

## 운동부하 심폐기능 검사의 시행방법

연세대학교 의과대학 내과학교실

김 영 삼

### Methodology of Cardiopulmonary Exercise Testing

Young Sam Kim, M.D.

Department of Internal Medicine Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

#### 서 론

운동에는 호흡기계와 순환기계를 포함하여 여러 장기가 관여하고 있다. 한 장거나 계통의 기능만으로는 운동 능력의 진부를 설명할 수 없으며, 운동 능력의 장애를 평가하기 위해서는 각 장기의 기능을 통합적으로 파악할 수 있는 검사를 시행해야 하는데 이것이 운동부하심폐기능검사이다. 운동부하심폐기능검사는 주로 운동능력의 저하, 운동과 관련하여 나타나는 증상의 원인을 알아내고 운동 능력의 장애를 객관적으로 평가하기 위해 시행하는 검사로<sup>1</sup>, 정확하고, 피검자에게 스트레스를 덜 주어야하며, 단시간 내에 시행할 수 있어야 한다<sup>2</sup>. 운동부하심폐기능검사는 다음과 같은 방법으로 시행하는 것을 권장하고 있다.

#### 본 론

##### 1. 검사실 이전 준비

운동부하심폐기능검사를 시행하기에 앞서 다음과 같은 내용을 확인한 후 기재해야 한다.

- 1) 피검자의 이름, 주소, 전화번호와 같은 인적사항
- 2) 피검자의 체중, 신장, 성별과 나이
- 3) 피검자의 추정 진단명과 검사를 시행하는 이유
- 4) 의뢰하는 검사의 유형 및 특별한 요구사항

이외에도 근육힘기록기(ergometer)로 자전거(cycle) 혹은 답차(treadmill) 중 어느 것을 사용할 것인지, 동맥혈카테터(arterial catheter)를 삽입할 것인지, 추

---

Address for correspondence:

**Young Sam Kim, M.D.**

Department of Internal Medicine, Yonsei University College of Medicine

CPO Box 8004, Seoul, Korea

Phone : 02-361-5394 Fax : 02-393-6884 E-mail : Ysamkim@yumc.yonsei.ac.kr

**Table 1.** Absolute and relative contraindications for cardiopulmonary exercise testing

절대적 금기증	상대적금기증
1. 급성심근경색(3-5일)	1. 좌주관상동맥(left main coronary)의 협착이나 그에 상응되는 상황
2. 불안정협심증	2. 중등도의 심장판막 협착
3. 증상이나 혈액학적 이상이 있는 부정맥	3. 심한 고혈압(수축기 혈압: >200 mmHg, 이완기혈압: >120 mmHg)
4. 실신	4. 빈맥이나 서맥
5. 급성심내막염	5. 고도 방실차단 (High-degree atrioventricular block)
6. 급성심근염이나 심내막염	6. 비후성심근증
7. 증상을 동반한 심한 대동맥협착증	7. 유의한 폐동맥 고혈압
8. 조절되지 않는 심부전	8. 진행되거나 합병증이 동반된 임신
9. 급성폐색전증이나 폐경색	9. 전해질 장애
10. 하지의 색전증	10. 운동을 진행하기 곤란한 정형외과적 장애
11. 박리성동맥류가 의심되는 경우	
12. 조절되지 않은 천식	
13. 폐부종	
14. 안정시 산소포화도가 85%미만	
15. 호흡부전	
16. 운동으로 인해 악화되는 질환 (감염증, 신부전, 갑상선중독증)	
17. 협조가 되지 않을 정도의 정신장애	

