소아에서 Mapleson D 회로 사용시 필요한 Fresh Gas Flow의 적정 유량

영남대학교 의과대학 마취과학고실

서일숙 · 광민규 · 구본업 · 김흥대

- Abstract -

The Appropriate Inflow Rates of Fresh Anesthetic Gas in the Pediatric General Anesthesia with Mapleson D-circuit

Il Sook Seo, M.D., Min Kyu Kwak, M.D., Bon Up Koo, M.D. and Heung Dae Kim, M.D.

Department of Anesthesiology, College of Medicine, Yeungnam University, Daegu, Korea

Background: During pediatric general anesthesia with Mapleson D-circuit, we used large amount of FGF(fresh gas flow) for avoidance of rebreathing of expired gas but low FGF are employed, the amount of anesthetic consumption and air contamination can be reduced. The aim of this study was to evaluate the fact that FGF of 220 ml/kg/min is clinically acceptable.

Methods: We selected sixty children weighing ≤ 20 kg who were scheduled for inguinal hernia repair under general anesthesia. The study was performed by 2 steps; In the step 1, the patients were divided into two groups according to weight(less than or greater than 8 kg) and end-tidal P_{CO_2} were compared with simultaneous arterial P_{CO_2} measurements. In the step 2, the patients were divided into two groups according to FGF(2MV or 220 ml/kg) and arterial P_{CO_2} , end tidal P_{CO_2} and P_{minCO_2} (minimum inspired P_{CO_2}) were measured.

Results: In the step 1 study, arterial P_{CO_2} was significantly higher than end-tidal P_{CO_2} in the group 1 and there was slight difference in arterial P_{CO_2} and end-tidal P_{CO_2} in the group 2. In the step 2 study, $PaCO_2$, P_{etCO_2} , P_{minCO_2} were significantly increased in the group 3 than group 2 but there were no clinical hypoxemia in all patients.

Conclusions: We consider that FGF of 220 ml/kg/min is appropriate during controlled ventilation with Mapleson D circuit in children weighing ≥ 8 kg because of economic and ecological advantages. Also, we consider FGF can be reduced in children weighing < 8 kg under accurate respiratory gas monitoring. (Korean J Anesthesiol 1997; 32: 397~402)

Key Words: Anesthesia: pediatric; fresh gas flow rate. Breathing circuit: mapleson D system. Carbon dioxide: arterial; end-tidal.

서 론

비교적 근년에 고가인 흡입 마취제가 등장하고 흡입 마취제가 온실 효과가 있으며 오존층을 파괴하는 것으로 알려짐에 따라^{1,2)} 경제성 및 환경 보존 측면에서 성인 환자의 전신 마취 유지 동안 저유량 법에 대한 관심이 높아지고 있다³⁻⁵⁾.

전통적으로 소아 환자의 전신 마취동안 많이 사용되는 호흡 회로에서는 호기 가스의 재호흡을 방지하기 위하여 높은 유량을 사용하여 왔으나 통상 적용하는 조절 호흡 방법으로는 혈중 이산화탄소치가 너무 낮게 유지되는 경향이 있으므로 근년에는 신선 공급 가스의 유량을 낮추어 호기 가스의 일부를 재호흡시키므로써 혈중 이산화탄소치를 정상 범위로 유지시키는 것이 바람직하다고 하여 이론적인 최소 권장 유량도 다양하게 제시되고 있다.

이에 저자는 소아 환자에서 Mapleson D 회로를 사용하여 조절 호흡을 시킬 때 공급 가스의 유량을 어느 정도로 낮추어도 임상적으로 위험성이 없는지 알아 보기 위하여 예비 단계로 대상 환자에서 혈중 이산화탄소치를 측정하여 그 때의 호기말 이산화탄소치와의 차이를 구하고 비교적 차이가 적어 호기말 이산화탄소치로써 혈중 이산화탄소치를 가늠할 수 있는 체중군을 정한 후 그 체중군에 속하는 환아를 대상으로 하여 본 연구를 시행하였다.

