

중환자 간호를 위한 생리학적 기초—호흡기가스의 확산과 이동

(The Physiologic Basis of Critical Care Nursing —Diffusion and Transportation of Respiratory Gases)

김 일 원

(경희대학교 부속병원 내과 중환자실 수간호원)

1. 기체법칙(Gas Law)

기체의 용적과 온도와 압력사이에는 일정한 상관관계가 있다. 만일 기체의 압력, 용적, 온도중 한가지가 변화하고 다른 한가지가 일정한 상태이면 우리는 나머지 하나의 변화를 예견할 수 있다.

1) Boyle의 법칙

$$T(\text{온도}) = P(\text{압력}) \times V(\text{용적})$$

온도가 일정하면 압력은 용적에 반비례한다.

2) Charles의 법칙

$$P = T/V$$

압력이 일정하면 온도와 용적은 비례한다.

3) 분압의 법칙

한가지 기체 혼합체의 압력은 그 기체 혼합체를 구상하고있는 각각 기체의 압력을 모두 합한 것과 같다. 그러므로 각 기체는 전 기체에서 각각 자기가 차지하고있는 비율 만큼의 압력을 지니며 이를 그 기체의 분압이라 한다. 예를들면 공기는 질소, 수증기, 산소, 이산화탄소로 이루어진 기체혼합체인데 760mmHg의 압력을 가진다. 산소의 분압을 계산하면 산소가 대기에서 차지하는 비율이 21%이므로 분압은 약 158mmHg이다.

4) Henry의 법칙

온도가 일정할때 일정량의 용매에 용해되는 기

체량은 그 기체의 분압과 어떤 특정용매에 대한 특정기체의 용해성에 달려있다. 용매에 용해된 기체가 액체내의 어떤 성분과 화학반응을 일으키지 아니하고 남아 있으면 액체내에서 압력을 지닌다. 동맥혈액기체분석(Arterial Blood Gas Analysis)을 실시했을 때 측정되어지는 산소와 이산화탄소의 분압은 바로 이러한 압력이다. 이 분석의 결과는 PaO_2 또는 $PaCO_2$ 로 쓰여진다.

2. 확 산

호흡의 첫번째 단계는 환기이며 폐로 공기를 들이 마시고 내쉬는 과정이다. 폐내로 흡입된 기체가 폐포에 도달했을때 호흡의 다음 단계인 확산이 일어난다.

확산은 산소(O_2)와 이산화탄소(CO_2)가 압력차에 따라 폐포의 모세혈관을 통해 이동하는 과정이며 이러한 확산을 가능하게 해주는 것은 압력차의 작용인데 어떤 기체의 혈액에 대한 용해도가 확산에 요구되는 압력차의 정도와 확산속도를 결정한다.

CO_2 는 O_2 보다 용이하게 용해되고 확산된다. 그러므로 폐부종같이 폐포막이 두꺼워진 상태에서는 CO_2 는 여전히 체외로 배출되어 정상 PCO_2 를 유지하나 O_2 는 그 막을 통과하기 어려우므로 PO_2 는 떨어진다.

1) 분압(Partial Pressure, P.)

■ 지면보수교육

기체 혼합체에서 각각 기체가 가지는 압력은 그 혼합체에서 그 기체가 점유하는 비율에 비례한다.

해면을 기준으로 할때 흡입된 공기의 압력은 760mmHg이다.

각각의 기체가 지니는 분압을 계산해 보면 대기중에서

- N₂ 약 80% 760mmHg×약 0.8=596mmHg
- O₂ 약 21% 760mmHg×약 0.2=158mmHg
- CO₂ 극소량 =0.3mmHg
- 수증기압 약 5.7mmHg

총 760mmHg

그러나 일단 공기가 흡입되면 상부기도에 의해 더워지고 습화되므로 수증기압은 47mmHg가 된다(정상체온에서). 그런데 총기압은 760mmHg이므로 다른 기체가 점유하는 분압이 감소된다. 또한 흡입된 공기가 폐포에 도달하기 전에 기도 내에 남아있던 공기와 혼합된다. 기도내에 잔류하던 공기는 P_AO₂(폐포내 산소분압)는 낮고 P_ACO₂(폐포내 이산화탄소분압)는 높으므로 다시 한번 분압은 아래와 같이 된다.

- P_AO₂ 100mmHg
- P_ACO₂ 40mmHg
- P_AH₂O 47mmHg
- P_AN₂ 573mmHg

압과 같으므로 막을 사이에 두고 가장 큰 압력차를 가진 것은 O₂이다.

