

운동부하 심폐기능 검사의 생리학적 이해

삼성서울병원 스포츠의학과

박 원 하

Cardiopulmonary Exercise Testing : Basis of the physiology

Won-Hah Park, M.D., PhD.

Department of Sports Medicine, Samsung Medical Center,
Sungkyunkwan University School of Medicine, Seoul, Korea

운동은 인체에 가해지는 가장 일반적인 생리학적 스트레스(physiologic stress)이다. 운동에 대한 생리학적 반응 중에서 영향을 가장 받는 곳이 심폐계통(cardiopulmonary systems)이다. 최대운동(maximal exercise)이라는 것은 건강한 사람에게 있어 수행능력의 한계점으로 정의하고 특정 질환이 있는 환자들의 경우에는 기능적 능력의 제한(limits)으로 정의한다. 그러므로 운동부하 심폐기능검사는 조절된 검사방법을 통하여 여러 가지 심폐계통의 질환을 가진 환자를 진단하고 평가할 수 있는 유용한 검사 방법이다. 최근에는 가스교환(gas exchanges)을 자동으로 분석할 수 있는 장비들이 소개되면서부터 임상에서 심폐기능을 간단하고 편리하게 평가할 수 있다. 그러나 운동부하 심폐기능검사의 결과를 정확하고 효과적으로 이해하고 해석하기 위해서는 운동에 대한 생리학적 기본 이해가 필수적이다.

신체적 작업이나 운동을 수행하기 위해서는 산소가 풍부한 혈액을 운동근(working muscle)으로 필요한 만큼 전달해야한다. 이를 위해서는 순환계, 호흡계, 내분비계, 신경계 등 신체의 대부분의 기관(all body systems)들이 항상성(homeostatic)을 유지하기 위해 동원된다.

일반적으로 운동시에는 안정시에 비해 대사율이 약 20배 이상 증가하고 심박출량은 6배 이상, 그리고 환기량은 약 16-30배정도 증가한다. 이러한 반응은 환자의 연령이나 성별, 체력 그리고 운동형태에 따라 달라지게 된다.

운동 시 가스 교환과 대사율의 증가는 주로 심혈관계와 호흡계의 상호작용에 의해 이루어진다. 이러한 개념은 그림1에 나타나 있다.

그림1에는 폐호흡 또는 외호흡(external respiration)으로부터 조직 및 내호흡(internal respiration)까지의 가스전달 기전을 그림으로 제시하였

Address for correspondence :

Won-Hah Park, M.D., PhD.

Department of Sports Medicine, Samsung Medical Center, Sungkyunkwan University School of Medicine, Seoul, Korea, 50, Ilwon-dong, Kangnam-gu, Seoul, 135-710

Phone : 02-3410-3840 Fax : 02-3410-0054 E-mail : whpark@samsung.co.kr

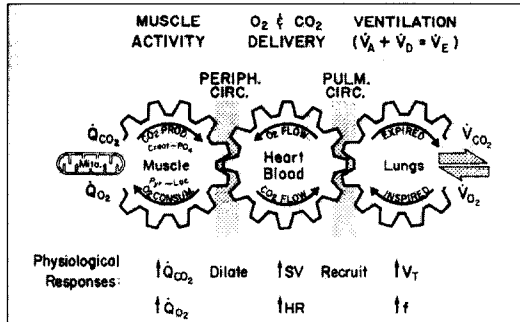


그림 1. 외부환경으로부터 운동근로의 산소전달 경로(Wasserman, 1999).

다. 운동을 하기 위해서는 혈액에서 산소를 추출하여 운동근으로 확산시켜야 한다. 운동근으로 산소를 운반하기 위해서는 심박출량이 증가하고 폐순환이 증가해야 하며 말초 혈관확장이 원활하게 이루어져야 한다. 이론적으로 산소섭취량(VO₂)은 근육에서의 산소이용률과 같기 때문에 산소섭취량은

미토콘드리아(mitochondria)의 산소요구량과 일치한다. 환기량(ventilation)은 이산화탄소(VCO₂)에 대한 반응으로 증가하게 된다.

