

최대하 운동검사시 최대산소섭취량 예측 수식의 타당성

한림대학교 의과대학 재활의학교실 및 스포츠건강의학센터

최형종 · 김동현 · 이정기 · 고원진 · 유우경 · 온석훈 · 정광익

Validity of the Prediction Equation of the Maximal Oxygen Consumption in Submaximal Exercise Test

Hyung Jong Choi, M.D., Dong Hyun Kim, M.D., Jeong Ki Lee, M.D., Won Jin Ko, M.D., Woo-Kyoung Yoo, M.D., Suk Hoon Ohn, M.D. and Kwang-Ik Jung, M.D.

Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Hallym University College of Medicine and Hallym Sports Health Medical Center

Objective: To explore accuracy and validity of a VO_{2max} prediction equation of the multistage model using by modified Bruce protocol submaximal exercise test in healthy subjects.

Method: Thirty three healthy subjects (age: 44.0 ± 12.9) were recruited. VO_{2max} was measured during treadmill by direct gas analysis from a maximal incremental test. VO_{2max} was then predicted from multistage model equation with age, measured oxygen consumption and heart rate during a maximal incremental treadmill test. And the predicted VO_{2max} values from equation were compared

with the measured VO_{2max} values.

Results: The predicted VO_{2max} values and the measured VO_{2max} values were highly correlated ($r=0.9$, $p<0.001$). The predicted VO_{2max} values ($2,285.3 \pm 536.0$ ml/min) were not significantly different from the measured VO_{2max} values ($2,285.5 \pm 598.5$ ml/min).

Conclusion: In healthy subjects, the multistage model equation offers a fairly accurate VO_{2max} prediction. Therefore the equation can be used in the estimation of VO_{2max} at modified Bruce protocol in an aerobic exercise program. (J Korean Acad Rehab Med 2008; 32: 549-552)

Key Words: Modified Bruce protocol, Submaximal exercise

서 론

최대산소섭취량(VO_{2max})은 개인의 운동능력을 나타내는 대표적인 지표로서 객관적이고 정확하여 널리 사용되고 있다.^{1,3} 최대산소섭취량은 최대심박출량과 동-정맥 산소차에 의해 주로 결정되며 각 개인의 최대심박출량에 의해 주로 차이를 나타내지만 폐기능, 근육의 대사, 혈액색 등 다양한 요인에 의해 차이를 보인다.^{1,4} 이러한 최대산소섭취량은 각 개인의 신체 운동능력을 통한 건강 상태의 평가, 유산소 운동훈련 처방을 위한 운동강도의 설정, 운동 프로그램의 효과 모니터링 등에 폭넓게 사용되고 있다.⁵ 그러나 미국스포츠의학회(American College of Sports Medicine; ACSM)는 노인이나 증상이 있는 환자군에서는 최대산소섭취량을 위험도를 고려해서 매우 조심해서 얻을 것을 권고하고 있으며, 여러 연구에서 운동부하를 최대로 올리는 것이 신체에 상당히 많은 양의 산소 부채(oxygen debt)를 초래할 수 있음

을 보고하고 있어 환자에서는 적용하는데 한계가 있을 수 있다.^{1,3} 따라서 최대산소섭취량 측정이 어려운 경우에는 최대하 운동부하검사를 시행하고 정해진 공식을 이용하여 최대산소섭취량을 계산하여 얻게 된다.^{2,3}