가적으로 산소를 투여할 것인지의 여부를 결정해야 한다. 그리고 검사를 시행하고 해석하는 데 도움이 되는 다른 정보들 예를 들면, 투약 내역과 이전 검사 결과, 운동시에 나타나는 증상을 확인하고 흉부 X-선 검사, 폐기능검사 결과 및 심전도와 심초음파 검사 결과 등을 확인하여 검사를 할 때 위험하지 않을 지와 운동에 대한 금기 사항<sup>1</sup>(Table. 1)이 없는 지를 확인해야 한다. 피검자는 검사 당일 적어도 검사실 도착 2-3시간 전에 식사를 가볍게 하고, 평상시에 복용하는 약을 먹은 후에 운동화를 신고 와야한다. 검사 전 최소 2시간은 담배를 피지 말고 커피를 마시지 않아야 한다. 피검자에게 검사에 대해 간단히 설명을 해준 후, 얼마나 시간이 걸릴 것이며 검사를 통해 어떤 것을 알 수 있는지에 대해 알려 주어야 한다<sup>1,2</sup>.

## 2. 검사실에서의 준비

### 가. 교정(calibration)

검사를 정확하게 시행하기 위해서 매 검사 전에

영점교정을 시행해야 한다. Flowmeter에는 Watersealed spirometer와 Pneumotachograph가 있는데 pneumotachograph는 온도, 수증기압, 기체의 점도에 따라 검사수치가 변하기 때문에 검사를 시행하기 전에 검사를 시행할 때와 동일한 조건하에서 영점교정을 해야 한다. 교정을 위한 실린더가 있으며 이를 이용하여 매 검사 전에 영점교정을 한다. 가스분석기에 대한 영점교정도 필요하며 이미 가스의 구성이 알려진 두 종류의 가스를 이용해 교정한다. 그 중 하나는 건조한 대기 중의 공기로 산소의 농도는 약 20.93%, 이산화탄소의 농도는 0.04%이며, 다른 하나는 15%의 산소와 6%의 이산화탄소 및 질소 가스로 구성되어 두 가지의 농도를 이용해 영점교정을 시행한다. 최근에 개발된 기계에는 자동으로 가스교환에 대한 영점교정을 시행할 수 있는 장치가 부착되어 있다<sup>3-5</sup>.

### 나. 사전 검사(Preliminary Test)

사전검사로 폐기능 검사를 시행한다. 대부분 폐활

량(Vital capacity), 들숨용적(Inspiratory capacity), 1초간 날숨호흡폐활량(FEV<sub>1</sub>), 최대자발환기량(Maximal voluntary ventilation:MVV)을 측정한다. 폐기능검사는 American Thoracic Society에서 제시한 방법대로 시행해야 한다<sup>6</sup>. 최대자발환기량은 12초 동안 깊고 빠르게 숨을 쉬어 측정할 수도 있고(direct MVV), FEV<sub>1</sub>에 40을 곱하여 간접적으로 측정할 수도 있다. 최대환기량을 측정함으로써 운동시의 환기예비량(exercise breathing reserve)을 측정할 수 있다. 최대 자발호흡을 시키는데 있어 호흡수가 너무 많거나, 흡기시 기도의 폐쇄가 있는 경우, 근골격계 질환이나, 심한 비만의 경우에는 최대자발환기량을 직접 측정하고 피검자가 검사에 협조가 되지 않는 경우에는 간접법으로 측정하는 것이 정확하다. 폐질환이 있거나 호흡곤란이 있는 경우에는 헤모글로빈이나 일산화탄소혈색소(carboxyhemoglobin)를 측정한다<sup>2</sup>.

#### 다. 피검자진찰(Physician Evaluation)

검사를 시행하는 의사는 검사를 시행하기 전에 피검자가 복용하는 약물, 흡연력, 평소 활동량과 협심증 및 운동과 관련된 증상의 유무 및 호흡곤란의 정도(Borg Scale)를 확인해야 한다. 검사를 시행하는 의사는 피검자의 심장, 폐, 말초혈관, 근골격계에 대해 진찰을 하고 양쪽 팔에서 혈압을 측정한 후, 신발을 벗은 상태에서 정확한 키와 몸무게를 측정한다. 검사를 시행하는 의사는 검사를 의뢰하는 의사의 요구, 피검자의 상태, 심전도 및 다른 사전 검사 결과를 종합하여 운동의 종류와 운동부하의 종류(protocol)를 결정한다. 피검자에게 검사에 대해 간단히 설명을 한 후 서면동의서를 받고 가능한 끝까지 최선을 다해 운동을 할 것과 운동시에 문제가 있으면 언제라도 검사를 중단할 수 있음을 알려준다<sup>1,2</sup>.