대사 & 근육계

근육을 수축시키기 위해서는 에너지가 필요하고 이것은 미토콘드리아 내에서 ATP의 형태로 가장 먼저 사용된다. Phosphocreatine은 높은 에너지 형태인 Phosphate로 전환되지만 Phosphocreatine은 연료로서 한계가 있다. 따라서 지속적인 근육의 움직임을 유지하기 위해서는 ATP는 본질적으로 유산소적으로 이용된다. 운동을 하는 동안에 ATP에서 더 많은 산소를 요구하게 되고 이에 의한 반응으로 산소섭취량은 증가하게 되는 것이다. 짧은 시간 고강도의 운동시에는 ATP-PC시스템에 의해 주로 에너지를 공급받는다.

표 1. 근섬유의 형태와 특성

Characteristics	type I	type IIa	type IIb
Oxidation	slow	fast	fast glycolytic
Color	red	red	white
Myoglobin content	high	high	low
Triglyceride content	high	high	low
Glycogen content	no appreciable differences		
Glycolytic capacity	moderate	high	high
Oxidate potential(mitochondrial cont, oxidative enzyme potential, capillary density)	high	high	low
Fiber diameter	moderate	small	large
Contractile behavior(time to peak tension following activation, myosin ATPase rate)	slow	fast	fast

표 2. 기질 산화에 의한 칼로리 소비량과 RER값

substrate	RER	Kcal/g	Kcal/L O ₂	Kcal/L CO ₂	liters O ₂ /g	liters CO ₂ /g
carbohydrate	1.00	4.1	5.05	5.05	0.81	0.81
fat	0.71	9.3	4.74	6.67	1.96	1.39
protein	0.81	4.2	4.46	4.57	0.94	0.75

근 섬유는 크게 지근(slow twitch)과 속근(fast twitch)으로 나눌 수 있다. 속근은 산화능에 따라 다시 타입A와 타입B로 나뉜다. 지근 섬유는 근 수축 속도가 느리고 주로 유산소성 형태의 근 섬유이다. 즉, ATP를 합성하는 능력이 좋으며 미토콘드리아 수가 많고 크기가 크며 유산소성 대사과정에 관여하는 각종 효소활성도가 높다. 이에 반해, 속근 섬유는 지근 섬유에 비해 근 수축 속도가 빠르고 해당작용에 의해 ATP를 생성하여 공급한다. 근 섬유의 특성은 표1에 나타나 있다.

운동 중 에너지원인 ATP는 궁극적으로 음식을 통해 탄수화물이나 지방 그리고 단백질에 의해 공급된다. 운동 시 작용하는 영양소는 주로 탄수화물과 지방이다. 호흡교환율(Respiratory Exchange Ratio : R or RER)은 동일한 시간동안 산소섭취량에 대한 이산화탄소 배출량의 비율로서 나타낸다. 호흡교환율은 안정시나 항정상태에서 사용된 영양소의 비중을 표시한다. 탄수화물은 4Kcal/g의 에너지를 방출하고 RER이 1이다. 지방은 9Kcal/g의 에너지를 방출하고 RER이 0.7이다(표 2). RER이 0.7-1.0사이를 나타내면 탄수화물과 지방이 적절한 비율로 산화되었다는 것을 의미한다. 보편적으로 운동부하 심폐기능 검사 시에는 RER값이 1을 훨씬 넘게 된다. RER값은 연료로서의 이용률을 나타내지만 검사 중 최대능력 도달의 지표로서도 사용된다(1.15이상이면 최대검사라고 판정할 수 있음).

심혈관계

일시적 운동(acute exercise)에 대한 심혈관계 반응은 인체의 항상성을 유지하기 위해 다음과 같은 변화들이 나타난다. 1) 운동근으로 혈액이 적절하게 공급되어야 한다, 2) 근수축으로 생성된 열은 분산된다, 3) 뇌(brain)나 심장(heart)으로 적정량의 혈액이 공급되어야 한다. 운동시에는 신체 각 부분의 대사율의 변화에 따라 심박출량의 재분포가 달

라지게 된다.

안정시 심박출량은 4.5-5.5L/min정도 되지만 점차 운동량을 증가시키면 운동근으로 충분한 산소를 전달하기 위해 심박출량은 점차 증가하게 되는데 최대 운동시점에서는 약 20-30L/min정도까지 이른다. 점진적 운동시 심박출량의 증가는 주로 심박수의 증가에 의해 영향을 받는다. 일회 박출량은 안정시 보통 70-80ml/beat 정도 되며 점진적 운동 시 점차 증가하다가 최대산소섭취량의 50-60%정도까지 도달하면 항정상태에 이른다. 최대운동시 일회 박출량은 안정시에 비해 약 1.5배정도 증가한다.