운동부하검사시 각 환자의 상태와 목적에 맞는 프로토콜을 적용하는 것은 매우 중요하다. 환자의 능력에 비해 운동이 너무 격렬하면 조기에 종료하게 되어 임상적으로 중요한 반응들을 얻을 수 없고, 반대로 너무 쉬우면 검사가 오래 지속되어 유산소 운동능력보다는 지구력 검사가 되기 때문이다.⁶ 그 중 브루스 프로토콜(Bruce protocol)은 유산소 능력 평가를 위한 상대적으로 높은 예측 정확도가 있다고 알려져 지금까지 가장 일반적으로 사용되고 있지만 3분마다 상대적으로 큰 증가가 이루어져 초기 변화가 크다는 특징이 있다.¹ 그래서 초기 변화가 적은 변형 브루스 프로토콜(modified Bruce protocol)은 브루스 프로토콜보다 위험성이 높은 사람과 노인에게 안전하게 적용할 수 있는 운동부하검사 프로토콜이며,¹⁷ 현재 우리나라 의료기관에서 가장 널리 사용되고 있다. 하지만, 변형 브루스 프로토콜에서 최대산소섭취량의 예측을 위한 수식은 주로 트레드밀 스피드와 경사도를 이용하여 계산하는 미국스포츠의학회에서 제시한 대사량 공식³을 제외하고는 없다. 호흡가스분석 없이 최대산소섭취량을 예측하려는 시도는 그 정확도가 떨어진

접수일: 2008년 3월 25일, 게재승인일: 2008년 7월 15일
교신저자: 정광익, 경기도 안양시 동안구 평촌동 896번지
☎ 431-070, 한림대학교 성심병원 재활의학과
Tel: 031-380-3860, Fax: 031-380-3864
E-mail: jki@hallym.ac.kr

다.⁸ 따라서 본 연구에서는 브루스 프로토콜을 위해 개발된 최대산소섭취량 예측 수식이 변형 브루스 프로토콜에도 적용이 가능한지 알아보려고 하였다. 변형 브루스 프로토콜을 이용하여 시행한 최대하 운동부하검사 각 단계로부터 얻어진 심박수와 운동부하 자료를 복합단계모형수식(multi-stage model)³에 적용하여 최대산소섭취량을 예측하고 그 정확성 및 타당성을 알아보려고 하였다.

연구대상 및 방법

1) 연구 대상

2006년 12월부터 2007년 6월까지 한림대학교 성심병원 재활의학과 스포츠건강의학센터에 내원하여 기저 질환이 없고 최대 운동부하검사를 받은 건강한 성인 33명(남자 19명, 여자 14명)을 대상으로 연구하였다. 대상군의 평균 연령은 44.0±13.0세, 키는 164.6±7.3 cm, 몸무게는 63.8±9.9 kg, 체질량지수는 24.5±7.0 kg/m²이었으며 최대 심박수(220-나이)는 176.0±12.9 bpm이었다.

2) 연구 방법

(1) 표준 최대산소섭취량 측정: 모든 대상군은 트레드밀에서 변형 브루스 프로토콜을 이용하여 운동부하검사를 시행하였다. 운동부하검사는 Quark b[®] (Cosmed, Rome, Italy) 호흡가스분석기와 CASE[®] (GE Medical system, Milwaukee, USA) 심장부하검사를 이용하여 측정하였다. 호흡가스분석기는 실험을 시작하기 바로 전에 보정을 하였다. 안정시 혈압 및 심박수는 15분 동안 안정을 취한 후 누운 자세와 선 자세에서 측정하였으며, 운동시에는 심전도, 산소분압 및 심박수를 지속적으로 측정하면서 각 단계마다 혈압을 측정하였다. 운동이 끝난 후 회복기 1분, 2분, 4분 그리고 5분에 혈압 및 심박수를 측정하여 기록하였다. 최대산소섭취량 도달 여부는 산소섭취량이 운동부하를 계속 증가시켜도 증가하지 않는 경우와 연령에 따른 최고 심박수에 도달한 경우로 규정하였다.

