

한국 남자 청소년의 VO₂max 추정을 위한 새로운 20-m PST 프로토콜과 추정식의 타당도 및 신뢰도

박동호¹, 이상현¹, 김도윤¹, 천정우¹, 김창선²

¹인하대학교 스포츠과학과, ²동덕여자대학교 체육학과

Validity and Reliability of a New 20-m PST Protocol for Predicting VO₂max of Male Youths Aged 13-18 Years

Dong-Ho Park¹, Sang-Hyun Lee¹, Do-Youn Kim¹, Jeon-Woo Cheon¹, Chang-Sun Kim²

¹Department of Kinesiology, Inha University, Incheon; ²Department of Physical Education, Dongduk Women's University, Seoul, Korea

PURPOSE: To develop and validate regression models to estimate maximal oxygen uptake (VO₂max) from the new 20-m Progressive Shuttle Test (20-m PST) in Korean male youths aged 13-18 years.

METHODS: The new 20-m PST and VO₂max were assessed in a sample of 80 participants. Participants underwent a treadmill test (TT) in the laboratory and the new 20-m PST protocol (starting at 5.0 km/h and increasing by 0.75 km/h every 1 minute) in a gymnasium. Participants in the validation study performed the TT with the stationary metabolic cart and the 20-m PST with a portable metabolic cart once, as well as the 20-m PST without the portable metabolic cart twice for test-retest reliability. All tests were conducted at least three days apart and in a random order.

RESULTS: Mean measured VO₂max (55.4 ± 6.7 mL/kg/min) from the portable metabolic cart was significantly increased from that measured during the GXT from stationary metabolic cart (52.6 ± 7.0 mL/kg/min, *p* = .001) using the new 20-m PST protocol. But it was a narrow range (2.8 mL/kg/min). The measured VO₂max from the portable and stationary metabolic cart correlated at *r* = .89 (*p* < .001). Test-retest of the 20-m PST yielded comparable results (Laps *r* = .94 & final speed *r* = .89). New regression equations were developed from present data to predict VO₂max for male youths: $y = .875 \times \text{BMI} + 2.031 \times \text{DT (min.sec)} + 51.856$ (*r* = .60, SEE = 5.54 mL/kg/min).

CONCLUSIONS: It is concluded that (a) the new 20-m PST protocol is a valid and reliable test and (b) this equation developed in this study provides valid estimates of VO₂max of Korean male youths aged 13-18 years.

Key words: VO₂max, 20-m progressive shuttle test, Male youths, Validity, Reliability

서론

미국의 경우 주당 5일 이상, 하루 60분 이상 신체활동을 실시하는 청소년은 24.8%에 해당하는 반면 이러한 기준을 충족하는 우리나라 청소년의 신체활동 실천율은 13.1%에 지나지 않는다[1]. 이 같은 신체활동 감소는 청소년들의 체력수준 저하는 물론 청소년 비만의 주된 원

인으로 이어지며, 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 선진국의 경우, 이러한 사회적 문제를 해결하기 위한 방안 중 하나로 국가적 차원의 청소년 체력 및 건강 증진 프로그램(FITNESSGRAM, EUROFIT, Trim & Fit program, The New PE)을 개발하여 운영하고 있다[2,3]. 우리나라에서도 이러한 맥락에서 2006년에 맞춤형 학생 건강체력 평가 시스템 (Physical Activity Promotion System, PAPS)을 구축하였다[4].

Corresponding author: Chang-Sun Kim Tel +82-2-940-4507 Fax +82-2-940-4507 E-mail chang@dongduk.ac.kr

*이 논문은 2014년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2014S1A5A2A01014312).

Keywords 최대산소섭취량, 20-m 점증셔틀검사, 남자 청소년, 타당도, 신뢰도

Received 10 Jan 2017 **Revised** 20 Jan 2017 **Accepted** 31 Jan 2017

© 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.

PAPS에서 측정하는 건강체력 중 하나인 심폐체력은 학생들의 건강 뿐만 아니라 일상생활을 영위하기 위해 필요한 필수 체력요소에 해당하며, PAPS에서는 20-m 점증왕복달리기 테스트(Progressive Shuttle Test, 20-m PST)를 시행하여 청소년들의 심폐체력을 평가하는 척도로 사용하고 있다. 일반적으로 정확한 심폐체력 측정을 위해서는 점증부하운동검사(Graded Exercise Test, GXT)를 이용하나 이러한 측정은 고가의 장비와 전문 인력이 필요할 뿐만 아니라 측정으로 소요되는 시간 등의 제약으로 대상자의 수가 한정된다는 단점이 있다[5]. 더욱이 초·중·고등학교 여건상 사용의 한계가 존재하기 때문에 그 대안으로 20-m PST를 사용하고 있다.

Leger & Lambert [6]에 의해 개발된 20-m PST는 오래달리거나 스텝 테스트 등과 비교했을 때 지루하지 않고 참여자의 능력에 따라 자동 탈락되므로 안전사고의 발생을 최소화할 수 있으며, 음악과 박자에 따라 점증부하 방식으로 대상자의 흥미와 성취동기를 유발시킬 수 있는 장점이 있어 학교 현장에서 많이 활용되고 있다[7]. 하지만 이러한 20-m PST 프로토콜은 한국 청소년에 비해 상대적으로 체력이 우수한 서구 청소년을 대상으로 개발된 것으로 적용의 한계가 존재한다. 특히, 20-m PST 프로토콜은 성별과 연령의 구분 없이 사용된다는 점에서 문제가 제기된다. 최근 중학교 2학년 여학생 30명을 대상으로 실시한 연구[8]에 의하면 현재 PAPS에서 사용되고 있는 20-m PST 프로토콜을 사용했을 때, 운동 지속시간($3'59'' \pm 1'08''$)이 지나치게 짧아 VO_{2max} 의 추정뿐만 아니라 심폐체력의 등급 구분 역시 모호하다. 이러한 결과는 현재 우리나라 학생들에게 시행되고 있는 PAPS의 20-m 프로토콜의 초기속도(8.5 km/h, 매분마다 0.5 km/h 증가)가 지나치게 높기 때문이며, 초기 속도(운동강도)가 지나치게 높을 경우 운동 지속시간이 짧아지게 되어 정확한 VO_{2max} 를 얻기 어렵다. 그 이유는, VO_{2max} 가 심박출량과 동정맥산소차의 곱으로 얻어지며, 심장이 점증적인 운동 부하 증가에 의해 최대심박출량에 도달할 때까지 걸리는 시간이 약 5분 이상으로 제안하고 있기 때문이다[9-12].