정맥 폐포

- PO₂ 40mmHg 100mmHg
- PCO₂ 47mmHg 40mmHg

* 여기에서의 정맥혈은 우심실로 부터 나와 폐 동맥을 통해 폐포모세혈관에 도달하는 혈액을 말한다.

일단 혈액이 폐포를 통과하고 난후에는 PCO₂는 변치 아니하나 PO₂는 정상적, 해부학적 Shunt로 인하여 순환혈액내에서 그 수치가 변하는데 정상에서는 10mmHg를 넘지 아니한다.

정맥혈 폐포 동맥혈

- Shunt
- PO₂ 40mmHg 100mmHg → 95mmHg
- PCO₂ 47mmHg 40mmHg 40mmHg

2) 기체농도의 변화가 미치는 영향

흡입된 공기내에서 기체농도가 변화에 따라 압력차도 변하고 확산과정이 정상적으로 일어날때는 동맥혈내에서의 각 기체의 분압 또한 변한다.

① 폐포내 PCO₂의 증가

어떠한 이유로 인해 폐포내 CO₂가 밖으로 배출되지 아니하면 P_ACO₂가 증가하고 이러한 증가를 수용키 위해 P_AO₂가 감소되므로 폐포와 폐 모세혈관사이의 산소압력차가 감소되어 혈액으로 확산되는 산소량이 줄어들고 결국은 PaCO₂는 증가, PaO₂는 감소한다.

② Nitrogen Washout

어떤 사람이 100% O₂를 흡입하고 있을 때에 폐포내에는 가스확산과정이 여전히 계속되고 있으므로 P_ACO₂가 존재하고 또한 공기가 기도에 의해 덩어지고 습화되므로 P_AH₂O도 존재하지만 N₂가 차지할 자리를 O₂가 모두 차지하게 되므로 P_AN₂는 O₂가 된다. 이때의 P_AO₂는 673mmHg나 된다. 만일 O₂확산과정이 정상적으로 일어나고 있으면 PaO₂도 매우 증가된다. 환자가 100% O₂를 공급받고 있을때 폐포와 모세혈관 사이의 정상 PO₂차는 100mmHg를 초과할 수 없으므로 고농도의 산소공급은 폐포막에 매우 해롭다.

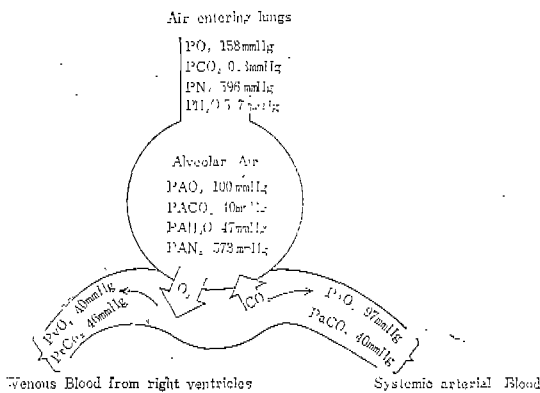


Fig. 1 호흡에 따른 호흡기체의 분압

우심으로부터 온 정맥혈은 P_VO₂ 40mmHg, P_VCO₂ 47mmHg이고 P_VH₂O, P_VN₂는 폐포내 분

3. 호흡기체의 운반

환기와 확산이 일어나고 난 후에는 기체들은 그들의 최종 목적지인 조직으로 이동된다. 산소는 혈장에 용해된 형태나 Hb에 결합된 형태로 이동된다.

1) 용해된 산소

혈장에 녹는 산소의 양은 산소의 분압과 혈장에 대한 용해도에 의존한다. O₂는 혈장에 의해 잘 녹지 않아서 PaO₂ 100mmHg에서 단지 0.3 ml의 산소가 100ml의 혈장에 녹아 운반된다.

2) Hb과 O₂의 결합

대부분의 O₂는 단백질 결합체인 Hb과 결합되어 운반되며 조직의 낮은 PO₂에 노출되었을 때 분리된다.

O₂와 결합되는 것은 Hb의 철분 부분이며 이는 반드시 Ferrous(Fe⁺⁺)상태여야 하는데 어떤 화학약제, 예를들면 Nitrites는 이 부분을 Ferric(Fe⁺⁺⁺)로 바꾸어 놓으며 이러한 것을 Methemoglobin이라 한다.