대상 및 방법

1) 연구 대상

1995년 9월부터 1996년 4월까지 영남대학교 의과대학 부속병원 수술실에서 서혜부 탈장 교정술이 예정된 환아 중 별다른 병력이 없으며 수술전 검사상 문제가 없는 체중 20 kg 미만의 환아 30명을 대상으로 하여 예비시험을 하였고 8 kg 이상 20 kg 미만의 환아 30명을 대상으로 본 단계 연구를 하였다.

2) 연구 방법

모든 환아의 보호자에게 연구의 취지를 설명하여 동의를 얻은 후 연구의 안전성을 기하기 위하여 먼저 예비단계에서는 30명의 환아를 체중을 기준으로

하여 8 kg 미만인 군(1군)과 8 kg 이상인 군(2군)으로 나누어 공급 유량을 분시 호흡량($10 \text{ ml/kg} \times \text{호흡수}$)의 2배로 하였을 때 체중에 따른 혈중 이산화탄소치와 호기말 이산화탄소치의 차이를 비교하였다. 이 결과를 토대로 하여 본단계에서는 혈중-호기말 이산화탄소치의 차이가 적은 체중군(체중 8 kg 이상)에 속하는 환아 30명을 대상으로(3군) 하여 공급 유량을 분당 체중 kg당 220 ml로 낮추었을 때의 혈중 이산화탄소치를 얻어 2군의 결과와 비교하였다.

마취전 금식은 나이에 따라 적절히 하였고 소량의 물은 수술 예정 2~3시간 전까지 허용하였으며 마취전 투약은 생략하였다. 마취전 준비실에서 환아의 부모가 동석한 가운데 체중 kg당 2~3 mg의 thiopental을 정주하여 재운 상태로 수술실로 옮겨 심전도기, 맥박 산소 측정기(Lifescope 9, Nihon kohden, Japan) 및 호기말 이산화탄소 측정기(Engström eliza CO₂ analyzer, Gambro enström, Sweden)를 준비한 후 필요에 따라 thiopental을 추가로 정주하였으며 체중 kg당 succinylcholine 1~2 mg을 정주한 후 기강이 없는 기관내 튜브를 선택하여 삽관을 하였다. 모든 환아에게 거즈로 성문 주위를 막은 후(packing) 입 바깥으로 나온 기관내 튜브의 길이는 가능한 한 짧게 자르고 준비된 T-tube를 끼운 후 Mapleson D회로를 연결하였으며(Fig. 1) T-tube에 연결된 삼방향 조리개(3-way stopcock)의 나머지 두 통로중 한쪽에는 가스 분석을 위한 수집관을 끼워 이산화탄소 분석기에 연결하였으며 다른 한쪽에는 압력도관을 연결하여 기도내 압력을 확인하면서 용수 조절 호흡을 시켰다. 모든 환자에서 마취 유도가 되었다고 판단

Fig. 1. This figure shows Mapleson D circuit connected with T-tube and 3-way stopcock.

Table 1. Patient Characteristics

Group	1	2	3
No. of patient	15	15	30
Age(months)	2.1 ± 0.8	25.1 ± 17.5	27.9 ± 16.3
Weight(kgs)	4.9 ± 1.2	14.1 ± 4.4	13.8 ± 3.4
FGF(/min)	2MV	2MV	220 ml/kg
Frequency(/min)	25.2	20.8	19.9

Values are mean ± SD. FGF: fresh gas flow. MV: minute volume

이 되면 호흡낭을 제거한 후 파형관을 이용하여 마취용 인공 호흡기(Narcomed 2B, North American Dräger, USA)에 연결하여 일회호흡량은 체중 kg당 10 ml, 호흡 수는 분당 20회 전후로 그리고 최고 기도 내압이 15~20 mmHg가 되도록 흡기 유속(inspiratory flow rate)을 조정하였다. 분당 공급 유량을 분시호흡량(일회 호흡량 × 호흡수)의 2배(1군, 2군) 혹은 체중 kg당 220 ml(3군)로 하여 호기말 이산화탄소치가 20분간 일정하게 유지되면 좌측 요골 동맥에서 동맥혈을 채취한 후 가스 분석하였으며(280 Blood gas system, Ciba corning Co, USA) 1분 후의 호기말 이산화탄소치 및 최소 이산화탄소치를 기록하였다.