보편적으로 운동을 시작하면 교감 신경계의 활성도가 증가하게 되고 이에 반해, 부교감 신경계의 활성도는 줄어들게 됨으로 심박수는 점차적으로 상승한다. 심박수는 운동부하와 더불어 산소섭취량과 함께 증가된다. 심박수는 연령(매 10년마다 최대심박수가 5-7박정도 낮아짐), 건강상태, 약물(특히, 베타차단제), 자세, 운동형태, 환경 그리고 자율신경계와 호르몬의 영향을 받는다. 점진적 운동 중의 심박수 반응은 심장질환의 진단이나 예후 평가, 그리고 운동처방에 중요한 정보를 준다. 운동부하 검사의 중단기준은 최대 예측심박수(220-나이)의 85%정도의 수준으로 설정하지만 심박수 반응은 개인간의 차이가 있기 때문에 절대적으로 운동부하 검사의 중단기준으로서 적용하지는 못한다. 운동 중 심박수가 충분히 증가하지 않을 때(chronotropic incompetence)나 심박수가 너무 빠르게 증가할 때 심장질환과 관련되어 있을 가능성이 높으며 심장 질환자들의 경우에는 예후에 좋지 못한 영향을 준다. 운동과 더불어 동맥혈압은 증가하게 된다. 점진적 운동시 일반적으로 수축기 혈압은 점차 증가하게 되지만 확장기 혈압은 변화가 없거나 약간 감소하는 경향을 보인다. 최대 수축기 혈압은 연령, 운동강도, 좌심실기능, 약물 그리고 환경에 영향을 받는다.

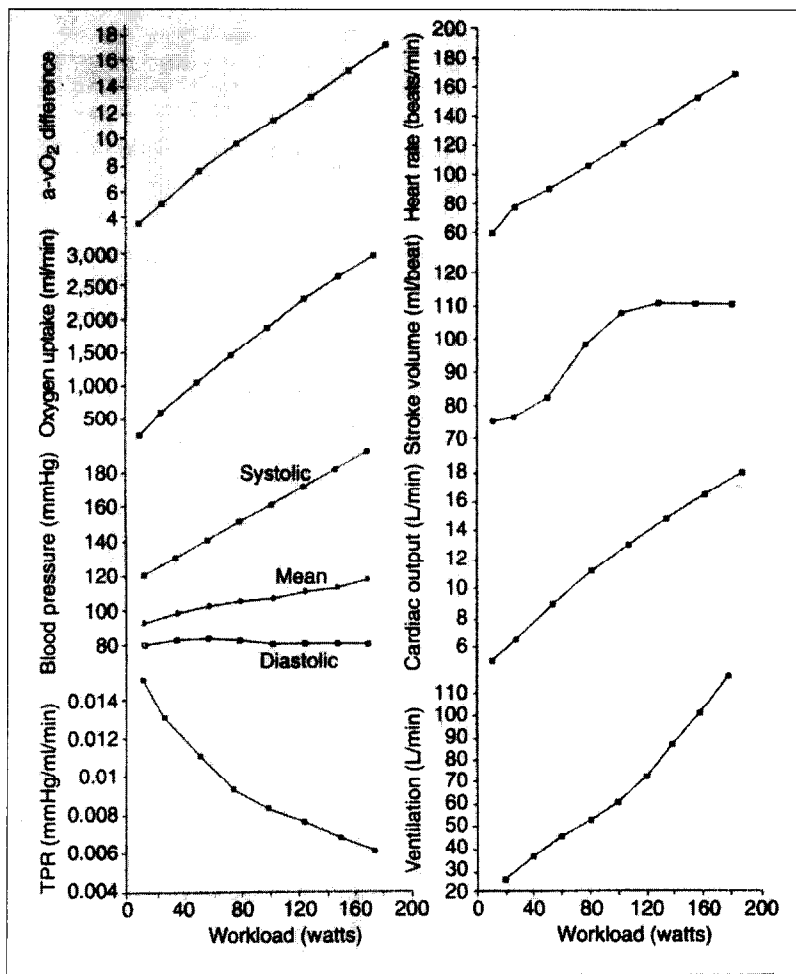


그림 2. 운동에 의한 혈액동력학적변화.