그럼에도 불구하고 현재까지 우리나라 청소년의 체력수준을 고려하여 개발된 20-m PST 추정식은 여자중학생을 대상으로 한 Park et al. [13]의 연구가 유일하며, 타당도가 확보된 남학생을 위한 20-m PST 추정식의 부재로 학교 현장에서 실시되고 있는 20-m PST의 경우도 최종 왕복 횟수를 준거로 측정된 기록에 의해 단순히 1-5의 등급으로만 제시해 주고 있는 실정이다. 이것은 심폐지구력의 척도라 할 수 있는 VO_{2max} 를 대변할 수 없기 때문에 학생 개인의 심폐지구력 수준을 정확하게 파악할 수 있는 지표로 활용할 수 없다는 문제점을 야기한다. 더욱이 최대 점증부하 방식으로 개발된 20-m PST는 학생들의 체력수준의 저하 및 건강 상태(과도 비만, 대사성 질환 및 근골격계 질환 등)로 인하여 완주하지 못하는 경우가 종종 발생하기 때문에 이들을 포함하여 평가할 수 있는 최대 및 최대하 점증부하검사가 가능한 새로운 20-m PST 프

로토콜의 개발 및 이를 이용한 추정식의 개발이 절실히 요구된다.

따라서 본 연구의 목적은 ACSM [14]의 예측 VO_{2max} 산출식을 준거로 현장에서 사용할 수 있는 신뢰도와 타당도가 확보된 우리나라 남자 청소년들의 심폐체력을 평가할 수 있는 새로운 20-m PST 프로토콜과 최대 및 최대하 20-m PST 추정식을 개발하는데 있다.

연구 방법

1. 연구 대상

1시 소재의 남자 중고생 각각 45명 총 90명을 선정하여 실험을 진행 하였으나 다양한 이유로 중도에 포기하여 실험에 참여하지 못한 학생들이 발생하여 중고생 각각 39명(중학교 1학년 13명, 2학년 14명, 3학년 12명)과 41명(고등학교 1학년 14명, 2학년 14명, 3학년 13명)의 청소년 총 80명(탈락률 11%)이 본 연구에 참여하였다. 본 연구의 진행은 기관 윤리위원회(IRB)의 심의를 거친 후 실시하였으며, 실험 참여 전 학생과 학부모들에게 측정 내용과 이유를 설명하고 학부모로부터 동의서를 받은 후 실험을 진행하였다. 본 연구의 참여기준은 심혈관질환이나 대사성 질환, 근골격계 질환 등 질환이 없는 건강한 학생만을 대상으로 하였으며, 실험 중 측정결과에 영향을 미칠 수 있는 약물을 복용하거나 습관성 흡연자는 본 연구에서 제외하였다. 본 연구에 참여한 남자 중고생의 특성은 Table 1에 제시하였다.

2. 연구절차

1) 20-m PST 프로토콜 개발

기존의 20-m PST 프로토콜(시작 속도 8.5 km/h, 매분마다 \uparrow 0.5 km/h)을 변형한 새로운 프로토콜은 첫째, 기존의 서양 프로토콜과 달리 5.0 km/h의 속도로 2분 동안의 준비운동 시간을 포함시켰고, 준비운동이 종료된 후 1단계 역시 준비운동의 속도인 5.0 km/h에서 시작하여 매분 평균적으로 0.75 km/h 증가(0-1.5 km/h)하는 새로운 프로토콜을 사용하여 20-m PST 시 최소 5분 이상의 운동지속시간을 유지할 수 있도록 고안하였다. 본 연구에서 새롭게 개발한 20-m PST 프로토콜은 ACSM [14]의 트레드밀 달리기 공식과 한국체육과학연구원의 KSSI 트

Table 1. Subject characteristics

Variables	Middle school males (n=39)	High school males (n=41)	Total (N=80)
Age (year)	13.5±0.5	17.0±0.8	15.3±1.9
Height (cm)	169.4±6.6	171.8±5.9	170.6±6.3
Weight (kg)	60.8±10.7	66.3±8.4	63.7±10.0
BMI (kg/m ²)	21.1±3.3	22.5±2.6	21.8±3.0
Body fat (%)	17.4±8.8	14.9±7.1	16.1±8.0
Waist-hip ratio	0.77±0.1	0.9±0.8	0.79±0.04

BMI, body mass index.

레드밀 점증부하 프로토콜을 기초로 개발하였다. VO₂ (mL/kg/min) 산출을 위한 ACSM의 트레드밀 달리기 공식은 아래와 같다.

$$VO_2 \text{ (mL/kg/min)} = [\text{속도(m/min)} \times 0.2 \text{ mL/kg/min}] + [\text{경사도(분수)} \times \text{속도(m/min)} \times 0.9 \text{ mL/kg/min}] [14].$$

GXT 프로토콜은 일반 여성 또는 남성을 대상으로 하는 KSSI 프로토콜(체육과학연구원)을 수정한 것으로, 수정된 프로토콜의 최초 운동 시작 부하속도는 5.0 km/h, 경사도 3% (남녀모두)에서 2분간 실시하고 이후 단계별 부하 증가는 경사도를 고정(남녀모두 3%)한 상태에서 속도만 2분마다 1.5 km/h씩 점증적으로 증가시킨다. 한편, 본 연구에서 새롭게 개발한 20-m PST 프로토콜은 KSSI 최대점증부하 프로토콜과 같은 초기 속도인 5.0 km/h에서 시작하여 매분 평균적으로 0.75 km/h 증가(0-1.5 km/h)하는 프로토콜로, 이를 고정식 프로토콜처럼 2분으로 산출할 경우, 고정식과 유사한 2분마다 1.5 km/h씩 증가하도록 고안하였다(Table 2).

본 연구에서 ACSM의 VO₂ 산출을 위한 트레드밀 공식을 20-m PST

측정에 적용할 때의 고려사항으로 20-m PST 측정은 트레드밀이 아닌 목재 마루바닥으로 이루어진 체육관 평지에서 이루어진다는 점에서 다소 오차가 발생할 수 있다. 하지만 체육관의 평지는 트레드밀 위에서의 달리기 측정에 비해 몸을 앞으로 이동하는데 필요한 추가적인 에너지소모뿐만 아니라 달릴 때 공기의 저항 등으로 소모되는 에너지가 트레드밀에서의 약 1-2% 경사도와 유사하며[15], 20-m PST 측정 시 VO₂ 측정장비의 착용으로 인한 장비 무게(1 kg)로 발생하는 추가 에너지소비 약 1% 경사도 등을 고려할 때 유사할 것으로 판단하여 ACSM의 VO₂ 산출을 위한 트레드밀 공식에 적용할 때 20-m PST VO₂ 산출에도 3%의 경사도를 반영하여 계산하였다(Table 2).

2) 실험실 측정

신장과 체중은 반바지와 티셔츠를 입은 상태에서 측정기기(TBF-2002, Tanita Co., Japan)를 이용하여 각각 0.1 cm와 0.1 kg 단위까지 측정하였다. 또한 허리와 엉덩이 둘레 모두 0.1 cm 단위까지 측정하였다.

