

맥박산소포화도 측정 알고리즘에 존재하는 가정 (Assumption)과 임상적 해석

대부분의 전자기기는 어떤 조건을 만족할 때 원하는 결과를 얻을 수 있다. 예를 들어, 220 V 선풍기에 100 V 전원을 연결하면, 바람의 세기가 약한 것을 관찰할 수 있고, 반대의 경우에는 휴즈가 절단되어 작동이 되지 않는다. 이렇게 가정이나 선행 조건이 충족되지 못하면, 예상하지 않은 결과를 얻게 되는데, 마취과 의사들이 사용하는 임상기기의 결과 해석에도 같은 원리가 적용될 수 있다.

맥박산소포화도 측정은 현대 마취에서 필수적인 사항으로 인정받고 있고 대부분의 마취에서 환자의 안정성을 평가하는 데 사용된다. 이 측정 장치는 비침습적으로 빛을 이용하여, 적혈구 내 혈색소 중 산소와 결합된 혈색소의 비율이 얼마인가를 알아보는 장치이다. 그래서, 모든 마취과 교과서가 간단한 원리를 기술하고 있고, 모든 전공의의 학습 대상이 되고 있다. 하지만, 교과서에 자세한 원리가 기술되어 있지 않거나, 학습자가 약간은 막연하게 이해하여, “두 개의 파장을 가진 빛을 사용하여 수축기와 이완기 때를 측정한다”, 또는 “혈액 중 정맥이나 모세혈관의 성분은 제거되고, 동맥의 성분만을 추출하여 동맥 내 산소포화도를 측정한다”로 이해하는 경우가 있다. 이에 전통적인 맥박 산소포화도 측정기의 가정과 원리를 보다 정확히 이해하고,¹⁾ 가정에 어긋나는 특이한 생리 현상이 존재하여 평소와 다른 결과가 관찰될 때, 맥박산소포화도 수치의 해석과 특이한 현상의 원인을 이해하고자 이 글을 작성하였다. 전통적인 맥박 산소포화도라고 칭한 이유는, 최근 손가락의 움직임에 대한 것을 고려한 알고리즘이 개발되었으나 이 글에서는 현재 수술장에서 많이 사용되고 있는 맥박 산소포화도 장치가 채택한 알고리즘에 대한 고찰로 한정하기 위해서 ‘전통적’이라는 명칭을 사용하였다.

맥박산소포화도는 다음과 같은 Beer-Lambert 법칙을 응용하고 있다(Fig. 1). 즉, 투과된 빛의 양은 주입된 빛의 양에 비례하고, 매질의 흡수 계수, 농도, 두께에 따라 지수적으로 감소한다.

$$I = I_0 e^{-\epsilon(\lambda)cd}$$

I : 투과 광량(transmitted light)

I_0 : 주입 광량(incident light)

e : exponential

λ : 빛의 파장

ϵ : 매질의 흡수 계수(absorptivity)

c : 매질의 농도

d : 매질의 두께

이 때 빛은 반사(reflection)되거나 산란(scattering)되는 것이 없는 것으로 가정한다(가정 1). 주입되는 빛의 양에 독립적인 식을 구하기 위해, 주입 광량(incident light)과 투과 광량(transmitted light)의 비를 투과도(transmittance, T)라고 정의하면 다음과 같이 된다.

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\epsilon(\lambda)cd}$$

투과도에 관한 식이 exponential을 포함하고 있어 수식 계산의 편의를 위해 자연로그를 취한 후 음수 값을 취해 ‘흡수도(absorbance, A)’라고 정의하자. 원래의 값에 음수 ‘-1’를 곱하였으므로 투과되는 빛의 양과 반비례 관계에 있는 흡수되는 빛의 양이 된다. 계산을 수행하면, 자연로그와 exponential이 상쇄되면서 다음과 같은 식이 된다.

$$A = -\ln T = \epsilon(\lambda)cd$$

만약 여러 종류의 빛(각각의 파장[λ]에 대한 빛의 흡수계

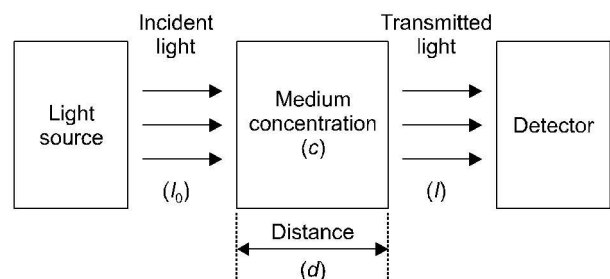


Fig. 1. The intensity of incident light (I_0) decreases as a result of the absorption of medium. The intensity of the transmitted light (I) is determined by Beer-Lambert's law.

