소아에서 선천성 심질환 수술시 청색증 동반 여부에 따른 동맥혈-호기말 이산화탄소 분압차의 변화

울산대학교 의과대학 마취과학교실

이영희 · 조명원 · 최인철 · 심지연

= Abstract =

Changes in Arterial to End Tidal CO₂ Difference during Pediatric Open Heart Surgery: Cyanotic vs Acyanotic Congenital Heart Diseases

Young-Hi Lee, M.D., Myung-Won Cho, M.D., In-Cheol Choi, M.D.
and Ji-Yeon Sim, M.D.

Department of Anesthesiology, College of Medicine, Ulsan University, Seoul, Korea

Background: The arterial to end-tidal carbon dioxide tension difference($P_{a-ET}CO_2$) can be increased in patients with congenital heart disease(CHD) and, therefore, end-tidal carbon dioxide tension($P_{ET}CO_2$) does not accurately approximate arterial carbon dioxide tension(P_aCO_2). The purpose of this study was to evaluate the stability of the $P_{a-ET}CO_2$ in pediatric patients with congenital heart disease undergoing open heart surgery.

Methods: Forty three children with CHD were studied: twenty two were acyanotic and twenty one were cyanotic. Simultaneous $P_{ET}CO_2$ and P_aCO_2 measurements, as well as pulse rate, blood pressure, pH and arterial oxygen tension(P_aO_2) were obtained for each patient during four intraoperative events: (1) after induction of anesthesia and before sternotomy, (2) after sternotomy and before cardiopulmonary bypass(CPB), (3) after weaning of CPB, and (4) after closure of sternotomy.

Results: The $P_{ET}CO_2$ of cyanotic group were lower than that of acyanotic group throughout operation period, and did not change significantly after CPB. Cyanotic children demonstrated a greater $P_{a-ET}CO_2$ difference before CPB as compared with acyanotic group. In acyanotic group, $P_{a-ET}CO_2$ difference increased significantly after CPB($p < 0.05$), whereas it remained unchanged in cyanotic group.

Conclusions: Since cyanotic children had higher $P_{a-ET}CO_2$ differences intraoperatively and acyanotic children showed an increase in $P_{a-ET}CO_2$ after CPB, the $P_{ET}CO_2$ cannot be the alternative value to estimate reliably the P_aCO_2 during open heart surgery of pediatric CHD. (Korean J Anesthesiol 1998; 35: 321 ~ 326)

Key Words: Anesthesia: cardiovascular; pediatric. Carbon dioxide: tension; end-tidal, arterial. Heart: congenital defects. Monitoring: blood gas; capnography.

논문접수일 : 1998년 3월 2일

책임저자 : 심지연, 서울시 송파구 풍납동 388-1, 울산대학교 의과대학 마취과학교실, 우편번호: 138-040, Tel: 224-3868, Fax: 470-1363

서 론

호기말 이산화탄소 분압(이하 $P_{ET}CO_2$)은 비침습적인 방법으로 측정되며 동맥혈 이산화탄소 분압(이하 P_aCO_2)을 반영하기에 기계호흡요법을 받는 환자의 감시에 흔히 사용된다. 그러나 수술 및 마취중 동맥혈-호기말 이산화탄소 분압차(이하 P_a-ETCO_2)는 각 개인마다 다르며 동일인에서도 변할 수 있다.

심폐질환이 없는 소아에서는 전신마취중 P_a-ETCO_2 는 4~5 mmHg 이하이며 $P_{ET}CO_2$ 는 P_aCO_2 를 잘 반영한다.^{1,2)} 그러나 선천성 심질환을 갖는 소아에서는 심기형의 형태에 따라 $P_{ET}CO_2$ 와 P_aCO_2 의 차이가 더 커지기도 하며 이 경우에는 P_a-ETCO_2 는 정상보다 크다고 할 수 있다.³⁾

이에 본 연구에서는 소아 선천성 심질환자의 개심술 마취중 나타나는 동맥혈-호기말 이산화탄소 분압차의 변화를 서로 다른 순환기전을 갖는 청색증형군과 비청색증형군으로 나누어 두 군간의 차이와 각 군에서의 시간대별 차이를 비교하고 이 분압차에 영향을 주는 요인들에 대하여 문헌을 통해 고찰하였다. 또한 소아 개심술 마취중 $P_{ET}CO_2$ 가 P_aCO_2 를 적절하게 반영하는 지표가 될 수 있는가를 평가하였다.