Table 2. A new 20 m PSRT protocol based on the metabolic equation of ACSM Treadmill and Outdoor Running

GXT protocol			New 20 m PSRT protocol					
Stage (2 min, 3% grade)	Speed (km/h)	PVO ₂ * (2 min)	Minute	Speed (km/h)		Lap.	PVO ₂ * (1 min)	PVO ₂ * (2 min)
				1 min stage	2 min stage			
2 min	5.0	22.42		5.0	5.0	4	22.42	22.42
Warm-up				5.0		4	22.42	
1	5.0	22.42	1	5.0	5.38	4	22.42	23.84
			2	5.75		5	25.25	
2	6.5	28.09	3	5.75	6.5	5	25.25	28.09
			4	7.25		6	30.93	
3	8.0	33.77	5	7.25	8.0	6	30.93	33.77
			6	8.75		7	36.6	
4	9.5	39.44	7	9.5	9.5	8	39.44	39.44
			8	9.5		8	39.44	
5	11.0	45.12	9	11.0	11.38	9	45.12	46.54
			10	11.75		10	47.95	
6	12.5	50.79	11	11.75	12.5	10	47.95	50.79
			12	13.25		11	53.63	
7	14.0	56.47	13	14.0	14.0	12	56.47	56.47
			14	14.0		12	56.47	
8	15.5	62.14	15	15.5	15.5	13	62.14	62.14
			16	15.5		13	62.14	
9	17.0	67.82	17	17.0	17.38	14	67.82	69.24
			18	17.75		15	70.65	
10	18.5	73.49	19	17.75	18.5	15	70.65	73.49
			20	19.25		16	76.33	
11	20.0	79.17	21	19.25	19.63	17	76.33	79.17
			22	20.0		17	79.17	
12	21.5	84.84	23	21.25	21.25	18	83.9	81.53
			24	21.25		18	83.9	

PVO₂², predicted VO₂ (mL/kg/min).

*VO₂ (mL/kg/min) = (0.2 × S) + (0.9 × S × G) + 3.5. S: speed (m/min), G: grade (%) [14].

체지방을 포함한 체성분 분석은 인피트니스 방식의 체성분 분석기(in-body 4.0, Korea)를 이용하여 대상자들의 체지방률(%fat)을 측정하였다.

트레드밀에서의 GXT를 이용한 VO_2max 측정은 남자 중고생 80명(중학생 39명, 고등학생 41명)을 대상으로 실시하였다. 대상자들은 무선 심박측정기(POLAR, Newyork, USA)를 착용하고 10분 동안 안정을 취한 후 트레드밀을 이용하여 VO_2max 를 측정하였다(Parvo Medics True One 2400, USA). GXT를 이용한 VO_2max 의 측정은 일반 성인 여성 또는 남성을 대상으로 하는 KSSI protocol (체육과학연구원)을 수정하여 측정하였다. 본 프로토콜의 최초 운동 시작 부하속도를 5.0 km/h, 경사도 3% (남녀모두)에서 2분간 실시하고 이후 단계별 부하 증가는 경사도를 고정(남녀모두 3%)한 상태에서 속도만 2분마다 1.5 km/h씩 점증적으로 증가시킨다. 운동 중에는 심박수, 호흡교환율, 운동자각도, 산소섭취량 등을 체크하면서 달리기 지속 여부를 수시로 확인하고, 대상자가 더 이상 운동을 지속하지 못하는 상태(all-out)까지 지속시켰다.

VO_2max 는 운동 부하가 증가됨에도 불구하고 산소 섭취량(VO_2)의 수준이 항상 상태일 때로, 이때 운동중 심박수가 나이로 추정된 최대 심박수($206.9 - [0.67 \times \text{나이}]$) [16]의 ± 10 bpm 이내에 있을 때 그리고 호흡교환율(RER) >1.1 이거나 운동자각도가 17 이상일 때로 간주하였다.

3) 새롭게 개발된 20-m PST 프로토콜의 타당도 검사

새롭게 개발된 20-m PST 프로토콜의 타당도 검증을 위하여 ACSM의 VO_2 산출을 위한 트레드밀 공식을 준거로 하였다. 따라서 VO_2max 측정을 위해 GXT 실험에 참여한 남자중고생 80명을 대상으로 트레드밀에서의 GXT 1주일 후 새롭게 개발된 20-m PST 프로토콜을 이용하여 20-m PST 시 이동식 가스분석기를 이용하여 VO_2max 를 측정하였다.

20-m PST 검사에서는 휴대용 가스분석기(Metamax 3B, Germany)를 착용한 후 실시하였고, 매 운동단계 및 운동종료 직후 산소섭취량, 심박수, 최고속도, 최대 왕복횟수, 최종 단계, 운동지속시간 등을 측정하였다. 운동 중 심박수의 측정은 무선 심박수(polar RS400, USA)를 착용하게 하여 산소섭취량과 함께 심박수를 측정하였다. 실험실에서의 GXT를 이용한 VO_2max 측정과 체육관에서의 20-m PST를 이용한 VO_2max 측정 시 주요 고려사항은 측정 환경(온도 25°C와 습도 40%)을 유사하게 하는 것이었다.

본 연구에서 사용된 20-m PST 점증 속도 및 음원의 신호주기는 새롭게 개발된 프로토콜에 따라 제작되었다. 20-m PST의 종료시점은 대상자들이 신호음이 울리기 전에 목표지점까지 도달하지 못한 횟수가 2회가 될 때로 하였고, 그때까지의 왕복횟수 또는 실패 전 마지막 스테이지를 최종 횟수로 산정하였다[6,17].

4) 새롭게 개발된 20-m PST 프로토콜의 신뢰도 검사

20-m PST 신뢰도 검사(test-retest reliability) 역시도 GXT와 타당도

검사에 참여한 80명을 대상으로 이루어졌으며, 이때의 측정은 이동식 가스분석기를 착용하지 않은 상태에서 최소 3일 이상의 간격을 두고 2회 실시하였다. 20-m PST 측정 시 최대심박수(HRmax), 최종 속도(km/h), 최종 왕복횟수(회), 최종 단계(stage), 운동지속시간(웍업을 제외한 분초) 등을 측정하였다.

3. 자료처리방법

본 연구의 자료처리를 위하여 통계프로그램 SPSS 18.0(kr)을 이용하여 각 변인들의 평균과 표준편차를 구하였다. VO_2 실측값 간의 타당도 검증과 신뢰도 검증은 two-way repeated ANOVA와 결과에 따른 사후 분석으로 Bonferroni 방법과 상관분석(Pearson's correlation)을 실시하였다. 또한 새로운 20-m PST를 이용한 VO_2max 예측을 위한 공식을 개발하기 위하여 multiple regression analysis를 실시하였다. 본 연구의 모든 유의수준(α)은 .05로 설정하였다.

