



## Original Article

# Development of $\text{VO}_{2\text{max}}$ Prediction Equations from KISS Protocol-Based Maximal Oxygen Uptake Measurements in Adolescent and Adult Elite Athletes

Ji-Young Jeon and Jong-Baek Lee\*

Center for Sport Science in Gyeongnam

### Article Info

Received 2025. 09. 08.

Revised 2025. 11. 10.

Accepted 2025. 12. 11.

### Correspondence\*

Jong-Baek Lee

supertomcat100@hanmail.net

### Key Words

Maximal oxygen uptake ( $\text{VO}_{2\text{max}}$ ),  
Prediction equation,  
KISS Protocol,  
Cardiorespiratory endurance,  
Elite athletes

Supported by Ministry of Culture,  
Sports and Tourism and Korea Sports  
Promotion Foundation\_Korea Institute  
of Sport Science

**PURPOSE** This study aimed to develop and validate sex-specific maximal oxygen uptake ( $\text{VO}_{2\text{max}}$ ) prediction equations for Korean elite athletes aged 10–20 years using physiological and fitness variables derived from the standardized KISS treadmill protocol. **METHODS** This study used data from 526 elite athletes (373 boys, 153 girls), including adolescents and adults in the Gyeongnam region.  $\text{VO}_{2\text{max}}$  was measured over 2 years using the KISS protocol. Multiple regression analyses were conducted with measured  $\text{VO}_{2\text{max}}$  as the dependent variable and age, height, body weight, body fat percentage, total exercise time, maximal heart rate (HRmax), and reasons for test termination as independent variables. **RESULTS** The regression equation for male athletes was:  $\text{VO}_{2\text{max}} = 45.233 + (0.024 \times \text{total time}) - (0.097 \times \text{body weight}) - (1.260 \times \text{reason for termination}) - (0.112 \times \text{body fat percentage})$ . The regression equation for female athletes was:  $\text{VO}_{2\text{max}} = 22.913 + (0.024 \times \text{total time}) - (0.220 \times \text{body weight}) + (0.106 \times \text{HRmax})$ . When compared with five existing prediction models, the proposed equations demonstrated the highest correlation coefficients (male  $r = 0.743$ ; female  $r = 0.749$ ). The standard error of estimate for the developed models was 4.27 and 3.57  $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  for males and females, respectively. **CONCLUSIONS** The sex-specific  $\text{VO}_{2\text{max}}$  prediction equations developed in this study can serve as reliable alternative tools for evaluating cardiorespiratory endurance in elite athletes. Further research incorporating a broader range of physiological variables and age groups is warranted to validate and refine these models.

## 서 론

현대 스포츠과학은 운동선수의 경기력 향상과 일반인의 건강 증진을 위해 객관적이고 과학적인 체력 평가 지표 개발에 중점을 두고 있다. 이 중 최대산소섭취량(maximal oxygen uptake:  $\text{VO}_{2\text{max}}$ )은 유산소 성 운동능력을 대표하는 정량적 지표로, 운동선수들의 지구력 훈련 효과를 평가하고, 심폐지구력 수준을 객관적으로 파악하는 핵심 지표로 활용된다.  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 는 또한, 운동선수 뿐만 아니라, 일반인의 고혈압, 심혈관 질환, 당뇨병 등과 같은 대사성 질환의 예방 및 관리에도

중요한 지표로 활용되고 있다(Hayward, 1992).

$\text{VO}_{2\text{max}}$ 는 일반적으로 트레드밀이나 싸이클 에르고미터와 같은 장비를 이용하여 직접적으로 측정되며, 이는 피검자의 운동 중 수집되는 산소섭취량과 이산화탄소 생산량 등의 호흡ガ스량의 분석을 통해 산소 소비량을 산출하는 방식이다. 이러한 직접적인 측정 방식은  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 가장 정확하게 평가할 수 있는 준거방법(gold standard)으로 받아들여진다. 하지만 이러한 직접 측정(direct measurement)방식은 고가의 장비와 전문 인력, 검사 시간, 안전한 환경이 필수적이기 때문에 실제 스포츠현장이나 학교, 지역사회 건강증진 센터 등에서 활용하는 데에 제한적이다(Schoffelen et al., 2019).

이러한 한계로 인해 성별, 나이, 심박수, 운동시간, 속도, 경사 등 다양한 운동생리학적 변수들을 이용한 간접추정식(indirect estimation equation)으로  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 예측하는 방식도 스포츠현장

© This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에서 활용되고 있다. 간접추정식은 직접측정 방식보다 간편하고 측정에 걸리는 시간이 비교적 빠르며, 고가의 장비가 필요로 하지 않기 때문에 실용성과 편의성, 접근성이 좋지만,  $\text{VO}_{2\text{max}}$  평가의 정밀도가 낮아지는 단점이 있다. 하지만 간접추정식은 직접측정 방식에 비해 상대적으로 낮은 신뢰성에도 불구하고 높은 활용성으로 인해 계속해서 개발의 필요성이 커지고 있다(McArdle et al., 2015).

현재 현장에서 활용되는 간접추정식을 살펴보면, 최대하 사이클 테스트와 심박수 반응을 기반으로  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 추정한 스트랜드-리밍 테스트(Siconolfi et al., 1982), 최대하 트레드밀 프로토콜을 활용하여 회귀방정식을 만들어  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 추정한 브루스 트레드밀 테스트(Grant et al., 1999), 충거리를 기준으로  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 추정하는 Balke 트레드밀 테스트(Peric & Nikolovski, 2017), 1.5mile 달리기를 완료하는 데 걸린 시간을 기준으로  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 예측하는 1.5mile 달리기 테스트(Zwirner et al., 1991), 최대심박수(HRmax)와 안정시심박수(HRrest)의 비율을 통해  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 추정하는 심박수 비율 방법(Uth et al., 2004) 등이 있다. 하지만 위의 간접추정식 대부분은 일반인을 대상으로 개발된  $\text{VO}_{2\text{max}}$  수식으로 전문 운동선수에 적용하기에 제한적이다.

따라서 선수들의 훈련 효과분석과 맞춤형 운동처방 등을 위해서는 전문 운동선수에 맞는 간접추정식이 필요하다. 현재 국내 스포츠 현장에서 가장 널리 활용되고 있는 검사 방식이 바로 한국스포츠과학원(Korea Institute of Sport Science, KISS)에서 개발한 KISS protocol이다. 이 프로토콜은 국가대표 선수들을 대상으로  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 분석하기 위해 고안된 접증부하형 트레드밀 검사로, 일정한 경사에서 단계적으로 속도를 증가시켜 피검자의 유산소성 운동수행능력을 평가한다. 현재 한국스포츠과학원과 국가대표 밀착지원팀, 전국 15개 시·도 지역 스포츠과학센터에서 동일하게 적용되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 KISS protocol을 활용하여 직접 측정된  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 와 주요 생리·운동 지표(심박수, 부하단계, 운동시간 등)를 활용하여 전문 운동선수에게 적합한 간접추정식을 개발하는 것이다. 이를 통해 전문 장비 없이도 트레드밀을 통해  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 효율적으로 예측할 수 있는 모델을 제시하고, 나아가 전문 운동선수는 물론 국민체력100, 학교체육, 군 체력평가, 직무체력 등 다양한 심폐지구력 관련 체력평가 및 건강관리 시스템에 적용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

