

호흡기질환에서의 간접칼로리 측정과 응용

영남의대 내과학교실 호흡기-알레르기내과

이 관 호

Indirect Calorimetry in Pulmonary Diseases

Kwan-Ho Lee, M.D.

Department of Internal Medicine, Division of Pulmonology and Allergy
College of Medicine, Yeungnam University, Daegu, Korea

서 론

간접 칼로리측정법(indirect calorimetry)은 생체내에서 산소 소모량($\dot{V}O_2$)과 이산화탄소 생성량($\dot{V}CO_2$)을 측정하여 안정시에너지소모량(resting energy expenditure)을 측정하는 검사법이다. 간접 칼로리측정법은 안정시에너지소모량 외에도 호흡상수(respiratory quotient: RQ)를 측정하여 탄수화물, 지방, 단백질의 이용률을 측정할 수도 있다^{1,2}.

우리 신체의 에너지소모는 크게 3가지 방향으로 일어난다. 첫째는 안정시에너지소모량으로 총에너지소모량의 약 60-80%를 차지하며 일반적으로 안정시에너지소모량이 10-20%정도 증가하면 체중이 감소된다. 둘째는 음식을 섭취하여 소화시킬 때 일어나는 에너지소모로 이는 총에너지소모량의 10-15%를 차지한다. 셋째는 일상생활 활동 시 일어나는 에너지소모로 총에너지소모량의 20-30%를

차지한다. 안정시에너지소모량이 총에너지소모량의 대부분을 차지하고 음식물 소화나 일상생활 활동을 제한하였을 때 안정시에너지소모량이 총에너지소모량을 반영할 수 있어서 총에너지소모량을 측정하는 데 안정시에너지소모량이 가장 널리 이용되고 있다³.

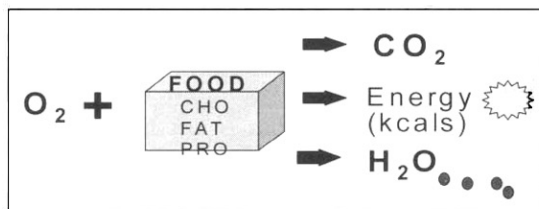


Fig. 1. Food sources(carbohydrate, fat and protein) are broken down(metabolized) to produce energy(heat, kcal). The oxygen consumed and the CO_2 produced are measured to provide an indirect assessment of energy expenditure.

Address for correspondence :

Kwan Ho Lee, M.D.

Department of Internal Medicine, Yeungnam University Hospital

317-1, Daemyung Dong, Namgu, Daegu, 705-035

Phone : 053-620-3838 Fax : 053-654-8386 E-mail : ghlee@med.yu.ac.kr

Table 1. Comparison of O₂ consumption, CO₂ production, respiratory quotient (RQ), and heat generated during the oxidation of the three main biological fuels

Substrate	O ₂ consumed during oxidation L/g	CO ₂ produced during oxidation L/g	RQ	Heat produced/g oxidized, kcal	Heat produced/L O ₂ consumed kcal
Glucose	0.746	0.746	1.00	3.74	5.02
Lipid	2.029	1.430	0.69	9.50	4.66
Protein	0.966	0.782	0.81	4.10	4.17

안정시에너지소모량을 측정하는 방법은 그동안 190여 가지 이상 개발되었으나 간접 칼로리측정법은 비관혈적으로 측정할 수 있을 뿐만 아니라 연료대사에 관한 많은 정보를 제공할 수 있어서 운동의 열역학, 영양소의 발산연구, 대사질환 연구, 영양이 필요한 환자에 대한 영양처방 등에 많이 이용되고 있다^{3,4}. 간접 칼로리측정법이 알려진 것은 오래되지 않으며 최근에 급성질환이나 만성소모성질환에서 영양 투여 시에 처방할 에너지요구량 측정에 이용되고 있다⁵⁻⁷.

여기서는 간접 칼로리측정법의 이론적 원리, 측정방법, 임상적용, 판독 및 판독시 주의점 등에 대해서 알아보고자 한다.

이론적 원리

간접 칼로리측정법은 산소소모량과 이산화탄소 생성량을 측정하여 안정시에너지소모량을 측정하고 호흡상수를 측정하여 3대 영양소 가운데 어떤 영양소의 대사가 주로 일어나는지를 측정한다(그림 1).