연구 결과

1. 새로운 20-m PST 프로토콜의 타당도 분석

본 연구에서는 기존의 서양 20-m PST 프로토콜(시작 속도 8.5 km/h, 매분마다 $\uparrow 0.5$ km/h)을 변형한 새로운 프로토콜을 개발하여 사용하였다. 본 프로토콜은 첫째, 기존의 서양 프로토콜과 달리 5.0 km/h의 속도로 2분 동안의 준비운동 시간을 포함시켰고, 준비운동이 종료된 후 1단계 역시 준비운동의 속도인 5.0 km/h에서 시작하여 매분 평균적으로 0.75 km/h 증가하는 새로운 프로토콜을 사용하여 20-m PST 시 최소 5분 이상의 운동지속시간을 유지할 수 있도록 고안되었다. 이러한 프로토콜의 사용이 타당한지에 대한 분석을 실시하기 위하여 우선 ACSM의 VO_2 산출을 위한 트레드밀 공식을 준거로 단계별 VO_2 를 산출하였고, 둘째 남자 중고생 80명을 대상으로 트레드밀 위에서 GXT 검사(시작 속도 5.0 km/h, 경사도 3% 고정, 매 2분마다 약 $\uparrow 1.5$ km/h, 남녀 공용 프로토콜)를 실시하여 얻은 VO_2max 와 체육관의 목재 마루 바닥에서 20-m PST를 실시할 때 휴대용 가스분석기(Metamax 3B, Germany)를 이용하여 측정된 VO_2max 를 비교, 분석하였다. 한편, GXT와 20-m PST의 단계(stage)는 각각 2분과 1분으로 구성되어 있어 이러한 차이를 없애기 위해 20-m PST의 1분 stage를 2분(예: 초기시작 1분+2분 = 1stage)으로 묶어 비교하였다.

Table 3의 결과에 따르면 각 스테이지별 VO_2 값(ACSM의 공식을 이용한 예측값 그리고 고정식과 이동식 가스분석기를 이용한 실측값)에서 모두 유의한 차이가 나타났으며, 그에 따른 사후분석 결과 1, 2단계를 제외하고 이동식 가스분석기를 이용한 20-m PST VO_2 실측값이 트레드밀에서 실시한 고정식 GXT를 통해 얻은 VO_2 실측값과 ACSM의 추정식을 이용한 예측 VO_2 값보다 높게 나타났다. 또한 고정식과 이동

Table 3. Comparison of measured and predicted VO₂ at each stage and VO₂max in male youths

Variable	Stage	ACSM equation	Stationary	Portable	p	r ⁵
VO ₂ (mL/kg/min)	1st	22.4±0.0 ^{b*,c**}	21.6±5.4 ^{c**}	23.4±4.0 [‡]	M: .001	.001
	2nd	28.1±0.0 ^{c**}	29.5±5.4 ^{c**}	33.8±6.6	S: .000	.318**
	3rd	33.8±0.0 ^{c**}	36.8±6.6 ^{c**}	42.0±5.8	M×S: .265	.570**
	4th	39.4±0.0 ^{b**,c**}	42.9±7.9 ^{c**}	47.7±8.1		.681**
	5th	45.1±0.0 ^{c*}	48.5±7.5 ^{c*}	50.7±8.2 [‡]		.846**
VO ₂ max (mL/kg/min)			52.6±7.0 ^{c**}	55.4±6.7		.894**

Values are means and SD. M: method, S: stage. a: significantly different from predicted VO₂ using ACSM equation, b: significantly different from measured VO₂ using stationary metabolic cart, c: significantly different from measured VO₂ using metabolic cart.

⁵: correlation coefficient between Stationary and Portable value. [‡]: VO₂ (-1.4 mL/kg/min) was adjusted by speed differences at 1st and 5th stage between GXT and 20-m PST protocol. *p<.05, **p<.01.

Table 4. The results of reliability analysis (test-retest) of the new 20-m PST in male youths

Variable	Time	Middle School (n=39)	High School (n=41)	Total (N=80)	p	r ⁵
# of Laps (repetition)	1st	65.6±15.5 ^{a**}	75.3±12.1	70.4±14.6	T: .385	.937**
	2nd	64.7±13.3 ^{a**}	75.1±10.8	69.9±13.1	G: .001 T×G: .543	
Last Speed (km/h)	1st	11.9±1.2 ^{a**}	12.6±1.0	12.2±1.1	T: .318	.890**
	2nd	11.8±1.0 ^{a**}	12.6±0.8	12.2±1.0	G: .001 T×G: .184	
Exercise duration (sec)	1st	9.4±1.5 ^{a**}	10.4±1.2	9.9±1.4	T: .520	.936**
	2nd	9.3±1.3 ^{a**}	10.4±1.1	9.9±1.3	G: .001 T×G: .606	
HRmax (bpm)	1st	204.0±6.9 ^{9**}	204.5±8.9 ^{9**}	204.2±7.9	T: .000	.822**
	2nd	201.8±5.5	202.1±9.2	201.9±7.5	G: .072 T×G: .789	

Values are means and SD. T: 1st vs. 2nd time measurement, G: middle school vs. high school male students. a: significantly different from high school students.

⁹: significantly different from the time; ⁵: correlation coefficient between 1st and 2nd time measurement; *p<.05; **p<.01.

식 가스분석기를 이용하여 얻은 VO₂max 이동식 가스분석기를 이용한 20-m PST 측정에서도 더 높게 나타났다(↑3.7 mL/kg/min, ↑4.9%).

한편, 두 측정방법(고정식과 이동식)에 따른 실측값의 상관관계는 1 단계를 제외하고 모두 통계적으로 유의한 상관관계(2단계: r=.32, 3단계: r=.57, 4단계: r=.68, 5단계: r=.85)를 보였으며, VO₂max는 매우 높은 상관관계(r=.89)를 나타냈다. 특히, 스테이지가 높아질수록 상관관계가 점차 증가하는 것으로 나타났다.

2. 새로운 20-m PST 프로토콜의 신뢰도 분석

Table 4의 결과에 따르면, 최대심박수(HRmax)를 포함한 왕복횟수, 최종속도 및 소요시간에서 모두 상호작용효과는 나타나지 않았다. 중학생과 고등학생 집단 간 주효과에서는 최대심박수를 제외하고 왕복 횟수, 최종속도 및 소요시간에서 고등학생이 유의하게 높은 것으로 나타났다. 반면, 측정시기(1차 vs. 2차)에 따른 결과에서는, HRmax에서만 1차 측정시기가 2차 측정시기에 비해 유의하게 높은 것으로 나타났다. 1차와 2차시기의 반복 측정에 따른 변인간 상관관계는 왕복횟수 (r=.94, p=.000), 최종속도(r=.89, p=.000), 소요시간(r=.94, p=.000), 최

대심박수(r=.82, p=.000) 모두 높은 상관을 나타냈다.

3. 심폐체력 평가를 위한 새로운 20-m PST 프로토콜의 최대 및 최대하 VO₂max 추정식

남자중고생 80명을 대상으로 트레드밀에서의 GXT를 통해 얻은 VO₂max 실측값과 상관성이 있는 인체계측 변인들(키, 체중, BMI, 체지방률 등)과 20-m PST 시 측정된 변인들(최종속도, 왕복달리기 횟수, 운동소요시간 등)을 활용하여 VO₂max (mL/kg/min)를 예측할 수 있는 추정 공식을 개발하기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다.