(2) 예측 최대산소섭취량(predicted VO₂max) 수식: 복합 단계모형 수식은 운동부하의 점진적인 증가와 함께 심박수가 직선적으로 증가한다는 가정을 기반으로 하여 운동을 중단한 단계 전 단계의 산소소모량(VO₂ 2)와 바로 그 두 단계 전의 산소소모량(VO₂ 1)의 차이와 각각의 단계에서 얻어진 산소 소모량에서의 심박수 HR2 와 HR1의 변화 사이 비율을 계산함으로써 기울기(b)를 구하였다[b=(VO₂ 2 - VO₂ 1)/(HR2 - HR1)]. 이를 예측 심박수로 환산하여 계산하였다(predicted VO₂max=VO₂ 2 + b (HR_{max} - HR2)). 즉, 여기서 예측 최대산소섭취량 수식에 사용된 산소 소모량과 심박수는 표준 최대산소섭취량 측정시 각각의 대상군에서 나온 결과를 이용하였고 최대 심박수(HR_{max})는 "220-나이" 수식을 적용하였다.

측정된 자료는 평균과 표준편차로 표시하였으며, window 용 SPSS 10.0 통계프로그램을 이용하였다. 측정 최대산소섭취량(measured VO₂max)과 예측 최대산소섭취량의 관련성 및 타당도를 비교하기 위해 회귀 분석을 시행하고 상관계수(r), 상수오차(CE=측정 최대산소섭취량-예측 최대산소섭취량), 추정치의 표준오차[(SEE=SD(1-r²)^{1/2}], 총오차 {TE=[Σ(측정 최대산소섭취량-예측 최대산소섭취량)²/n]^{1/2}}를 분석하였다.^{5,9} 또한, 측정 최대산소섭취량과 예측 최대산소섭취량의 차이는 대응표본 t 검정을 시행하였고 통계적 유의수준은 p값을 0.05 미만으로 하였다. 95% 신뢰구간으로 x 축에는 측정 최대산소섭취량과 예측 최대산소섭취량의 평균, y 축에는 최대산소섭취량과 예측 최대산소섭취량의 차이를 도식화 하는 Bland and Altman plot¹⁰⁻¹²를 나타내었다.

결 과

1) 최대 운동부하검사 결과

트레드밀 최대 운동부하검사로 측정 최대산소섭취량은 2,285.5±598.5 ml/min, VO₂ 2는 1,888.8±531.9 ml/min, VO₂ 1은 1,373.4±355.9 ml/min, HR2는 153.3±15.6 bpm, HR1은 125.0±14.0 bpm, 기울기는 18.2±6.3이었다.

2) 최대 운동부하검사로 측정된 최대산소섭취량과 예측 최대산소섭취량의 비교

측정 최대산소섭취량은 1,456.4~3,943.0 ml/min 범위였고 예측 최대산소섭취량은 1,238.2~3,689.4 ml/min 범위였다.

예측 최대산소섭취량에 대한 상관계수(r)는 0.9 였고(Fig. 1), 최대산소섭취량의 상수 오차(CE)는 0.2 ml/min 으로 예측 최대산소섭취량은 측정 최대산소섭취량보다 낮게 추정되었고, 추정치의 표준오차(SEE)는 235.6 ml/min였다. 상수 오차와 추정치의 표준오차를 반영하는 총오차(TE)는 255.0 ml/min이었다.

측정 최대산소섭취량(2,285.5±598.5 ml/min)과 예측 최대산소섭취량(2,285.3±536.0 ml/min)은 유의한 차이(p<0.05)를 보이지 않았다.

Bland and Altman plot에서 95% 신뢰구간(Limit of agreement)에서 예측 수식의 편차(bias)는 0.2±259.0 ml/min이었다(Fig. 2).

고 찰

유산소 운동 능력은 유전, 나이, 성별, 체지방, 활동량 등에 의해 좌우되며 산소섭취량은 폐환기, 폐포-동맥 가스교환, 심박출량, 혈류분포, 근육에서의 산소 이용 등에 의해 결정된다.^{9,13} 심폐지구력을 측정하고 관상동맥 질환의 진단,