O₂와 결합된 Hb의 비율을 Hb의 산소포화도라고 한다(SO₂). Hb. gram당 1.39ml의 산소가 결합되었을 때 100% 포화되었다고 한다.

Hb이 100% 포화 되었을 때는 색이 빨갛다. 포화되지 아니한 Hb 또는 Reduced Hb은 자주색이다. Hb은 O₂를 운반하는 동시에 CO₂를 운반할 수 있지만 CO는 O₂보다 Hb과의 결합능력이 240배 강하므로 CO와 O₂를 같이 운반할 수는 없다. 매우 적은량의 CO흡입으로도 사람을 저산소증에 빠트리기에 충분하다.

혈액으로 운반되는 O₂의 총량을 결정하기 위해서는 Hb으로 운반되는 O₂와 혈장으로 운반되는 양을 합하면 된다. 이는 CaO₂(동맥혈 산소함량)로 쓸 수 있다.

$$CaO_2/100ml \text{ Blood} = (PaO_2 \times 0.03ml) + (Hb \times 1.39ml \times SaO_2)$$

특정기관의 동맥과 정맥과 산소함량차는 그 기관의 산소소모를 나타낸다. 폐동맥관을 사용하여 혼합정맥혈을 채취하면 신체의 산소소모량을 측정할 수 있으며 이러한 기술을 변형시킨 방법

이 심박출량을 계산하는데 사용된다.

◎ O₂와 Hb.의 친화력 측정

Hb의 O₂운반능을 이해하기 위해서는 Hb의 O₂해리곡선을 이해함이 필요하다. 이 곡선은 PO₂와 Hb의 O₂포화도와와의 상관관계를 그림으로 나타낸 것이다.

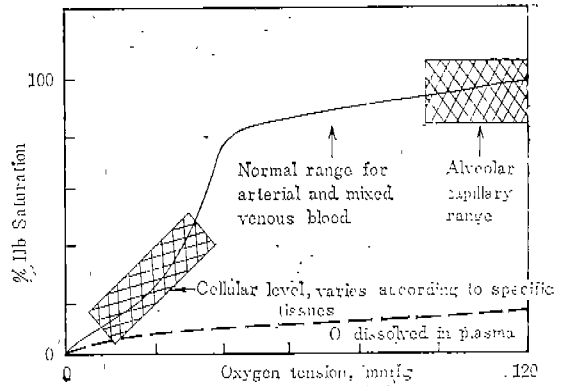


Fig. 2

그림을 보면 PO₂의 증가에 따라 Hb의 포화도가 같이 증가치 아니한 부분이 있는데 이는 보통 80% 포화도와 PO₂ 50mmHg에서 시작된다. 혈장에 녹아있는 O₂는 PaO₂가 증가하면 같이 증가하지만 Hb은 PaO₂의 증가에도 불구하고 운반할 수 있는 O₂량에는 한계가 있다. 그러므로 PaO₂가 감소해도 SaO₂에는 많은 영향을 미치지 아니하고 혈액내 O₂함량은 어느정도 유지된다. 이러한 작용은 PO₂가 감소될 때 우리 몸이 저산소혈증에 빠지는 것을 방지하는 역할을 한다. 조직의 PO₂는 10~40mmHg인데 이 범위내에서는 곡선이 급격한 경사도를 나타내며 PO₂의 작은 증가도 Hb의 O₂포화도를 2~3배 증가시켜 많은 양의 O₂를 조직이 섭취할 수 있도록 하여 준다.

◎ Hb의 O₂ 해리곡선의 이동

Hb이 O₂와 결합하여 운반되는 능력을 나타내는 이 곡선은 체온 PH, PCO₂등의 신체조건이 변하면 좌우 방향으로 이동한다.

정상곡선에서 PO₂ 27mmHg일 때 Hb은 50% (P50) 포화도를 가진다. 곡선이 오른쪽으로 이동했을 때는 P50은 27mmHg보다 커진다. 그러므로 주어진 PO₂(27mmHg)에 대한 포화도는 작

■ 지면보수교육

아진다. 이러한 현상은 바람직하지 못하게 보이지만 주목할 점은 Hb과 O₂와의 결합은 어려우나 조직에서 O₂를 방출 할때는 O₂와 Hb의 분리가 쉽게 빨리 일어난다. 이런 현상은 O₂를 궁극적으로 필요로 하는 곳인 세포를 위해서는 유리하다.