대상 및 방법

본원 흉부외과에 입원하여 개심술을 받는 43명의 소아 선천성 심질환자를 대상으로 하였으며 이들을 청색증형군($n=22$)과 비청색증형군($n=21$)으로 나누었다. 연령은 청색증형군보다 비청색증형군에서 더 많았고 헤모글로빈과 헤마토크리트는 청색증형군에서 더 높았다(Table 1). 마취전 투약은 5 kg 이하에서는 시행하지 않았고 그 이상의 환아에게는 chloral hydrate 30 mg/kg를 경구 투여하였다. 마취유도는 midazolam 0.1 mg/kg과 fentanyl 10 μ g/kg으로 하였고 vecuronium 0.1 mg/kg을 투여한 후 기관내 삽관을 하였다. 마취유지는 fentanyl을 간헐적으로 정주하였고 1.5 vol% 이하의 isoflurane을 임상적 요구에 따라 추가 사용하였다.

Ohmeda modulus II(BOC health care, USA) 마취기를 사용하여 P_aCO_2 가 30~35 mmHg를 유지하도록

Table 1. Patients Characteristics

	Cyanotic($n=22$)	Acyanotic($n=21$)
Age(months)	9.9 $\pm$ 13.9	15.7 $\pm$ 14.9
Body Weight(kg)	7.2 $\pm$ 5.4	8.9 $\pm$ 4.5
Hb(g/dL)	14.4 $\pm$ 2.8	11.5 $\pm$ 1.5
Hct(%)	43.3 $\pm$ 8.0	34.3 $\pm$ 4.2

Data are mean $\pm$ S.D.

일회 환기량은 체중당 약 10 mL 정도로 하였고 호흡수는 분당 20~25회, 최대흡기압은 20~25 mmHg 정도에서 조절하였다. 흡입산소농도는 비청색증형환아에서는 의료용공기를 이용하여 50%로 유지하였고 청색증형환아에서는 산소포화도에 따라 50~100% 사이에서 조절하였다.

직접동맥압과 중심정맥압을 지속적으로 감시하였고, 심전도, 말초동맥 산소포화도, 직장과 식도 체온, 요량 등을 감시하였다. $P_{ET}CO_2$ 의 측정은 Capnomac (Datex, Finland)을 사용하였으며, calibration gas(Quick calibration gas, Datex, Finland)를 이용해 마취전 미리 보정을 시행하였다. P_aCO_2 측정은 동맥혈 가스 분석기(CIVA coming, U.S.A.)를 사용하였다. 동맥혈 채취는 마취유도후 흉골 개방전, 흉골 개방후 심폐우회로술(이하 CPB) 시작전, CPB 이탈 이후, 그리고 흉골 폐쇄 이후에 각각(총4회) 시행하였다.

통계분석은 순위에 의한 반복측정 분산분석법(repeated measures analysis of variance)을 이용하여 군 내의 시간대별 변화를 비교하였고, Student *t*-test를 시행하여 양 군간의 동시간대별 변화를 비교하였다. 모든 측정치는 평균 $\pm$ 표준편차로 표시하였고 유의수준은 $p<0.05$ 로 하였다.

결 과

진단명은 Table 2와 같았다. 심박동수와 혈압은 양 군에서 시간대별로 유의한 변화가 없었으며 군간에 차이도 없었다. 동맥혈 산도는 양 군 모두 실험기간중 변화가 없었고 군간에 차이도 없었다.