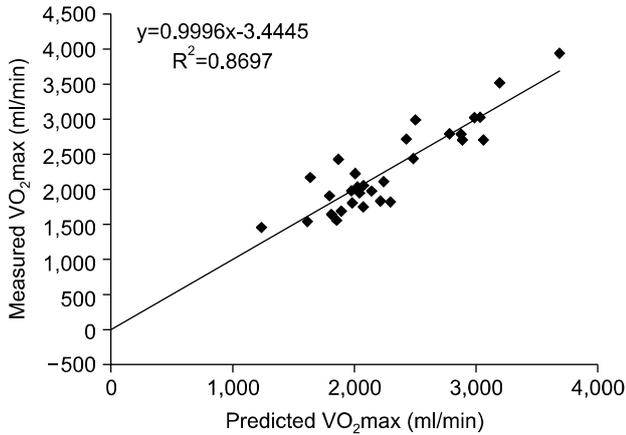


Fig. 1. The relationship between the predicted VO₂max values and the measured VO₂max; values from maximal treadmill exercise test (R: correlation coefficient).

유산소 운동 프로그램의 처방을 위해서 이러한 유산소 운동 능력을 직접 측정하는 것이 바람직하나 실행에 어려움이 있어 최대하 운동부하검사를 통해 추정하려는 노력이 있어 왔다. 최대하 운동부하검사는 최대하 운동에 대한 생리적인 반응을 측정하여 주어진 운동량에 대한 산소 요구량을 검증된 표준 도표 또는 트레드밀의 속도와 경사, 에르고미터의 운동량을 대입하는 공식에 의해 추정된다.^{14,15}

복합단계모형수식을 이용한 본 연구에서 상관계수는 0.9로 높은 상관관계를 보였으며 이 수식을 적용한 최대산소섭취량 예측이 실제 측정한 최대산소섭취량과 유의한 차이를 보이지 않았다. 그러나 측정식의 예측 정확도를 비교할 때 상관계수는 자료의 분포에 영향을 받으므로 상관관계수가 차이가 있더라도 변동계수는 유사하게 나타나는 경우가 있기 때문에 단지 상관계수만을 고려하면 안 된다. 즉, 상관계수는 자료의 동질성만을 반영하므로 회귀식의 정확성 비교시에 유일한 지표라고 보는데 다소 무리가 있기 때문에 표준오차와 총오차 분석값이 필요하다. 표준오차는 오직 다양한 수식들 사이의 회귀(regression)와 관련된 오차를 나타내는 반면, 총오차는 측정 최대산소섭취량과 예측 최대산소섭취량 사이의 실제 차이를 반영하여 공식의 정확성을 결정하는 가장 중요한 인자로 볼 수 있다. 표준오차, 총오차는 각각 235.6 ml/min, 255.0 ml/min이었으며, 향후 다른 수식들과의 비교 잣대로 사용될 수 있다.^{5,10}

본 연구에서 복합단계모형수식을 적용한 최대산소섭취량 예측이 실제 측정한 최대 산소섭취량과 유의한 차이를 보이지 않다는 것을 알 수 있었으나, 어떤 대상군에서는 예측 최대산소섭취량값이 측정 최대산소섭취량값보다 569.4 ml/min 정도 작거나 아니면 오히려 최대 486.4 ml/min 커지는 중요한 변이성(variability)을 확인할 수 있었다. 이는 최대하 운동부하 검사가 3가지 가정을 전제로 시행되기 때문이라고 생각된다.

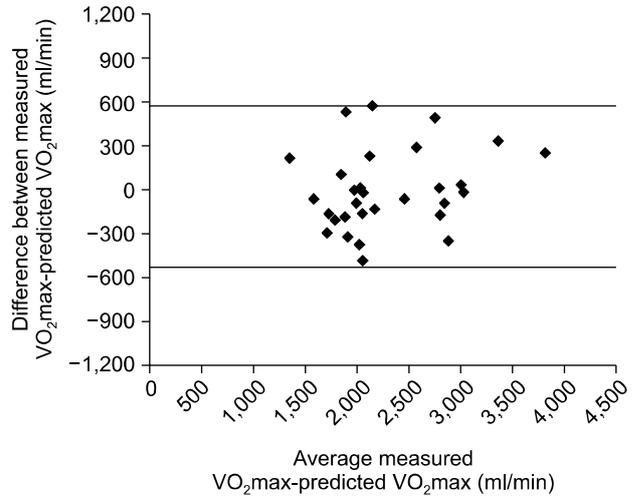


Fig. 2. Bland-Altman plot of measured and predicted VO₂max (ml/min) with inferior and superior 95% limits of agreement (LOA=bias±1.96×SD_{difference}).