탄수화물, 지방, 단백질이 각각 1 몰이 산화되었을 때 소모되는 산소량, 생성되는 이산화탄소량, 호흡상수, 에너지량은 표 1과 같다.

이들 영양소들이 완전히 산화되어 소모된 산소량과 생성된 이산화탄소 및 뇨 질소량에서 서로 대입하여 구한 에너지소모량은 표 2와 같다.

이 중 뇨 질소량은 에너지소모량에 미치는 영향

Table 2. Equations to derive energy expenditure starting from $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, and urinary nitrogen (N)

N	Equations
1	$\dot{V}O_2 = 0.746G_{ox} + 2.029L_{ox} + 0.966P_{ox}$
2	$\dot{V}CO_2 = 0.746G_{ox} + 1.430L_{ox} + 0.782P_{ox}$
3	$N = 0.160P_{ox}$
4	$G_{ox} = 4.55\dot{V}CO_2 - 3.21\dot{V}O_2 - 2.87N$
5	$L_{ox} = 1.67\dot{V}O_2 - 1.67\dot{V}CO_2 - 1.92N$
6	$P_{ox} = 6.25N$
7	$EE = 3.74G_{ox} + 9.50L_{ox} - 4.10P_{ox}$
8	$EE = 3.91\dot{V}O_2 + 1.10\dot{V}CO_2 - 3.34N$

G_{ox} , glucose oxidation; L_{ox} , lipid oxidation; P_{ox} , protein oxidation; EE, energy expenditure.

이 1-2%밖에 되지 않기 때문에 무시할 수 있다. 실제로 중환에서도 뇨 질소량이 에너지소모량에 미치는 영향은 항상 4%이하인 것으로 알려져 있다⁸. 임상에서도 뇨 질소량을 측정하는 것은 모으기가 부정확할 수 있고 불편하기 때문에 뇨 질소량 측정은 무시하고 있다.

간접 칼로리측정법은 안정시에너지소모량을 측정하는 것 외에 호흡상수를 이용하여 산화되는 3대 영양소의 정도를 파악할 수 있다. 호흡상수는 산소소모량에 대한 이산화탄소생성량으로 표시되며 탄수화물이 산화될 때는 값이 1, 지방이 산화될 때는 0.7, 단백질이 산화될 때는 0.8이다. 각 물질이 산화될 때의 호흡상수는 표 3과 같다.

체중증가가 필요할 때는 호흡상수가 중요한 영양

Table 3. Interpreting respiratory quotient (RQ)

$RQ = \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$	
1 ethanol + 6O ₂ → 4CO ₂ + H ₂ O	
1 palmitate + 23O ₂ → 16CO ₂ + 16H ₂ O	
1 amino acid + 5.1O ₂ →	4.1CO ₂ + 2.8H ₂ O + 0.7urea
1 glucose + 6O ₂ → 6CO ₂ + 6H ₂ O	
13.5 glucose + 3O ₂ →	C ₅₅ H ₁₀₄ O ₆ + 26CO ₂ + 29H ₂ O
Substrate utilization	RQ
Ethanol	0.67
Fat oxidation	0.71
Protein oxidation	0.82
Mixed substrate oxidation	0.85
Carbohydrate oxidation	1.0
Lipogenesis	1.0-1.2

Table 4. Harris-Benedict Equations

Males: $13.7 \times Wt + 5.0 \times Ht + 66 - 6.8 \times Age$ (kcal)
Females: $9.6 \times Wt + 1.7 \times Ht + 655 - 4.78 \times Age$ (kcal)
Wt: weight(kg), Ht: height(m), Age: years

치료의 임상적 가이드로 이용되며 일반적으로 호흡상수가 1보다 크면 총에너지섭취량을 줄이고, 0.8이상이면 섭취량을 늘린다⁹.