P_aO_2 는 비청색증형군에서는 시간대별로 유의한 변화가 없었으나 청색증형군에서는 흉골개방 이전에 비하여 CPB 이후에 증가하여($p<0.05$) 흉골폐쇄후까

지 계속되었다. 양 군간에는 CPB 직후를 제외하고 각 시간대마다 유의한 차이를 보였다(Fig. 1).

P_aCO_2 는 비청색증형군에서 CPB 이탈직후 흉골개방 이전에 비하여 유의하게 증가하였으나 흉골폐쇄 후에는 다시 감소하였고 청색증형군에서는 CPB 이탈이후 감소하였으나 통계적 유의성은 없었다. 양 군간에는 CPB 이전에는 청색증형군이 유의하게 높았으나 CPB 이탈이후에는 차이가 없었다(Fig. 2).

$P_{ET}CO_2$ 는 양 군 모두에서 CPB 후로 변화가 없었으나 청색증형군에서 비청색증형군에 비하여 모든

시간대에서 유의하게 낮았다(Fig. 3).

$P_{a,ET}CO_2$ 는 비청색증형군에서 CPB 이후의 값이 흉골개방전과 비교하여 유의하게 커져서 흉골폐쇄 이후까지 지속되었다. 청색증형군에서는 CPB 이후에도 분압차는 변화를 보이지 않고 유지되었다. 흉골개방전과 CPB 이전에는 청색증형군에서 비청색증형군에 비해 더 컸으나($p < 0.05$) CPB 이후에는 양 군간에 차이가 없었다(Fig. 4).

Table 2. Distribution of Congenital Heart Diseases

Group	Diagnosis	Number of patients
Cyanotic (n=22)	Tetralogy of Fallot	12
	Pulmonary Atresia	5
	TAPVR	3
	Transposition of Great Arteries	2
Acyanotic (n=21)	Ventricular Septal Defect	16
	Atrial Septal Defect	3
	C-AVSD	2

TAPVR: total anomalous pulmonary venous return.
C-AVSD: complete atrioventricular septal defect.

Fig. 1. The changes of arterial oxygen tension (PaO_2). The PaO_2 increased significantly after CPB in cyanotic group ($p < 0.05$). * $p < 0.05$ compared with before sternotomy, # $p < 0.05$ compared with acyanotic group.

Fig. 2. The changes of arterial carbon dioxide tension ($PaCO_2$). The $PaCO_2$ increased significantly after CPB, but decreased after sternal closure in acyanotic group. There were significant differences of $PaCO_2$ between cyanotic and acyanotic groups before but not after CPB. * $p < 0.05$ compared with before sternotomy, # $p < 0.05$ compared with acyanotic group.

Fig. 3. The changes of end-tidal carbon dioxide tension ($P_{ET}CO_2$). The $P_{ET}CO_2$ of cyanotic group were significantly lower than that of acyanotic group throughout the operation period. * $p < 0.05$ compared with before sternotomy, # $p < 0.05$ compared with acyanotic group.

Fig. 4. The changes of differences of arterial-end tidal carbon dioxide tension ($dP_{A-ET}CO_2$). The $dP_{A-ET}CO_2$ increased after cardiopulmonary bypass in acyanotic group ($p < 0.05$), but remained unchanged in cyanotic group. There were significant differences of $dP_{A-ET}CO_2$ between cyanotic and acyanotic groups before but not after CPB. * $p < 0.05$ compared with before sternotomy, # $p < 0.05$ compared with acyanotic group.