수 $[\epsilon]$ 이, 여러 개의 물질(농도, c)에서, 각 물질의 두께(d)를 통과한 총 빛의 흡수도(A_t)를 구한다면 다음과 같이 수학적 덧셈으로 구할 수 있는 것이 알려져 있다.

$$A_t = \epsilon_1(\lambda)c_1d_1 + \epsilon_2(\lambda)c_2d_2 + \dots + \epsilon_n(\lambda)c_nd_n = \sum_{i=1}^n \epsilon_i(\lambda)c_id_i$$

- A_t : 총 빛의 흡수도
- λ : 빛의 파장
- $\epsilon_i(\lambda)$: 특정 파장(λ)에서 매질(i)의 흡수 계수(absorptivity)
- c_i : 매질(i)의 농도
- d_i : 매질(i)의 두께

수학적 복잡함을 피하기 위해 맥박산소포화도 장치가 측정하는 신체 조직에서 빛을 흡수하는 성분이 적혈구 내에 있는 혈색소가 유일하다고 가정하자(가정 2). 또한, 혈색소의 존재 형태로는, 산소와 결합한 혈색소(HbO_2)와 산소와 결합하지 않은 혈색소(Hb)만 존재하고, carboxyhemoglobin, methemoglobin, sulfhemoglobin, carboxysulfhemoglobin 등은 존재하지 않는다고 가정하자(가정 3). 그러면, 특정 파장(λ)에서 조직에 흡수된 빛의 총량(A_t)은 다음과 같이 계산된다.

$$A_t = \epsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda)c_{\text{HbO}_2}d_{\text{HbO}_2} + \epsilon_{\text{Hb}}(\lambda)c_{\text{Hb}}d_{\text{Hb}}$$

- A_t : 총 빛의 흡수도
- λ : 빛의 파장
- $\epsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda)$: 특정 파장(λ)에서 HbO_2 의 흡수 계수(absorptivity)
- c_{HbO_2} : 조직 내 HbO_2 의 농도
- d_{HbO_2} : HbO_2 이 존재하는 조직의 두께
- $\epsilon_{\text{Hb}}(\lambda)$: 특정 파장(λ)에서 Hb 의 흡수 계수(absorptivity)
- c_{Hb} : 조직 내 Hb 의 농도
- d_{Hb} : Hb 이 존재하는 조직의 두께

어떤 특정 조직에서 HbO_2 와 Hb 가 존재하는 조직의 두께는 거의 같을 것이므로 이를 d 라고 하자. 즉, $d = d_{\text{HbO}_2} = d_{\text{Hb}}$. 그러면 위 식은 아래와 같이 정리된다.

$$A_t = [\epsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda)c_{\text{HbO}_2} + \epsilon_{\text{Hb}}(\lambda)c_{\text{Hb}}]d \quad \text{식(1)}$$

한편, 혈색소의 농도와 무관한 관계식을 구하기 위해 다음과 같은 과정을 거쳐 혈색소의 농도를 공통의 곱셈항으로 묶어낸다.

총 혈색소 중에 HbO_2 의 비율을 산소화 혈색소의 비율(SO_2)이라고 정의하면, 마취과 교과서에서 흔히 보는 다음 식이 된다.

$$\text{SO}_2 = \frac{c_{\text{HbO}_2}}{c_{\text{total hemoglobin}}} = \frac{\text{HbO}_2}{\text{Hb} + \text{HbO}_2} = \frac{c_{\text{HbO}_2}}{c_{\text{HbO}_2} + c_{\text{Hb}}}$$

우변의 분모를 양 변에 곱하고 좌, 우변을 바꾸면 다음과 같은 식이 된다.

$$c_{\text{HbO}_2} = \text{SO}_2(c_{\text{HbO}_2} + c_{\text{Hb}}) \quad \text{식(2)}$$