최대 20-m PST VO₂max 추정식에는 체질량지수 변인(x, kg/m²)과 준비운동(warm-up)시간을 제외한 운동지속시간(x, 분·초)변인이 독립 변인으로 함께 투입되었을 때 종속변인인 GXT VO₂max (y, mL/kg/min) 실측값을 가장 잘 대변하는 것으로 나타났다. 반면에 최대하 20-m PST VO₂max 추정식에는 20-m PST 4단계(7.25 km/h)의 심박수 (x, 심박수), BMI (x, 체질량지수) 그리고 나이(x, 만 연령) 변인이 독립 변인으로 함께 투입되었을 때 종속변인인 이동식 20-m PST를 통해 얻은 VO₂max (y, mL/kg/min) 실측값을 가장 잘 대변하는 것으로 나타났다.

Table 5. Validity analysis of the new 20-m PST equation to predict measured VO₂max

Equation		r	r ²	SEE	F	p
Maximal (mL/kg/min)	$y = -.875 \times \text{BMI} + 2.031 \times \text{DT} + 51.856$.603	.364	5.54	2.013	.000
Sub-maximal (mL/kg/min)	$y = -.933 \times \text{BMI} - .151 \times \text{P4HR} - .837 \times \text{Age} + 113.471$.619	.383	5.41	13.889	.001

BMI = body mass index, DT = duration time except warm-up time, P4HR = 20 m PSRT 4th min heart rate, r = correlation coefficient between actual and predicted VO₂max; r²: coefficient of determination; SEE: standard error of the estimate; F = ANOVA F statistic; p = Pearson's coefficient significant.

각각의 회귀분석을 통해 얻은 최대 및 최대하 20-m PST 공식은 아래와 같으며, 이 회귀 모형에 대한 요약은 Table 5에 제시하였다.

논 의

본 연구에서는 ACSM [14]의 예측 VO₂ 산출식을 준거로 현장에서 사용할 수 있는 신뢰도와 타당도가 확보된 우리나라 남자 청소년들의 심폐체력을 평가할 수 있는 새로운 20-m PST 프로토콜과 이를 활용한 최대 및 최대하 20-m PST 추정식을 개발하는데 목적이 있었다.

1. 새로운 20-m 프로토콜의 타당도 분석

Leger & Lambert [6]가 개발한 20-m PST는 8.5 km/h의 속도를 시작으로 매분 0.5 km/h의 속도를 증가시키는 프로토콜로써 각 단계별 1 MET씩 속도를 증가시키는 달리기 검사 방법으로 본 연구에서 개발된 20-m PST 프로토콜과는 두 가지 측면에서 차이가 있다. 즉, 초기 속도 (8.5 km/h vs. 5 km/h)와 단계별 부하(매분 0.5 km/h vs. 매분 0.75 km/h)로, 본 연구에서 개발한 프로토콜은 5.0 km/h의 속도를 시작으로 매분 0.75 km/h의 속도를 증가시키는 프로토콜로써 각 단계별 1.5 MET씩 속도를 증가시키는 검사방법이다. 현재까지 전세계적으로 사용되는 20-m PST 프로토콜은 Leger et al. [6]가 개발한 것으로, 이 프로토콜 역시 트레드밀을 이용하여 측정된 GXT VO₂max를 준거로 개발되어 본 연구에서 개발한 프로토콜의 초기 속도와 단계별 부하 정도를 직접적으로 비교하는 것은 한계가 있다.

일반적으로 VO₂max 측정을 위해 GXT 검사에서 가장 많이 활용되고 있는 국내의 프로토콜은 Astrand, Bruce, Balke, Naughton, KSSi 프로토콜 등이 있다. 이들 프로토콜은 단계별 2-3분으로 구성되어 있고, 초기 속도는 1.6-8 km/h이며, 경사도는 0-10% 그리고 단계별 부하는 0.9-3.2 METs로 매우 다양하다. 이러한 관점에서 본 연구에서 개발한 초기속도 5.0 km/h, 매분 1.5 MET (0.75 km/h)의 부하를 증가시키는 프로토콜은 일반인이 사용하는데 문제가 없는 것으로 판단된다. 특히, 본 연구에서 개발한 20-m PST는 첫째, 초기 속도(8.5 km/h vs. 5.0 km/h)가 지나치게 높아 발생할 수 있는 안전사고의 위험을 낮추고 둘째, VO₂max 측정의 정확성과 관련하여 점증부하검사 시 남녀 모두 최소 5분 이상 그리고 최대 15분 이하의 운동지속시간을 확보하고자 한 것으로 비교적 안전하게 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

본 연구결과에 의하면, 20-m PST 측정 시 운동지속시간은 남자 중고생 각각 약 9분(9.3±1.4분)과 10분(10.4±1.2분)이 소요되어 중고생 평균 10분(±1.4) 정도에 종료되었다. 선행 연구[9-12]에 의하면, 운동강도가 지나치게 높을 경우, 근 파워의 부족으로 운동지속시간이 너무 짧아지거나 운동부하가 낮아 지나치게 오랜 시간 동안 운동을 지속할 경우에는 오히려 낮은 VO₂max 값을 얻게 된다고 제안하고 있다. McCole et al. [18]과 Lepretre et al. [19]의 연구에서는 성인남성을 대상(VO₂max=50.7 mL/kg/min)으로 GXT 측정 시 심혈관계의 반응과 관련하여 약 5분에서 9분 사이에서 개인의 최대심박출량에 도달한다고 보고 하였다. 따라서 정확한 VO₂max 검사를 위한 최적의 운동지속시간이 존재하며, 이러한 시간으로 최소 5분 이상의 운동지속시간이 요구되고, 일반적으로 10±2분을 제안하고 있어[18-21] 본 연구에서 개발된 20-m PST 프로토콜은 적합 것으로 판단된다.

한편, 본 연구의 결과에서는 ACSM의 VO₂ 산출을 위한 트레드밀 공식을 준거로 산출된 GXT VO₂와 20-m PST VO₂ 추정값은 속도 차이에서 유발되는 초기 1단계(GXT 22.4 mL/kg/min vs. 20-m PST 23.8 mL/kg/min)와 5단계(GXT 45.1 mL/kg/min vs. 20-m PST 46.5 mL/kg/min)를 제외하고 모두 동일한 것(Table 2)으로 나타났으나, Table 3에서 제시한 ACSM의 VO₂ 산출을 위한 트레드밀 공식을 준거로 산출된 VO₂ 추정값 그리고 GXT와 20-m PST VO₂ 실측값 간 유의한 차이가 나타났다. 사후분석을 실시한 결과 1,2단계를 제외하고 ACSM 추정 VO₂ 값, 고정식 VO₂ 실측값, 이동식 VO₂ 실측값 순으로 높게 나타났으며, 총 5단계(1-5단계) 평균 VO₂값은 ACSM의 추정값의 경우 33.8 mL/kg/min, GXT와 20-m PST VO₂ 실측값은 각각 35.9 mL/kg/min와 39.6 mL/kg/min로 나타나 GXT에서 얻은 VO₂ 실측값은 ACSM의 추정값보다 약 6.2% 높았고, 20-m PST VO₂ 실측값은 GXT의 VO₂ 실측값보다 약 10.5% 높은 것으로 나타났다. 하지만 GXT (52.8±6.8 mL/kg/min)와 20-m PST 측정에서 얻은 VO₂max 실측값 (55.4±6.7 mL/kg/min) 간의 차이는 4.9%로 나타났다(Fig. 1).