고 찰

심장내 우-좌 단락이 있을 경우 단락을 통해 이산화탄소 분압이 높은 정맥혈액이 동맥계로 직접 들어가므로 동맥혈 이산화탄소분압이 폐말초모세혈관의 이산화탄소분압보다 더 높게 상승된다. 아울러 우심장으로 부터 배출되는 혈액량의 대부분이 우-좌 단락을 통해 좌측 심장으로 직접 흘러들어가므로 폐실질 중에서 관류가 되지 않는 부분 즉, 폐포사강이 증가하게 된다. 심장내 우-좌 단락의 이 두 가지 효과는 서로 상승적으로 작용하여 $P_{A-ET}CO_2$ 를 증가시킨다. 그러나 심실중격결손증(VSD)이나 심방중격결손증(ASD)과 같은 심장내 좌-우 단락은 폐혈류량을 증가시키기에 폐포사강을 증가시키는 효과는 적어서 이러한 선천성 심질환아에서는 $P_{A-ET}CO_2$ 는 작고 정상 소아와 거의 유사하다.⁹⁾

결국 $P_{A-ET}CO_2$ 의 크기는 세가지 요인에 의해서 좌우된다고 할 수 있다. 즉, 첫째, 정맥 순환에서 동맥 순환으로 가는 단락 혈류량, 둘째, 폐의 환기-관류비 즉 폐포 사강의 비율, 셋째, 이산화탄소 확산능 등이다.⁵⁾ Yates등은⁶⁾ 개심술을 받는 선천성 심질환아를 대상으로 한 연구에서 마취 유도후 흉골개방전의 시점에서 P_aCO_2 는 청색증형군과 비청색증형군에서 유사했으나 청색증형군에서 $P_{A-ET}CO_2$ 가 더 컸다

고 하였다. 또한 청색증형군에서 계산된 이산화탄소의 배출량과 폐포환기량이 낮았는데 이는 사망환기/일회환기량 비율(이하 V_D/V_T)이 높다는 결과가 나타나 주는 바와 같이 환기 효율성의 감소에 의해 이산화탄소 배출이 감소하는 것이며 그 원인은 낮은 폐관류량에 의해 가스 교환에 장애가 생기기 때문이라고 하였다. 이는 본 연구와도 일치하는 결과로서 CPB 이전 청색증형군에서 $dP_{A-ET}CO_2$ 가 더 큰 것을 알 수 있다. 단락이 $P_{A-ET}CO_2$ 에 미치는 영향은 정상인에서는 V_D/V_T 의 영향에 비해서 더 경미한데 그 이유는 혼합 정맥혈과 동맥혈의 탄산가스 분압 차이가 상대적으로 적기 때문이다. 그러나 단락이 큰 경우에는 청색증형 심질환에서 보여지는 것처럼 그 영향도 역시 커진다. 한편, 탄산가스는 체액에 상대적으로 잘 용해되므로 CO_2 의 확산능의 영향은 중요하지 않다. 따라서 청색증형 선천성 심질환에서 $P_{A-ET}CO_2$ 가 큰 것은 폐포 사강이 더 크고 심장내 우-좌 단락이 있기 때문이라고 할 수 있다.⁷⁾

흉골개방 이후 흉골개방전에 비하여 비청색증형군과 청색증형군 모두 $P_{A-ET}CO_2$ 의 유의한 변화는 없었다. 관상동맥 우회로술을 받는 성인에서와⁸⁾ ASD나 VSD 교정수술을 받는 환아를⁹⁾ 대상으로 한 연구들에서도 이와 유사한 결과를 보였다. 흉막의 개방은 폐상부의 부피를 감소시키는데 이는 폐포 사강은 증가시키면서 기도 사강은 감소시키게 되므로 결과적으로는 생리적 사강은 변화시키지 않는다.¹⁰⁾ 이러한 변화는 $P_{A-ET}CO_2$ 를 증가시키고 P_aO_2 를 약간 감소시키나 수술중 폐를 누르는 등의 조작이 관류와 환기를 모두 감소시킨다면 $P_{A-ET}CO_2$ 는 영향을 받지 않게 된다.¹¹⁾

