선천성 청색증 심질환 환아에서 동맥혈-호기말 이산화탄소 분압차와 맥박 산소포화도와의 관계

동아대학교 의과대학 마취과학교실

진 영 준 · 정 찬 종 · 김 상 범

= Abstract =

The Relationship between PaCO_2 - P_{ETCO_2} Difference and SpO_2 in Patients with Congenital Cyanotic Heart Disease

Young Jhoon Chin, M.D., Chan Jong Chung, M.D. and Sang Bum Kim, M.D.

Department of Anesthesiology, College of Medicine, Dong-A University, Pusan, Korea

Background: In neonates and infants with congenital cyanotic heart disease, venous blood, rich in CO_2 and poor in O_2 , is mixed with pulmonary venous blood at left heart. As a consequence, any given degree of decreases in SpO_2 is accompanied by obligatory increase in PaCO_2 - P_{ETCO_2} difference. This study was designed to evaluate these relationship in 20 pediatric patients.

Methods: After endotracheal intubation with high dose fentanyl and pancuronium, P_{ETCO_2} was measured by capnometer (side stream, sample gas flow rate of 200 ml/min; sampling site at elbow connector area) and SpO_2 probe was attached at toe or finger. Observations were made 4 or 5 times before initiation of CPB. Ventilation was controlled by pressure type ventilator, partial rebreathing circuit at frequency of 25-35 breaths/min, an inspiratory time of 25% with an end-inspiratory pause of 10%, and peak airway pressure of 20 ± 2 cmH₂O.

Result: Mean values of PaCO_2 - P_{ETCO_2} difference were increased linearly with decreases in SpO_2 . The regression equation is mean (PaCO_2 - P_{ETCO_2}) (mmHg) = $23.9 - 0.22 \times \text{mean } \text{SpO}_2$ ($r = -0.51$, $p = 0.028$)

Conclusions: The relationship between PaCO_2 - P_{ETCO_2} was found to agree with that predicted by theory confirming that in congenital cyanotic heart patients, PaCO_2 increases by 2~5 mmHg for every 10% reduction in SpO_2 . This relationship may be useful when attempting to estimate PaCO_2 from P_{ETCO_2} in the management of congenital cyanotic heart patients. (Korean J Anesthesiol 1999; 36: 69~74)

Key Words: Heart: cyanotic congenital disease. Hemoglobin: Oxygen Saturation. Monitoring: carbon dioxide, end-tidal, pulse oximetry.

서 론

수술실 및 중환자실의 환자관리에서 호기말 이산

화탄소분압(P_{ETCO_2})의 측정은 비침습적으로 순간 순간의 동맥혈 이산화탄소분압(PaCO_2)을 지속적으로 추정할 수 있어 임상에 널리 이용되고 있다. 그러나 실제로 측정된 PaCO_2 와 P_{ETCO_2} 의 차이, 즉 PaCO_2 - P_{ETCO_2} 는 여러 가지 인자에 의해 영향을 받는다. 즉 환기-관류의 부적합, 기관내삽관, 공기, 지방, 혈전 등에 의한 폐색전, 우-좌 단락 등에 의한 폐관류 저하, 호흡 양상, 마취기의 가스유량, 호기말 이산화탄

논문접수일 : 1998년 7월 13일

책임저자 : 진영준, 부산시 서구 동대신동 3-1

동아의료원 마취과학교실, 우편번호: 602-103

Tel: 051-240-5390, Fax: 051-247-7819

소 측정기계에 따라 다르다. 이러한 경우에는 흔히 환자상태의 이상으로 생각하기 보다 기계의 이상으로 오판 하기 쉽다.¹⁻³⁾

특히 신생아 및 유소아는 호흡횟수가 빠르며 마취시 다량의 가스가 필요하고, 일회호흡량에 비해 많은 표본 가스량이 필요하며, 기관내 도관의 가스 채취부위(원위부 및 근위부)에 따라 PaCO_2 - PETCO_2 가 변화하여 성인에서보다 정확하게 측정하기 어렵다.⁴⁻⁵⁾ 그러나 이러한 변화요인이 일정화되었을 때는 정상 및 비정색증 선천성 심질환을 가진 신생아 및 유소아에게서 PETCO_2 는 PaCO_2 에 비례하며, PaCO_2 - PETCO_2 의 평균치는 -5.3 에서 $+5.3$ mmHg로 알려져 있다.⁷⁻⁹⁾