## 연구방법

### 연구대상

본 연구는 한국 전문 운동선수 집단의 최대산소섭취량( $\text{VO}_{2\text{max}}$ )을 정확하게 예측할 수 있는 간접추정식을 개발하기 위해 수행되었다. 본 연구의 대상자는 2023년부터 2025년까지 경남스포츠과학센터에서  $\text{VO}_{2\text{max}}$  및 최대심박수 평가를 받은 중등부 이상의 전문 운동선수 남자 373명, 여자 153명 총 526명을 대상으로 진행하였다. 대상자는 모두 대사성 질환, 근골격계 질환 등 건강상 이상이 없는 자로, 운동부하검사를 안전하게 수행할 수 있는 신체적, 체력적 조건을 충족하였다. 또한 본 연구는 측정 전 모든 대상자들에게 연구의 목적과 절차를 충분히 설명하였으며, 성인 선수의 경우에는 본인 동의서를 작성

**Table 1.** Subjects' character by gender (Mean±SD)

Gender	Age	Height(cm)	Weight(kg)	Bodyfat(%)
Male n=373	18.26±4.23	175.4±6.86	71.3±10.91	14.4±5.53
Female n=153	17.87±2.92	164.9±5.58	60.69±9.02	24.2±5.24

하고, 미성년자 선수는 법적 대리인(부모 또는 보호자)의 서면 동의를 받은 후 참여 하였다. 참여 선수들은 총 23개 종목으로 구성되었으며, 태권도, 검도, 펜싱 등 투기 종목과 농구, 축구, 핸드볼 등 구기 종목, 카누, 수영, 육상, 럭비 등 기록 종목을 포함하였다. 연구 대상자의 기본 신체적 특징은 Table 1과 같다.

### 측정방법

#### 1. 신체구성

신체구성은 체성분 분석기 InBody 770(InBody, Co., Korea)를 이용하여 측정하였으며, 측정 항목으로는 체중, 제지방량, 근육량, 체지방률을 포함하였다. 신장은 BSM370(Biospace Inc., Seoul, Korea)를 이용하였다.

#### 2. 운동부하검사

본 연구에 적용된 접증운동부하검사 프로토콜은 한국스포츠과학원(KISS: 구 체육과학연구원)에서 국가대표 운동선수의 심폐지구력을 정확하게 평가하기 위해 개발된 KISS Protocol을 기반으로 수행되었다. 대상자들은 무선 심박계(T31, Polar, Finland)를 착용하고 10분간 안정 상태를 취한 뒤, 본 측정을 시작하였다.

KISS Protocol은 경사도(남자 6%, 여자 5%)를 고정된 상태에서 속도 5.4km/h로 시작하여, 2분마다 1.2km/h씩 접증적으로 증가시키는 방식으로 진행된다. 측정 중에는 산소섭취량( $\text{VO}_2$ ), 심박수(HR), 호흡교환율(RER), 운동자각도(RPE) 등을 지속적으로 확인하며, 대상자가 더 이상 운동을 지속할 수 없는 상태에 도달했을 때 검사를 종료하였다.

접증적 운동부하검사는 트레드밀(COSMED T170 DE, COSMED, Italy)을 이용하여 진행되었으며, 산소섭취량은 가스분석기(Quark CPET, COSMED, Italy)를 활용하여 측정하였다.

#### 3. 기존 $\text{VO}_{2\text{max}}$ 간접추정식

본 연구에서는 총 6개의  $\text{VO}_{2\text{max}}$  간접추정식을 활용하였다. 각 추정식들은 직접측정 없이도, 운동 수행 중 기록되는 시간, 속도, 성별, 연령 등의 변수로  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 추정할 수 있도록 고안된 것으로 자세한 내용은 Table 2와 같다.

Bruce et al.(1973)은 29세에서 73세 사이의 남성 151명과 여성 144명을 대상으로 다단계(multi-stage)트레드밀 운동부하검사를 진행한 결과,  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 는 성별, 연령, 신체활동 수준, 운동 지속시간과 높은 상관관계를 나타냈으며, 성별과 운동 지속시간만으로도  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 간접적으로 추정할 수 있는 예측 회귀식을 제시하였다. Peterman et al.(2021)에 따르면 이 예측 회귀식은 직접 측정된  $\text{VO}_{2\text{max}}$  와의 상관계수  $r=0.88$ , 표준추정오차 SEE=3.6mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>로 보고되었다.

Leger and Lambert(1982)은 성인 91명(남성 59명, 여성 32명)을 대상으로 최대 멀티스테이지 20m 셔틀런(maximal multistage 20m

**Table 2.** VO<sub>2max</sub> indirect estimation formula

Source	Equation
Bruce et al. (1973)	VO <sub>2max</sub> = 6.70 - 2.82(Gender:M1, W2) + 0.056(Ts)
Leger & Lambert (1982)	VO <sub>2max</sub> = 5.827 × velocity - 19.458
Ramsbottom et al. (1988)	VO <sub>2max</sub> = 3.46 × velocity + 12.2
Ahmaidi et al. (1992)	VO <sub>2max</sub> = 31.025 + (3.238 × velocity) - (3.248 × age) + (0.1536 × age × velocity)
St Clair Gibson et al. (1998)	VO <sub>2max</sub> = (6.0 × velocity) - 24.4
Flouris et al. (2005)	VO <sub>2max</sub> = (velocity × 6.65 - 35.8) × 0.95 + 0.182

shuttle run test)를 통해 이 검사가 VO<sub>2max</sub>를 예측하는데 유용한지 검증하였다. 20m 셔틀런 테스트에서 기록된 최종 속도와 직접 측정한 VO<sub>2max</sub> 간에 강한 상관관계(0.84~0.90)가 나타났다. 이를 바탕으로 최대 속도만으로 성인의 VO<sub>2max</sub>를 예측하는 회귀식을 제시하였다.

Ramsbottom et al.(1988) 연구는 남녀 성인 74명(남성 36명, 여성 38명)을 대상으로 호흡ガス분석과 셔틀런 테스트를 진행하였다. 20m 셔틀런 테스트를 활용하여 VO<sub>2max</sub>을 간접 추정하는 회귀식을 개발하였다. 해당 예측식은 실제 측정된 VO<sub>2max</sub>와의 상관계수가  $r=0.92$ 로 매우 높게 나타났으며, 표준추정오차 SEE=3.5mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>로 높은 예측력을 나타낸 것으로 보고되었다.

Ahmaidi et al.(1992) 연구는 18세에서 30세 사이의 중등도 훈련을 받은 남자 11명을 대상으로 트레드밀, 20m 셔틀런, 몬트리올 트랙 테스트(UM-TT) 등 세 가지 방법을 활용하여 VO<sub>2max</sub>, 최대 속도(Vmax), 최대심박수(HRmax), 젖산 농도 등을 비교 분석하였다. 이 과정에서 도출된 VO<sub>2max</sub> 예측식은 속도 및 연령을 함께 반영해 정확도를 높였다. 이 예측식은 Batista et al.(2013)에 따르면 실제 측정값과 상관계수( $r=0.60$ ), 표준추정오차(SEE=7.59mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>)가 나타나 예측 정확도가 낮은 것으로 보고되었다.