CPB 이후 청색증형군에서 P_aCO_2 는 감소되었으나 $P_{A-ET}CO_2$ 는 마취 유도 직후의 값과 유사하였다. 이와 같은 결과는 청색증형 심기형의 외과적 교정에 의해서 심장내 우-좌 단락은 해소가 되었으나 CPB에 의해 폐내 단락이 생겼기 때문이라고 할 수 있다. CPB 이후에 폐유순도는 감소하고 폐쇄 용량(closing capacity)은 기능적 잔기량(functional residual capacity)을 초과한다. 따라서 호기말에 기도 폐쇄가 빨리 일어나므로 폐의 일부분이 관류는 되나 환기가 되지 않는 폐 단락이 생기게 된다.¹²⁾ 호기말 이산화탄소 분압이 $P_{A-ET}CO_2$ 에 미치는 영향도 고려를 해야하는데 이는 두 군 모두에 영향을 미치는 요소다. 본 연

구에서는 기관내 튜브의 마취기쪽 끝에서 측류(side stream)를 채취하여 분석하였다. 12 kg 이하의 환아에서는 기관내 튜브의 화자쪽 끝에서 가스를 채취할 때 보다 더 정확한 값을 얻을 수 있다.¹³⁾ 또한, 측류 이산화탄소측정기는 가스 채취 부위와 측정기 사이에 수증기가 많이 생길 수 있고 가스 채취 시각과 측정시각의 간격이 있으며 가스 채취 속도가 호기말 이산화탄소 분압의 정확성을 방해할 수가 있다.¹⁴⁾

CPB 이후에 비청색증형군에서는 $P_{a-ET}CO_2$ 가 CPB 이전의 값에 비해서 유의하게 증가하였다. 지금까지 비청색증형군에서 교정 수술과 CPB 이후에 가스 교환이 갑자기 변화하는 것에 대한 명확한 설명은 없다. 단지 몇가지 인자들을 추측할 수가 있는데 폐관류량의 변화가 가장 중요한 것으로 알려져 있다. VSD와 같은 좌-우 단락이 큰 경우에는 증가된 폐혈류량은 전단 압력(shear stress)과 폐동맥의 내강 압력을 증가시킨다. 정상적으로 배열되어 있는 폐동맥의 내피 세포는 혈관의 긴장도와 대사의 활성도를 조절하는 역할을 하는 것으로서 상승된 압력과 전단력(shear force)의 증가로 인해 분열되고 팽창되며 정상적인 배열이 깨지게 된다. 손상된 내피 세포는 단백분해 효소를 분비하고 혈관 활성 물질의 국소적 분비를 자극한다. 분비된 대사 산물은 분해되어 폐동맥의 평활근층에 파고들어 elastin을 분해시키고 평활근의 발달을 자극한다. 이 과정은 폐혈관의 유순도를 변화시키는 중요한 원인이 된다.¹⁵⁾ ASD 환아에서는 보통 폐혈류는 증가되어 있으나 소아기 동안에는 폐동맥압은 상승되어 있지 않다. Fletcher등은⁴⁾ ASD 환아에서도 CPB 이후 $P_{a-ET}CO_2$ 증가가 항상 나타나기 때문에 이러한 변화의 일차적인 원인은 폐혈류량의 감소에 있다고 하였다. Yates등은⁶⁾ 폐 혈류가 증가되어 있는 비청색증형 선천성 심질환아에서 CPB 직후 $P_{a-ET}CO_2$ 가 크게 증가하는 것은 수술적 교정으로 인해 폐관류와 폐동맥, 세동맥의 충만정도가 극적으로 변화하기 때문이라고 하였다. 즉 폐동맥계의 혈류가 줄어들므로써 비후된 동맥의 긴장도가 변화되어 폐동맥 수축정도가 증가하고 폐관류는 더욱 감소하여 폐의 환기-관류 불균형이 증가하게 된다고 하였다. 본 연구에서 비청색증형군의 $P_{a-ET}CO_2$ 는 흉골폐쇄 이후 어느 정도 감소하는 경향을 보이나 CPB 이전과는 계속 큰 차

이를 유지하였다. 그러나 이러한 사상의 증가와 가스 교환의 감소가 수술후 얼마나 지속되는지는 알려져 있지 않다.