그러나 우좌단락이 있는 청색증 선천성 심질환의 환자에서는 산소가 적고 탄산가스가 풍부한 정맥혈이 폐환류를 거친 혈액과 좌심에서 혼합되며, 결과적으로 맥박 산소포화도(SpO_2)가 감소될수록 PaCO_2 - PETCO_2 차이는 증가되는 현상이 발생하므로 이러한 역비례 관계의 정도를 조사하기 위해 20명의 환자에서 임상시험을 시행하였고 이론적 고찰과 비교 분석하였다.

대상 및 방법

1997년 1월부터 1998년 3월까지 본 대학교 부속 병원에서 선천성 심장 질환으로 심장수술을 시행받은 환자중 술전 심초음파 혹은 심도자술 시행결과 우좌단락 혹은 복합우좌 및 좌우단락이 증명된 생후 2일부터 36개월까지의 환자 20명을 관찰대상으로 하였다.

이들은 술전에 보호자 및 외과주치의들의 동의를 사전에 얻었으며 환자의 연령분포는 평균 9.5개월이었고 질병별 분포는 팔로써사증이 11례로 가장 많았고 그외에 대혈관전이(TGA)가 4례였으며 술전 평균 혈색소 농도는 14.3 gm/dl이었다(Table 1).

예정 수술 환아는 술전 4시간부터 절대금식을 시행하였고 정맥주사로 D_5 1 : 4 N/S용액 400 ml에 10% dextrose 100 ml를 혼합하여 체중 10 Kg 미만은 4 ml/kg/hr, 10~20 kg은 $[40 + (\text{kg} - 10) \cdot 2]$ ml/hr의 속도로 정맥점적하여 저혈당을 방지하였다.

마취전 투약은 3개월 미만은 생략하였고, 환자의 상태에 따라 glycopyrrolate 0.004 mg/kg, morphine 0.1

mg/kg를 술전 30분에 근주하였다. 마취유도제로 ketamine 2 mg/kg를 정주하였고 100% 산소를 투여하면서 심전도, 식도 및 피부체온계, SpO_2 probe를 부착하였다. Fentanyl 10 $\mu\text{g/kg}$ 와 pancuronium 0.2 mg/kg를 정주하여 기관내삽관을 시행한 뒤, 좌측 혹은 우측 요골 동맥을 천자하여 요골동맥압 측정 및 동맥혈 채취가 가능토록 하였고 새골하 중심정맥로를 확보하였다. 모든 환아에서 기낭이 없는 튜브를 사용했고 직경은 환아의 소지원위지 관절(DIP joint)과 같은 크기로 20 cmH₂O 양압에서 약간의 가스유출이 있도록 하였다. PETCO_2 의 측정을 위해 혼합가스 채취장소는 “ γ ”자 연결관 근위부에서 가스채취속도가 200 ml/min인 측부채취방식(side stream)을 사용하였다. PETCO_2 는 사용전에 보정한 적외선 이산화탄소 분석기(Datex Capnomac Ultima, Helsinki, Finland)에 부착하여 지속적 관찰하여 이산화탄소 파형과 분압이 일정할 때의 값으로 하였고 그때의 SpO_2 를 환자 감시장치(Hewlett Packard, Model 54S, USA)로 동시 측정하였다.