St Clair Gibson et al.(1998)은 남자 운동선수 총 20명(장거리 육상선수 10명, 수구수 10명)을 대상으로 멀티스테이지 셔틀런 테스트(multistage shuttle run test)와 VO<sub>2max</sub>를 비교하였다. 연구 결과, 멀티스테이지 셔틀런 테스트로 산출된 VO<sub>2max</sub>는 직접 측정 값에 비해 과소 평가되는 경향을 나타냈으며, 두 측정값의 상관계수는  $r=0.61\sim0.71$ 수준으로 보고되었다.

Flouris et al.(2005)은 기존의 20m 셔틀런 테스트가 심폐 체력 평가하는 데 자주 활용되지만, 민감도와 정확도 측면에서 한계가 존재함을 지적하였다. 이에 따라 본 연구에서는 총 110명의 건강한 남성 참가자를 대상으로 새로운 VO<sub>2max</sub> 예측공식 EQMST(셔틀런 기반), EQTT(트레드밀 기반)을 개발하였다. 이 공식은 트레드밀에서 직접 측정한 VO<sub>2max</sub>와 높은 상관관계( $r=0.75$ )를 보였으며, 표준추정오차(SEE)는 0.9mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>로 나타났다.

#### 4. 자료 처리

본 연구의 모든 통계 분석은 SPSS Statistics 27.0을 활용하여 수행되었다. 기술 통계분석을 통해 대상자의 신체 특성과 주요 변수들의 평균 표준편차를 산출하였다. 피어슨의 적률 상관분석을 이용하여 VO<sub>2max</sub>와 기타 변인들 간의 선형적 관계를 분석하여 예측 모델에 포함될 유의미한 변수들을 식별했다. 본 연구의 단계적 회귀분석(stepwise multiple regression)을 위한 표본 수는 G\*Power 3.1(Faul et al., 2007; Faul et al., 2009)을 이용하여 사전 검정력 분석을 통해 산출하였다. Cohen(1988)의 기준에 따라 중간 효과크

기( $f^2 = .15$ ), 유의수준  $\alpha = .05$ , 검정력( $1-\beta = .95$ , 예측변수 7개를 가정하여 a priori 분석을 수행한 결과, 최소 요구 표본 수는 436명과 145명内外로 산출되었다. 실제 수집된 표본은 남자 444명, 여자 153명으로, 두 집단 모두 최소 요구 표본 수를 상회하였다. 마지막으로 단계적 회귀분석(stepwise regression analysis)을 통해 운동선수들의 예측식을 개발하였다. 가설검정의 유의수준은 0.05로 설정하였으며 이러한 통계적 접근을 통해 개발된 모델의 통계적 유효성과 신뢰성을 확보하도록 진행하였다.

## 연구결과

### 신체적 특성 비교

본 연구에서 활용한 연구 대상자의 신체적 특성은 Table 3과 같다. 남자선수의 경우 수집된 444명중의 자료중 이상치(outlier)를 제외한 373명을 최종 분석대상으로 선정하였다. 남자선수 VO<sub>2max</sub>는 평균  $55.93 \pm 6.37$ mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>, 만나이는  $18.26 \pm 4.23$ 세, 신장  $175.37 \pm 6.86$ cm, 체중  $71.13 \pm 10.91$ kg, 체지방률  $14.42 \pm 5.53\%$ , HRmax  $193.19 \pm 9.03$ , 총시간(초)  $877.59 \pm 161.06$ 로 나타났다. 여자 선수 또한 수집된 157명의 자료중 이상치 4명을 제외한 153명을 분석하였다. 여자선수 VO<sub>2max</sub>는  $47.21 \pm 5.88$  mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>, 만나이는  $17.87 \pm 2.92$ 세, 신장  $164.92 \pm 6.02$ cm, 체중  $60.69 \pm 9.02$ kg, 체지방률  $24.27 \pm 5.24\%$ , HRmax  $193.10 \pm 7.78$ , 총시간(초)  $703.97 \pm 145.51$ 로 나타났다.

### VO<sub>2max</sub>와 관련된 변인간의 관계(상관분석 결과)

Table 4는 남자 운동선수를 대상으로 VO<sub>2max</sub>와 관련된 주요 변수간의 상관관계를 분석한 결과이다. VO<sub>2max</sub>는 총시간(초)과 강한 정적 상관( $r=0.704$ )을 보여 운동부하검사 종료 시점까지의 지속시간이 최대산소섭취량 수준을 반영하는 지표임을 나타냈다. 한편, VO<sub>2max</sub>는 중단사유( $r=-0.212$ )와는 부적 상관을 나타내어, 중단사유가 All Out(자발적 탈진)이 아닌 기타 사유(다리 통증, 근피로 등)로 나타난 경우, 최대산소섭취량이 낮아지는 경향을 보였다. HR<sub>max</sub>( $r=0.072$ )는 VO<sub>2max</sub>와 약한 정적 상관으로 나타나 최대심박수는 VO<sub>2max</sub> 수준을 설명하는 데 제한적임을 확인하였다. 이는 최대심박수가 연령, 유전, 훈련 정도 등 복합적인 생리적 요인에 따라 달라지기 때문에 심폐지구력의 지표로 활용하는 데 한계가 있음을 의미한다. 또한 체중( $r=-0.324$ )과 체지방률( $r=-0.482$ )은 VO<sub>2max</sub>와 각각 중간 정도의 부적 상관관계를 보였다. 이는 동일한 산소섭취량에서도 체중과 체지방

**Table 3.** Descriptive statistics of participants by gender

Fitness variable		Average	Standard Deviation	Minimum value	Maximum value
Male (n=373)	VO <sub>2max</sub> (mL·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	55.93	6.37	35.20	74.20
	Age(yrs)	18.26	4.23	12	35
	Height(cm)	175.37	6.86	138.5	194.9
	Body Mass(kg)	71.13	10.91	42.7	114.0
	Body Fat(%)	14.42	5.53	4.3	36.4
	HRmax(beats·min <sup>-1</sup> )	193.19	9.03	170	217
	Reason for Termination	1.22	.411	1	2
Total Exercise Time(s)		877.59	161.06	305	1237
Female (n=153)	VO <sub>2max</sub> (mL·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	47.21	5.88	35.10	61.20
	Age(yrs)	17.87	2.92	12	28
	Height(cm)	164.92	6.02	150.5	183
	Body Mass (kg)	60.69	9.02	40.5	89.7
	Body Fat(%)	24.27	5.24	7.2	38
	HRmax(beats·min <sup>-1</sup> )	191.10	7.78	171	211
	Reason for Termination	1.29	.457	1	2
Total Exercise Time(s)		703.97	145.51	258	1041

Reason for Termination: 1 = Volitional Exhaustion, 2 = Other reasons (leg fatigue, pain, etc.)

**Table 4.** Pearson Correlation Analysis Results for Male and Female Athletes

	Fitness variable	VO <sub>2max</sub> (mL·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	Age (yrs)	Height (cm)	Body Mass (kg)	Body Fat (%)	HR <sub>max</sub> (beats·min <sup>-1</sup> )	Reason for Termination
Male	Age(yrs)	0.098						
	Height(cm)	-0.013	0.406					
	Body Mass(kg)	-0.324	0.401	0.590				
	Body Fat(%)	-0.482	0.017	-0.177	0.457			
	HRmax(beats·min <sup>-1</sup> )	0.072	-0.183	-0.065	-0.043	0.045		
	Reason for Termination	-0.212	-0.112	-0.055	-0.040	0.021	0.028	
	Total Exercise Time(s)	0.704	0.249	0.179	-.0.185	-0.504	0.056	-0.225
Female	Age(yrs)	0.243						
	Height(cm)	-0.153	0.178					
	Body Mass(kg)	-0.475	0.064	0.513				
	Body Fat(%)	-0.448	-0.012	-0.013	0.577			
	HRmax(beats·min <sup>-1</sup> )	0.327	-0.073	-0.152	-0.347	-0.063		
	Reason for Termination	0.020	-0.044	0.055	-0.010	-0.097	0.007	
	Total Exercise Time(s)	0.675	0.392	0.059	-0.166	-0.279	0.108	-0.124

량이 증가하면 상대적 VO<sub>2max</sub> 값이 낮아질 수 있음을 나타내며, 선수의 체지방율이 유산소성 능력과 연동되는 것을 시사한다.