우변을 전개하면,

$$c_{\text{HbO}_2} = \text{SO}_2 c_{\text{HbO}_2} + \text{SO}_2 c_{\text{Hb}}$$

우변을 좌변으로 옮기고, 양변에 c_{Hb} 을 더하면,

$$c_{\text{HbO}_2} - \text{SO}_2 c_{\text{HbO}_2} - \text{SO}_2 c_{\text{Hb}} + c_{\text{Hb}} = c_{\text{Hb}}$$

좌변을 $(1 - \text{SO}_2)$ 로 묶고, 좌, 우변을 바꾸면,

$$c_{\text{Hb}} = (1 - \text{SO}_2)(c_{\text{HbO}_2} + c_{\text{Hb}}) \quad \text{식(3)}$$

식(2)와 식(3)을 식(1)에 대입하면

$$A_t = [\epsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda) \text{SO}_2(c_{\text{HbO}_2} + c_{\text{Hb}}) + \epsilon_{\text{Hb}}(\lambda)(1 - \text{SO}_2)(c_{\text{HbO}_2} + c_{\text{Hb}})]d$$

공통의 혈색소 농도항을 뽑아내면,

$$A_t = [\epsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda) \text{SO}_2 + \epsilon_{\text{Hb}}(\lambda)(1 - \text{SO}_2)](c_{\text{HbO}_2} + c_{\text{Hb}})d$$

가정 3에서 혈색소는 HbO_2 과 Hb 의 두 가지 종류만 존재하는 것으로 가정하였으므로, 총 혈색소의 농도의 합은 일정($c_{\text{HbO}_2} + c_{\text{Hb}} = c_{\text{Hb}}$)할 것이다. 이를 대입하면,

$$A_t = [\epsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda) \text{SO}_2 + \epsilon_{\text{Hb}}(\lambda)(1 - \text{SO}_2)](c_{\text{Hb}})d \quad \text{식(4)}$$

c_{Hb} : 총 혈색소의 농도

위의 흡광도 식(식[4])을 구했으면, 특정 파장에 대해서 알아보자. 우리가 주로 사용하는 맥박산소포화도 장치는 940 nm와 660 nm를 주로 사용한다. 이는 측정하는 맥박 산소포화도 대상이 주로 정상(95-100%)이고, 높은 맥박산소포화도를 알고리즘으로 추정하는데 이들 두 파장을 사용하는 것이 좋다고 알려져 있기 때문이다(가정 4). 먼저, 940 nm의 적외선(infrared, IR)을 손가락 같은 조직에 투여하였을 때 흡광도를 알아보자. 상기의 공식 중, 빛의 주행 거

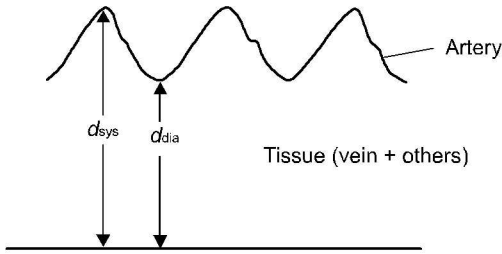


Fig. 2. The light traveling distance during systole (d_{sys}) is greater than that during diastole (d_{dia}).

리 d 는 심장의 박동에 따라 동맥이 수축 이완하면서 거리가 달라질 수 있다. 이 때 정맥 압력파에 의한 영향은 없는 것으로 가정한다(가정 5). 직관적으로 알 수 있듯이 수축기 동안에는 동맥에 혈액이 공급되면서 빛을 흡수하는 조직이 팽창하여 빛의 주행 거리(d_{sys})는 길어진다. 그래서, 수축기에는 흡광도가 커진다. 반면에, 이완기에는 동맥 내 혈액의 양이 줄면서 빛을 흡수하는 조직(동맥)이 수축하여 빛의 주행거리(d_{dia})는 짧아진다. 그래서, 이완기에는 흡광도가 작아지게 된다(Fig. 2). 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$A_{IR,sys} = [\epsilon_{HbO_2}(IR)SO_2 + \epsilon_{Hb}(IR)(1 - SO_2)](c_{tHb})d_{sys}$$

$$A_{IR,dia} = [\epsilon_{HbO_2}(IR)SO_2 + \epsilon_{Hb}(IR)(1 - SO_2)](c_{tHb})d_{dia}$$

실제로는 어느 시점이 수축기이고, 어느 시점이 이완기인지 알지 못하기 때문에 한 맥박 주기를 충분히 포함할 수 있을 정도로 단시간에 여러 번 빛을 주사하는데, 예를 들어, 초당 100번 정도(100 Hz)의 빛을 주사하여 흡광도를 알아본 후 가장 많은 흡광도가 측정된 시점을 수축기로 하고, 가장 적게 흡광도가 측정된 시점을 이완기라고 가정한다(가정 6).