첫째, 심박수, 산소섭취량, 운동강도 간의 선형적인 관계를 보인다는 것이다. 그러나 Davies 등¹⁶은 보다 큰 운동량에서는 심박수와 산소섭취량이 곡선의 관계 즉, 심박수의 증가에 비해 산소 섭취량의 증가가 더 커지기 때문에 실측치에 비해 낮게 추정되어 최대산소섭취량을 추정하는 데 가장 큰 제한점이 될 수 있다고 하였다.³ 본 연구에서 보듯이 측정 최대산소섭취량이 큰 값에서는 측정 최대산소섭취량과 예측 최대산소섭취량의 차이가 주로 양의 값을 확인할 수 있다(Fig. 2).

둘째, 같은 연령에서 최대 심박수가 동일하다는 가정이다. 하지만 최대 심박수는 심지어 나이와 트레이닝 상태에 따른 차이를 통제한 후에도 많게는 11 bpm이나 차이가 난다.³ 최대하 검사의 경우에도 최대 심박수는 나이로부터 추산된다. “최대 심박수=220-나이” 공식은 널리 사용되고 있는 식으로 남성과 여성의 약 5~7%는 실제 최대 심박수가 자신의 나이로 예측한 최대 심박수보다 15 bpm 이상 낮으며 그와는 달리, 9~13%는 실제 최대 심박수가 자신들의 나이로 예측한 최대 심박수보다 15 bpm 이상 높게 나타난다.¹⁷ 또한, Tanaka 등¹⁸은 이 공식은 젊은 사람일수록 과대 평가되고 40세 이상의 연령일수록 과소 평가된다고 언급하였다. 따라서, Tanaka 등¹⁸에 의한 연구를 바탕으로 할 경우 복합단계모형수식을 적용시 40세 이상에서는 예측 최대산소섭취량값이 낮게 측정될 수 있다. 하지만 본 연구에서는 40세 이상의 21명에서 측정 최대산소섭취량과 예측 최대산소섭취량의 차이를 보이는 경우는 7명으로 33.3%만을 확인할 수 있었다.

셋째, 에르고미터나 트레드밀 운동 동안 동일한 효율을 가진다는 것이다. 그러나 신체적성이 좋은 사람일수록 상대적으로 낮은 심박수를 나타내므로 예측 최대산소섭취량

은 높게 추정되고 훈련되지 않는 비활동적인 사람에게서는 과소평가되는 경향이 있다.^{8,19} 본 연구에서는 비교적 운동을 규칙적으로 하는 21명 중 측정 최대산소섭취량과 예측 최대산소섭취량의 차이가 음의 값을 보이는 12명(=57.1%)을 확인할 수 있었다.

이러한 이유에 의해 측정 최대산소섭취량과 예측 최대산소섭취량의 차이를 유발하여 두 값의 변이성이 증가하며 이는 최대하 운동부하검사의 정확성을 제한하는 요소로써 향후 예측값과 측정값이 차이가 큰 실험군에 대한 추가적 연구가 필요할 것이다.