ACSM의 공식을 준거로 산출된 VO₂ 추정값과 GXT VO₂ 실측값 간의 차이는 대상자의 체력수준, 인종, 측정 시 환경 온도와 습도 등으로 유발될 수 있으나 본 연구에서는 아마도 성별의 구분 그리고 측정 대상자의 연령으로 인한 운동효율성 차이가 주요 요인으로 판단된다. 그 이유는 ACSM의 VO₂ 산출을 위한 트레드밀 추정식은 연령이나 성별의 구분이 없이 사용되고 있다는 점에서 본 연구에 참여한 대상자들

의 특성과 차이가 있기 때문이다. 즉, 본 연구에서는 13-18세의 남자 청소년을 대상으로 하였기 때문에 상대적으로 성인에 비해 운동효율성이 낮아 동일한 부하속도에서 더 높은 VO₂가 나타날 수 있고, 성별의 차이로 유발되는 오차가 ACSM의 추정식과는 차이가 있을 수 있기 때문이다.

또한 GXT와 20-m PST VO₂ 실측값 간 차이는 1-5단계 평균 10.5%으로 크게 나타난 반면 VO₂max는 4.9%로 상대적으로 적은 차이를 보였다. Flouris et al. [22]은 이동식 가스분석기를 이용하여 실험실(트레드밀)과 필드(20-m PST)에서 유사한 프로토콜(시작속도 8.5 km/h)을 사용하여 VO₂max를 측정하였고, 본 연구의 결과에서처럼 트레드밀에서의 GXT VO₂max (51.3±3.1 mL/kg/min)가 20-m PST에서 얻은 VO₂max (53.4±3.5 mL/kg/min)보다 통계적으로 유의하게 낮게 나타나(2.1 mL/kg/min, 4.1% 차이, p=.001) 본 연구의 결과와 유사하였다. 이것은 20-m PST 시 GXT와는 달리 유발될 수 있는 무산소 대사의 증가 및 생체 역학적 요인들이 상대적으로 20-m PST 시 VO₂를 증가시키는 것으로 제안하고 있다[14,23-26]. 즉, 20-m PST 시 인체 무게 중심의 수직 이동으로 인한 추가적인 에너지 소비에 따른 VO₂의 증가 그리고 왕복 구간에서의 가속과 감속의 반복 동작 등으로 인한 무산소 대사의 증가 등이 영향을 미친다고 제안하고 있다.

본 연구에서는 VO₂max 보다는 두 측정간(GXT vs. 20-m PST) 1-5 단계에서 그 차이가 더 크게 나타났는데, 이는 트레드밀을 이용한 GXT는 트레드밀의 속도에 맞춰 걷거나 달리기를 조절하는 것이 용이한 반면 20-m PST는 음원에 맞춰 테스트를 실시하지만 피험자 스스로가 속도를 예측하여 걷거나 달려야 하기 때문에 예정된 속도보다 더 빨리 움직이는 경향이 있다. 이는 추가적인 에너지 소모를 유발하며, 이러한 차이는 속도가 증가하는 최종 단계에 도달하면서 줄어들어 VO₂max 실측값의 차이가 감소한 것으로 판단된다.

한편, GXT 단계별 VO₂와 VO₂max 그리고 20-m PST의 단계별 VO₂ (2분 stage)와 VO₂max 상관관계는 단계가 증가할수록 높아지는 것으로 나타났다(1단계 r=.00, 2단계 r=.32**, 3단계 r=.57**, 4단계 r=.68**, 5단계 r=.85**, VO₂max r=.89**). Leger & Lambert [6]와 Leger et al. [27]의 초기 연구에 의하면, 20-m PST를 이용한 VO₂max 예측값과 트레드밀에서의 GXT 실측값 간 상관계수는 각각 r=.84과 r=.89로 나타났고, Flouris et al. [22]의 연구에서는 이동식 가스분석기를 이용하여 실험실(트레드밀)과 필드(20-m PST)에서 같은 프로토콜(시작속도 8.5 km/h)을 사용하여 VO₂max를 측정했을 때에도 상관계수(r)는 .86-.91로 나타났다. 이러한 결과는 본 연구결과와 유사한 상관계수(r=.89, p=.000)를 나타내어 본 연구에서 개발한 20-m PST 프로토콜은 남자 중고등학생들에게 적합한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 VO₂max 보다는 두 측정간(GXT vs. 20-m PST) 1-5 단계에서 그 차이가 더 크게 나타났는데, 이는 트레드밀을 이용한 GXT는 트레드밀의 속도에 맞춰 걷거나 달리기를 조절하는 것이 용이한 반면 20-m PST는 음원에 맞춰 테스트를 실시하지만 피험자 스스로가 속도를 예측하여 걷거나 달려야 하기 때문에 예정된 속도보다 더 빨리 움직이는 경향이 있다. 이는 추가적인 에너지 소모를 유발하며, 이러한 차이는 속도가 증가하는 최종 단계에 도달하면서 줄어들어 VO₂max 실측값의 차이가 감소한 것으로 판단된다.

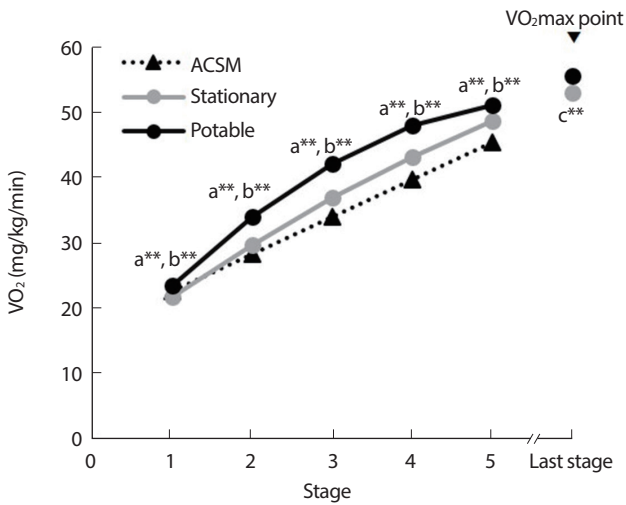


Fig. 1. Scattergram of measured and predicted VO₂ at each stage and VO₂max in male youths. VO₂ (-1.4 mL/kg/min) was adjusted by speed differences at 1st and 5th stage between GXT and 20-m progressive shuttle test (20-m PST) protocol. a: significantly different from predicted VO₂ using ACSM equation, b: significantly different from measured VO₂ using stationary metabolic cart, c: significantly different from measured VO₂ using metabolic cart.