수축기와 이완기 때 흡광도의 차이($A_{IR,diff}$)를 구하면, 다른 항은 모두 같기에, 수축기, 이완기 때 빛의 주행 거리만 각 거리의 차이로 수정하면 된다.

$$A_{IR,diff} = [\epsilon_{HbO_2}(IR)SO_2 + \epsilon_{Hb}(IR)(1 - SO_2)](c_{tHb})\Delta d_{IR} \tag{5}$$

같은 방법으로 660 nm의 적색광(red, R)을 쬐었을 때 흡광도 차이를 구하면 다음과 같다.

$$A_{R,diff} = [\epsilon_{HbO_2}(R)SO_2 + \epsilon_{Hb}(R)(1 - SO_2)](c_{tHb})\Delta d_R \tag{6}$$

이 때, 이 두 빛에 의한 흡광도 차이에 관한 식을 비(Ratio)로 구하면 다음과 같은 식이 된다.

$$Ratio = \frac{A_{IR,diff}}{A_{R,diff}}$$

그런데, 이 식의 우변은 알고 있는 파장의 빛을 조직에 쬐어서 구한 측정값($A = -\ln[T] = -\ln[I/I_0]$)이다. 그래서, 좌변의 비율 상수 Ratio은 측정할 때마다 계산하여 얻을 수 있는 값이 된다. 위 식에 식(5), 식(6)을 대입하면, 다음과 같다.

$$Ratio = \frac{[\epsilon_{HbO_2}(IR)SO_2 + \epsilon_{Hb}(IR)(1 - SO_2)](c_{tHb})\Delta d_{IR}}{[\epsilon_{HbO_2}(R)SO_2 + \epsilon_{Hb}(R)(1 - SO_2)](c_{tHb})\Delta d_R}$$

이 때, 혈액색소의 농도는 분자, 분모에 동시에 있으므로 삭제되고, 빛의 주행 거리 차이도 같을 것이므로 삭제된다. 그래서, 다음과 같은 식이 유도된다.

$$Ratio = \frac{[\epsilon_{HbO_2}(IR)SO_2 + \epsilon_{Hb}(IR)(1 - SO_2)]}{[\epsilon_{HbO_2}(R)SO_2 + \epsilon_{Hb}(R)(1 - SO_2)]}$$

상기 식에서 Ratio는 측정하여 구한 값이므로, 각 파장에 대한 Hb과 HbO₂의 빛 흡수 계수 ϵ 를 안다고 가정하면(가정 7), 미지수는 SO₂ 한 가지만 남으므로 SO₂를 구할 수 있게 된다. 그래서, SO₂에 관한 식으로 정리하면 다음과 같이 된다.

$$SO_2 = \frac{\epsilon_{Hb}(R) - \epsilon_{Hb}(IR) Ratio}{\epsilon_{Hb}(R) - \epsilon_{HbO_2}(R) + [\epsilon_{HbO_2}(IR) - \epsilon_{Hb}(IR)] Ratio} \tag{7}$$

위 식에서 Ratio는 흡광도를 측정하여 계산한 값이고, 나머지는 알려진 값이므로 SO₂를 추정할 수 있게 되어 모니터에 SO₂ 값이 나타나게 되는 것이다. 이상과 같이 맥박산소포화도 장치가 어떻게 산소와 결합된 혈액색소의 비율(SO₂)을 추정하는지 알아보았다. 하지만, 여기에는 많은 가정이 사용되고 있으므로 이를 숙지하여야 SO₂를 보다 적절히 해석할 수 있고, 나아가 진료에 있어서 정확한 판단을 내리는데 도움이 될 것이므로 사용된 가정들을 확인해 보도록 하겠다.

먼저, 가정 1에서 Beer-Lambert 법칙을 적용하면서 빛이 산란이나 반사되는 것이 없는 것으로 가정하였다. 하지만, 빛이 많이 반사될 수 있는 조건, 예를 들어, manicure를 손톱에 바른 여성 등에서 SO₂가 크게 잘못 추정될 수 있다.