안정시에너지소모량 측정법의 종류

1. Harris-Benedict Equation

안정시에너지소모량을 측정하는 방법은 여러 가지가 있으나 과거부터 널리 사용된 방법은 환자의 몸무게, 나이, 키를 이용하여 계산한 Harris-Benedict 공식이다. 이 방법은 구하기가 매우 간단하며 현재까지도 예측치로 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 환자의 몸무게, 나이, 키만 고려한 값이기 때문에 환자 개개인의 스트레스, 투여약제, 질환 등을 고려하지 않는 수치여서 정확성이 떨어지는 단점이 있다. Harris-Benedict Equation은 표 4

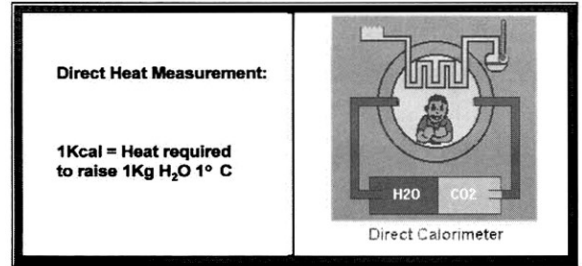


Fig. 2. Direct calorimetry.

와 같다.

2. 직접 칼로리측정법(Direct calorimetry)

직접 칼로리측정법은 물로 채워진 통 안에서 24시간 동안 안정상태에서 체온의 변화에 따른 물의 온도를 측정하여 1kg의 물을 섭씨 1도로 올리는 것을 1kcal로 계산하여 구한다. 이 방법은 정확하게는 에너지소모량이라기 보다는 에너지생성량이라 할 수 있으나 보통 이 두 가지 수치가 비슷하기 때문에 같은 의미로 사용된다. 단점은 시간이 오래 걸리고, 검사하기가 불편한 점 등이어서 실제 임상에서 사용하기에는 적절하지 않고 정확한 에너지대사의 연구에 주로 사용되고 있다.

3. 간접 칼로리측정법

간접 칼로리측정법은 세포단위에서 에너지 대사 시 산소를 이용하여 탄수화물, 지방, 단백질과 같은 에너지원이 소모될 때 발생하는 이산화탄소를 측정하여 발생하는 에너지량을 간접적으로 측정하는 방법이다. Harris-Benedict 공식으로 구한 에너지소모량은 질환, 약제, 개인적인 차이 등이 고려되지 않은 값이나 간접 칼로리측정법은 이와 같은 에너지대사에 영향을 미칠 수 있는 요소를 고려한 검사여서 더 정확한 검사라 할 수 있겠다. 검사하기가 비교적 쉽고, 수치가 직접 칼로리측정법과 차

Table 5. Indirect calorimetry equations

Complete Weir Formula

$$REE = [3.9(\dot{V} O_2) + 1.1(\dot{V} CO_2)]1.44 - 2.17(UN)$$

Abbreviated Weir Formula

$$REE = [3.9(\dot{V} O_2) + 1.1(\dot{V} CO_2)] 1.44$$

Where $\dot{V} O_2$ = Oxygen consumption (mL/min)

$\dot{V} CO_2$ = Carbon dioxide production

UN = Urinary nitrogen (g/d)

REE = Resting energy expenditure (kcal/d)

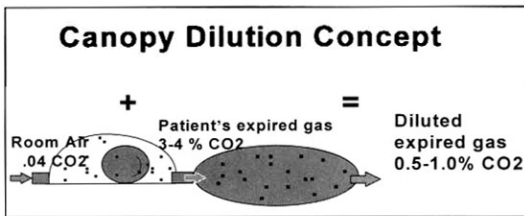


Fig. 3. Canopy dilution concept.

이가 거의 없는 등의 장점이 있어서 임상에서 사용하기에 적합하여 널리 사용되고 있다.

안정시에너지소모량은 간접 칼로리측정법으로 측정한 산소소모량($\dot{V} O_2$)과 이산화탄소생성량($\dot{V} CO_2$)을 이용한 Weir 공식¹⁰으로 구하며 Weir공식은 표 5와 같다.

간접 칼로리측정기의 종류와 기구

간접 칼로리를 측정하는 방법은 open-circuit system, closed-circuit system, mixed system의 3가지가 있다. 이 중 가장 흔하게 사용되는 방법은 open-circuit system이다. Open-circuit system에서는 흡입가스를 모으는 통이 필요한데 breath-by-breath 방법, mixing chamber 방법, dilution system이 있으며 dilution 방법은 캐네피(canopy)를 이용하며 정상적인 호흡을 하는 환자에서 측정하기에 가장 좋은 방법이다. Dilution 방법의 원리는 그림 3에서와 같이 캐네피 바깥의 대기의 이산