#### 라. 피검자의 사전 준비(Equipment Familiarization)

실제 검사를 시행하기에 앞서 피검자로 하여금 검사에 익숙하게 하는 것이 중요하다. 답차로 검사를 하게되는 경우에는 피검자 스스로 답차에 오르고 내릴 수 있는 지를 확인해야 하고, 자전거로 검사를 하게되는 경우에는 의자의 높이를 조정하여 피검자의 다리가 거의 펴질 수 있게 하는 것이 중요하다. 마우스피스(mouthpiece)나 마스크를 사용하면 말로 의사표현을 할 수 없기 때문에 손가락을 이용하여 간단히 의사표현을 하는 방법을 교육하는 것이 필요하다. 미리 마우스피스나 마스크를 착용시켜 보고 침을 삼켜도 되나, 마우스피스나 마스크 주위로 바람이 새어나가지 않도록 주의시킨다.

#### 마. 동맥혈 채취 및 동맥카테타삽입(Arterial Blood Sampling and Arterial Catheterization)

단순히 운동능력을 평가하기 위해 검사를 시행하는 경우에는 동맥혈을 채취하여 추가 검사를 할 필요가 없으나 폐에서 가스교환의 이상을 알아내기 위해서는 동맥혈을 채취하여 검사를 해야한다. 동맥혈 채취를 고려해야 하는 상황은 다음과 같다.

- 1) 간질성폐질환, 폐혈관질환, 만성폐쇄성폐질환에서 일산화탄소화산능이 감소되어 폐에서의 가스교환의 이상이 의심되는 경우<sup>2,7,8</sup>
- 2) 맥박산소측정기(pulse oximetry)의한 산소포화도의 측정이 부정확할 것이라고 예상되는 경우<sup>9-11</sup>
- 3) 산소화의 정도를 정확하게 측정할 필요가 있을 경우(예를 들면 산소처방)
- 4) 초기 운동부하심폐기능검사 결과 폐에서의 가스교환의 이상이 과다호흡 때문인지 아니

면 사강호흡의 증가인지 구별하기 힘든 경우

검사를 하는 동안에 여러 차례 동맥혈을 채취해야 하는 경우에는 요골동맥(radial artery)이나 상완동맥(brachial artery)에 카테타를 삽입해야 한다. 동맥에 카테타를 넣기 전과 후에 요골동맥과 척골동맥(ulnar artery)의 맥박이 있는 지를 확인하는 것이 중요하다. 카테타는 혈압변환기(blood pressure transducer)에 연결을 한 후, 헤파린을 넣은 용액을 천천히 주입하여 카테타가 막히지 않도록 해야 한다. 혈압변환기는 피검자가 서 있을 때 심방의 중간에 위치하도록 빗장중간선(midclavicular line)과 제4 늑간이 만나는 위치에 해당하는 높이에 고정시킨다. 2분마다 동맥혈을 채취하고 채혈 직후에는 헤파린을 포함하는 액체를 통과시켜 카테타가 막히는 것을 방지해야 한다<sup>2</sup>.

