

# 폐포 기체의 압력과 조성이 허파의 산소농도 확산능에 미치는 영향

배황\* · 장근식\*\*

## The Effect of Alveolar Gas Pressure and Composition on the Oxygen Diffusion Capacity in the Lung

Hwang Bae\*, Keun-Shik Chang\*\*

### 1. 서론

\* 인체는 생명 유지에 필요한 에너지를 얻기 위해서 영양분을 섭취하여 연소한다. 이를 위해서는 산소가 필요하고, 연소가 끝나면 이산화탄소가 발생하게 된다. 이 영양분의 연소 과정에 필요한 산소를 대기로부터 확보하는 것과 신진대사의 결과로 생긴 이산화탄소를 체외로 배출하는 허파의 기능을 호흡이라 한다. 내호흡은 세포가 혈액으로부터 산소를 공급받아 세포내 여러 영양원과의 이화작용(catabolism)을 통해 소모하고, 이 결과 생성된 이산화탄소를 혈액으로 내보내는 작용이며, 이를 세포호흡 혹은 산화대사라고도 한다.

외호흡 과정중 산소가 혈액으로 들어가는 동시에 혈액 내 이산화탄소가 폐포로 배출되는 가스교환과정은 폐포와 폐모세혈관내 동일 기체성분간의 분압차로 인한 확산에 의해 진행된다. 이때 허파 자체 또는 심장 혈관계에 질병에 의한 이상이 없다면, 폐포내 각 성분들의 분압은 흡입하는 공기의 대기압에 영향을 받는다. 고도 3000m 이상의 고산 지대에서 흔히 발생하는 고산병 증세가 그 대표적인 예라 할 수 있다. 이는 산소부족과 저기압에 기인한 것으로 고도가 높아져도 대기중 산소 조성은 20.9%로 변화가 없으나 산소 분압 자체가 낮아짐으로 인해 동맥혈의 산소 농도가 낮아지기 때문이다. 그렇다고 고산병 환자에게 산소를 공급한다고 모든 증세가 호전되는 것은 아니며 이런 경우 하산만 하면 호전되는 것으로 보아 산소부족만의 문제가 아니라 추위, 피로, 영양 결핍과 같은 여타의 원인에 의한 복합적인 증상이라고 볼 수 있으나 낮은 산소 분압이 고산병 증세에 미치는 영향은 분명하다.

본 논문에서는 대기압의 변화가 폐포와 폐모세혈관간의 가스교환에 미치는 영향을 수학적 모델을 이용해 추산하고자 한다. 이를 이용하면 후에 특정 호흡기 질병에 대한 다양한 의공학적 대처방안을 강구할 수 있다.

### 2. 폐포내 가스 교환 모델

#### 2.1 산소-이산화탄소 농도

허파의 가스교환은 폐포와 폐모세혈관 및 그 인근 조직 사이에 이루어지며, 폐포막을 통한 확산작용에 의해 동맥혈액내 산소와 이산화탄소의 농도 및 분압이 결정된다. 혈액내 산소의 98.5%는 적혈구내 헤모글로빈과 결합하고 나머지 1.5%는 혈장에 용해된다. 반면, 이산화탄소는 30%정도가 적혈구내 헤모글로빈과 결합하고, 65%는 수분과 결합하여 탄산을 형성하고 이는 다시 수소이온과 중탄산염으로 해리된 형태로 존재한다. 나머지 5%는 혈장에 용해된 형태로 존재한다. 산소와 이산화탄소의 농도는 서로간의 분압에 대해 영향을 받기 때문에 이들의 농도를 계산할 때 이들의 결합 형태뿐만 아니라 분압의 영향도 고려해야 한다. 폐모세혈관의 산소 분압이 높아지면 헤모글로빈과 결합된 이산화탄소의 친화성이 낮아져 탄산가스가 해리되는 Haldane 효과가 나타나며, 반대로 말초조직의 모세혈관에서 혈액의 이산화탄소의 분압이 높아지면 헤모글로빈으로부터 산소가 해리되는 Bohr 효과가 나타난다. 본 연구에서는 이러한 효과를 고려한 Kelman의 방법(1)(2)을 이용하여 산소와 이산화탄소의 농도를 구한다.

#### 2.2. Mass Balance Equations

대기압과 폐포내 분압의 합은 같다. 만약 대기압이 760mmHg라면 폐포내 질소, 산소, 이산화탄소의 분압

\* 한국과학기술원 항공우주공학과 박사과정

\*\* 한국과학기술원 항공우주공학과

과 수증기압의 합 또한 760mmHg가 된다. 대기중의 공기의 산소 분압과 가스교환을 끝내고 호기되는 공기의 산소 분압차는 가스교환을 하기 전후의 혈액내 산소분압차에 비례하며, 질소와 이산화탄소 역시 각각 비례한다.

고산지대에서는 대기압이 낮아지며, 고도 5,800m 에서의 기압은 일반평지의 1/2이며, 9,500m에서는 1/3로 낮아진다. 기압이 낮아지더라도 공기 성분의 조성은 그대로 유지 되기 때문에 결과적으로 산소의 분압은 낮아진다.