동정맥 산소차는 동맥과 정맥의 산소함량의 차이를 의미한다. 이러한 차이는 말초조직에서 산소를 얼마나 추출하였나에 따라 달라진다. 안정시 동정맥 산소차는 혈액 100ml 당 산소함량이 4-5ml 정도되지만 최대 운동시에는 15-17ml정도까지 증가된다. 동정맥 산소차는 헤모글로빈 농도, 폐 확산능력, 폐포의 산소분압 그리고 산소추출력에 의해 영향을 받는다.

점진적 운동 중 다른 중요한 요인은 총 말초저항이 감소하는 것이다. 운동하지 않은 신체의 부분이

나 내장기관(신장, 간, 위장 등)은 혈관이 수축되어 혈류가 감소하는 반면 운동근에서는 대사적 신경학적인 변화에 의해 혈관확장이 일어서 혈액이 증가하게 된다. 즉, 혈류 재분포가 일어나는 것이다 (그림 2).

심장의 산소이용율을 의미하는 것이 심근산소소비량(MVO₂)이다. 운동 시 후부하(afterload), 심장 수축력 (contractility) 그리고 심박수가 증가하기 때문에 심근산소소비량은 안정시에 비해 약 4-5배 정도 증가된다. 심근산소소비량은 심박수, 심실벽

장력(ventricular wall tension), 그리고 수축력이 영향을 주기 때문에 정확하게 평가하기 위해서는 심장카테터를 삽입해야 하는데 이렇게 하기가 쉽지 않다. 따라서 임상에서는 간접적인 지표인 수축기 혈압×심박수로 산출하여 적용한다.

호흡계

운동을 수행하기 위해서는 많은 양은 공기(air)가 폐(lungs)로 들어가야 한다. 폐로 공기가 들어가거나 나오는 양을 분 단위(liters/min)로 표시하며 이것을 분당 환기량(VE)이라 한다. 최근 과학기술의 발달로 인해 분당 환기량을 자동화 된 기계로 쉽게 측정할 수 있다.

최대 분당 환기량은(VE_{max})은 심폐기능의 중요한 요소이다. 골격근으로 산소를 보내기 위해 심장에서 나온 혈액은 폐로 들어가며 환기량은 폐에서 심박출량과 일치되어야 효과적인 가스교환이 이루어진다. 임상적으로 특별한 질환이 없는데도 불구하고 환기효율이 떨어지면 운동에 대한 비정상적인 반응이 나타난다. 건강하고 체력이 단련된 사람의 경우 분당 환기량은 안정시에는 약 8-12L/min에서 최대 운동시에는 150L/min이상까지 증가된다. 분당 환기량의 증가는 1회 호흡량(tidal volume)과 분당 호흡수(respiratory rate)에 의해 결정된다. 최대운동시 분당호흡수의 증가에 의해 주로 분당 환기량은 상승된다. 운동 중 폐혈류가 증가되는 것은 폐혈관의 저항이 안정시에 비해 거의 2배정도 낮아지고 폐 동맥압이 약간 상승하기 때문이다. 증가된 폐혈류의 일부는 폐 내의 관류가 적게되는 곳으로 이동하게 되어 환기와 관류는 동일하게 일치되어 환기적 사각(ventilatory dead space)은 약간 감소한다.

운동에 대한 호흡계의 가장 중요한 적응은 폐 내에서의 가스교환이다. 폐와 조직, 그리고 혈액내에서 산소와 이산화탄소의 교환은 확산에 의해 이

루어진다. 조직을 통한 확산정도는 조직 표면의 크기와 비례하며 동정맥 혈관의 가스분압의 차에 의해 이루어 달라진다. 정상적인 폐내에서의 가스교환은 빠르게 이루어진다. 폐포와 혈액간의 가스교환이 이루어지는데는 1초도 걸리지 않는다. 운동과 관련된 환기능력은 얼마나 빨리 이산화탄소를 폐나 혈액내에서 제거하느냐에 달려있다.

