Korean Journal of Pediatrics Vol. 48, No. 12, 2005

소아의 기계적 환기요법

서울대학교 의과대학 소아과학교실

박 준 동

Mechanical Ventilation of the Children

June Dong Park, M.D.

Department of Pediatrics, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Korea

Mechanical ventilation in children has some differences compared to in neonates or in adults. The indication of mechanical ventilation can be classified into two groups, hypercapnic respiratory failure and hypoxemic respiratory failure. The strategies of mechanical ventilation should be different in these two groups. In hypercapnic respiratory failure, volume target ventilation with constant flow is favorable and pressure target ventilation with constant pressure is preferred in hypoxemic respiratory failure. For oxygenation, fraction of inspired oxygen(FiO_2) and mean airway pressure(MAP) can be adjusted. MAP is more important than FiO2. Positive end expiratory pressure(PEEP) is the most potent determinant of MAP. The optimal relationship of FiO_2 and PEEP is PEEP≒FiO_2×20. For ventilation, minute volume of ventilation(MV) product of tidal volume(TV) and ventilation frequency is the most important factor. TV has an maximum value up to 15 mL/kg to avoid the volutrauma, so ventilation frequency is more important. The time constant(TC) in children is usually 0.15-0.2. Adequate inspiratory time is 3TC, and expiratory time should be more than 5TC. In some severe respiratory failure, to get 8TC for one cycle is impossible because of higher frequency. In such case, permissive hypercapnia can be considered. The strategy of mechanical ventilation should be adjusted gradually even in the same patient according to the status of the patient. Mechanical ventilators and ventilation modes are progressing with advances in engineering. But the most important thing in mechanical ventilation is profound understanding about the basic pulmonary mechanics and classic ventilation modes. (Korean J Pediatr 2005;48:1310-1316)

Key Words : Mechanical ventilation, Children, Hypercapnic respiratory failure, Hypoxemic respiratory failure

서 론

1800년대 초반 가산 상태로 태어난 신생아에게 기관 내 삽관 및 구강-구강 소생술이 시행된 이후 호흡부전이 있는 환자를 대상으로 기계적으로 환기를 도와주는 다양한 시도가 도입되었고[1] 1900년대 후반에는 기계공학의 발달과 전자공학의 발전과 더불어 기계적 환기요법(mechanical ventilation)은 기계적인 면 뿐만 아니라 방법적인 면에서도 괄목할 만 한 발전을 이루어왔다.

이러한 발전은 호흡부전 치료의 성과를 매우 향상시키고 기계적 환기요법의 필연적 합병증이던 여러 가지 후유증을 감소시켰지만 지나치게 복잡해진 각종 기계와 세분화된 환기요법 전략(strategy)으로 인해 최근에는 의료진 상호간의 의사소통에도 문제가 생길 정도여서 기계적 환기요법에 대한 체계적인 이해가 요구되고 있다.

소아과 영영에서의 기계적 환기요법은 특히 가사상태로 태어난 신생아와 호흡부전증후군이 있는 미숙아의 치료에 있어 많은 경험들이 축적되어 왔던 탓에 많은 소아과 의사들이 기계적 환기요법의 전략을 신생아 연령의 전략에 편향된 경험과 지식을 가지고 있는 것이 사실이다.

소아 연령에서의 기계적 환기요법은 성인에서의 경우와도 약간의 차이가 있고 또 신생아기의 경우와도 차이가 있다. 특히 소아는 지속적으로 성장 중이기 때문에 각종 기계를 적용하는데 있어서나 특정 환기법(ventilation mode)을 적용하는데 있어 항상 성장발달에 대한 문제를 고려해야 한다.

본문에서는 소아의 기계적 환기요법에서 신생아 또는 성인에

접수 : 2005년 11월 10일, 승인 : 2005년 11월 12일
책임저자 : 박준동, 서울대학교병원 소아과
Correspondence : June Dong Park, M.D.
Tel : 02)2072-3359, 3570 Fax : 02)760-3359
E-mail : jdparkmd@snu.ac.kr

서의 기계적 환기요법에 비교하여 고려해야 할 부분과 소아의 기계적 환기요법의 일반적인 전략에 대해 기술하고자 하며 논의의 편의를 위해 고빈도(high-frequency) 환기요법과 비침습적(non-invasive) 환기요법에 대한 부분은 차후에 기회를 가졌으면 한다.