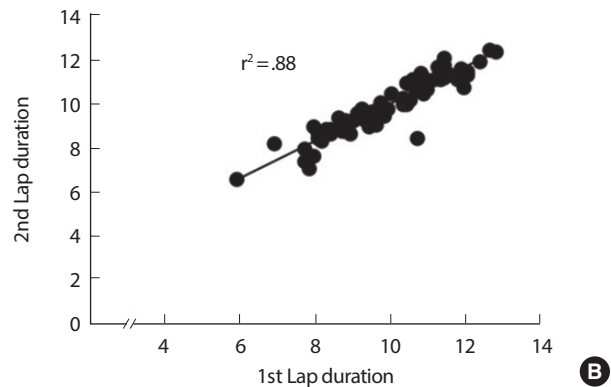
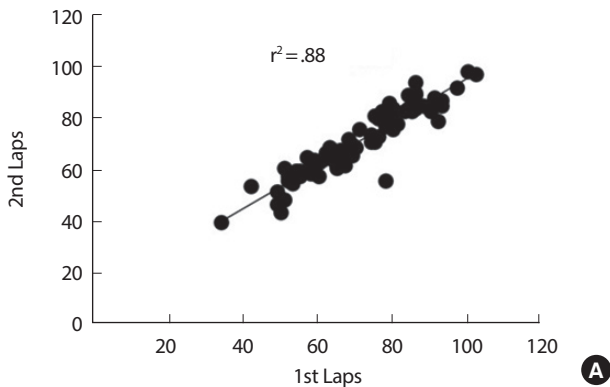


Fig. 2. Scattergram of (A) 1st and 2nd Laps (repetitions) and (B) total Lap duration (min.sec) for test-retest reliability of 20-m PST protocol in male youths aged 13-18 years.

2. 새로운 20-m 프로토콜의 신뢰도 분석

본 연구에서의 20-m PST의 신뢰도 검사와 관련하여 관찰한 변인인 1차와 2차 시기의 왕복횟수($r = .94, p = .000$), 최종속도($r = .89, p = .000$), 소요시간($r = .94, p = .000$), 최대심박수($r = .82, p = .000$) 모두 높은 상관을 나타냈으며, 1차와 2차 측정 시 왕복횟수, 최종속도 운동지속시간에서는 유의한 차이가 나타나지 않았으나 최대심박수(HRmax)에서 1차에 비해 2차 측정에서 유의하게 낮은 것으로 나타났다. 또한 중학생과 고등학생의 집단 비교에서는 HRmax를 제외하고 왕복횟수, 최종속도 운동지속시간 모두 고등학생이 유의하게 높거나 오래 지속하는 것으로 나타났다(Fig. 2).

Lamb & Rogers [28]에 의하면 의한 2차 측정 시 1차 측정에 비해 학습에 의한 왕복횟수의 증가가 나타날 수 있다고 하였으나 2차와 3차 측정에서는 통계적인 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 본 연구의 결과와는 차이가 있는 것이다. 일반적으로 20-m PST 시 구간 반환시점에서 민첩성이 요구되는데, 20-m PST에 익숙하지 않은 대상자의 경우 학습효과로 인하여 1차 측정에 비해 2차 측정 시 왕복횟수가 증가하는 것으로 제안된다. 하지만 본 연구에 참여한 대상자들은 남자 청소년들보다 여성에 비해 민첩성이 우수하며, 이미 20-m PST에 익숙한 상태였기 때문에 남녀 대학생 35명을 대상으로 실시한 Lamb & Rogers [28]의 연구 결과와는 다소 차이가 있을 수 있다. 반면에 중학생과 고등학생 집단별 1, 2차 측정시기 간 HRmax에서 유의한 차이가 나타났으나 이러한 차이는 약 1-1.5%의 차이로 1, 2차시기의 왕복횟수, 최종속도 및 운동지속시간에 통계적인 유의한 영향을 미치지 않았다.

한편, 측정의 신뢰도(test-retest reliability)와 관련하여 본 연구결과에서 도출된 왕복횟수($r = .94, p = .000$), 최종속도($r = .89, p = .000$), 소요시간($r = .94, p = .000$) 및 최대심박수($r = .82, p = .000$) 모두 높은 상관을 나타내어, 새롭게 개발된 20-m PST 프로토콜은 재현성이 높은 것으로 나타났다.

3. 새로운 20-m 프로토콜의 최대 및 최대하 VO₂max 추정식

남자중고생 80명을 대상으로 트레드밀에서의 GXT를 통해 얻은 VO₂max 실측값과 상관이 있는 인체계측 변인들(키, 체중, BMI, 체지방률 등)과 20-m PST 시 측정된 변인들(최종속도, 왕복달리기 횟수, 측정소요시간 등)을 활용하여 VO₂max (mL/kg/min)를 예측할 수 있는 추정 공식을 개발하기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다.

최대 20-m PST VO₂max 추정식에는 체질량지수 변인($x, \text{kg/m}^2$)과 월업을 제외한 측정지속시간($x, \text{분} \cdot \text{초}$) 변인이 독립변인으로 함께 투입되었을 때 종속변인인 GXT VO₂max ($y, \text{mL/kg/min}$) 실측값을 가장 잘 대변하는 것으로 나타났다. 반면에 최대하 20-m PST VO₂max 추정식에는 20-m PST 4단계(7.25 km/h)의 심박수($x, \text{심박수}$), BMI ($x, \text{체질량지수}$) 그리고 나이($x, \text{만 연령}$) 변인이 독립변인으로 함께 투입되었을

때 종속변인인 이동식 20-m PST를 통해 얻은 VO₂max ($y, \text{mL/kg/min}$) 실측값을 가장 잘 대변하는 것으로 나타났다. 각각의 회귀분석을 통해 얻은 최대 및 최대하 20-m PST 공식은 Table 5의 회귀 모형에 대한 요약에 제시하였다.

본 연구의 회귀분석 결과에서는 최대 및 최대하 20-m PST를 통해 GXT를 통해 얻은 VO₂max 실측값과 20-m PST를 통해 얻은 VO₂max 실측값을 유의하게 추정할 수 있는 추정식을 회귀분석을 통해 얻었다(최대 VO₂max 추정식 $F = 20.013, p = .000$; 최대하 VO₂max 추정식 $F = 13.889, p = .001$). 본 연구에서 도출된 VO₂max 추정식을 활용할 경우, 실측값과 추정식을 이용한 예측값 간의 차를 나타내는 추정값의 표준오차(standard error of the estimate, SEE)는 각각 5.54 mL/kg/min와 5.41 mL/kg/min이며, 두 값간 .603와 .619의 상관을 지니고 있는 것으로 나타났다($p = .000, p = .000$). 이러한 결과는 Park et al. [13]의 연구에서 여중생 194명을 대상으로 실시한 추정식의 표준오차(SEE = 4.29 mL/kg/min) 및 상관계수($r = .74$)와도 유사한 것으로 나타나 본 연구결과를 지지하는 것으로 나타났다.