여자 운동선수를 대상으로 VO<sub>2max</sub>와 관련된 주요 변수간의 상관관계를 분석한 결과이다. VO<sub>2max</sub>는 총시간(초)( $r=0.675$ )과 가장 강한 정적 상관을 보였고, HR<sub>max</sub>( $r=0.327$ ), 만나이( $r=0.243$ ) 순으로 유의한 관계가 나타났다. 이는 여자 운동선수의 경우에도 운동 지속시간과 최대심박수 반응이 VO<sub>2max</sub>에 영향을 미치는 주요 변인임을 확인할 수 있었다.

따라서, 본 연구에서 확인된 VO<sub>2max</sub>와 총시간 간의 높은 상관관계

는 검사 종료 시점까지의 지속능력은 유산소성 에너지 대사 효율을 잘 반영하는 지표로 해석될 수 있다.

한국 운동선수 최대산소섭취량(VO<sub>2max</sub>) 추정식 개발(단계적 회귀분석 결과)

〈Table 5〉는 남자 선수의 VO<sub>2max</sub> 예측을 위한 단계적 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 1단계 모형에서 총시간(초)은  $\beta=0.704$ 로 가장 높은 설명력을 보였으며, 단일 변수로  $R^2=0.496$ 의 설명력을 나

**Table 5.** Stepwise regression analysis predicting VO<sub>2max</sub> in male athletes

	regression	B	Standard error	$\beta$	t	P	R <sup>2</sup>	Standard error of estimation
1	Constant	31.766	1.284		24.747	0.000	0.496	4.48
	Total Exercise Time(s)	0.027	0.001	0.704	19.104	0.000		
2	Constant	41.199	2.098		19.640	0.000	0.535	4.31
	Total Exercise Time(s)	0.026	0.001	0.667	18.484	0.000		
	Body Mass(kg)	-0.114	0.021	-0.201	-5.563	0.000		
3	Constant	43.474	2.364		18.393	0.000	0.540	4.29
	Total Exercise Time(s)	0.025	0.001	0.649	17.551	0.000		
	Body Mass(kg)	-0.118	0.021	-0.207	-5.742	0.000		
	Reason for Termination	-1.161	0.565	-0.075	-2.056	0.040		
4	Constant	45.233	2.487		18.186	0.000	0.546	4.27
	Total Exercise Time(s)	0.024	0.002	0.605	14.397	0.000		
	Body Mass(kg)	-0.097	0.023	-0.171	-4.310	0.000		
	Reason for Termination	-1.260	0.564	-0.081	-2.235	0.026		
	Body Fat(%)	-0.112	0.051	-0.098	-2.173	0.030		

**Table 6.** Stepwise regression analysis predicting VO<sub>2max</sub> in female athletes

	regression	B	Standard error	$\beta$	t	P	R <sup>2</sup>	Standard error of estimation
1	Constant	27.920	2.055		13.584	0.000	0.456	4.20
	Total Exercise Time(s)	0.027	0.003	0.675	9.693	0.000		
2	Constant	45.014	3.339		13.481	0.000	0.591	3.66
	Total Exercise Time(s)	0.025	0.002	0.613	9.971	0.000		
	Body Mass(kg)	-0.254	0.042	-0.373	-6.063	0.000		
3	Constant	22.913	9.948		2.303	0.023	0.611	3.59
	Total Exercise Time(s)	0.024	0.002	0.606	10.029	0.000		
	Body Mass(kg)	-0.220	0.044	-0.322	-5.038	0.000		
	HRmax(beats·min <sup>-1</sup> )	0.106	0.045	0.149	2.353	0.020		

타였다. 2단계에서는 체중이 추가되며 총시간(초) ( $\beta=0.667$ )와 체중 ( $\beta=-0.201$ )이 유의한 설명 변수로 포함되었고, 설명력은  $R^2=0.535$ 로 증가하였다. 3단계 모형에서는 중단사유가 추가되어 총시간 ( $\beta=0.649$ ), 체중 ( $\beta=-0.207$ ), 중단사유 ( $\beta=-0.075$ )가 모두 유의하게 VO<sub>2max</sub>에 기여하였으며,  $R^2$ 은 0.540으로 향상되었다. 4단계 최종 모형에서는 체지방률이 추가되며, 총시간 ( $\beta=0.605$ ), 체중 ( $\beta=-0.171$ ), 중단사유 ( $\beta=-0.081$ ), 체지방률 ( $\beta=-0.098$ ) 모두 유의한 변수로 포함되었고, 최종적으로  $R^2=0.546$ 으로 나타나 VO<sub>2max</sub>의 약 55%를 설명하였다.

<Table 6>은 여자 선수의 단계적 회귀분석 결과로, 1단계에서 총 시간(초)은  $\beta=0.675$ 로 유의한 변수로 나타났으며  $R^2=0.456$ 으로 나타났다. 2단계에서는 체중 ( $\beta=-0.373$ )이 추가되며 총시간 ( $\beta=0.613$ )과 함께  $R^2$ 가 0.591로 증가하였다. 3단계 최종 모형에서는 HR<sub>max</sub> ( $\beta=0.149$ )가 추가되어 총시간 ( $\beta=0.606$ ), 체중 ( $\beta=-0.322$ ), HR<sub>max</sub> ( $\beta=0.149$ )가 모두 유의하게 VO<sub>2max</sub>에 기여하였으며,  $R^2$ 는 0.611로 약 61%의 설명력이 확인되었다.

단계적 회귀분석을 통해 도출된 변수들의 표준화 회귀계수( $\beta$ )를 비교해보면, 남자 여자 모두 총시간(초)은 VO<sub>2max</sub> 예측에 가장 영향을 주는 변수로 확인되었다 ( $\beta=0.605 \sim 0.606$ ). 체중은 남자 선수에 비해 여자 선수에게서 더 큰 부정 영향을 미친 것으로 나타났다 (여자  $\beta=-0.322$ , 남자  $\beta=-0.171$ ). 이는 여자가 남자에 비해 체지방률이 높고, 근육량이 낮은 생리학적 특성에 따른 결과로 해석된다. 한편 HR<sub>max</sub>는 여자 선수에게만 유의한 변수로 포함되었으나 ( $\beta=0.149$ ), 남자 선수 예측식에는 포함되지 않았다. 이는 생리학적 차이에 기인한 결과로, 여자는 남자에 비해 일회박출량이 작아 동일한 산소 소비량을 유지하기 위해 심박수 증가에 더 의존하는 특성을 나타낸다. 따라서 HR<sub>max</sub>가 주요 변수로 작용했을 가능성성이 있다.