기계적 환기요법의 적응증

기계적 환기요법의 목표는 적절한 가스교환이다. 하지만 기계적 환기요법에서 간과해서는 안되는 것이 환기요법에 의한 폐손상을 최소화해야 한다는 것이다. 기계적 환기요법의 적응증은 한마디로 호흡부전이라고 할 수 있는데 호흡부전을 일으키는 기저 질환은 연령에 따라 차이가 있지만 호흡부전의 기전에 따라 분류하면 고이산화탄소혈증성 호흡부전과 저산소혈증성 호흡부전 두 가지로 분류할 수 있다[2].

1. 고이산화탄소혈증성 호흡부전

외부 공기를 폐포 내로 들여오고 폐포 내의 공기를 다시 외기로 내 보내는 환기 펌프 기능에 이상이 있는 경우로 일반적으로 동맥혈의 이산화탄소분압이 높은 호흡부전 형태를 나타낸다. 이런 호흡부전은 신경계에 일차적 문제가 있는 경우, 호흡근육의 기능에 문제가 있는 경우, 흉곽 또는 폐의 확장성에 문제가 있는 경우, 그리고 기도에 문제가 있는 경우로 분류할 수 있다(Table 1).

2. 저산소혈증성 호흡부전

폐포까지는 적절하게 공기가 교환되지만 폐포 또는 그 이하에서 산소와 이산화탄소의 교환이 적절하게 이루어지지 못하는 경우이다. 이런 형태의 호흡부전은 그 병태생리에 따라 넓은 영역의 폐포허탈, 국소성 폐포질환, 폐동맥 색전증, 비심장인성 폐부종, 심장인성 폐부종 등으로 분류할 수 있으며 저산소혈증의 기전은 Table 2와 같다[2].

3. 지속적 호기말 양압법 및 양압환기의 적응증

소아 연령에서 호흡부전으로 인해 지속적 호기말 양압법 또는 양압환기법이 필요한 경우를 절대적인 경우와 상대적인 경우로 구분하면 Table 3과 같다[3].

기계적 환기요법과 관련된 호흡역학 지표

기계적 환기요법은 어떤 이유에서든지 호흡부전 상태에 놓인 환자를 상대로 적절한 가스교환이 이루어지도록 도와주는 것인데 적절한 가스교환을 위해서는 물론이고 기계적 환기요법에 의한 이차적인 합병증을 최소화하기 위해서는 기본적인 호흡역학의 각종 지표에 대한 이해가 필수적이며 이러한 호흡역학과 관련하여 기계적 환기요법이 폐역학(pulmonary mechanics) 및 가스교환에서 어떤 생리적 효과를 나타내는지에 대한 이해는 매우 중요하다.

1. 유순도(compliance)

호흡기계(respiratory system)의 유순도는 탄성도(elastance)의 역수로 주어진 압력(pressure)변화에 그 호흡기계가 얼마나 쉽게 반응하는지를 계량화한 수치로 단위 용적(volume)을 변화시키기 위해 필요한 압력의 양으로 표시되는 탄성도와는 역수의 관계를 가진다. 유순도는 단위 압력의 변화에 의해 생긴 용적의 양으로 표시된다. 호흡기계의 전체 유순도는 폐 유순도와 흉곽의

Table 1. Hypercapnic Respiratory Failure in Pediatric Patients

Mechanism	Example
Inadequate central drive	Neonate : apnea and bradycardia of prematurity, maternal drug intoxication, birth asphyxia, intraventricular hemorrhage
	Childhood : head trauma, meningoencephalitis, drug intoxication, near-drowning
Inadequate muscle performance	Neonate : phrenic nerve palsy, spinal cord injury, spinal muscular atrophy
	Childhood : muscular dystrophy, myasthenia gravis, Guillain-Barre syndrome
Thoracic or pulmonary restrictive disease	Congenital skeletal anomaly, pulmonary fibrosis
Airway obstruction	Neonate : laryngotracheomalacia, choanal atresia
	Childhood : bronchial asthma, foreign body aspiration

Table 2. Mechanisms of Hypoxemia

Mechanism	Distinguishing attribute
Inadequate FiO_2*	Low barometric pressure and/or FiO_2
Hypoventilation	High $PaCO_2$†
Right-to-left shunt	Relatively little improvement with supplemental oxygen
Ventilation-perfusion mismatch	Good response to supplemental oxygen
Incomplete diffusion equilibrium	Good response to supplemental oxygen

*FiO_2 : fraction of inspired oxygen, †$PaCO_2$: carbon dioxide partial pressure of arterial blood