### 3. 검사 시행(Performing the Exercise Test)

대부분 검사는 자전거를 이용하여 운동부하를 증가시키며(incremental exercise), 피검자가 견딜 수

있는 한 최대로 운동을 시켜야 한다. 그러나 운동 유발 천식이 있거나, 추가적인 산소공급이 필요한 경우, 협심증이 있는 경우에는 다른 종류의 프로토콜을 사용하거나 검사시에 특별히 주의해야 한다. 특별한 이유에 의해 답차 검사를 시행해야 하거나 자전거가 없는 경우에는 답차를 이용해 검사를 시행할 수 있다<sup>1</sup>. 답차를 이용하면 자전거를 이용한 경우보다 최대산소섭취량이 5-10%정도 많이 나온다<sup>12-15</sup>. 그러나 공간이 많이 필요하고 검사를 하는데 많은 주의가 필요하며, 환기와 가스교환 수치에 허상(artifact)이 포함되는 경우가 있다. 답차를 이용한 검사의 가장 큰 단점은 운동량을 정확하게 측정할 수 없다는 것이다. 이에 비해 자전거를 이용하면 운동량을 정확하게 예측할 수 있고, 운동부하를 가하는 정도를 자유롭게 조절할 수 있다. 그리고 초기에 자전거를 기계 내부의 모터를 이용해 돌림으로써 부하가 없는 상태에서 검사를 시행할 수 있다. 이에 비해 최대산소섭취량이 적게 측정되는 것이 단점이다. 답차검사와 자전거 검사의 장단점은 다음과 같다(Table 2)<sup>2</sup>. 하지로 운동을 할 수 없는 경우에는 arm crank ergometer를 이용하

**Table 2.** Comparison of treadmill and cycle ergometers for exercise testing

특 징	Treadmill	Cycle
$V_{O_{2max}}$ 와 $O_2$ pulse 수치가 높음	+	
최고치 맥박수와 $V_E$ 의 유사성	+	+
운동의 친숙도	++	+
운동량의 양적 측정의 정확도	--	++
심전도, 공기흐름, 압력측정에서 artifact가 없음	--	++
동맥혈을 채취하는데 있어서의 용이성	--	++
안정성(적은 근육계손상)		+
누운 자세에서 시행할 수 있는지의 여부		+
작은 검사실 공간에서 시행가능한지의 여부		+
소음이 적은지의 여부		+
비용이 적게 드는지의 여부		+
이동이 가능한지의 여부	-	+
미국에서 경험이 많음	+	
유럽에서 경험이 많음		+

++: 좀 더 많은 장점,   +: 덜 중요한 장점,  
-: 덜 중요한 단점,   --: 더 많은 단점

여 검사를 할 수 있는데, 최대산소섭취량이 하지 운동의 70% 밖에 안되고<sup>16-19</sup>, 호흡기 질환이 있는 피검자에서는 시행하기가 힘들다<sup>1,2</sup>.

#### 가. 운동부하증가 속도의 결정(Selecting the Increment Size)

검사를 시행하기 전 운동부하가 증가하는 속도를 결정해야 한다. 운동부하의 증가 속도를 결정하기 위해서는 피검자의 병력과 신체 검진 결과를 참고해야 하고 폐기능 검사 결과를 이용하여 최대산소섭취량을 예측해야 한다. 운동 부하량의 증가는 최대산소섭취에 도달하는 데 필요한 운동량을 10분에 걸쳐 주면 된다. 이를 간단히 계산하는 공식은 다음과 같다.

- 1) 운동부하가 없을 경우 분당 mL당 최대산소섭취량 : (Vo<sub>2</sub> unloaded : mL/minutes)  
= 150 + (6×weight, kg)
- 2) 최대 분당 mL당 최대산소섭취량 : (Peak Vo<sub>2</sub>/mL/minutes)  
=(height, cm-age, years)×20 : 앉아서 일하는 정상 성인 남자  
=(height, cm-age, years)×14 : 앉아서 일하는 정상 성인 여자
- 3) 분당 운동부하의 증가량 : (Work rate increment/ minutes)  
=(Peak Vo<sub>2</sub> : mL/minutes-Vo<sub>2</sub> unloaded : mL/minutes)/100

대부분 실제 검사를 시행하는데 있어서는 분당 20 Watt씩 증가시켜 검사 시간이 약 10분 정도 되도록 한다. 만약 최대자발환기량, FEV<sub>1</sub>, 일산화탄소화산능이 예측치의 80% 미만일 경우에는 최대산소섭취량을 같은 비율로 낮추어 계산하면 된다. 이외에 안정 시에 빈맥이 있거나, 협심증의 증상이 있거나 만성적인 심부전이 있으면 운동부하의 증