결과를 종합하면, 본 연구에서 제시된 VO<sub>2max</sub> 예측 모형 중 남자 선수는 4단계 모형, 여자 선수는 3단계 모형이 가장 높은 설명력 ( $R^2$ )과 안정적인 오차 수준 (SEE)을 보여 최종 모형으로 채택되었다. 이에 따라 남자 선수의 경우 총시간, 체중, 중단사유, 체지방률이 포함되었으며, 이중 체지방률 변수는 남자 선수 회귀모형에 포함되었지만 통계

적 유의수준에 도달하지 못하였다. 여자 선수는 총시간과 체중 외에  $\text{HR}_{\max}$ 가 추가되어  $\text{VO}_{2\max}$  수준 예측의 설명력이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 바탕으로, 본 연구에서 개발된 한국 운동선수의 최대산소섭취량 추정식은 <식 1>, <식 2>이다.

<식 1> 남자 운동선수  $\text{VO}_{2\max}$  추정식=

$$45.233 + (0.024 \times \text{총시간(초)}) - (0.097 \times \text{체중}) - (1.260 \times \text{중단사유}) \\ (1:\text{호흡}, 2:\text{기타사유}) - (0.112 \times \text{체지방률})$$

<식 2> 여자 운동선수  $\text{VO}_{2\max}$  추정식=

$$22.913 + (0.024 \times \text{총시간(초)}) - (0.220 \times \text{체중}) + (0.106 \times \text{HRmax})$$

이 예측식은 국내 운동선수의 특성과 신체조성을 반영한 다변수 모형으로,  $\text{VO}_{2\max}$ 을 간편하고 신뢰성 있게 추정할 수 있는 실용적 평가 도구로 활용될 수 있다. 특히 선수 개별의 유산소성 지구력 수준을 정량적으로 파악하여, 개인 맞춤형 훈련 설계와 체력 관리 전략 수립에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

#### 한국 운동선수 최대산소섭취량( $\text{VO}_{2\max}$ ) 추정식 상관분석 비교

<Table 7>은 본 연구에서 개발한  $\text{VO}_{2\max}$  예측식과 기존 예측식들이 실제 측정값과 어떤 상관관계를 보이는지 비교 분석한 결과이다.

남자 선수의 경우, 본 연구 추정식은  $\text{VO}_{2\max}$  실제값과  $r=.743(p<.001)$ 으로 나타나 Bruce et al.(1973)( $r=.713$ ), Leger and Lambert(1982) ( $r=.686$ ) 등 기존 예측식보다 다소 높은 상관계수를 보였다. 이는 운동부하검사에서 종료 시점까지의 총시간, 체중, 중단사유, 체지방률을 함께 반영한 다변수 모형이 기존 단일 변수 또는 단일 속도 기반 예측식보다 국내 선수 특성에 적합한 설명력을 보였다. 여자 선수 또한 본 연구 추정식은 실제  $\text{VO}_{2\max}$ 과  $r=.749(p<.001)$ 로 가장 높은 상관관계를 나타내었으며, 기존 Bruce et al.(1973)과 Leger and Lambert(1982) 예측식보다 설명력이 우수하였다. 따라서 본 연구의 추정식은 국내 운동선수의 신체조성과 운동 지속능력 특성을 반영하여  $\text{VO}_{2\max}$  추정의 타당성을 확보하였으며, 기존 예측식보다 높은 설명력을 보였다. 이는 현장에서 간편하고 신뢰성 있는 유산소성 지구력 평가 도구로 활용될 수 있음을 보여준다.

## 논의

본 연구는 경남지역 중등부, 고등부, 대학부, 일반부 남녀 전문 운동 선수를 대상으로 가스호흡분석 측정장비를 활용하여 직접 측정한  $\text{VO}_{2\max}$  결과를 토대로, 국내 선수들의  $\text{VO}_{2\max}$ 를 예측할 수 있는 간접 추정식을 개발하였다. 본 연구에서 개발된  $\text{VO}_{2\max}$  간접추정식은 총 운동시간, 체중, 체지방률,  $\text{HR}_{\max}$ , 그리고 운동 중단사유와 같이 현장에서 쉽게 측정 가능한 변인들로 구성되어, 고가의 장비나 숙련된 전문 인력 없이도 신뢰성 있는  $\text{VO}_{2\max}$ 를 예측할 수 있음을 확인하였다. 이는 직접 측정 방식의 비용·환경·시간적 제약을 보완하여, 실제 스포츠 현장에서의 접근성과 활용도를 크게 향상시킬 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서 직접 측정된  $\text{VO}_{2\max}$  결과와 도출된 추정식, 그리고 널리 사용되던 6가지  $\text{VO}_{2\max}$  간접추정식을 비교하여 타당성을 검증하였다. 남자 선수의 경우, 본 연구에서 개발된 간접추정식은 실제  $\text{VO}_{2\max}$  값과  $r=.743(p<.001)$ 의 상관관계를 보였고, Bruce et al. (1973)( $r=.713$ ) 및 Leger and Lambert(1982)( $r=.686$ ) 등 기존 예측식보다 다소 높은 상관계수를 나타냈다. 특히 Ahmaidi et al.(1992)의 공식( $r=.640$ )과 비교했을 때 더욱 큰 차이를 나타냈다. 여자 선수의 경우에도 본 연구 추정식은 실제  $\text{VO}_{2\max}$  값과  $r=.749(p<.001)$ 로 높은 상관관계를 나타냈으며, 기존 Bruce et al.(1973) 및 Leger and Lambert(1982) 예측식보다 우수한 설명력을 보였다.

기존 추정식들은 각각 다른 모집단(연령, 성별 등)과 검사 방식(트레드밀, 셔틀런 등)을 기반으로 개발되었기 때문에, 국내 전문 운동선수 집단에 적용할 경우 예측 정확도에 차이가 발생할 수 있다. Bruce et al.(1973)의 공식은 성별과 운동 지속 시간을 기반으로 성인의  $\text{VO}_{2\max}$ 를 예측하며, 다단계 트레드밀 운동 부하 검사를 통해 개발되었다. Leger and Lambert(1982) 및 Ramsbottom et al.(1988), St Clair Gibson et al.(1998)의 공식은 주로 20m 셔틀런 테스트의 최고 속도를 변수로 활용하여 청소년 또는 성인의  $\text{VO}_{2\max}$ 를 추정했다. Ahmaidi et al.(1992)의 공식은 속도와 연령을 함께 고려하여 예측 정밀도를 높였고, Flouris et al.(2005)의 공식은 트레드밀 기반으로 개발되었다. 이처럼 개발 배경과 대상 집단의 차이는 본 연구와 같은 국내 전문 운동선수 그룹에 적용할 경우, 예측의 타당성을 저하시킬 수 있다.

본 연구는 태권도, 농구, 카누 등 다양한 종목의 전문 운동선수들이 포함되었다. 이러한 다양한 종목의 데이터를 통합하여 예측식을 개발

**Table 7.** Correlation coefficients between actual  $\text{VO}_{2\max}$  values and estimation equations in this study and previous estimation equations for male and female athletes

Prediction Equation	Male			Female		
	N	r	p	N	r	p
$\text{VO}_{2\max}(\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1})$	400	1	$p < .001$	153	1	$p < .001$
This Study	400	.743**	$p < .001$	153	.749**	$p < .001$
Bruce et al.,(1973)	400	.713**	$p < .001$	153	.690**	$p < .001$
Leger & Gadoury (1989)	400	.686**	$p < .001$	153	.656**	$p < .001$
Ramsbottom et al. (1988)	400	.686**	$p < .001$	153	.656**	$p < .001$
Ahmaidi et al. (1992)	400	.640**	$p < .001$	153	.570**	$p < .001$
St Clair Gibson et al. (1998)	400	.686**	$p < .001$	153	.656**	$p < .001$
Flouris et al. (2005)	400	.686**	$p < .001$	153	.656**	$p < .001$

\* $p < .05$ , \*\* $p < .01$  “This study” refers to the  $\text{VO}_{2\max}$  estimation equation developed in the present study.