인공환기기는 압력식 부분적 재호흡회로인 Dräger Babylog N(Drägerwerk AG, Lübeck, Germany)을 사용하여 일회호흡량은 최고기도압력 20 ± 2 cmH₂O 범위가 되게 조정하였고 호흡횟수 25~35회/분, 흡기 시간 25%, 흡기말유지 10% 되게 100% 산소와 필요하면 isoflurane 0.5 vol%로 환기시켰다. 체외순환전까지 PETCO_2 와 SpO_2 를 간헐적으로 4~5회 측정하였으며 이때 동일회수로 동맥혈을 채취하여 3분 이내에 얻어진 동맥혈 혈액가스 결과를 PaCO_2 로 하였다.

모든 결과는 평균 $\pm$ 표준편차로 표시하였으며, 이들의 상관관계는 단순회귀 직선방정식, 선상최소자승법으로 나타내었고, $p < 0.05$ 일 때를 통계적으로 유의한 것으로 간주하였다.

결 과

총 20명의 우좌단락이 있는 선천성 청색증 심질환 환아에서 평균 SpO_2 가 감소할수록 평균 PaCO_2 - PETCO_2 차이는 커짐을 보였다(Table 1).

평균 PaCO_2 - PETCO_2 차이와 평균 SpO_2 사이의 상관관계수 r 은 -0.70 이었으며 회귀방정식은 $\text{mean}(\text{PaCO}_2 - \text{PETCO}_2)(\text{mmHg}) = 55.6 - 0.57 \pm \text{mean } \text{SpO}_2(P=0.0007)$ 이었다(Fig. 1).

Table 1. Patients Data

Patient No	Age	Diagnosis	Mean SpO ₂ (%)	Mean(Pa-ETCO ₂) (mmHg)	Hb (gm/dl)
1	23 mo	TOF	91.6±8.7	1.6±1.1	14.5
2	3 y	TOF	98.0±2.8	2.5±3.2	14.0
3	2 mo	TOF	95.7±3.5	-1.4±1.0	12.6
4	2 y	TOF	93.7±2.5	1.2±2.0	16.1
5	11 mo	TOF	97.0±3.0	0.2±0.8	13.0
6	8 d	TOF	94.0±5.3	7.6±0.9	12.3
7	9 mo	TOF	85.3±8.3	4.7±1.5	14.3
8	10 mo	TOF	92.0±6.9	4.1±1.7	15.3
9	16 mo	TOF	85.0±9.6	2.2±1.7	15.9
10	10 mo	TOF	74.7±6.8	4.8±2.4	18.7
11	2 d	TOF	86.3±5.7	9.0±1.4	15.4
12	8 mo	TOF	73.3±5.7	8.6±1.2	16.4
13	26 d	TGA	72.0±19.3	7.0±2.1	15.2
14	13 d	TGA	78.3±3.2	9.6±2.3	10.3
15	10 d	TGA	90.3±6.7	8.1±0.9	13.4
16	9 d	TGA	77.0±7.0	22.9±7.7	12.7
17	36 d	PA	88.3±6.4	10.0±8.0	12.4
18	28 d	PA	93.7±2.5	1.2±2.0	16.1
19	3 y	TA	82.3±5.9	3.0±3.0	15.7
20	35 d	DORV	64.0±17.5	31.5±11.9	13.1

Values are expressed as mean ± SD. TOF; tetralogy of Fallot, TGA; transposition of great arteries, PA; pulmonary atresia, TA; tricuspid atresia, DORV; double outlet of right ventricle

Fig. 1. Relationship between PaCO₂ - P_{ET}CO₂ difference and SpO₂ in cyanotic pediatric patients. The regression line shows co-relation between SpO₂ and PaCO₂ - P_{ET}CO₂ difference.

Fig. 2. Relationship between PaCO₂ - P_{ET}CO₂ difference and SpO₂ in cyanotic pediatric patients. The regression line shows co-relation between SpO₂ and PaCO₂ - P_{ET}CO₂ difference.

현저한 SpO_2 감소와 $PaCO_2 - P_{ET}CO_2$ 증가를 보인 2례를 제외한 상관계수 r 는 -0.51 이었으며 회귀방정식은 $mean(Pa - P_{ET}CO_2)(mmHg) = 23.9 - 0.22 \pm mean SpO_2(P=0.028)$ 이었다(Fig. 2).