관찰 결과의 통계학적 처리는 각 군내에서의 혈중 이산화탄소치와 호기말 이산화탄소치의 비교는 Student's paired t-test를, 두 군(1군과 2군, 2군과 3군) 간 변수 사이의 비교는 unpaired t-test를 이용하여 p 값이 0.05 미만인 경우 유의성이 있는 것으로 판정하였다.

결 과

대상 환자의 연령 및 체중은 1군의 경우 평균 2.1 개월, 4.9 kg이었으며 2군에서는 각각 25.1개월, 14.1 kg 그리고 3군에서는 27.9개월, 13.8 kg이었다(Table 1).

체중에 따른 혈중-호기말 이산화탄소 분압차를 비교한 1단계 연구에서는 1군의 호기말 이산화탄소치는 27.2 mmHg, 혈중 이산화탄소치는 33.9 mmHg 그리고 평균 분압차는 6.6 mmHg로써 혈중 이산화탄소치는 호기말 이산화탄소치보다 유의하게 높았다.

Table 2. Carbon Dioxide Tensions in Each Groups

	Group 1	Group 2	Group 3
PetCO ₂ (mmHg)	27.2 ± 6.4	29.3 ± 2.9	34.0 ± 1.5
PaCO ₂ (mmHg)	33.9 ± 9.2**	30.8 ± 3.9	36.5 ± 2.6**
ΔPa-etCO ₂ (mmHg)	6.6 ± 3.9	2.4 ± 2.0##	2.5 ± 2.0##
P _{min} CO ₂ (mmHg)	1.5 ± 0.8	2.2 ± 0.9	4.0 ± 2.3#

Values are mean ± SD, ΔPa-etCO₂: arterial-end tidal CO₂ tension difference, P_{min}CO₂: minimum inspired CO₂ tension, **: P<0.01 vs PetCO₂, ##: P<0.01 vs Group 1, #: P<0.05 vs Group 2

2군의 경우에는 호기말 이산화탄소치 29.3 mmHg, 혈중 이산화탄소치 30.8 mmHg로써 통계학적인 유의성이 없었으며 분압차는 2.4 mmHg로써 1군의 분압차에 비하여 유의하게 낮았다(Table 2).

공급 유량에 따른 이산화탄소치의 차이를 관찰한 2 단계 연구에서는 3군 대상 환자의 경우 호기말 이산화탄소치는 평균 34.0 mmHg, 혈중 이산화탄소치는 36.5 mmHg로써 2군에 비하여 각각 유의하게 높았으나 혈중-호기말 이산화탄소 분압차는 2.5 mmHg로 2군과 큰 차이는 없었다. 반면 최소(흡입)이산화탄소치는 4.0 mmHg로써 2군의 평균치(2.2 mmHg)에 비하여 유의하게 높았으나 모든 예에서 혈중 이산화탄소치는 정상범위였었다(Table 2).

고 찰

비교적 근년에 고가의 흡입 마취제가 등장하고 또한 흡입 마취제가 온실 효과가 있으며 오존층을 파괴하는 것으로 알려짐에 따라^{1,2)} 경제적 및 환경 보존 측면에서 그런 약제들의 소모 혹은 대기로의 배출을 줄이기 위하여 성인 환자의 전신 마취 동안 저유량법에 대한 효용성이 재고 되고 있다^{3,4)}. 즉 반 폐쇄 순환식 방법을 사용할 때 마취 유도 동안은 고유량을 사용하고 유지 동안에는 분당 공급 유량을 1-2L로 낮추어 안전한 마취 관리를 할 수 있다고 한다⁵⁾. 소아 환자의 경우에도 반폐쇄 순환식 회로로는 이처럼 유량을 낮추어 사용할 수 있겠으나 전통적으로 소아 환자의 전신 마취시에는 반폐쇄 재호흡식 회로를 사용하는 경우가 많으며 이 때는 호기 가스의 재호흡을 피하기 위하여 사용되는 유량이

높다는 점을 고려하여 저자가 통상 사용하여 오던 공급 유량을 문헌적 고찰을 통한 가능한 한 최소 유량으로 낮추어 보고자 본 연구를 시작하였다.