하는 것은 일반화 가능성을 높이는 장점이 있으나, 각 종목의 고유한 생리적 요구나 운동 특성을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다.

그럼에도 불구하고 본 연구에서 도출된 추정식은 국내 젊은 전문 운동선수들의 실제 생리적 특성을 반영한 점에서 의의가 크다. 즉, 본 연구 추정식에 포함된 변수들(남자:총시간, 체중, 체지방률, 중단사유; 여자:총시간, 체중, HRmax)이 해당 집단의 생리적 특성과 운동 반응을 반영한 결과이며, 기준의 일반화된 간접추정식보다 본 연구 집단에서 더 높은 예측 정확도를 보이는 것은 일관된 결과로 해석될 수 있다.

이러한 결과는 '특이성 원리(specificity principle)'의 중요성을 뒷받침하며, 추정식이 파생된 인구 집단과 유사한 특성(연령, 성별, 체력 수준, 인종, 훈련 상태, 테스트 방식)을 가진 개인에게 적용될 때 가장 유효하고 신뢰할 수 있음을 의미한다. 실제로 기준의 일반화된 VO<sub>2max</sub> 예측 추정식들은 다양한 인구 집단에 적용될 수 있도록 설계되었지만, 외부 검증 연구 결과에서는 종종 낮거나 중간 정도의 정확도( $R^2$  값이 0.65 미만)를 보이며, 특히 고도로 훈련된 운동선수 집단에 적용될 때 VO<sub>2max</sub>를 과소 또는 과대 추정하는 경향이 있다. 따라서 하나의 추정식으로 모든 집단과 성별, 연령에 적용될 수 없으며, 특정 운동선수 집단의 고유한 생리적 특성을 반영한 맞춤형 간접추정식 개발의 필요성이 강조된다.

본 연구의 VO<sub>2max</sub> 간접추정식은 경남지역 중등부 이상의 남녀 전문 운동선수라는 특정 코호트의 데이터를 기반으로, KISS 프로토콜을 적용하여 개발되었다.

따라서 이 간접추정식은 특정 종목에 국한되지 않고 다종목에 걸쳐 일반적인 적용 가능성을 갖춘 것이 특징이다. 특히 유산소 능력이 경기력에 핵심인 종목(중장거리 육상, 축구, 사이클 등)에서는 정기적인 평가와 훈련 피드백 도구로 적극 활용될 수 있다. 선수의 체중, 체지방률 변화에 따른 유산소 능력의 추이 변화를 수치화하여 훈련 강도를 조절하고 오버트레이닝 방지 등 전략적이고 체계적인 관리에 실질적인 도움이 될 수 있다.

개발 과정에서 총시간은 남녀 모두 공통적으로 높은 설명력을 가진 변인으로 나타냈다.

VO<sub>2max</sub>과 총 운동시간의 높은 관련성은 고전적 연구에서부터 비교적 최근의 연구들까지 일관되게 언급되고 있다. VO<sub>2max</sub>는 주로 심박출량, 혈중 산소 운반능력, 근육의 산소 이용 능력에 의해 결정되며, 운동지속시간과는 상호 반비례의 관계를 가진다. 즉, VO<sub>2max</sub>에 가까운 고강도 운동일수록 운동의 지속시간이 급격히 단축된다(Hill & Lupton, 1923; Coyle 1995; Bassett & Howley, 2000).

또한 지속 가능한 최대파워(Critical Power: CP) 이상의 강도에서는 VO<sub>2max</sub>에 빠르게 도달하여 피로 누적으로 인해 탈진하게 되며, 반대로 VO<sub>2max</sub>에 도달하지 않는 범위에서는 장시간 운동이 가능하다. 이때 CP는 개인이 지속할 수 있는 한계 강도를 결정하는데 유용하다고 보고하고 있다(Poole et al., 2016; Jones & Vanhatalo, 2017). 그러나 동일한 VO<sub>2max</sub> 수준이라도 달리기 효율성(Running Economy)과 젖산역치(Lactate Threshold, LT)에 따라 운동 지속시간은 달라질 수 있으며(Joyner & Coyle, 2008), 이는 본 연구에서 총 운동시간이 VO<sub>2max</sub> 간접추정식의 약 60% 이상의 설명력만 나타냈던 이유로 해석되어진다.

체중과 체지방률 또한 VO<sub>2max</sub>에 주요 변인으로 나타났다. Sharma et al.(2016)는 남녀 모두에서 체지방률이나 BMI가 높을수록 VO<sub>2max</sub>가 낮아진다고 보고하였고, Onetti et al.(2020)는 남성이 여성보

다 체중과 VO<sub>2max</sub>의 부적 상관이 더 뚜렷하다고 하였다. Shete et al.(2014) 또한 여성 운동선수 집단이 비운동 집단보다 높은 VO<sub>2max</sub>와 낮은 체지방률을 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었으며, 부적 상관의 경향성만 확인하였다.

이러한 결과는 본 연구에서 체중과 체지방률이 주요 변인으로 도출된 것과 일치한다. 즉, 체중과 체지방률이 낮고 근육량이 높을수록 VO<sub>2max</sub>는 증가하며, 체중이 높을수록 VO<sub>2max</sub>는 감소하는 경향을 보였다. 특히 남자 선수에서 이러한 경향이 더 뚜렷하였고, 여자 선수에서는 체지방률 증가에 따른 VO<sub>2max</sub> 감소 경향이 있었으나 그 폭이 작아 통계적으로 유의하지 않았다.

이러한 남녀 간 체지방률에 의한 VO<sub>2max</sub>의 차이는 근육량의 영향으로 설명할 수 있다. 운동 중 근육은 산소를 가장 많이 소비하는 조직으로 근육량이 많을수록 전체적인 산소 수요와 소모량이 증가된다. 특히 하체 근육량이 높을수록 높은 VO<sub>2max</sub>를 나타내며, 근육내 미토콘드리아 생합성을 촉진하고 산화적 인산화 능력을 개선함으로써, 단위 근육질량 당 산소 이용 효율도 높아진다(AlKandari & Nieto, 2019). 이렇듯 근육량과 체지방률, 체중이 VO<sub>2max</sub>와 직결되기 때문에 이러한 추정식의 변인에 차이를 나타낸 이유로 사료된다.