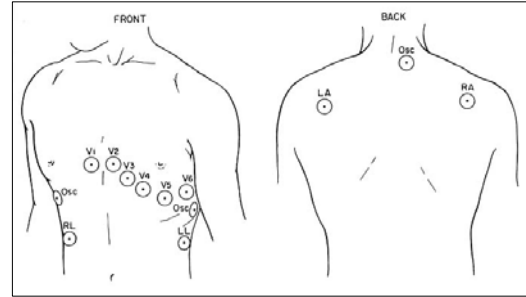


Fig 2. ECG lead placement for upright ergometry.

가속도를 늦추어야 한다. 피검자가 운동을 거의 못하는 경우에는 다음과 같은 방법으로 시행하는 것을 권장한다.

- 1) 운동 시작 초기 3분: 부하가 없는 상태에서 분당 20회 정도의 속도로 페달을 돌린다.
- 2) 운동 시작 4분째: 부하가 없는 상태에서 분당 40회 정도의 속도로 페달을 돌린다.
- 3) 운동 시작 5분째: 부하가 없는 상태에서 분당 60회 정도의 속도로 페달을 돌린다.
- 4) 운동 시작 6분째: 약간 운동 부하를 걸고 분당 60회 정도의 속도로 페달을 돌린다.
- 5) 운동 시작 7분째: 운동부하를 분당 5-10 watt 씩 증가시키며 검사를 진행한다.

#### 나. 운동 전 측정(Resting Measures)

심전도의 유도(lead)를 몸에 부착한다. 심전도는 운동에 따른 영향을 최소화하기 위해 그림(Fig. 1)과 같이 몸에 부착한다<sup>20</sup>. 안정시에 심전도를 찍는다. 동맥혈을 자주 측정해야 하는 경우에는 동맥카테타를 삽입하며, 그렇지 않은 경우에는 마우스피스 를 착용하기 전에 동맥혈을 채취한다. 마우스피스를 입에 물린 후, 코집게(nose clip)를 코에 부착하고 바람이 새지 않는 지를 확인한다. 피검자를 자전거 의자에 앉히거나 답차에 세운다. 안정시에 검사 수치가 제대로 나오는 지를 확인한다. 혈압과 산소포화도를 측정하여 기록한다<sup>2</sup>.

**Table 3.** Indications for Exercise Termination

1. 심근허혈을 시사하는 흉통
2. 심근허혈을 시사하는 심전도 변화
3. complex ectopy
4. 2도 혹은 3도 방실차단
5. 검사중 수축기 혈압이 20 mmHg 이상 감소
6. 고혈압(수축기 혈압: >250 mmHg, 이완기혈압: >120 mmHg)
7. 심한 저산소증의 증상을 동반하면서 산소포화도가 80%이하로 감소
8. 급작스러운 창백
9. 협조가 안되는 경우
10. 의식의 장애
11. 현기증이나 실신
12. 호흡부전의 증후

**다. 미부하운동검사와 회전속도(Unloaded Exercise and Cycling Rate)**

피검자가 자전거 페달에 발을 얹어놓은 상태에서 전혀 힘을 주지 않아도 페달이 분당 60회의 속도로 회전할 수 있도록 자전거 바퀴에 모터가 장착되어 부하가 없는 상태에서 3분간 검사를 진행하게 된다. 피검자로 하여금 속도계를 보고 분당 60회의 속도로 회전하게 자전거 페달을 돌려야 함을 설명한다. 3분이 끝날 무렵에 심전도와 혈압을 측정하고 동맥혈을 채취한다<sup>1,2</sup>.