Table 3. Indications for Positive Pressure Ventilation, Continuous Distending Pressure, or Both

Absolute	Relative
Inadequate alveolar ventilation	Secure control of ventilatory pattern and function
Apnea	Intracranial hypertension
$PaCO_2$* >50-55 mmHg(in the absence of chronic hypercapnia)	Circulatory insufficiency
Impending hypoventilation	Decrease metabolic cost of breathing
Increasing $PaCO_2$*	Chronic respiratory failure
Vital capacity <15 mL/kg	Circulatory insufficiency
Dead space/tidal volume ratio >0.6	
Failure of arterial oxygenation	
Cyanosis with FiO_2† ≥0.6	
PaO_2‡ <70 mmHg with FiO_2† >0.6	
Other indices of severely impaired oxygenation	
$AaDO_2$§ >300 mmHg with FiO_2†=1.0	
Qs/Qt‖ >15%	

*$PaCO_2$: carbon dioxide partial pressure of arterial blood, †FiO_2 : fraction of inspired oxygen, ‡PaO_2 : oxygen partial pressure of arterial blood, §$AaDO_2$: alveolar arterial oxygen difference, ‖Qs/Qt : shunt ratio

유순도의 합으로 표시할 수 있다. 성인에서와 마찬가지로 소아에서도 폐 전체의 유순도가 일정한 것은 아니고 폐 부위 부위마다 유순도가 차이가 있으며 특히 폐에 병리소견이 있을 경우에는 부위에 따른 유순도의 차이가 더 커지며 이러한 부위에 따른 유순도의 차이가 기계적 환기요법의 전략 중 일정유량(constant flow rate) 전략에 비해 일정압력(constant pressure) 전략이 더 효과적인 이유의 배경이 된다. 소아는 성인에 비해 정상적으로 폐 및 흉곽의 유순도가 더 높다. 하지만 높은 유순도에 비해 변화에 대처할 여유가 많지 않기 때문에 기흉, 늑막 삼출액 등 흉곽의 유순도가 떨어지는 경우와 폐부종 등 폐유순도가 떨어지는 경우 쉽게 저환기 상태에 빠질 수 있다.

2. 기도저항(resistance)

기도저항은 단위 유량(flow rate)을 만들기 위해 필요한 압력의 차이로 표시되며 기계적 환기요법을 할 경우 자연기도와 인공기도의 저항의 합으로 표시된다. 역학적으로 유체의 저항은 유량이 지나가는 경로의 단면적의 네제곱에 비례하기 때문에 상대적으로 기도가 좁은 소아에서는 기도의 조그마한 부종으로도 저항이 심하게 증가될 수 있다.

3. 시간상수(time constant)

시간상수는 호흡기계가 주어진 변화에 얼마나 빨리 평형상태에 도달하는가하는 시간의 개념으로 유순도와 기도저항의 곱으로 표시된다. 시간상수가 큰 호흡기계는 주어진 변화에 따라 평형상태에 도달하는 시간이 오래 걸리며 성인에서는 만성 폐쇄성 폐질환이 해당되며 소아에서는 기관지폐 이형성증이나 기관지천식이 해당된다. 시간상수가 작은 호흡기계는 주어진 변화에 따라 평형상태에 도달하는 시간이 짧은 경우로 폐 섬유화나 간질성 폐질환, 급성 호흡부전 증후군 등이 해당된다. 기계적 환기요법에서 시간상수가 가지는 중요성은 이 물리적 특성에 기초하여 흡기시간(inspiratory time)과 호기시간(expiratory time)을 정해야 하며 특히 상대적으로 호흡수가 빠른 소아 연령에서는 시간상수에 대한 정확한 평가가 이루어져야만 부적절하게 긴 흡기시간으로 인한 문제점이나 지나치게 짧은 호기시간으로 인한 동적 과팽창 또는 내인성 호기말 양압 등의 문제를 피할 수 있다.

환기법의 분류

기계적 환기요법의 목적은 적절한 가스교환을 이루면서 합병증은 최소화하는 것이다(Table 4)[4]. 이 목적을 이루기 위해 환자 상태에 따라 다양한 환기법을 적용할 수 있다. 환기법의 분류는 기계적 환기기(mechanical ventilator)의 제어체계(control scheme)에서 위상변수(phase variable)와 조건변수(conditional variable)가 어떤가에 의해 결정된다.