VO<sub>2max</sub>는 최대운동 시 심박수(HR) × 일회박출량(Stroke Volume: SV) × 동정맥산소차(arteriovenous oxygen difference: a-vO<sub>2diff</sub>)로 결정된다. 여기서 HR은 HRmax에 근접하지만, 개인 간 VO<sub>2max</sub> 차이를 크게 가르는 것은 주로 SV와 Hbmass(haemoglobin mass)이다. 따라서 HR<sub>max</sub>와 VO<sub>2max</sub>는 직접적인 상관관계라기보다는 동시에 발생되는 관계로 볼 수 있다(Saunders et al., 2013). HR<sub>max</sub> 예측식의 상수항/기울기만으로 개인의 HR<sub>max</sub>를 판단하기는 어렵고 오차 폭도 크며, 특히 고령·여성·엘리트 운동선수는 표준식의 편향 차이가 크다(Swain & Leutholtz, 1997). HR<sub>max</sub>은 연령에 가장 크게 좌우되고, 훈련 수준이나 성별의 영향은 적어 훈련으로 VO<sub>2max</sub>의 변화의 폭은 있지만 HR<sub>max</sub> 자체는 거의 변하지 않는다(Tanaka et al., 2001). 이러한 HR<sub>max</sub>는 VO<sub>2max</sub>에 직접적인 영향을 주는 요인은 아니지만 여자 선수들에서는 낮은 체중과 함께 VO<sub>2max</sub>에 영향을 주는 변인으로 나타났고, 남자 선수에서는 제외되었다.

최대운동 중 호흡곤란으로 중단된 경우는 말초 근피로, 부상이나 정신적 포기 등 비호흡성 사유와 생리학적 의미가 다르며, 이런 차이는 같은 총 운동시간이어도 VO<sub>2max</sub> 추정의 보정 신호로 작동할 수 있다(Stendardi et al., 2005)는 연구와 같은 것으로 사료된다. 다만 여자선수들의 경우 남자선수에 비해 상대적으로 폐용적과 작은 기도의 크기 등으로 인한 호흡기계 기계적인 제한적이라고 하였으며 (Guenette et al., 2009), 이러한 이유 외에 남자선수에 비해 부족한 표본차이로 인한 분산의 부족으로 인해 통계적으로 탈락하고 대신 HR<sub>max</sub>가 심혈관계 한계를 대변했던 것으로 사료된다.

## 결론 및 제언

본 연구는 경남지역 중등부, 고등부, 대학부, 일반부 전문 운동선수를 위한 남녀 성별 특이적 최대산소섭취량(VO<sub>2max</sub>) 간접추정식을 개발하였다. 이 추정식은 전문 운동선수의 심폐지구력을 평가하기 위해 한국스포츠과학원(KISS)의 표준화된 트레드밀 프로토콜을 기반으로 직접 측정된 데이터를 활용하여, 총 운동시간, 체중, 체지방률, 최대 심박수(HR<sub>max</sub>), 그리고 운동 중단사유 등과 같은 실용적인 변수들을

포함하고 있다.

분석 결과, 본 연구에서 개발된 새로운 모델은 기존에 널리 사용되던 6가지  $\text{VO}_{2\text{max}}$  예측공식과 비교했을 때 실제  $\text{VO}_{2\text{max}}$  값과 더 높은 상관관계를 보이며 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 예측력을 갖춘 것으로 나타났다. 이는 특정 집단의 생리적 특성을 반영한 맞춤형 추정식이 일반화된 추정식에 비해 해당 집단의  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 를 보다 정확하게 평가할 수 있음을 시사한다.

따라서 본 연구에서 개발된  $\text{VO}_{2\text{max}}$  간접추정식은 한국의 젊은 전문 운동선수의 유산소성 능력을 간편하고 효율적으로 평가할 수 있는 신뢰성 있는 도구로 제시된다. 이는 스포츠 현장에서 선수 개개인의 맞춤형 훈련 계획 수립과 훈련 효과 분석 그리고 체계적인 체력 관리 시스템 구축에 필요한 핵심 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 본 연구에서 개발한 모델과 비교 대상으로 포함된 기존 추정식 모두  $\text{VO}_{2\text{max}}$  분산의 약 50%~70%를 설명하였으나, 여전히 상당 부분의 분산이 설명되지 않고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 단순한 선형 예측 변수만으로는  $\text{VO}_{2\text{max}}$ 의 복잡한 결정요인을 충분히 설명하기 어려운 한계를 반영한다. 또한 본 연구에서는 태권도, 축구, 육상 등 다양한 종목의 선수들이 포함되어 있어 종목 생리적 특이성이나 운동 패턴 등을 반영하기에는 한계가 있는 것으로 사료된다.

향후 연구에서는 종목 특성, 훈련수준, 유전적 요인, 달리기 효율성 등 다양한 운동생리학적 요인을 정량화하여 보다 설명력 높은 다변량 예측 모델의 개발이 요구된다. 특히 산소섭취 효율기울기(OUES), 환기효율(VE/VCO<sub>2</sub>)과 같은 지표들을 추가함으로써  $\text{VO}_{2\text{max}}$  단일 지표를 넘어 보다 종합적인 심폐체력의 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

이러한 통합적이고 다차원적인 접근은 단순 예측을 넘어, 실제 경기력 향상과 체력평가 시스템 구축에 핵심적인 기초자료가 될 수 있으며, 향후 선수 개인 및 상호간의 맞춤형 체력평가 및 훈련 모델 개발의 토대가 될 것으로 사료된다.

#### CONFLICT OF INTEREST

논문 작성에 있어서 어떠한 조직으로부터 재정을 포함한 일체의 지원을 받지 않았으며 논문에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 관계도 없음을 밝힌다.

#### AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptualization: Jong-Baek Lee, Data curation: Ji-Young Jeon, Formal analysis: Jong-Baek Lee, Methodology: Jong-Baek Lee, Project administration: Ji-Young Jeon, Visualization: Ji-Young Jeon, Writing-original draft: Jong-Baek Lee, Ji-Young Jeon, Writing-review & editing: Jong-Baek Lee