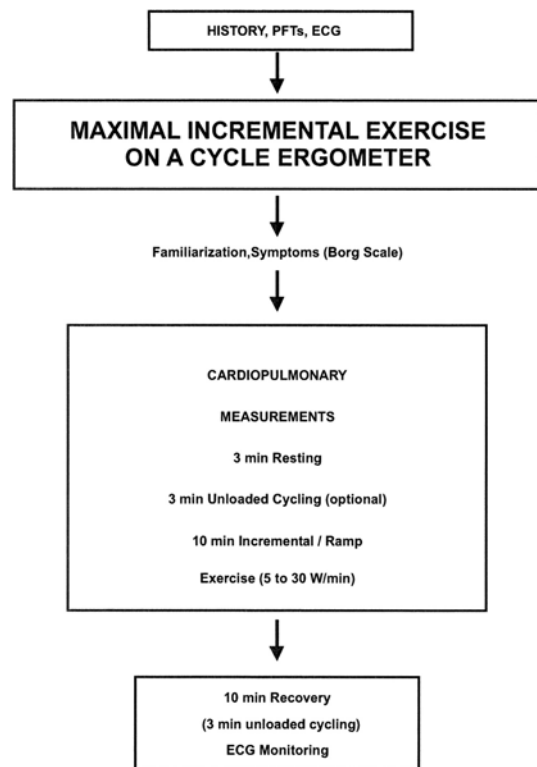
**라. 운동부하검사**

3분간의 미부하 운동이 끝나면 미리 준비한 대로 운동부하를 걸고 최대한 운동을 시키며 검사를 진행한다. 운동부하의 증가속도는 피검자의 운동능력에 따라 조절해야 한다. 2분 간격으로 심전도를 측정하고, 동맥혈카테타를 삽입한 경우에는 2분 간격으로 동맥혈을 채취한다. 의사와 기사는 혈압을 측정하고 피검자의 상태를 계속 감시해야 한다. 피검자로 하여금 최대한도로 운동을 하도록 격려하는 동시에 피검자가 불편한 점이 없는 지를 수시로 확인해야 한다. 만약 수축기혈압 혹은 평균혈압이 20 mmHg 이상 저하하거나, 심각한 부정맥이 발생

하거나, 심전도상 ST 분절이 기저치보다 3 mm 이상 떨어지면 검사를 중단시켜야 한다. 피검자가 자전거 바퀴를 분당 40회 이상 회전시키지 못해도 검사를 중단한다. 그 외에 검사를 중단 해야하는 적응증은 다음과 같다(Table 3)<sup>1</sup>. 동맥혈카테타를 삽입하지 않은 경우에는 운동을 중단하기 직전에 동맥혈을 채취한다<sup>1,2</sup>.

**라. 회복기 측정(Recovery Phase)**

피검자로 하여금 운동이 끝난 후 3분 동안 마우스 피스를 물고 3분 동안 호흡을 계속하도록 한다. 운동이 끝난 직후에는 자전거에 부하가 걸리지 않는데 피검자로 하여금 천천히 페달을 돌리게 한다. 만약 갑자기 모든 운동을 중단시키면 혈압이 떨어



**Fig 2.** Flow chart of a maximal symptom-limited cardiopulmonary incremental protocol on cycle ergometer.

질 수 있다. 회복기 2분 쯤에 마지막으로 동맥혈을 채취한다. 심전도를 측정하고 10분 후 검사를 마친다. 자전거를 이용한 운동부하심폐기능검사의 시행법을 요약하면 다음과 같다(Fig 2)<sup>1</sup>.

#### 4. 운동 후 관리(Post-Exercise Care)

회복기 측정이 끝나면 마우스피스를 제거한 후, 어떤 증상으로 인해 운동을 중단하게 되었는지를 확인한다. 검사결과를 검토한 후 피검자가 협조가 안 되어 검사가 조기에 중단된 경우에는 30-45분 동안 휴식을 취한 후 다시 검사를 시행할 수 있다. 검사가 잘되어 종료를 하게되는 경우에는 동맥혈 카테타를 제거하고, 삽입 부위를 5-10분 동안 세게 압박해야 한다. 더이상의 출혈이 없는 지를 확인한 후에 천자부위에 압박봉대를 감고 말초부위의 맥박을 확인한다. 그리고 24시간 동안 힘든 일을 하지 않도록 주의를 준 후 귀가시킨다<sup>2</sup>.

