

동맥혈 가스 분석의 역사와 개요

계명대학교 의과대학 마취통증의학과

김 진 모

History and Background of Arterial Blood Gas Analysis

Jin Mo Kim, M.D.

Department of Anesthesiology and Pain Medicine, School of Medicine, Keimyung University, Daegu, Korea

동맥혈 가스 분석은 환자 감시 분야에서 가장 기본적이면서도 중요한 감시 방법 중의 하나이다. 이는 호흡관리 등과 같은 중환자 관리에서 뿐만 아니라 심폐소생술과 같은 극적인 상황에서 치료 방향을 나타내는 지표가 되기도 한다. 본 강의에서는 동맥혈 가스 분석의 역사 및 가스 분석의 원리에 관하여 다루고자 한다.

동맥혈 가스 분석의 역사

환자 감시 분야의 중요한 발전 중의 하나가 혈액 내의 가스를 측정 가능하게 된 것이다. 이의 역사적 배경은 300여 년 전으로 거슬러 올라간다. 혈액 내 가스 분석은 17세기와 18세기에 전기 및 가스에 관한 법칙들이 소개된 이후 발전을 시작하여 19세기에

Table 1. History of Blood Gas Analysis

| Year | Historical events |
|-------|--|
| 17th | Guericke, Exploration of electricity and gas law |
| 1678 | Robert Hooke, Gases consist of molecules in motion |
| 1801 | John Dalton, law of partial pressure |
| 1802 | William Henry, Amount of dissolved gas is proportional to the partial pressure (Henry's law) |
| 1811 | Avagadro, law of Avagadro : all gases under same temperature and pressure contain equal number of molecules, 6.022×10^{23} early 19th Henderson, et al. Importance of H^+ in biology, Body's buffering mechanisms |
| 1833 | Michael Faraday, named ion, anion, cation, anode, cathode |
| 1839 | Gay-Lussac, idea of ionization idea |
| 1887 | van't Hoff, et al, Development of thermodynamic electrochemistry |
| 1887 | Arrhenius, Concept of ionization of acids |
| 1890 | Wilhelm Ostwald, Electrometric measurement of the $[H^+]$ |
| 1909 | Sorenson, nomenclature pH (negative logarithm of $[H^+]$) |
| 1923 | Bronsted, acid is proton donor and base is proton acceptor |
| 1925 | Geseil, CO_2 electrode |
| 1952 | Astrup and Anderson, Practical blood pH measurement |
| 1970s | Concept of base excess |

는 생체에서의 수소 이온의 중요성과 완충기전에 관하여 Henderson 등이 연구하였다. 1890년경 William Ostwald가 수소 이온 농도 측정법을 고안하였다. 최초로 혈액의 pH를 측정한 것은 Hasselbach이었으며 그는 대사성 산-염기 불균형에 관하여 언급하기도 하였다. 실제 혈액 pH 측정이 도입된 것은 1950년대 Astrup와 Anderson에 의하여 가능하게 되었는데 당시 PCO₂ 측정의 필요성이 대두된 것은 1952년 폴리오가 유행하면서 인공호흡기의 효과를 판정할 필요성이 있었기 때문이었다. Table 1은 동맥혈 가스 분석이 가능하게 된 역사적인 주요 사건들을 보여준다.

산-염기 균형(Acid-base balance)

화학반응에서 산(acid)이란 수소 이온을 제공하는 물질, 염기(base)란 수소 이온을 수용하는 물질로 정의된다. 적절한 신체의 기능을 위해서는 이러한 산과 염기 사이의 균형이 이루어져야 한다. 산-염기 상태를 평가하는 가장 흔히 이용되는 척도가 pH이다. 이때 pH는 수소 이온 농도의 로그 값에 역비례 한다($pH = -\log[H^+]$).

정상 수소 이온 농도는 40 ± 5 nEq/L로 이는 pH 7.40 ± 0.05 가 된다. 따라서 산증(acidosis)이란 수소 이온 농도가 45 nEq/L 이상인 상태로 pH가 7.35 이하인 경우를 말하며, 알칼리증(alkalosis)이란 수소 이온 농도가 35 nEq/L 이라로서 pH가 7.45 이상인 경우를 말한다.