목선을 우측으로 이동시키는 요소는 산소소모가 증가된 상황이다. 예를들면 고열, 산증, 또는 2, 3-DPG 등의 유기인의 증가가 있다. 높은 고도에 사는 사람들은 공기내 산소 희박을 보충하기 위해 2, 3-DPG가 증가되어 있고 polycythemia가 있다. 이러한 현상은 장기성 저산소증, 즉 만성폐질환 환자에게서 볼 수 있다.

오래 저장된 혈액은 응고인자 뿐만 아니라 2, 3-DPG도 부족하다. 30분 정도의 수혈을 했을 때는 신체가 이를 보충할 수 있으나 빠른속도로 다량의 수혈을 받는 환자에 있어서는 조직적으로 산소방출의 감소를 예측할 수 있다.

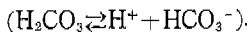
Hb의 O₂해리곡선의 좌측으로의 이동은 P50이 PO₂ 27mmHg이하가 되게한다. 이때는 O₂와 Hb은 서로 잘 결합하나 조직에 와서는 잘분리되지 아니한다. 염기증, 저체온, 감소된 2, 3-DPG가 곡선을 좌측으로 이동하게 하는 요소이다.

Hb의 산소포화도는 체온에 의해 영향을 받는데 이러한 요소들은 동맥혈가스분석을 관독할때 반드시 고려해야 할 것들이다.

3) 이산화탄소

CO₂는 혈액내에서 세가지 방법으로 이동되는데 단지 5%만이 혈장내에 녹아서 운반된다. 이 중의 얼마는 혈액가스분석시 측정되는 압력을 제공하고 나머지는 물과 작용하여 Carbonic Acid를 만든다. (CO₂+H₂O⇌H₂CO₃)

Carbonic Acid는 더 해리되어 H⁺과 HCO₃⁻를 형성한다.



CO₂의 65%는 적혈구내에서 Carbonic Acid형태로 운반된다. 이 Carbonic Acid가 HCO₃⁻와 H⁺로 해리된다. 이때 HCO₃⁻이온은 적혈구 밖으로 쉽게 확산되나 H⁺이온은 그렇지 못하다. 세포안에 HCO₃⁻이온이 너무 많아지면 세포밖으로의 확산이 일어나는 데 이때 세포안의 전기적

균형을 이루기 위해 Cl⁻가 이동해 들어온다. 이것이 Chloride 이동이라 알려져 있다.

약 30%의 CO₂가 CO₂와 Hb의 복합체인 Carboaminohemoglobin형태로 운반된다.

일단 혈액이 우심을 통해 폐모세혈관으로 들어오면 모든 역전 가능한 화학공식이 역전되어 CO₂가 다시 형성되고 Hb은 CO₂를 방출한다. 그리고 이러한 CO₂는 모세혈관과 폐포막을 통해 폐포로 확산된다.

산·염기평형을 이루는데 있어서 CO₂의 역할을 이미 토의된 화학공식



에서 볼 수 있다.

산이란 H⁺을 내는 물질이고 염기는 H⁺을 받아 들이는 물질이다. 신체의 정상 PH(=7.4)를 유지키 위해 신체는 H⁺과 HCO₃⁻이 1 : 20의 비율을 유지해야 한다.

PaCO₂가 증가되면 Carbonic Acid량이 증가되어 H⁺농도가 증가되고 PH는 떨어진다. 이것이 호흡성 산증이다. PaCO₂가 감소하면 PH가 증가 하는데 이것이 호흡성 염기증이다. 폐는 이러한 방법으로 혈액내 PH를 수분내에 변화시킬 수 있다. 폐는 신체의 산·염기평형을 유지하고 대사성 산·염기 불균형을 교정하는데 기여를 한다.

HCO₃⁻의 농축은 주로 신장기능의 산물이다. HCO₃⁻가 증가하면 PH가 증가하고 HCO₃⁻가 감소하면 PH가 감소한다. 이러한 것이 대사성산증 또는 염기성이다.

Harderson-Hasselbach공식이 H⁺과 HCO₃⁻사이의 완충계 관계를 잘 보여준다.

<Table>

Calculation of Blood PH

$$PH = pk + \log \frac{Base}{Acid}$$

$$(1) \frac{HCO_3^-}{H_2CO_3} = \frac{25.4meq/L}{1.27meq/L} = \frac{20}{1}$$

$$(2) \text{Blood } pk \text{ at BTPS} = 6.1$$

$$PH = 6.1 + \log \frac{20}{1}$$

$$PH = 6.1 + 1.3 = 7.4$$