고 찰

폐동맥혈과 평형상태를 이룬 폐포가스를 직접적으로 얻기 힘들므로 흔히 간편하게 적외선 이산화탄소 분석의 원리를 적용한 $P_{ET}CO_2$ 로 $PaCO_2$ 를 추정하고 있으나 여기에는 몇가지 문제점이 있다. 먼저 소아에서는 일회 호흡량, 호흡회수, 가스유량 등의 환기법이 성인과 다르며,⁴⁾ 기관내 튜브가 기낭의 유무에 따라 $P_{ET}CO_2$ 가 차이가 날 수 있으며,⁵⁾ $P_{ET}CO_2$ 측정기의 표본가스 채취방법(main stream 혹은 side stream), 채취속도(sampling gas rate), 표본채취 튜브의 길이 및 직경, 호흡회로내의 채취장소(기관내 튜브의 근위부 및 원위부), 사용호흡회로(부분 재호흡 혹은 반폐쇄식 순환회로)에 따라라도 차이가 난다. 본 연구에서는 모든 환아에게 동일한 조건하에서 조사하였으므로 각 환아간에 큰 차이는 없을 것으로 생각되어진다.

정상인 및 비청색증 선천성 심질환 환아에서는 $P_{ET}CO_2$ 는 $PaCO_2$ 와 밀접하게 연관되나 청색증 선천성 심질환 환아에서는 생리적 사상은 저평가되고 폐포 환기는 과평가되어 환기/관류 비가 높을수록 $PaCO_2 - P_{ET}CO_2$ 차이는 커진다고 한다.⁹⁾ 특히 우좌 단락이 있는 환아에서 단락이 심할수록 환기/관류비가 커지는 사강효과가 증가하며 이때 폐포내 가스와의 평형을 이룬 $P_{ET}CO_2$ 는 감소할 것이며, 또한 탄산가스가 풍부하고 산소가 감소된 정맥혈이 폐관류를 거친 정맥혈과 좌심에서 혼합되므로 요골동맥에서 채취한 혈액가스 표본은 $PaCO_2$ 는 증가하고 SpO_2 는 감소된 혈액이다.^{10,11)}

이런 관점에서 Shapiro 등,¹²⁾ Nunn,¹³⁾ Fletcher에¹⁴⁾ 의해 $PaCO_2 - P_{ET}CO_2$ 차이의 증가와 SpO_2 치 감소간의 관계를 이론적으로 고찰하면 다음과 같다.

Cc' , Ca , C_v 를 각각 폐말단모세혈액 산소함량, 동맥혈 산소함량, 혼합정맥혈 산소함량이라 하면

섀트 방정식

$$\frac{Q_s}{Q_t} = \frac{Cc'o_2 - CaO_2}{Cc'o_2 - C_vO_2}$$

에서 분모를 고쳐쓰면

$$\frac{Q_s}{Q_t} = \frac{Cc'o_2 - CaO_2}{(Cc'o_2 - CaO_2) + (CaO_2 - C_vO_2)}$$

이것을 정리하면

$$\frac{Q_s}{Q_t} (CaO_2 - C_vO_2) = (Cc'o_2 - CaO_2) \left(1 - \frac{Q_s}{Q_t}\right) \quad (1)$$

탄산가스에도 동일하게 적용하면

$$\frac{Q_s}{Q_t} (CaCO_2 - C_vCO_2) = (Cc'CO_2 - CaCO_2) \left(1 - \frac{Q_s}{Q_t}\right) \quad (2)$$

(2)를 (1)로 나누면

$$\frac{C_vCO_2 - CaCO_2}{CaO_2 - C_vO_2} = \frac{CaCO_2 - Cc'CO_2}{Cc'o_2 - CaO_2} \quad (3)$$