인체에서의 pH가 많이 증가하거나 감소되는 경우 심각한 위험을 동반하게 된다. 예를 들어 산증이 발생되는 경우 심근 수축이 감소되고 카테콜아민에 대한 혈관 반응이 감소되며 약물들의 약리학적 작용에 장애를 초래하게 된다. 반대로 알칼리증이 발생되면 적혈구로부터 산소의 방출이 방해를 받게 된다.

pH가 수소 이온 농도의 로그 값과 관련이 있기 때문에 pH의 작은 변화는 수소 이온 농도의 상당한 변화를 반영하게 된다. 예로 pH가 7.4에서 7.1로 0.3이 감소된 경우 실제 수소 이온 농도는 40 nEq/L에서 80 nEq/L로 증가된 상태를 의미한다. 이 상태에서 다시 pH가 0.3 감소하게 되면 즉, pH 7.1에서 6.8이 되면 수소 이온 농도는 또 다시 두 배(160 nEq/L)로 증가하게 된다. 다시 말하여 pH 6.8인 상태에서 pH가 0.30 증가(pH 7.1)한다는 것은 수소 이온 농도

의 50% 감소를 의미한다고 볼 수 있다.

응급 상황에서는 급성 산증이 주된 문제 상황이 되므로 산-염기 균형의 관리 시 만성적인 상황보다는 급성 상태가, 알칼리증 보다는 산증이 주요 관심사가 된다.

산은 세포의 대사에 의하여 정상적으로 생성되는 대사산물로 생체는 호기성 대사에 의하여 두 가지 형태의 산을 생성한다. 이중 하나는 이산화탄소로 위발성 산(volatile acid)이라고도 하는데 이는 폐를 통하여 배출된다. 다른 하나는 대사성 산(metabolic acid)으로 순환 내인성 염기 물질에 의한 완충작용에 의하여 중화되기도 하고 정상 산-염기 항상성을 유지하기 위하여 신장을 통하여 배출되기도 한다.

이산화탄소는 순환, 신장 기능 및 환기가 적절할 경우 인체로부터 쉽게 배출된다. 그러나 이러한 기능들의 이상이 있는 경우 혹은 이산화탄소의 양이 과도하게 많을 경우에는 산증이 초래된다.

젖산과 같은 대사성 산은 이산화탄소보다 분자의 크기가 크다. 이러한 산들은 아미노산, 지방, 탄수화물의 대사에 의하여 생기며 혈장에 있는 순환 완충계에 의하여 완충되어진다. 무기 인산 및 sulfuric acid 등과 같은 일부 다른 대사성 산들은 신장으로 배설된다. 따라서 산증은 이러한 산들이 과도한 양으로 생성되거나 완충계 혹은 신장 기능 이상이 생길 경우 발생된다.

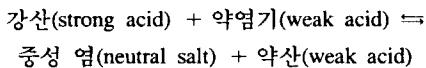
염기가 축적되는 경우는 두 가지 기전이 있는데 중탄산염(bicarbonate)과 같은 염기의 과다한 섭취, 과도한 산의 소실 등이 그 원인이 된다. 과도한 산의 소실은 hypokalemia가 있는 경우나 potassium 보다 H⁺의 신장으로의 소실이 증가되는 경우 혹은 구토에 의한 이차적인 H⁺의 고갈이 발생되는 경우 생기게 된다. 이러한 변화들은 환기 변화, 신 배설 및 순환 완충계에 의하여 보상되어 진다.