소아 마취시 가장 많이 사용되는 호흡회로는 Mapleson D 혹은 F회로 (Jackson-Rees modification)로써 성인용 회로에 비하여 호흡 회로가 간단하여 비교적 저렴하며 각 부분을 분해하여 소독함이 가능하고⁶⁾ 또한 가볍고 부피가 적으므로 다른 연결되는 부분(기관내 튜브, 마스크) 및 얼굴에 불필요한 힘이 가해지지 않는 등의 장점이 있으므로⁷⁾ 특히 유,소아에서 선호된다. 반면 비교적 높은 유량을 필요로 하므로써 마취제의 소모량 증가에 의한 비용의 상승 및 공기 오염, 장시간 사용시 열과 습기의 손실이 야기될 수 있으며⁶⁾ 회로내에 이산화탄소 흡수 장치가 없으므로 공급 유량이 감소되는 상황(O_2 , N_2O 탱크가 비거나 호흡 회로의 단절 등)에서는 위험한 정도의 재호흡이 초래될 수 있고 적절한 공급 유량의 결정이 어렵다는 단점이 있다⁸⁾. 이러한 단점들은 가능한 한 공급 유량을 낮추어 약간의 재호흡을 허용하며 아울러 재호흡의 정도 즉 환자의 혈중 이산화탄소치를 가늠하기 위한 장치가 갖추어 진다면 어느 정도는 극복될 수 있을 것이다.

기계 조절 호흡시 인공 호흡기에 의한 폐환기가 적절한지 확인하기 위하여 동맥혈 가스 분석이 필수적이며 이를 위한 동맥 천자의 합병증을 피하기 위하여 특히 유,소아에서 비침습적인 방법의 감시 장치가 요망된다. 1980년 전,후에 임상애 등장한 Capnometer는 비침습적이며 아울러 지속적으로 동맥혈 이산화탄소치를 측정할 수 있는 유용한 장치로 적외선 광원(infrared light source)과 검출기(detector)의 위치에 따라 흡인식(sidestream)과 주류식(mainstream)의 2가지로 분류되며 주류식 분석기(main stream analyzer)는 sensor(light source & detector)가 호흡 회로 내에 위치하게 되므로 정확도는 우수하나 무게가 무거워 영,유아에서는 기관내 삽관 튜브의 고정을 어렵게 하며⁹⁾ 기계로 인한 사강이 크며 가격이 비싸다. 반면 흡인식은 sensor(감지기)는 멀리 두고 호흡 회로내의 수집구를 통하여 가스 채취가 되므로 회로에 무게가 별로 가중되지 않으며 비용이 저렴하나 주류식에 비하여 정확도가 떨어지고¹⁰⁾ 수집관의 길이, 가스 채취 속도 등에 따라 분석 속도가 늦어질 수 있으며¹¹⁾ 반폐쇄 순환식 회로에서는 비교

적 정확한 이산화탄소치를 반영하지만 부분 재호흡 회로를 사용하는 경우에는 특히 체중이 낮은 영,유아에서는 호기말 이산화탄소치의 측정시 정확도가 낮아질 수 있다. 그 이유로는 기구의 사강에 비하여 상대적으로 일회 호흡량이 적고 공급 유량은 높으며 또한 분석기의 가스 채취 속도가 빠르기 때문에 (50~200 ml/min) 신선 공급 가스가 일부 흡인되어 희석된 가스를 분석하게 되므로 사실상의 호기말 이산화탄소치와의 차이가 생길 수 있으며 이런 문제점을 방지하기 위하여 기관내 튜브의 원위부에서 가스 채취를 하는 것이 가장 바람직 하다^{12,13,14)} 고 하 나 원위부에 가스 채취용 구멍이 있는 특수한 튜브를 사용하지 않는 한 원위부 채취는 기술적인 어려움이 많다. 저자는 기존의 가스 채취를 위한 수집관(sampling device; 부피 6 ml)으로는 사강이 너무 크다고 생각되어 보다 작은 부피의 수집관을 찾던 중 이비인후과에서 사용하는 silicone재질의 T-tube를 이용하여 길이를 적당하게 자르고 한쪽에는 삼방향 조리개를 연결하였던 바 부피는 2 ml가 되었으며 삼방향 조리개의 한 쪽으로는 가스 채취를 위한 수집관을 연결하고 다른 쪽에는 기도내 압력을 재기 위한 관을 연결하였다. 연구 대상이 안전역이 좁은 유,소아였기 때문에 신중을 기하기 위하여 예비 단계에서는 2대의 capnometer를 동시에 사용하여 호기말 이산화탄소치를 측정하고 그 값들을 혈중 이산화탄소치와 비교해 본 후 가스 채취 속도가 낮은 분석기(100 ml/min)의 결과가 보다 정확하여 본 단계에서는 Enström eliza 이산화탄소 분석기를 사용하였다. 그 결과 체중 8 kg 미만인 군에서의 혈중-호기말 이산화탄소 분압차는 평균 6.64 mmHg이었던 반면 체중 8 kg 이상인 군에서는 2.43 mmHg로써 다른 연구자들의 결과^{13,15)}와는 큰 차이가 있었으나 50 ml/min의 가스 채취 속도와 용량 1.48 ml의 채취관을 이용한 Pascucci등의 연구 결과¹¹⁾와 가장 유사하였고 원위부에 가스 채취용 구멍이 있는 기관내 튜브를 사용한 경우의 결과¹⁶⁾와도 큰 차이가 없었다.