### 결 론

운동부하심폐기능검사는 비교적 안전한 검사로, 잘 훈련받은 의사나 기사에 의해 정확한 방법으로 시행할 경우 임상적으로 유용한 정보를 얻을 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. ATS BOARD OF DIRECTORS AND THE ACCP HEALTH SCIENCE POLICY COMMITTEE. ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing. *Am J Respir Crit Care Med* 2003;167:211-77.
2. Chapter 5. Clinical Exercise Testing. in : Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Casaburi R, Whipp BJ. Principles of Exercise Testing and Interpretation Including Pathophysiology and Clinical Applications. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, Inc.; 1999. p. 115-42.
3. Bradley P. A model for gas-exchange simulation. *J Cardiovasc Pulm Tech* 1983; 11:33-9.
4. Huszczuk A, Whipp BJ, Wasserman K. A respiratory gas exchange simulator for routine calibration in metabolic studies. *Eur Respir J* 1990;3:465-8.
5. Gore CJ, Catcheside PG, French SN, Bennett JM, Laforgia J. Automated O<sub>2</sub>max calibrator for open-circuit indirect calorimetry systems. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29:1095-103.
6. American Thoracic Society. Standardization of spirometry:1987 update. *Am Rev Respir Dis* 1987;136:1285-307.
7. Jones NL. Pulmonary gas exchange during exercise in patients with chronic airway obstruction. *Clin Sci* 1966;31:39-50.
8. Owens GR, Rogers RM, Pennock BE, Levin D. The diffusing capacity as a predictor of arterial oxygen desaturation during exercise in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *N Engl J Med* 1984;310: 1218-21.
9. American Association for Respiratory Care. AARC clinical practice guideline: exercise testing for evaluation of hypoxemia and/or desaturation. *Respir Care* 1992;37:907-12.
10. Zeballos RJ, Weisman IM. Reliability of noninvasive oximetry in black subjects during exercise and hypoxia. *Am Rev Respir Dis* 1991;144:1240-4.
11. Ries AL, Prewitt LM, Johnson JJ. Skin color

- and ear oximetry. *Chest* 1989;96:287-90
12. Hermansen L, Saltin B. Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. *J Appl Physiol* 1969;26:31-7.
  13. McArdle WD, Katch FI, Pechar GS. Comparison of continuous and discontinuous treadmill and bicycle tests for max  $\dot{V}O_2$ . *Med Sci Sports* 1973;5:156-60.
  14. McKay GA, Banister EW. A comparison of maximum oxygen uptake determination by bicycle ergometry at various pedaling frequencies and by treadmill running at various speeds. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1976;35:191-200.
  15. Koyal SN, Whipp BJ, Huntsman D, Bray GA, Wasserman K. Ventilatory responses to the metabolic acidosis of treadmill and cycle ergometry. *J Appl Physiol* 1976;40:864-7.
  16. Casaburi R, Barstow TJ, Robinson T, Wasserman K. Dynamic and steady-state ventilatory and gas exchange responses to arm exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1992;24:1365-74.
  17. Franklin BA, Vander L, Wrisley D, Rubenfire M. Aerobic requirements of arm ergometry: implications for exercise testing and training. *Physician Sportsmed* 1983;11:81-90.
  18. Sawka MN. Physiology of upper body exercise. *Exerc Sport Sci Rev* 1986;14:175-211.
  19. Martin TW, Zeballos RJ, Weisman IM. Gas exchange during maximal upper extremity exercise. *Chest* 1991;99:420-5.
  20. Mason RE, Likar I. A new system of multiple-lead exercise electrocardiography. *Am Heart J* 1966;71:196-205.
-