일반적으로 산소의 전달과 이용에 대한 신체의 능력을 측정하는 것이 최대산소섭취량(VO_{2max})이다. 신체의 산소전달 능력을 측정하는 검사중에서 최대산소섭취량 보다 정확하고 반복 재현성이 높은 검사는 없다. 최대산소섭취량은 전통적으로 생리학 분야에서 심폐기능을 평가하는데 있어 핵심적인 지표로서 받아들여지고 있다. 최대산소섭취량은 Fick원리에 의해 표시된다. 최대산소섭취량=최대심박출량×최대동정맥 산소차

Fick원리에서 보는 바와 같이, 심폐기능에 영향을 주는 요소는 심장의 펌프 능력인 심박출량과 같은 중추요인들(central factors)과 혈액을 말초조직으로 전달하고 말초에서 산소를 효율적으로 얻을 수 있는 능력을 대변하는 동정맥 산소차와 같은 말초요인들(peripheral factors)로 구성되어 있다. 그림3은 심박출량과 동정맥 산소차에 영향을 주는 요인들을 제시하였다.

심장이나 호흡기 질환과 같은 심폐계의 질환이 있을 경우 이러한 요인들 중 하나 또는 그 이상 비정상적인 상태에 있는 경우가 많다. 산소섭취량은 운동부하를 증가시키면 점차 증가하게 된다. 전통적으로 운동부하가 증가됨에도 불구하고 산소섭취량이 더 이상 증가되지 않을 때(항정상태)를 최대산소섭취량이라 정의하지만 임상에서는 환자들의 경우 이러한 항정상태까지 도달하기가 어렵다. 따라서 이러한 경우에는 최고산소섭취량(VO_{2peak})이라고 표현한다. 최대산소섭취량은 젊은사람의 경우 4-5L/min까지 도달될 수 있으며 이것은 안정시 보다 약 15-20배 정도 까지 증가된다. 최대산소섭취량은 일반적으로

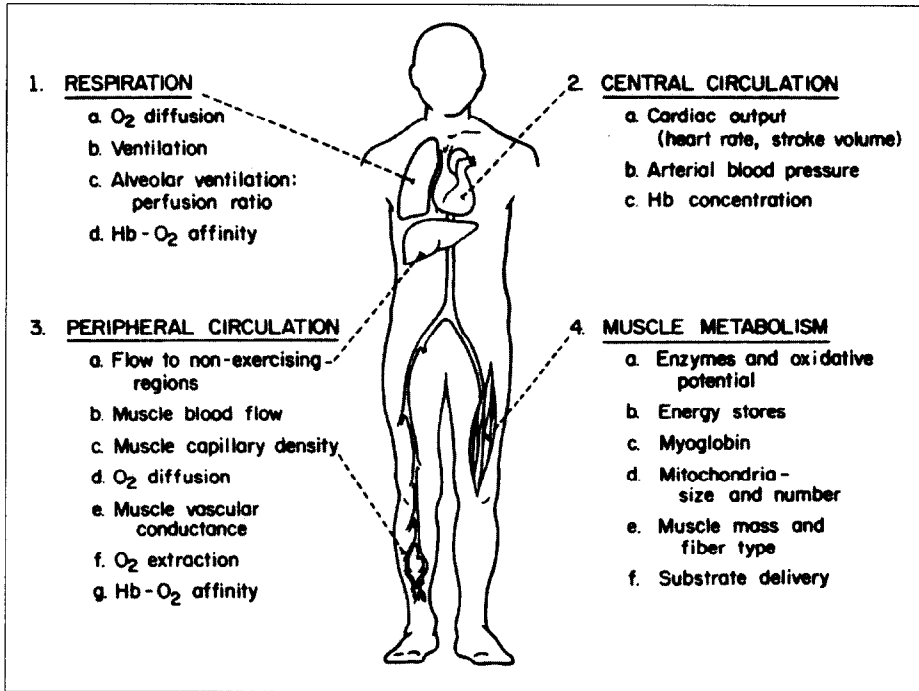


그림 3. 최대산소섭취량을 결정짓는 요소인 중추와 말초요인들.

상대적인 표시인 $ml/kg/min$ 으로 표현하며 건강한 정상인의 경우 $25-50ml/kg/min$ 정도 된다.