잘 알다시피 Mapleson D 회로에서 호기 가스의 재호흡은 공급 가스 유량을 높여 주므로써 피할 수 있다. 즉 흡기때는 호기가스와 호기후 휴지기때 새로 공급되는 가스의 혼합 가스를 흡입하게 되므로 재호흡의 정도는 공급 가스량, 환자의 일회 호흡량

및 호기후 휴지기에 의존하게 되며¹⁷⁾ 많은 공급 가스와 호기후 휴지기의 연장으로 재호흡의 빈도를 줄일 수 있다. 자발 호흡과 조절 호흡시의 추천되는 공급 가스량은 체중을 기준으로 다양하게 제시되고 있으며 호흡 횟수도 분당 12~16회로 종전보다 낮다. 조절 호흡의 경우 분시 호흡량의 1~2배의 공급 유량으로 재호흡을 방지한다¹⁸⁾고 하며 Tweed등에 의하면¹⁷⁾ 임상적으로 중요한 재호흡은 공급 가스의 양이 분시환기량의 1.67배일 때($V_{fg}=1.67V_{eff}$) 일어나지 않으며 전신 마취시에는 공급 유량을 분시 환기량의 2배 이상으로 하는 것이 바람직하다고 한다.

이처럼 재호흡을 방지하기 위한 가스 유량에 대해서는 많은 연구 보고들이 있으며 비교적 근년에는 약간의 재호흡을 허용하더라도 혈중 이산화탄소치는 정상 범위로 유지되며¹⁹⁾ 습도 및 열 손실을 줄이고 경제적인 이점이 있으므로²⁰⁾ 권장 유량도 다양하게 제시되고 있다.

고유량(100 ml/kg/min)을 사용할 때는 혈중 이산화탄소치는 분시환기량에 의해 결정되며 저유량(90 ml/kg/min)에서는 혈중 이산화탄소치는 분시환기량(일회 호흡량 및 호흡수)과 무관하고 공급 유량에 의해 결정된다²¹⁾. 공급 유량 이외에 재호흡의 정도를 좌우하는 것은 체내 이산화탄소 생성 정도, 분시환기량, 호흡양상(흡기 유속, 흡기 및 호기 시간, 호기후 휴지기)등으로써 흡기 시간에 짧고, 흡기 유속이 낮을수록 혹은 호기후 휴지기가 길고 호흡 수가 낮을수록 재호흡이 감소하게 되며 반대로 흡기 시간이 길고 호흡 수가 높을수록, 흡기후 휴지기가 첨가될수록(prolonging insp time, increasing resp rate, adding on insp plateau) 모두 재호흡을 증가시킨다²²⁾. 따라서 이산화탄소 생성 및 분시 환기량의 증가, 사강의 증가 때에는 공급 유량의 증가가 필요하며 이처럼 유량을 결정하는데에 관여하는 인자(factor)가 많기 때문에 적절한 유량의 선택시에는 항상 호기말 이산화탄소치에 대한 감시가 행해져야 한다^{20,23)}.

