: an integrative perspective. *Exp Physiol*. 2016;101:211-2.
9. Joyner MJ, Coyle EF. Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol*. 2008;586:35-44.
10. Loe H, Rognmo Ø, Saltin B, Wisløff U. Aerobic capacity reference data in 3816 healthy men and women aged 20-90 years. *Med Sci Sports Exerc*. 2013;45:2187-95.
11. Sheel AW, Richards JC, Foster GE, Guenette JA. Sex differences in respiratory exercise physiology. *Sports Med*. 2004;34:567-79.
12. Fleg JL, Morrell CH, Bos AG, Brant LJ, Talbot LA, Wright JG, et al. Accelerated longitudinal decline of aerobic capacity in healthy older adults. *Circulation*. 2005;112:674-82.
13. Kaminsky LA, Arena R, Myers J. Reference standards for cardiorespiratory fitness measured with cardiopulmonary exercise testing: data from the Fitness Registry and the Importance of Exercise National Database (FRIEND). *Mayo Clin Proc*. 2015;90:1515-23.
14. Montero D, Diaz-Canestro C. Endurance training and maximal oxygen consumption with ageing: role of maximal cardiac output and oxygen extraction. *Eur J Prev Cardiol*. 2016;23:733-43.

간추림 : 본 연구는 트레드밀 기반 점증운동부하검사에서 산출된 총 운동부하량(total workload)과 최대산소섭취량(maximal oxygen uptake, $\text{VO}_2 \text{ max}$) 간의 관련성을 분석하고, 성별에 따른 심폐지구력 반응의 차이를 해부생물인류학적 관점에서 규명하고자 수행되었다. 심폐지구력은 심혈관계와 호흡계의 산소 공급 능력 및 골격근의 산소 이용 능력을 반영하는 대표적인 생리학적 지표이며, 최대산소섭취량은 이를 평가하는 가장 신뢰도 높은 지표로 알려져 있다. 연구 대상은 건강한 성인 남성 8명과 여성 8명으로 구성되었으며, 모든 대상자는 Modified Bruce protocol을 적용한 트레드밀 기반 점증운동부하검사를 수행하였다. 검사 과정에서 속도, 경사도, 운동시간 및 심박수를 측정하였으며, 호흡가스 분석을 통해 최대산소섭취량을 직접 측정하였다. 또한 체중, 운동속도, 경사도 및 운동시간을 기반으로 총 운동부하량을 산출하였다. 자료 분석은 독립표본 t-검정, Pearson 상관분석, 공분산분석(ANCOVA), Cohen의 d를 이용한 효과크기 분석을 실시하였으며, 추가적으로 Spearman 상관분석과 민감도 분석을 수행하여 결과의 안정성을 검증하였다. 연구 결과, 남성은 여성보다 최대산소섭취량(46.69 ± 4.89 vs. $35.89 \pm 2.28 \text{ mL/kg/min}$)과 METs에서 유의하게 높은 값을 나타냈다($p < .001$). 운동지속시간과 총 운동부하량 또한 남성에서 높은 경향을 보였으나 통계적으로 유의하지는 않았다($p = .058$, $p = .077$). 효과크기 분석에서는 $\text{VO}_2 \text{ max}$ ($d = 2.80$)와 METs ($d = 3.20$)가 매우 큰 효과크기를 나타냈으며, 총 운동부하량($d = 0.92$) 역시 큰 효과크기를 보였다. 또한 총 운동부하량과 최대산소섭취량 간에는 높은 정적 상관관계($r = .86$, $p < .001$)가 확인되었으며, Spearman 상관분석 및 이상치 제거 후 분석에서도 유사한 결과가 유지되었다. 이러한 결과는 성별에 따른 형태학적 특성과 기능적 운동 반응 간의 연관성을 보여주는 자료로서 의미를 가진다. 특히 골격근량, 심장 크기, 혈액의 산소 운반능력과 같은 구조적 특성이 심폐지구력 차이에 영향을 미칠 가능성을 시사하며, 인간 집단 내 존재하는 성적 이형성(sexual dimorphism)의 기능적 표현 양상을 이해하는 데 기초자료를 제공한다. 또한 총 운동부하량은 최대산소섭취량과 밀접한 관련성을 나타내어 심폐지구력 평가를 위한 잠재적 지표로 활용될 가능성을 보여주었다. 따라서 본 연구는 성별에 따른 형태학적 다양성과 심폐지구력 반응 간의 관계를 이해하기 위한 기초자료를 제공하며, 향후 총 운동부하량 기반 평가 방법의 활용 가능성을 탐색하기 위한 후속 연구의 근거를 제시한다.

찾아보기 낱말 : 심폐체력, 최대산소섭취량, 총 운동부하량, 트레드밀 운동검사, 성별 차이