산소섭취량을 METs(metabolic equivalents)로 표현하는 경우가 많은데 1METs는 안정시 산소섭취량 $3.5ml/kg/min$ 을 의미한다. 예를 들어, 운동부하 검사에서 10METs가 나왔다면 산소섭취량이 $35ml/kg/min$ 이라는 뜻이다. 또한 운동부하검사 프로토콜에는 보통 METs가 표시되어 있어 한 단계 당 운동강도가 어느 정도 되는지 보여준다.

O_2 Pulse는 심박수를 산소섭취로 나눈 것과 같다. O_2 Pulse는 한번의 심박수당 산소 수송능력을 반영한다. 따라서 O_2 Pulse는 일회박출량의 간접적인 지표로서 자주 사용되지만 논란의 여지가 있다. 신장, 체중, 나이, 그리고 성별을 기초로 예측 가능하고 그 값이 80%보다 적으면 비정상적으로 판정한다.

무산소성 역치(anaerobic threshold ; AT)는 운

동시 조직에서 소비되는 산소(Vo_2)가 유산소에너지 대사과정에서 무산소에너지 대사과정으로 변화되는 시점을 의미한다. 운동강도가 최대능력의 50-70%이상을 넘어서면 산화과정에 필요한 산소 운반이 충분하지 못하게 된다. 이렇게 되면 혈중에는 젖산(lactate) 축적이 급격히 증가한다. 임상에서는 혈액을 직접 채취하여 무산소성 역치를 판정하기 어렵기 때문에 가스분석을 통해 대부분 평가한다. 이를 환기역치(ventilatory threshold ; VT)라고 한다. 즉, 운동강도가 점차 증가하기 시작하면 환기량은 산소섭취량과 비례하여 증가하다가 어느 시점에 이르면 급격하게 증가한다.

점진적 운동부하 시 환기역치는 일반인들의 경우 대체로 최대산소섭취량의 50-70% 범위내에서 나타난다. 높은 강도의 운동에서 환기역치에 도달하면 산소섭취량의 증가 비율은 천천히 줄어들고 이산화탄소 배출의 비율은 급격히 증가한다. 따라서 환기

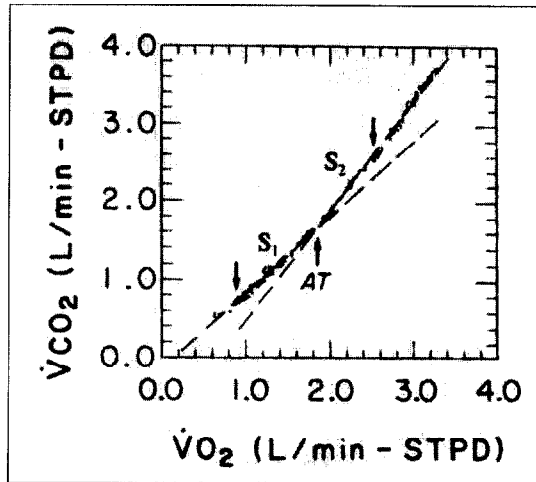


그림 4. V-slope 방법에 의한 환기역치.

역치를 평가하는 데는 이산화탄소 배출량 대 산소섭취량의 비율을 사용한다. 이것을 V-slope 방법이라고 하고 임상에서 많이 사용되는 평가 방법이다(그림 4). 그러나 환기역치를 결정하는 V-Slope 방식은 오늘날에 광범위하게 사용되고 있지만 어떤 질환이 있는 경우에서 일반적으로 적용시키는데는 논쟁의

여지가 있다. 또 다른 방법으로는 많이 사용되고 있는 것은 VE/VO_2 와 VE/VCO_2 를 이용하거나 RER을 이용하여 평가하기도 한다.

참 고 문 헌

1. Wasserman. K, Hansen. JE, Sue. Dy, Casaburi. RC, Whipp. BJ. Principles of exercise testing and interpretation(3 ed). Lippincott W & W.1999 page 10-56.
2. Myers.JN. Essentials of Cardiopulmonary Exercise Testing. Human Kinetics. 1996.
3. American Thoracic Society/A College of Chest Physicians. ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing. Am J Respir Crit Care Med; 167 211-277, 2003
4. Leff, AR. Cardiopulmonary Exercise Testing. Crune & Stratton, 1986
5. McArdle WD, Katch FI, Katch. Exercise physiology(4 ed). Williams & Wilkins. 1996