또한 본 연구에서 개발된 공식의 타당도 분석을 위하여 트레드밀을 이용하여 얻은 VO₂max 실측값과 최대 및 최대하 20-m PST 추정식으로부터 산출된 VO₂max 예측값의 정확도를 확인하기 위하여 두 값에 대한 종속 t-test를 실시하였고 두 값 간 유의한 차이가 없는 것으로 나타나(최대 20-m PST 실측값 52.86 ± 6.85 vs. 추정값 52.89 ± 4.18 mL/kg/min, $t = -.045, p = .965$; 최대하 20-m PST 실측값 55.4 ± 6.7 vs. 55.5 ± 4.1 mL/kg/min, $t = -.158, p = .875$) 유용한 공식으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

결론

결론적으로 새롭게 개발된 20-m PST 프로토콜을 이용하여 측정된 VO₂max 값과 트레드밀을 이용하여 측정된 VO₂max 값 간 매우 높은 상관($r = .894$)을 보였을 뿐만 아니라 각 스테이지별 VO₂ 값도 마찬가지로 높은 상관을 보여 새롭게 개발된 20-m PST 프로토콜은 타당한 것으로 판단된다. 또한 20-m PST 측정의 신뢰도 검사에서는 1차와 2차 시기의 왕복횟수($r = .94$), 최종속도($r = .89$), 소요시간($r = .94$), 최대심박수($r = .82$)로 모두 높은 상관을 보여 반복 측정시 재현성이 높은 것을 알 수 있다.

VO₂max 추정을 위한 공식의 타당도 분석에서도 트레드밀을 이용하여 얻은 VO₂max 실측값과 최대 및 최대하 20-m PST 추정식으로부터 산출된 VO₂max 예측값의 정확도에서도 두 값 간 유의한 차이가 없는 것으로 나타나(최대 20-m PST 실측값 52.86 ± 6.85 vs. 추정값 52.89 ± 4.18 mL/kg/min, $t = -.045, p = .965$; 최대하 20-m PST 실측값 55.4 ± 6.7 vs. 55.5 ± 4.1 mL/kg/min, $t = -.158, p = .875$) 유용한 공식으로 활용할

수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 개발된 20-m 프로토콜과 VO_{2max} 추정을 위한 공식은 한국 남자 청소년들에게 적용하기에 타당한 것으로 판단되나 개발된 프로토콜이 여중생이나 다른 연령대(초등학생, 성인, 노인)에 적용되기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Korea Centers for Disease Control and Prevention (KCDC). The 12th Korea youth risk behavior survey 2016.
2. Ko BG, Kim YR, Sung BJ, Chung DS, Youn SW, et al. Development of criteria for Korea youth fitness award. *Korean Journal of Sport Science* 2005;16(3):44-63.
3. Lee CJ. The characteristics of health-related physical fitness for female high school students. *Journal of Physical Growth and Motor Development* 2007;15(3):181-185.
4. Incheon Metropolitan City Office of Education. General report on PAPS (physical activity promotion system). Seoul: Rainbow publishing company 2007.
5. Ryu KH, Park DH, Youn SW, Chung DS. Analysis on the heart rate responses at LT and OBLA of swimmers according to graded exercise test methods. *Korean Journal of Sport Science* 2003;14(2):88-96.
6. Leger LA, Lambert J. A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict $\dot{V}O_{2max}$. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 1982;49(1):1-12.
7. Ko BG. Practical field aerobic fitness test, shuttle run test. *Sports Science* 2006;96:31-38.
8. Kim NY, Kim JS, Park DH. Assessing agreement of various 20-m PSRT equations to estimate VO_{2max} . *Korean Journal of Sport Science* 2012;23(2):254-264.
9. Saltin B. Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise. *Journal of Applied Physiology* 1961;16(6):971-976.
10. Poole DC, Ward SA, Gardner GW, Whipp BJ. Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics* 1988;31(9):1265-1279.
11. Whipp BJ. The slow component of O_2 uptake kinetics during heavy exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 1994;26(11):1319-1326.
12. Whipp BJ, Wasserman K. Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *Journal of Applied Physiology* 1972;33(3):351-356.
13. Park DH, Song JR, Lee SH, Kim CS. The development of prediction equation for estimating VO_{2max} from the 20-m PSRT in Korean middle-school girls. *Exercise Science* 2014;23(1):1-11.
14. American College of Sports Medicine. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription. Lippincott Williams & Wilkins 2000.
15. Jones AM, Doust JH. 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *Journal of Sports Sciences* 1996;14(4):321-327.
16. Gellish RL, Goslin BR, Olson RE, McDonald A, Russi GD, et al. Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2007;39(5):822-829.
17. Paliczka VJ, Nichols AK, Boreham CA. A multi-stage shuttle run as a predictor of running performance and maximal oxygen uptake in adults. *British Journal of Sports Medicine* 1987;21(4):163-165.
18. McCole SD, Davis AM, Fueger PT. Is there a disassociation of maximal oxygen consumption and maximal cardiac output?. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2001;33(8):1265-1269.
19. Lepretre PM, Koralsztein JP, Billat VL. Effect of exercise intensity on relationship between VO_{2max} and cardiac output. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2004;36(8):1357-1363.
20. Buchfuhrer MJ, Hansen JE, Robinson TE, Sue DY, Wasserman K, et al. Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment. *Journal of Applied Physiology* 1983;55(5):1558-1564.
21. Yoon BK, Kravitz L, Robergs R. $\dot{V}O_{2max}$, protocol duration, and the $\dot{V}O_2$ plateau. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 2007;39(7):1186-1192.
22. Flouris AD, Metsios GS, Famisis K, Geladas N, Koutedakis Y. Prediction of VO_{2max} from a new field test based on portable indirect calorimetry. *Journal of Science and Medicine in Sport* 2010;13(1):70-73.
23. Ahmaidi S, Collomp K, Préfaut C. The effect of shuttle test protocol and the resulting lactacidaemia on maximal velocity and maximal oxygen uptake during the shuttle exercise test. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 1992;65(5):475-479.
24. Ahmaidi S, Collomp K, Caillaud C, Préfaut C. 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* 1992;13(3):243-248.
25. Grant S, Corbett K, Amjad AM, Wilson J, Aitchison T. A comparison of methods of predicting maximum oxygen uptake. *British Journal of Sports Medicine* 1995;29(3):147-152.
26. Sproule J, Kunalan C, McNeill M, Wright H. Validity of 20-MST for

- predicting VO_2 max of adult Singaporean athletes. *British Journal of Sports Medicine* 1993;27(3):202-204.
27. Leger LA, Mercier D, Gadoury C, Lambert J. The multistage 20-metre shuttle run test for aerobic fitness. *Journal of Sports Sciences* 1988; 6(2):93-101.
28. Lamb KL, Rogers L. A re-appraisal of the reliability of the 20-m multi-stage shuttle run test. *European Journal of Applied Physiology* 2007; 100(3):287-292.