또한, 식(7)에서 구한 이론적 SO_2 가 실제 값과 다른 내재적 원인 중의 하나가, 현실에서 반드시 존재하지만 없는 것으로 가정한 빛의 산란과 반사이다. 둘째로 조직 내에 혈색소만이 빛을 흡수하는 것을 가정하였다. 그래서, 사용하는 두 파장에서 각각 흡수도가 다른 혈색소가 아닌 어떤 물질이 혈액 내에 존재한다면 가정 2를 만족하지 못해 부정확한 추정치가 될 수 있다. 셋째 가정을 충족시키지 못하게 carboxyhemoglobin, methemoglobin 등이 존재한다면, 당연히 오차를 포함한 추정이 된다. 파장의 선택에 대한 네 번째 가정, 심장 기형이 있어 맥박 산소포화도가 낮은 환자의 추정치와 실제 값에 있어서 차이가 관찰되게 하는 원인이 된다. 이것은 선택한 파장이 해당 맥박산소포화도를 검출하는 데 특이적이지 못해서 생기는 결과로, 낮은 산소포화도는 다른 파장으로 검출하는 것이 연구되고 있다.²⁾ 심박동 주기상에서 빛의 흡광도 차이는 동맥혈관의 팽창, 회복이라는 다섯째 가정은, 정맥압파가 어느 정도 이상 상승하게 되면 만족하지 못하게 된다. 이것은, 정맥이 동맥보다 10배 정도 팽창성이 크기 때문에 생기는 현상으로, 조그마한 정맥압과 변화가 맥박산소포화도 측정기에서 사용하는 빛의 흡광도 파형을 변형시킬 수 있을 정도가 될 수 있다.^{3,4)} 동일한 기전으로 정맥압파로 인해 생긴 비특이적인 흡광도 상승이나, 움직임 등에 의해 생긴 비정상적으로 높거나 낮게 측정된 흡광도가 있을 때, 가장 높은 흡광도가 수축기에서 나온 것이고, 가장 낮은 흡광도가 이완기에서 나왔다는 여섯째 가정을 충족시키지 못하게 된다. 이럴 경우(움직임 등)에도 부적절한 맥박산소포화도 추정치를 보이게 된다.⁵⁾ 마지막으로, 각 파장에 대한 Hb과 HbO₂의 빛 흡수 계수를 안다는 가정은, 성인 혈색소의 빛 흡수 계수를 가지고 공식에 대입한다는 의미로, 신생아 때 가지고 있는 fetal hemoglobin이 존재할 때는 성립하지 않는다. 그래서, 산소포화도를 90% 정도로

유지하는 것이 마취의 중요 항목인 미숙 신생아 마취에 수술장에서 흔히 사용하는 맥박산소포화도 장치를 사용하면 fetal hemoglobin이 존재하므로 오차가 발생할 수 있다.

결론적으로, 마취과 의사가 많이 사용하는 맥박산소포화도 장치는 여러 가정에 입각하여 맥박산소포화도를 추정하는 알고리즘을 사용하고 있으므로, 가정을 충족시킬 수 없는 임상상황에서는 맥박산소포화도 추정치의 해석에 주의가 필요하다고 하겠다.

저자: 심지연 · 안원식*

울산대학교 의과대학 마취통증의학교실,

*서울대학교 의과대학 마취과학교실

서울대학교병원 마취통증의학과

서울시 종로구 연건동 28번지, 우편번호: 110-744

E-mail: aws@snu.ac.kr

참 고 문 헌

1. Webster JG: Design of pulse oximeters. 1st ed. London, Institute of Physics Publishing. 1997, pp 40-51.
2. Mannheimer PD, Casciani JR, Fein ME, Nierlich SL: Wavelength selection for low-saturation pulse oximetry. IEEE Trans Biomed Eng 1997; 44: 148-58.
3. Guyton AC, Hall JE: Medical physiology. 11th ed. Philadelphia, Elsevier Science Publishing Company Inc. 2006, pp 171-80.
4. Shelley KH, Dickstein M, Shulman SM: The detection of peripheral venous pulsation using the pulse oximeter as a plethysmograph. J Clin Monit 1993; 9: 283-7.
5. Sami HM, Kleinman BS, Lonchyna VA: Central venous pulsations associated with a falsely low oxygen saturation measured by pulse oximetry. J Clin Monit 1991; 7: 309-12.