결론적으로 비청색증형 선천성 심질환아에서 개심술 마취중 마취유도후부터 CPB 이전까지는 $P_{a-ET}CO_2$ 가 정상 소아와 유사하게 크지 않으므로 $P_{ET}CO_2$ 감시는 P_aCO_2 를 평가하기에 유용한 방법이 될 수 있겠다. 그러나 CPB 이후 좌-우 단락의 외과적 교정과 CPB 자체의 폐혈류 및 폐수분 증가상황에 대하여 폐혈관계의 적응 부족으로 폐 환기-관류 불균형이 유발되고 $P_{a-ET}CO_2$ 는 커지게 된다. 따라서 CPB 이후에는 $P_{ET}CO_2$ 는 P_aCO_2 를 대변하는 값이 되지 못한다. 청색증형군에 있어서는 CPB 이전에는 생리적 사강과 우-좌 단락에 의한 정맥혈과 동맥혈의 혼합으로 인해서 $P_{a-ET}CO_2$ 가 크고 수술중의 외과적 자극과 CPB에 의한 영향으로 인해 계속 그 값에 변화가 있으므로 수술중 $P_{ET}CO_2$ 로 P_aCO_2 를 직접적으로 평가하기에는 정확성에 문제가 있는 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

1. Bissonnet B, Lerman J: Single breath end-tidal CO_2 estimate of arterial PCO_2 in infants and children. *Can J Anaesth* 1989; 36: 110-2.
2. 이상철, 조명원: 전신마취시 소아에서 호기말 이산화탄소분압과 동맥혈 이산화탄소분압에 관한 연구. *대한마취과학회지* 1989; 22: 521-4.
3. Fletcher R: Invasive and noninvasive measurement of the respiratory deadspace in anesthetized children with cardiac disease. *Anesth Analg* 1988; 67: 442-7.
4. Fletcher R: The arterial-end-tidal CO_2 difference during cardiothoracic surgery. *J Cardiothorac Anesth* 1990; 4: 105-17.
5. Whipp BJ, Wasserman K: Alveolar-arterial gas tension difference during graded exercise. *J Appl Physiol* 1969; 27: 361-5.
6. Yates AP, Lindahl SGE, Hatch DJ: Pulmonary ventilation and gas exchange before and after correction of congenital cardiac malformations. *Br J Anaesth* 1987; 59: 170-8.
7. Burrows FA: Physiologic dead space, venous admixture and the arterial to end-tidal carbon dioxide difference in infants and children undergoing cardiac surgery. *Anesthesiology* 1989; 70: 219-25.
8. Fletcher R, Veintemilla F: Changes in the arterial to

- end-tidal PCO_2 difference during coronary artery bypass grafting. *Acta Anaesthesiol Scand* 1989; 33: 656-9.
 9. Fletcher R, Niklason L, Drefeldt B: Gas exchange during controlled ventilation in children with normal and abnormal pulmonary circulation: a study using the single breath test for carbon dioxide. *Anesth Analg* 1986; 65: 642-52.
 10. Fletcher R: Gas exchange during thoracotomy in children. A study using the single-breath test for CO_2 . *Acta Anaesth Scand* 1987; 31: 391-6.
 11. Larsson A, Jonmarker C, Jögi P, Werner O: Ventilatory consequences of the lateral position and thoracotomy in children. *Can J Anaesth* 1987; 34: 141-5.
 12. Estafanous FG, Barash PG, Reves JG: *Cardiac anesthesia*, Philadelphia, J.B. Lippincott Co. 1994, pp479.
 13. Gregory GA: *Pediatric anesthesia*, 3rd ed. New York, Churchill Livingstone Inc. 1994, pp272.
 14. 대한 마취과 학회 교과서 편집위원회: 마취과학, 제 3판. 서울, 여문각. 1994, pp69.
 15. Estafanous FG, Barash PG, Reves JG: *Cardiac anesthesia*, Philadelphia, J.B. Lippincott Co. 1994, pp462.
-