(3)의 전항은 호흡계수 R 이며, CO_2 해리곡선상에서¹³⁾ 혈액의 CO_2 함량은 CO_2 분압과 비례(비례상수, 기울기 K , 약 $8.3 \text{ ml l}^{-1} \text{ mmHg}^{-1}$)하므로, 폐말단모세혈액 탄산가스함량은 $P_{ET}CO_2$ 와 동일하며 폐말단모세혈관의 혈액은 산소로 충분히 포화되었다고 가정하면 (3)은

$$R = K \cdot (PaCO_2 - P_{ET}CO_2) / [1.34 \pm Hb \pm (100 - SpO_2)] / 100 + \text{혈장용존산소차}$$

이고 혈장용존 산소차이는 적으므로 무시하고 단위를 정리 ($\times 100$) 하면

$$PaCO_2 - P_{ET}CO_2 = 1.31 \times R \times Hb \times (100 - SpO_2) / K$$

이다. 만일 $R=0.8$, Hb 15 gm/dl, SpO_2 97%이면, 계산 결과 $PaCO_2 - P_{ET}CO_2$ 는 5.7 mmHg가 된다. Fletcher

는¹⁴⁾ 다혈구증이 있는 청색증 환자에게 호흡계수가 0.8일때 SpO_2 가 10% 감소때마다 $PaCO_2 - P_{ET}CO_2$ 는 1~3 mmHg 증가한다고 하였다. 본 연구의 회귀방정식에 의하면 SpO_2 가 10% 감소때마다 $PaCO_2 - P_{ET}CO_2$ 는 약 5 mmHg 증가되어 Fletcher의 관찰과는 달랐으나, 정상보다 현저한 SpO_2 감소 및 $PaCO_2 - P_{ET}CO_2$ 증가가 있는 2례(NO 13,20, Table 1 참조)를 제외한 r 는 -0.51이었으며 회귀방정식은 $mean(Pa_{ET}CO_2)(mmHg) = 23.9 - 0.22 \times mean SpO_2(P=0.028)$ 로 (Fig. 2) 결과의 일치를 보았다.

Pulse oximetry측정에 있어서 본 연구의 환자들과 관련되어 HbF,¹⁵⁾ 낮은 SpO_2 ,¹⁶⁾ 빈혈, 저체온¹⁷⁾ 등이 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 신생아가 20명을 대상으로 하였는데 HbF의 LED(Light Emitting Diode) 흡수 특성은 성인과 동일하므로 측정에 영향이 없었을 것이나 SpO_2 70% 근처에서는 정확하지 않을 오류가 있을 수 있으며 빈혈이나 저체온이 발생한 환아는 없었다.

본 연구에서 $P_{ET}CO_2$ 측정의 몇 가지 취약점은 채취장소가 기관내 튜브의 원위부가 아닌 근위부였으며, 신선가스 유입량이 많았기 때문에 희석효과도 있었으며, 일회호흡량이 적고 호흡횟수가 빠른 신생아 및 유소아가 관찰대상인 점이다. 또한 채취방법도 mainstream이 아닌 sidestream방법이었고 채취속도도 비교적 빠른 200 ml/min로 신선가스의 유입도가 능하여 측정치의 정확도가 떨어질 수도 있었다. 특히 $P_{ET}CO_2$ 측정시 동일한 체중범위 및 심기형 환아에서 일정한 일회호흡량과 호흡횟수를 재호흡이 없는 회로에서 일정한 유량으로 용적조절 인공호흡기인 유아용 인공호흡기(Siemens-Elcoma Servo 900-C 혹은 Sechrist)를 사용하는 것이 바람직 할 것이다.³⁾ 환기/관류비율에 영향을 줄 수 있는 마취심도, 근이완 정도, 심박출량 감소, 폐유순도의 차이, 수술체위, 체온변화 등의 요소를 표준화 할 수 없는 문제점도 있었으므로 좀더 충분한 수의 환아를 대상으로 폐포상강 변화도 관찰할 수 있는 일회호흡점사법(single breath test)으로 실험하는 것이 정확도를 높일 수 있다.¹⁹⁾

이상의 관찰 및 고찰로서 결론적으로 선천성 청색증 심질환 환자에서 SpO_2 가 감소하는데 비례하여 $PaCO_2 - P_{ET}CO_2$ 차이가 커지며, 이들간의 상관관계는 $mean(Pa_{ET}CO_2)(mmHg) = 23.9 - 0.22 \times SpO_2$ 로 표

시되어질 수 있다.