Bain과 Spoerel²⁴⁾에 의하면 일회 호흡량을 체중 kg당 10 ml, 호흡수는 분당 12~16회로 하여 체중 10 kg 미만에서는 분당 2L, 10~50 kg에서는 분당 3.5L, 60 kg 이상에서는 분당 70 ml/kg의 공급 유량이 필요하다고 하며, Nightingale등²⁵⁾에 의하면 최소 유량은 분당 3L으로 하고, 분당 220 ml/kg의 유량이면 이산화탄소 축적(CO_2 retention)을 피하기에 충분하다

고 하며 Rose등²⁶⁾은 체중 10~30 kg에서는 분당 1000+100 ml/kg, 30 kg 이상에서는 분당 2000+50 ml/kg으로 하고 분시환기량은 공급 유량의 2배로 할 것을 권하였다. 저자는 예비 단계에서 얻어진 결과로 미루어 비교적 정확한 호기말 이산화탄소치를 얻을 수 있었던 체중 8 kg 이상의 환아를 대상으로 하여 분당, 체중 kg당 220 ml의 유량을 사용하여 최고 흡기압 15~20 mmHg, 호흡수는 분당 20회 전후로 조절 호흡시켰던 바 이산화탄소 분석기상의 호기말 이산화탄소치는 평균 34.0 mmHg였으며 이 때의 혈중 이산화탄소치는 평균 36.5 mmHg 최소 흡입 이산화탄소치(minimum inspiratory CO_2 tension)는 4.0 mmHg로써 높은 유량을 사용한 2군(2.2 mmHg)에 비하여 유의하게 재호흡의 정도가 높았으나 대상 환자 중 최고 혈중 이산화탄소치는 42.0 mmHg로써 임상적으로 허용될 수 있는 값이었다.

저유량에 대한 관심사에서 가장 문제점은 최소 흡입 이산화탄소치와 재호흡되는 이산화탄소의 양 사이의 구분이 안된다는 점이다²⁷⁾. 즉 흡기말에 기도내 이산화탄소치가 0(zero)이 되면 실제 상당량이 재호흡 되는데도 불구하고 비재호흡으로 분석(interpretation)하게 된다.

본 연구에서는 분당 공급 유량을 분시호흡량의 2배 이상으로 하였을 때 최소 흡입 이산화탄소치는 2.2 mmHg, 체중 kg당 220 ml로 하였을 때 4.0 mmHg로 유의한 차이가 있었으나 모든 경우에 혈중 이산화탄소치는 임상적으로 허용 범위였었다.

이상의 결과로 미루어 볼 때 소아에서 Mapleson D 회로를 사용하여 조절 호흡시키는 경우에는 분당 체중 kg당 220 ml의 유량을 사용하더라도 어느 정도 재호흡은 되나 혈중 이산화탄소치는 정상 범위로 유지될 수 있으므로 경제적, 환경 보존적 측면에서의 이점을 고려하여 바람직할 것으로 사료되며 체중 8 kg 미만의 환아인 경우에도 호기말 이산화탄소 측정치의 정확도를 높이기 위한 방법을 적용할 수 있다면 유량의 감소를 시도해 볼 만하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. Logan M, Farmer JG: Anaesthesia and ozone layer. Br J Anaesth 1989; 63: 645-6.