완충계(Buffer systems in the body)

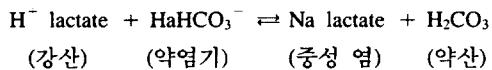
pH는 두 가지 요인에 의하여 결정되어 진다. 하나는 H⁺ 농도 자체의 증가 혹은 감소이며 다른 하나는 H⁺ 농도 변화시 pH를 정상으로 유지시키려고 하는 방어 기전인 완충계이다. 완충물(buffer)은 인체에서 pH를 빠르게 정상으로 유지시켜 주는 물질로 중탄산염, 인산염, 단백질, 헤모글로빈 및 암모니움 등

이 있다. 탄산(carbonic acid, H_2CO_3)-중탄산염(bicarbonate, HCO_3^-) 완충계는 빠르고 미세한 pH 조절에 가장 중요하다. 그러나 이 기능이 적절히 이루어지기 위해서는 정상적인 혈액학, 신장 및 폐기능을 필요로 한다.

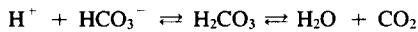
인체의 생리적 완충계는 산 혹은 염기의 염(salt)과 평형을 이루는 약산 혹은 약염기로 구성되며 다음과 같은 공식이 적용된다.



예를 들어 젖산과 같은 강산이 혈액으로 방출되면 약염기인 중탄산나트륨이 젖산의 수소 이온과 결합하여 약산인 탄산과 중성 염을 형성하게 된다.



일반적으로 강산의 H^+ 는 HCO_3^- 와 결합하여 탄산(H_2CO_3)을 형성한다. 탄산은 다시 carbonic anhydrase에 의하여 해리되어 물(H_2O)과 CO_2 로 된다.



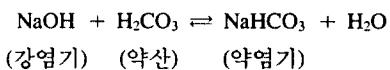
정상적으로 중탄산염과 탄산의 비율은 약 20 : 1이며 이 비율이 유지되는 한 pH는 정상이 된다. 탄산시스템에 의한 완충 작용이 정상적으로 이루어지기 위해서는 CO_2 가 폐로 운반되어져 폐모세혈관막을 통하여 제거되어져야 한다. 따라서 이 시스템은 부적절한 조직 및 폐순환과 부적절한 환기가 생기면 산의 부하를 빠르게 감소시킬 수 있는 능력이 감소되고 중탄산염과 탄산의 20 : 1 비율이 변화되어진다.

탄산-중탄산염 완충계는 산의 완충 시스템으로 양쪽의 농도에 따라 가역적 방향으로 반응한다. 점차적인 수소 이온 농도의 증가는 중탄산염 완충계에 의하여 순환과 환기가 적절한 경우 CO_2 의 제거에 의하여 교정될 수 있다.

다른 완충계 역시 작용기전은 탄산-중탄산염 완충계와 거의 유사한데 인산염 시스템(phosphate system)의 경우 수소 이온이 증가하면 중성 염(neutral salt)과 약산인 $NaHPO_4$ 를 형성한다. $NaHPO_4$ 는 이후 신장으로 배출된다. 단백질은 산 혹은 염기 모두로 작용할 수 있는데 필요에 따라 H^+ 를 방출하기도 하고 결합하기도 한다. 헤모글로빈 완충계는 거의 대부분

적혈구 세포 자체 내에서 탄산 반응을 통하여 작용한다.

염기가 과도하게 체내에 있을 경우에도 유사한 완충작용을 가진다. 즉, 수산화나트륨(sodium hydroxide)과 같은 강염기가 있는 경우 탄산과 결합하여 약 염기와 물을 형성한다.



이때 $NaHPO_4$ 에 의해 생성되는 중탄산염은 신장을 통하여 배설된다.

완충작용은 급격한 수소 이온 농도의 변화에 반응하여 산증 혹은 알칼리증 발생의 위험을 감소시키기는 하지만 위험성을 완전히 소실시키지는 못한다. 혈장에서의 완충작용의 속도는 매우 빨라 수소 이온 농도 변화와 거의 동시에 화학 반응을 일으킨다. 그러나 과다한 산을 중화시키게 되면 완충작용 기능이 거의 소실되는데 이 경우를 염기 결손(base deficit)라고 한다. 그 결과 완충작용 소실과 함께 pH가 감소되고 산의 부하가 증가된다. 다행히 시간이 경과하면 산-염기 균형을 유지하기 위한 폐 및 신장의 추가적인 보상기전이 발생되어 과도하게 증가되어 있는 산이나 염기를 배출하게 된다.