대기압과 폐포내 공기 성분들의 분압의 합이 같고, 호흡 전후의 공기 성분들의 분압차와 가스교환 전후의 혈액내 성분들의 농도의 차가 비례한다는 것을 이용하면 대기압의 변화가 호흡에 미치는 영향을 알 수 있다.

### 3. 대기압 변화가 가스교환에 미치는 영향

본 연구에서는 산소와 이산화탄소 분압에 대한 혈액에서의 농도를 Haldane 효과와 Bohr 효과를 고려하여 Kelman 방법을 재현할 수가 있었다. 그림1에서 실선으로 나타낸 본 연구의 결과가 점선으로 보인 Kelman의 결과와 잘 일치하고 있다. 본 차트는 여러 가지로 응용할 수 있는데 여기서는 우선 높은 고도에서 대기압이 낮아질 때, 폐포내 mass balance에 대한 연립 방정식을 이용하여 공기 성분들의 분압을 구한 결과를 그림1의 가운데에 이산된 점(원, 삼각, 역삼각형)들로 나타내었다. 고도가 해발 5800m까지 증가하면 대기압은 760 에서 380 mmHg로 변한다. 이 때 폐포내 산소 분압은 110 에서 45 mmHg로 낮아지고, 이산화탄소의 분압은 40 에서 35 mmHg로 낮아진다. 실제 고산 지역에서는 대기압이 낮아짐으로 인해 산소 분압이 낮아져 이에 대한 자율신경의 보상 작용으로 심박동수 및 호흡수가 빨라진다. 해수면 대기압이 760 mmHg일때 인체의 평균 심박동수는 72회, 일회 평균 호흡량은 500ml, 평균 호흡수는 12회 정도이다. 대기압 변화에 따른 신체의 적응 정도는 사람마다 다르지만, 해발 약 4000m 이상의 고산에서 대략 심박동수는 110~130회 정도이고, 호흡수는 20회 정도로 상승한다. 분당 호흡량과 분당 폐로 공급되는 혈류량의 비를 환기/관류비 ( $\dot{V}_A/\dot{Q}$  줄여서 기관비)라고 표기하는데, 일반적으로 대기압이 낮은 고산지역에서는 기관비가 1보다 큰 것으로 알려져 있다. 그림1에서는 대기압이 760 mmHg에서 38 mmHg 씩 감소할 때, 기관비  $\dot{V}_A/\dot{Q}$

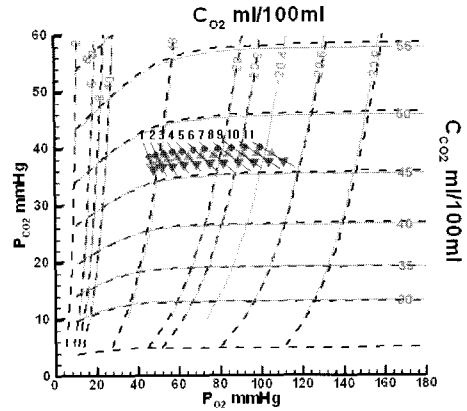


그림 1 산소 및 탄산가스 농도에 대한 동기체의 혈중 분압

● : 기관비 = 0.8, ▲ : 기관비 = 1.0, ▼ : 기관비 = 1.2,

0.8, 1.0과 1.2에 대하여 얻은 데이터를 각각 원, 삼각형과 역삼각형의 점 표지로 나타내었다. 이들의 본포(총 11개의 Lines)를 비교해 보면, 대기압이 760 mmHg인 Line 11은 기울기가 낮아 폐포내 산소의 분압이 110 mmHg에서 기관비에 따라 상당히 높은 변동을 나타낸다. 반면 대기압이 380 mmHg인 Line 1은 기울기가 커서 기관비가 커지더라도 폐포내 산소 분압의 변동이 작은 것으로 나타난다. 생리적으로 산소 분압이 낮아져 40mmHg에 이르면 적혈구 내 산소의 포화도가 75%정도에 이르고, 이때부터 혈구의 산소운반 능력에 장애가 나타나기 때문에 기관비가 증가하더라도 혈중 산소분압의 변화가 크지 않은 것은 쉽게 수긍이 간다.

폐질환자의 인공호흡에서 주입하는 기체의 압력 및 조성에 따라 허파 정맥에서의 산소 농도를 예측하는 것은 임상적으로 매우 필요하다. 본 연구의 방법은 주입되는 폐포 기체에서 압력뿐만 아니라 조성이 달라지는 경우에도 유사하게 계산할 수 있으므로 의공학적으로 대단히 유익한 도구가 될 수 있다.

### 참고 문헌

- (1) Kelman G.R., 1966, "Digital Computer Subroutine for the Conversion of Oxygen Tension into Saturation," J. Appl. Physiol. No.21, Vol.4, pp. 1375~1376.
- (2) Kelman G.R., 1967, "Digital Computer Procedure for the Conversion of Pco2 into Blood Cco2 Content," Respiration Physiol, Vol.3, pp. 111~115.