2. Sherman SJ, Cullen BF: Nitrous oxide and greenhouse effect. *Anesthesiology* 1988; 68: 816-7.
3. Baum JA and Aitkenhead AR: Low-flow anesthesia. *Anesthesia* 1995; 50: 37-44.
4. Eger EI II: Economic analysis and pharmaceutical policy: a consideration of the economics of the use of desflurane. *Anesthesia* 1995; 50:45-8.
5. 서일숙, 손기석, 이병용, 박준만, 김세연, 구분업 등: 성인 환자의 전신 마취동안 사용되는 O_2 와 N_2O 의 적정유량. *대한마취과학회지* 1996; 31: 178-83.
6. Lin YC and Brock-utne JG: Paediatric anaesthetic breathing systems. *Paediatric anaesthesia* 1996; 6: 1-5.
7. Dorsch JA, Dorsch SE: Understanding anesthesia equipment. 3rd ed. Baltimore, Williams and Wilkins Co. 1994, p 184.
8. Dorsch JA, Dorsch SE: Understanding anesthesia equipment. 3rd ed. Baltimore, Williams and Wilkins Co. 1994, pp 184-5.
9. Motoyama EK, Davis PJ: Smith's Anesthesia for Infants and Children. 6th ed. St. Louis, Mosby-Year Book, Inc. 1996, p 260.
10. From RP, Scamman FL: Ventilatory frequency influences Accuracy of End-Tidal CO_2 Measurements Analysis of seven Capnometers. *Anesth Analg* 1988; 67: 884-6.
11. Pascucci RC, Schena JA, Thompson JE: Comparison of a sidestream and mainstream capnometer in infants. *Critical care medicine* 1989; 17: 560-2.
12. 이혜원, 강포순, 임혜자, 채병국, 장성호, 신정순: 소아에서 호기말 탄산가스 분압 측정시 소아용 End-Tidal CO_2 Uncuffed Tracheal Tube의 사용효과에 대한 관찰. *대한마취과학회지* 1992; 25: 664-8.
13. Badgwell JM, McLeod ME, Lerman J, Creighton RE: End-Tidal PCO_2 Measurements Sampled at the Distal and Proximal Ends of the Endotracheal Tube in Infants and Children. *Anesth Analg* 1987; 66: 959-64.
14. McEvedy BAB, McLeod ME, Mulera M, Kirpalani H, Lerman J: End-tidal, Transcutaneous and Arterial PCO_2 Measurements in Critically Ill Neonates: A Comparative Study. *Anesthesiology* 1988; 69: 112-6.
15. Badgwell JM, Heavner JE, May WS, Goldthorn JF, Lerman J: End-tidal PCO_2 Monitoring in Infants and Children Ventilated with Either a Partial Rebreathing or a Non-rebreathing Circuit. *Anesthesiology* 1987; 66: 405-10.
16. 이태인, 신치만, 박주열: 소아에서 동맥혈 이산화탄소분압과 호기말 이산화탄소분압의 비교. *대한 마취과학회지* 1991; 24: 490-5.
17. Tweed WA, Amatya R, Lekhak BD: Fresh gas flow and carbon dioxide rebreathing in a low pressure semi-open anaesthesia system. *Can J Anaesth* 1993; 40: 1096-101.
18. Morgan GE, Mikhail MS: Clinical Anesthesiology. 1st ed. Connecticut, Prentice-Hall international Inc. 1992, p 26.
19. Bowie JR, Knox P, Downs JB: Rebreathing reduces arterial to end-tidal CO_2 gradient. *Anesthesiology* 1992; 77: A471
20. Dorsch JA, Dorsch SE: Understanding anesthesia equipment. 3rd ed. Baltimore, Williams and Wilkins Co. 1994, p 176.
21. Motoyama EK, Davis PJ: Smith's Anesthesia for Infants and Children. 6th ed. St. Louis, Mosby-Year Book, Inc. 1996, pp 232-3.
22. Dorsch JA, Dorsch SE: Understanding anesthesia equipment. 3rd ed. Baltimore, Williams and Wilkins Co. 1994, p 175.
23. Dorsch JA, Dorsch SE: Understanding anesthesia equipment. 3rd ed. Baltimore, Williams and Wilkins Co. 1994, p 167.
24. Bain JA, Spoerel WE: Flow requirements for a modified Mapleson D system during controlled ventilation. *Can Anaesth Soc J* 1973; 20: 629-36.
25. Nightingale DA, Richards CC, Glass A: An evaluation of rebreathing in a modified t-piece system during controlled ventilation in anaesthetized children. *Br J Anaesth* 1965; 37: 762-71.
26. Rose DK, Froese AB: The regulation of $PaCO_2$ during controlled ventilation of children with a t-piece. *Can Anaesth Soc J* 1979; 26: 104-13.
27. Ehrenwerth J, Eisenkraft JB: Anesthesia equipment principles and applications. 1st ed. St. Louis, Mosby-Year Book, Inc. 1993. p 104.