## 참고문헌

- Ahmaidi, S., Collomp, K., Caillaud, C., & Prefaut, C. (1992).** Maximal and functional aerobic capacity as assessed by two graduated field methods in comparison to laboratory exercise testing in moderately trained subjects. *International Journal of Sports Medicine*, 13(3), 243-248.
- AlKandari, J. R., & Nieto, M. B. (2019).** Peak O<sub>2</sub> uptake correlates with fat free mass in athletes but not in sedentary subjects. *Health, 11*(1), 40-49.
- Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000).** Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1), 70-84.
- Batista, M. B., Cyrino, E. S., Arruda, M., Dourado, A. C., Coelho-E-Silva, M. J., Ohara, D., Romanzini, M., & Ronque, E. R. (2013).** Validity of equations for estimating V [combining dot above] O<sub>2peak</sub> from the 20-m shuttle run test in adolescents aged 11-13 years. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(10), 2774-2781.
- Bruce, R., Kusumi, F., & Hosmer, D. W. (1973).** Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. *American Heart Journal*, 85(4), 546-562.
- Cohen, J. (1988).** *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum.
- Coyle, E. F. (1995).** Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 23(1), 25-64.
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009).** Statistical power analyses using G\*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149-1160.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007).** G\*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175-191.
- Flouris, A. D., Metsios, G. S., & Koutedakis, Y. (2005).** Enhancing the efficacy of the 20 m multistage shuttle run test. *British Journal of Sports Medicine*, 39(3), 166-170.
- Grant, S., Corbett, K., Amjad, A. M., Wilson, J., & Aitchison, T. (1999).** A comparison of methods of predicting maximum oxygen uptake. *British Journal of Sports Medicine*, 33(3), 147-152.
- Guenette, J. A., Querido, J. S., Eves, N. D., Chua, R., & Sheel, A. W. (2009).** Sex differences in the resistive and elastic work of breathing during exercise in endurance-trained athletes. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 297(1), 166-175.
- Heyward, V. H. (1992).** Advanced fitness assessment and exercise prescription. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 24(2), 278.
- Hill, A. V., & Lupton, H. (1923).** Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *QJ Med*, 16(62), 135-71.
- Jones, A. M., & Vanhatalo, A. (2017).** The 'critical power' concept: applications to sports performance with a focus on intermittent high-intensity exercise. *Sports Medicine*, 47(Suppl 1), 65-78.
- Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008).** Endurance exercise performance: the physiology of champions. *The Journal of physiology*, 586(1), 35-44.
- Leger, L. A., & Lambert, J. (1982).** A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict O<sub>2</sub> max. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 49(1), 1-12.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2015).** *Exercise physiology: Nutrition, energy, and human performance* (8th ed.). Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins.
- Onetti-Onetti, W., Molina-Sotomayor, E., González-Jurado, J. A., & Castillo-Rodríguez, A. (2020).** Comparison between sexes of the relationships between body composition and maximum oxygen volume in elderly people. *Sustainability*, 12(8), 3156.
- Peric, D., & Nikolovski, S. (2017).** Prediction of VO<sub>2max</sub> from the distance covered in the Balke treadmill test. *Facta Universitatis, Series: Physical Education and Sport*, 15(3), 499-508.
- Peterman, J. E., Harber, M. P., Imboden, M. T., Whaley, M. H., Fleenor, B. S., Myers, J., Arena, R., & Kaminsky, L. A. (2021).** Accuracy of exercise-based equations for estimating cardiorespiratory fitness. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 53(1), 74.
- Pool, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B., & Jones, A. M. (2016).** Critical power: an important fatigue threshold in exercise physiology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2320-2334.
- Ramsbottom, R., Brewer, J., & Williams, C. (1988).** A progressive shuttle run test to estimate maximal oxygen uptake. *British Journal of Sports Medicine*, 22(4), 141-144.
- Saunders, P. U., Garvican-Lewis, L. A., Schmidt, W. F., & Gore, C. J. (2013).** Relationship between changes in haemoglobin mass and maximal oxygen uptake after hypoxic exposure. *British Journal of Sports Medicine*, 47(Suppl 1), i26-i30.
- Schoffelen, P. F., den Hoed, M., van Breda, E., & Plasqui, G. (2019).** Test-retest variability of VO<sub>2max</sub> using total-capture indirect calorimetry reveals linear relationship of VO<sub>2</sub> and Power. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29(2), 213-222.
- Sharma, H. B., & Kailashya, J. (2016).** Gender difference in aerobic capacity and the contribution by body composition and haemoglobin concentration: A study in young Indian national hockey players. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDDR*, 10(11), CC09.
- Shete, A. N., Bute, S. S., & Deshmukh, P. R. (2014).** A study of VO<sub>2</sub> max and body fat percentage in female athletes. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDDR*, 8(12), BC01.
- Siconolfi, S. F., Cullinane, E. M., Carleton, R. A., & Thompson, P. D. (1982).** A simple, valid step test for estimating maximal

- oxygen uptake in epidemiologic studies. *American Journal of Epidemiology*, 115(5), 736-742.
- St Clair Gibson, A., Broomhead, S., Lambert, M. I., & Hawley, J. A. (1998).** Prediction of maximal oxygen uptake from a 20-m shuttle run as measured directly in runners and squash players. *Journal of Sports Sciences*, 16(4), 331-335.
- Standardi, L., Grazzini, M., Gigliotti, F., Lotti, P., & Scano, G. (2005).** Dyspnea and leg effort during exercise. *Respiratory Medicine*, 99(8), 933-942.
- Swain, D. P., & Leutholtz, B. C. (1997).** Heart rate reserve is equivalent to% VO<sub>2</sub> reserve, not to% VO<sub>2max</sub>. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(3), 410-414.
- Tanaka, H., Monahan, K. D., & Seals, D. R. (2001).** Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, 37(1), 153-156.
- Uth, N., Sørensen, H., Overgaard, K., & Pedersen, P. K. (2004).** Estimation of VO<sub>2max</sub> from the ratio between HRmax and HRrest—the heart rate ratio method. *European Journal of Applied Physiology*, 91(1), 111-115.
- Zwiren, L. D., Freedson, P. S., Ward, A., Wilke, S., & Rippe, J. M. (1991).** Estimation of VO<sub>2max</sub>: A comparative analysis of five exercise tests. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 62(1), 73-78.

## 엘리트 선수들의 KISS Protocol 최대산소섭취량 측정을 통한 VO<sub>2max</sub> 간접추정식 개발

전지영<sup>1</sup>, 이종백<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>경남스포츠과학센터, 선임연구원

<sup>2</sup>경남스포츠과학센터, 센터장

\*교신저자: 이종백(supertomcat100@hanmail.net)

[목적] 본 연구의 목적은 한국 엘리트 운동선수를 대상으로 한국스포츠과학원(KISS)의 표준화된 트레드밀 프로토콜에서 도출된 생리적 및 체력 변인을 활용하여, 성별에 따른 최대산소섭취량(VO<sub>2max</sub>) 간접추정식을 개발하고 그 타당성을 검증하는데 있다.

[방법] 본 연구는 경남지역의 청소년 및 엘리트 운동선수 526명(남자 373명, 여자 153명)을 대상으로 수행되었다. 최대산소섭취량은 KISS 프로토콜을 적용하여 2년에 걸쳐 측정되었다. 측정된 최대산소섭취량을 종속변수로 설정하고, 연령, 신장, 체중, 체지방율, 총 운동시간, 최대심박수(HRmax), 운동 중단사유를 독립변수로 하여 다중 회귀분석을 실시하였다.

[결과] 남자 선수의 최대산소섭취량 예측식은  $VO_{2\text{max}} = 45.233 + (0.024 \times \text{총 운동시간}) - (0.097 \times \text{체중}) - (1.260 \times \text{운동 중단사유}) - (0.112 \times \text{체지방율})$ 로 도출되었으며, 여자 선수의 예측식은  $VO_{2\text{max}} = 22.913 + (0.024 \times \text{총 운동시간}) - (0.220 \times \text{체중}) + (0.106 \times \text{최대심박수})$ 로 나타났다. 본 연구에서 개발된 예측식은 기존의 5가지 VO<sub>2max</sub> 간접추정식과 비교했을 때 가장 높은 상관계수(남자  $r=.743$ , 여자  $r=.749$ )를 보였다. 또한 개발된 모형의 추정 표준오차(Standard error of estimate, SEE)는 남자  $4.27 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ , 여자  $3.57 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 로 나타났다.

[결론] 본 연구에서 개발된 성별에 따른 최대산소섭취량 간접추정식은 국내 운동선수의 심폐지구력을 평가하는 데 있어 신뢰성 있는 대안적 평가 도구로 활용될 수 있다. 향후 연구에서는 보다 다양한 생리적 변인과 연령 집단을 포함한 후속 검증을 통해 본 모형의 타당성과 적용 범위를 확장할 필요가 있다.

### 주요어

최대산소섭취량(VO<sub>2max</sub>), 간접추정식, KISS프로토콜, 심폐지구력, 엘리트 선수

※ 본 연구는 문화체육관광부와 국민체육진흥공단 한국스포츠과학연구원의 지원을 받아 수행되었습니다.