참 고 문 헌

- Whitesell R, Asiddao C, Gollman D, Fablonski J: Relationship between arterial and peak expired carbon dioxide pressure during anesthesia and factors influencing the difference. *Anesth Analg* 1981; 60: 508-12.
- Raemer DB, Francis D, Philip JH, Gabel RA: Variation in P_{CO_2} between arterial blood and peak expired gas during anesthesia. *Anesth Analg* 1983; 62: 1065-9.
- Fletcher R, Jonson B: Dead space and the single breath test for carbon dioxide during anaesthesia and artificial ventilation: effects of tidal volume and frequency of respiration. *Br J Anaesth* 1984; 56: 109-19.
- 이태인, 신치만, 박주영: 소아에서 동맥혈 이산화탄소분압과 호기말 이산화탄소분압의 비교. *대한마취과학회지* 1991; 24: 490-5.
- 이혜원, 강포순, 임혜자, 채병구, 장성호, 신정순: 소아에서 호기말 탄산가스 분압측정시 소아용 end-tidal CO_2 uncuffed tracheal tube의 사용효과에 대한 관찰. *대한마취과학회지* 1991; 25: 664-8.
- 강봉진, 이관우, 이상철: 측정위치에 따른 호기말 이산화탄소분압치의 차이에 관한 연구. *대한마취과학회지* 1998; 34: 59-66.
- 함병문: 전신마취시 호기말 이산화탄소분압과 동맥혈 이산화탄소분압과의 관계. *대한마취과학회지* 1998; 21: 205-8.
- 이정례, 최영석, 신정순: 전신마취시 분시호흡량과 동맥혈 및 호기말 탄산가스 분압의 차이에 관한 연구. *대한마취과학회지* 1987; 20: 70-7.
- Lindahl SGE, Yates AP, Hatch DJ: Relationship between invasive and noninvasive measurements of gas exchange in anesthetized infants and children. *Anesthesiology* 1987; 66: 168-75.
- Beusch MW, Lenz G, Kottler B: Arterial to end-tidal CO_2 gradients in infants and children with cyanotic and acyanotic congenital heart disease during cardiac surgery. *J Cardiothoracic Anesth* 1990; 4: S120.
- Kaplan JA: Cardiac Anesthesia. 3rd ed. Philadelphia, WB Saunders CO. 1993, pp 1309, 1315.
- Shapiro BA, Kacmarek RM, Came RD, Peruzzi WT, Hauptman D: Clinical application of respiratory care. 4th ed. ST. Louis, Mosby-Year Book Inc. 1991, pp 242-6.
- Nunn JF: Applied respiratory physiology. 3rd ed. Boston, Butterworths. 1987, pp 212-3, 511.

14. Fletcher R: The relationship between the arterial to end-tidal P_{CO_2} difference and hemoglobin saturation in patients with congenital heart disease. *Anesthesiology* 1991; 75: 210-6.
 15. Polge JA, Raley DM: Effect of fetal hemoglobin on pulse oximetry. *J Perinatol* 1987; 7: 324-8.
 16. Severinghaus JW, Koh SO: Effect of anemia on pulse oximeter accuracy at low saturation. *J Clin Monit* 1990; 6: 85-8.
 17. Blitt CD, Hines RL: *Monitoring in anesthesia and critical care medicine*. 3rd. New York, Churchill Livingstone. 1995, pp 385-405.
 18. Fletcher R, Jonson B, Cumming G, Brew J: The concept of dead space with special reference to single breath test for carbon dioxide. *Br J Anaesth* 1981; 53: 77-87.
-