산-염기 불균형의 원인을 정확히 파악하기 위하여 동매혈 이산화탄소 분압($PaCO_2$)을 측정하게 되는데 평균치는 35~45 mmHg이다. $PaCO_2$ 는 적절한 폐환기 및 가스 교환 여부를 반영하며 분시환기량에 반비례한다. 만약 분시환기량이 증가하면 $PaCO_2$ 는 감소하고 분시환기량이 감소하면 $PaCO_2$ 는 증가한다. 일회환기량은 사강환기(dead space ventilation)와 유효폐포환기(effective alveolar ventilation)로 구성된다. 호흡이 빠르지만 얇은 경우에는 일회호흡량이 감소하는데 이때 사강환기는 변하지 않으므로 폐포환기가 감소하게 된다. 따라서 이 경우 전체적인 효과는 유효환기의 감소로 인한 $PaCO_2$ 의 증가가 발생된다.

급격한 $PaCO_2$ 의 증가는 탄산 농도의 증가를 가져오고 급격한 $PaCO_2$ 의 감소는 탄산 농도의 감소를 가져온다. 탄산 농도가 증가되어도 중탄산염의 농도에는 변화가 없는데 이는 중탄산염 자체가 탄산과 적접적으로 반응하지는 하지 않기 때문이다. 따라서 탄산과 중탄산염의 비율에 변화가 생기게 되고 중탄산염이 시간이 지남에 따라 신장에서의 중탄산염 재

흡수의 증가 및 감소에 의하여 중탄산염 농도가 변하여 중탄산염 : 탄산의 비율을 정상인 20:1로 유지하게 된다. 이 과정을 위해서는 신장 기능이 정상이어야 하며 순환 혈장에서의 Na^+ , K^+ 농도가 정상이어야 한다. 결론적으로 호흡 및 신장에 의한 배설로 인하여 중탄산염 : 탄산의 20:1의 비율과 정상 pH를 유지하게 되는 것이다.

산-염기 항상성을 위한 신장의 역할은 산을 배설하고 중탄산염을 재흡수하는 것이다. 또한 신장은 수소 이온과 관련이 있는 인산염, 염소 및 암모니아를 배설한다. 이 기능에는 비록 24시간 정도 소요되지만 산-염기 시스템에 중요한 역할을 하게 된다.

임상적 동맥혈 가스 분석 (Clinical Blood Gas Analysis)

혈액 가스 분석은 산소분압(PO_2), pH, 이산화탄소 분압(PCO_2)를 이용하여 분석한다. pH와 PCO_2 를 알게되면 수소 이온 농도를 알 수 있으며 다음의 공식

에 의하여 중탄산염의 농도를 알 수 있다.

$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{24 \times \text{PCO}_2}{[\text{H}^+]}$$

정상적으로 PCO_2 는 $40 \pm 5 \text{ mmHg}$ 이며 45 mmHg 이상의 과탄산혈증은 부적절한 환기 즉, 저환기에 의하여 발생되며, 35 mmHg 이하인 저탄산혈증은 과환기를 의미한다. PCO_2 가 높으면서 산증이 생기는 경우를 “호흡성 산증”이라 하며 이는 부적절한 호흡으로 인하여 PCO_2 가 증가된 경우이다. 대사성 산에 의하여 생기는 산증은 환기가 정상 혹은 증가되어 있어 PCO_2 가 정상 혹은 감소되어 있으며 이를 “대사성 산증”이라 한다.

알칼리성 pH와 낮은 PCO_2 가 함께 나타나는 경우는 대개 호흡성 알칼리증에 의하며 과도한 CO_2 와 H^+ 의 소실에 의한다. 정상 혹은 높은 PCO_2 와 함께 중탄산염이 많이 생김으로 인하여 발생되는 알칼리증은 대사성 알칼리증(예, 체액 부족, 저칼륨혈증)으로 이때의 PCO_2 증가는 호흡성 보상작용으로 인한다.