결 론

변형 브루스 프로토콜에서 최대하 운동부하검사시 복합 단계모형수식을 적용한 최대산소섭취량 예측과 실제 측정된 최대산소섭취량이 유의한 차이를 보이지 않았고 변형 브루스 프로토콜에서 복합단계모형수식을 이용한 최대산소섭취량 예측이 유산소 운동훈련 처방을 위한 운동강도 지표 등의 프로그램 계획 수립에 도움을 줄 것이다. 향후 예측값과 측정값의 차이가 큰 실험군에 대하여 그 차이를 줄일 수 있는 보정값의 고려 등 추가적 연구가 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Whaley MH, Brubaker PH, Otto RM. ACSM's Guidelines for exercise testing and prescription, 7th ed, Seoul: Hanmi Medical Publishing Co, 2006, 47-79
- 2) Macsween A. The reliability and validity of the Astrand nomogram and linear extrapolation for deriving VO₂max from submaximal exercise data. J Sports Med Phys Fitness 2001; 41: 312-317
- 3) Heyward VH. Advanced fitness assessment and exercise prescription, 5th ed, United States: Human Kintetics, 2006, 53-91
- 4) Kim C, Ahn JK, Bang IK, Rhee KJ, Kim BO, So MC, Kim YH, Jung IT. Effectiveness of the cardiac rehabilitation on exercise capacity and risk factor in coronary artery obstructive disease. J Korean Acad Rehab Med 2006; 30: 74-79
- 5) Malek MH, Berger DE, Housh TJ, Coburn JW. Validity of VO₂max equations for aerobically trained males and females. Med Sci Sports Exerc 2004; 36: 1427-1432
- 6) Kim C, Bang IG, Jung IT, Kim YJ, Park YK. The causes for the premature termination of graded exercise test in a cardiac rehabilitation setting. J Korean Acad Rehab Med 2007; 31:

- 109-112
- 7) Trabulo M, Mende M, Mesquita A, Seabra-Gomes R. Does the modified Bruce protocol induce physiological stress equal to that of the Bruce protocol. Rev Port Cardiol 1994; 13: 735-736
- 8) Bogaard, HJ, Woltjer H, Anton RJ, Keimpema V, Epostmus PT, Peter MJ, Vries MD. Prediction of peak oxygen uptake in men using pulmonary and hemodynamic variables during exercise. Med Sci Sports Exerc 2000; 32: 701-705
- 9) Choi CJ, Kim KS, Ock SM, Song CH, Yeun KS, Park YS, Kim HI. Validity analysis of four exercise tests in assessing aerobic capacity of young men. J Korean Acad Fam Med 1999; 20: 1752-1760
- 10) Rance M, Boussuge PY, Lazaar N, Bedu M, Van Praaah E, Dabonneville M, Duche P. Validity of a VO₂max prediction equation of the 2-km walk test in female seniors. Int J Sport Med 2005; 26: 453-456
- 11) Suminski RR, Ryan ND, Poston CS, Jackson AS. Measuring aerobic fitness of Hispanic youth 10 to 12 years of age. Int J Sports Med 2004; 25: 61-67
- 12) Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. Lancet 1986; 8: 307-310
- 13) Roitman JL, Haver EJ, Herridge M, Kelsey M, Lafontaine TP, Miller L, Wegner M, Williams MA, York T. ACSM's resource manual for guidelines for exercise testing and prescription, 4th ed, Philadelphia: American college of sports medicine, 2001, 133-224
- 14) Bruce RA, Kusumi F, Hsmer D. Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. Am Heart J 1973; 85: 546-562
- 15) Hartung GH, Krock LP, Crandall CG, Bisson RU, Mytre LG. Prediction of maximal oxygen uptake from submaximal exercise testing in aerobically fit and nonfit men. Aviat Space Environ Med 1993; 64: 735-740
- 16) Davies CT. Limitations to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements. J Appl Physiol 1968; 24: 700-706
- 17) Whaley M, Kaminsky L, Dwyer G, Getchell L, Norton J. Predictions of over- and under- achievement of age- predicted maximal heart rate. Med Sci Sports Exerc 1992; 24: 1173-1179
- 18) Tanaka H, Monahan KD, Seals DR. Age predicted maximal heart rate revisited. J Am Coll Cardiol 2001; 37: 153-156
- 19) Ferhall B, Kohrt W. The effect of training specificity on maximal and submaximal physiological response to treadmill and cycle ergometry. J Sports Med Phys Fitness 1990; 30: 268-275