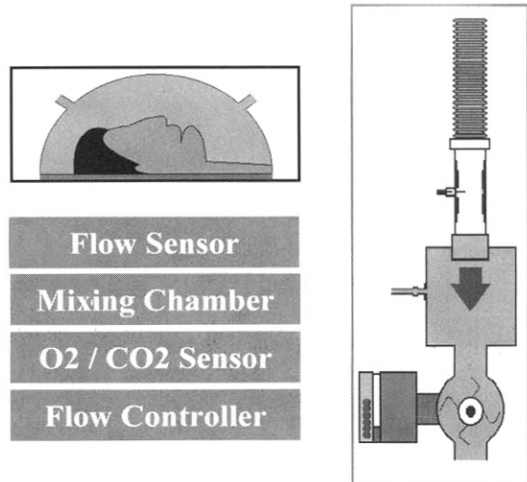


Fig. 4. Dilution pump systems.

화탄소 분압은 0.04%이며 캐네피 내의 환자의 호기말의 이산화탄소 분압은 3-4%로 이 두 분압을 일정하게 유지하여야 하는 데 그 희석압은 항상 0.5-1% 사이를 유지하여야 정확한 값을 측정할 수 있다.

이외에 간접 칼로리측정 시 갖추어야 할 것은 외부 공기와 밀폐할 수 있는 캐네피, 캐네피와 dilution system을 연결할 호스, 산소와 이산화탄소 분석기, 표준가스를 보정할 수 있는 방법, 분석할 컴퓨터 등이다(그림 4).

측정 방법

환자는 적어도 10시간 이상 금식하여야 하기 때문에 저녁 10시경부터 금식시키고 아침에 일어나서는 활동을 최소한으로 줄이면서 카트로 환자를 검사실로 이동시킨다. 검사할 침대 위에서 똑바로 눕거나 옆으로 누운 상태에서 약 30분 동안 안정을 취한 후에 검사를 실시한다. 검사실은 조용하고 온도도 적당하며 주변에 사람들이 없는 방에서 실시하여 스트레스로 인한 오차를 줄이도록 한다. 영양제 투여는 중지하며 투여해야 할 경우에는 영양제

의 종류와 투여속도 등을 기록해 둔다. 산소소모량은 흡입 산소농도에 영향을 받기 때문에 모든 산소 투여는 중지를 하고 검사를 실시하는 것이 좋다. 캐너피를 환자의 머리에 씌우고 공기가 새어나가지 않도록 캐너피의 덮개를 잘 씌운다. 연결호스의 한쪽 끝은 캐너피에 연결하고 다른 한쪽 끝은 희석펌프에 연결한다. 환자는 자지말고 깨어 있도록 해야 하며 과호흡을 하지말고 정상적인 호흡을 자연스럽게 하게 한다. 검사는 안정상태에 도달할 때까지 실시하며 보통 15분 내지 20분 이내에 안정상태에 도달한다^{8,9}. 안정상태의 정의는 5분 동안 산소소모량과 이산화탄소생성량의 값이 10%범위 이내에 있고 호흡상수값의 변화가 5%이내에 있는 호흡의 평형상태가 유지될 때이다. 검사를 실시한지 15분 내지 20분 이내에 평형상태를 유지하지 못하면 30분 이상 검사하여 비정상적으로 높거나 낮은 수치를 제외하고 나머지 값의 평균으로 구하거나 검사를 처음부터 다시 시작하여 값을 구한다. 검사를 실시하면서 산소소모량, 이산화탄소생성량, 호흡상수, 분당 환기량을 계속 관찰하고 검사를 마친 후에는 연결호스를 떼고 자료를 분석한다.

임상 응용

간접칼로리측정법은 에너지대사 장애를 일으킬 수 있는 모든 질환의 대사연구, 진단, 치료 및 치료에 대한 반응에 이용된다^{1,3,6}. 특히 영양치료가 필요한 만성폐쇄성폐질환¹¹, 암^{12,13}, 간경변증 환자에서⁶ 영양처방과 치료에 대한 반응을 파악하는데 효과적으로 이용될 수 있다. 이외에도 인공호흡기 치료를 받고 있는 중환자에서 영양부족 시 호흡근육의 힘의 약화로 인공호흡기 이탈이 어렵기 때문에 환자의 영양상태를 정확하게 파악하여 적절한 영양치료를 하는 데 사용될 수도 있다^{5,8}.

판독 및 주의점

판독은 산소소모량과 이산화탄소생성량을 컴퓨터가 자동적으로 계산하여 안정시에너지소모량의 측정치를 구한다. 예측치는 Harris-Benedict 공식으로 구하며 안정시에너지소모량은 예측치에 대한 측정치의 비율로 구한다. 이 비율이 90% 이하를 대사저하(hypometabolic), 91%부터 110% 사이를 정상 대사, 110% 이상을 대사항진(hypermetabolic)으로 정의한다.

간접 칼로리측정법은 직접적으로 에너지소모량을 측정하는 방법이 아니기 때문에 결과를 해석할 때는 다음과 같은 것을 고려하여야 한다. 첫째는 산소를 사용중인 환자에서는 산소소모량이 흡입 산소량에 영향을 받기 때문에 정확한 값을 구하기가 어렵다. FiO₂가 60% 이상에서는 정확한 값을 얻을 수 없다. 둘째는 이산화탄소생성량은 호흡형태에 따라 변할 수 있기 때문에 반드시 적어도 15-20분 동안 측정을 계속하여야 한다.

결론

간접 칼로리측정법은 운동부하심폐기능 검사 시 측정되는 산소소모량과 이산화탄소생성량으로 비교적 간편하고, 정확하게, 반복적으로 검사할 수 있는 안정시에너지소모량 측정법이다. 측정한 안정시에너지소모량에 따라 영양치료가 필요한 환자에게 정확한 영양처방을 함으로써 과도한 혹은 부족한 영양공급으로 인한 부작용을 줄일 수 있다. 호흡기질환에서 간접 칼로리측정법은 에너지소모가 많은 중환자의 영양치료 혹은 만성폐쇄성폐질환의 재활치료를 위한 영양처방, 폐암환자나 영양부족 상태가 심한 폐결핵 환자의 영양치료 등에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Livesey G, Elia M. Estimation of energy expenditure, net carbohydrate utilization, and net fat oxidation and synthesis by indirect calorimetry: evaluation of errors with special reference to the detailed composition of fuels. *Am J Clin Nutr* 1988;47:608-28.
2. Ferrannini E. The theoretical bases of indirect calorimetry: a review. *Metabolism* 1988;37(3):287-301.
3. Gasic S, Schneider B, Waldhausl W. Indirect calorimetry: variability of consecutive baseline determinations of carbohydrate and fat utilization from gas exchange measurements. *Horm Metab* 1997;29:12-5.
4. Simonson DC, DeFronzo RA. Indirect calorimetry: methodological and interpretative problems. *Am J Physiol* 1990;258:E399-412.
5. Brandi LS, Bertolini R, Calafa M. Indirect calorimetry in critically ill patients: clinical applications and practical advice. *Nutrition* 1996;13:349-58.
6. Battezzati A, Vigano R. Indirect calorimetry and nutritional problems in clinical practice. *Acta Diabetol* 2001;38:1-5.
7. Schwenk A, Merilainen PT, Macallan DC. Indirect calorimetry in patients with active respiratory infection-prevention of cross-infection. *Clinical Nutrition* 2002;21(5):385-8.
8. Bursztein S, Saphar P, Singer P, Elwyn D. A mathematical analysis of indirect calorimetry measurements in acutely ill patients. *Am J Clin Nutr* 1989;50:227-30.
9. Mataresa LE. Indirect calorimetry: Technical aspects. *J Am Diet Assoc* 1997;97(suppl 2):S154-60.
10. Weir JB. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 1949;109:1-9.
11. 문영철, 박혜정, 신경철, 정진홍, 이관호. 만성 폐쇄성폐질환에서 체지방량이 최대운동 능력에 미치는 영향. *결핵 및 호흡기 질환* 2002;52(4):346-54.
12. 신경철, 정진홍, 이관호. 국소진행성 폐암환자에 대한 전신항암화학요법이 운동부하 심-폐 기능에 미치는 영향: 초기변화를 중심으로. *결핵 및 호흡기 질환* 2002;53(4):369-78.
13. 이재련, 김기범, 이학준, 정진홍, 이관호, 이현우. 폐암환자의 안정시 에너지소비. *결핵 및 호흡기 질환* 1997;44(5):1019-29.