1. 기계적 환기기의 제어체계

환기기의 제어체계(Fig. 1)는 제어변수(control variable), 위상변수, 조건변수 등 세 가지 변수들의 조합으로 이루어져 있으며 이 중 제어변수는 환기기의 특성을 결정하고 위상변수와 조건변수는 환기법의 특성을 결정한다[5-7]. 소아 연령에서 흔히 사용되는 환기기는 대부분 유량을 제어변수로 가지고 있는 유량제어형(flow-control) 환기기이지만 최근 압력을 제어변수로 가지고 있는 압력제어형(pressure-control) 환기기도 소아 연령에서 많이 사용되고 있다. 제어변수가 환기기의 기본적인 특성을 결정하지만 위상변수를 적절히 이용하면 유량제어형 환기기도 압력목표형(pressure target) 환기법에 이용할 수 있다.

2. 위상변수

소아 연령에서 많이 사용되는 대부분의 환기기는 양압환기기이기 때문에 기계적 환기기의 위상변수는 흡기(inspiration)를 기준으로 분류한다. 호기(expiration)가 지속되다가 흡기가 시작되는 시점을 어떤 신호를 이용하여 결정하는가 하는 것이 유발

Table 4. Goals and Complications of Assisted Mechanical Ventilation

Goals to achieve	Complications to avoid
Improve alveolar ventilation and avoid significant hypercapnia and respiratory acidosis	Hyperventilation and decreased cerebral blood flow
Reduce V/Q mismatch and maintenance of normal hemoglobin saturation	Hypoxemic tissue injury Oxygen toxicity to the lungs or other organs
Reexpand atelectasis or collapsed lung segments	Alveolar overdistention Pulmonary hypoperfusion Reduced venous return/cardiac output Volutrauma to alveolar structures
Reduced work of breathing and eliminate respiratory muscle fatigue	Suppressed ventilatory drive Respiratory muscle disuse atrophy Increased upper airway resistance(i.e., subglottic edema/stenosis)

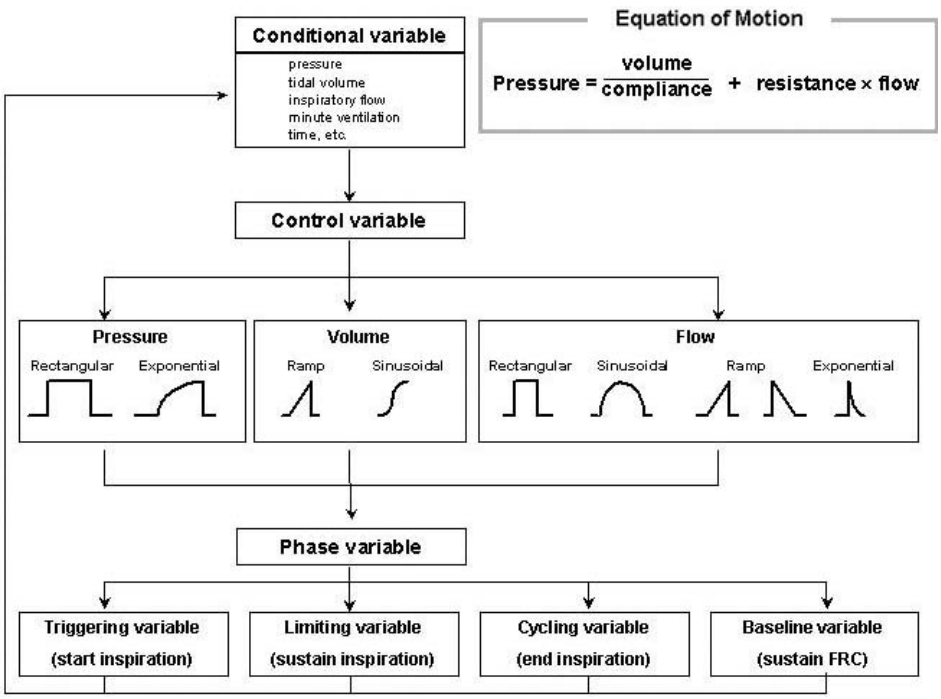

Fig. 1. Control scheme of mechanical ventilator has three groups of variables. One of them is control variable, another is phase variable, and the other is conditional variable. Mechanical ventilation mode is defined as specific set of these three variables.

변수(triggering variable)이며, 흡기가 지속되는 동안 특정 수치를 넘지 않게 하는 변수가 제한변수(limiting variable)이며, 지속되던 흡기를 중지하고 호기할 수 있도록 하는 변수가 무엇인가 하는 것이 주기변수(cycling variable)이다[7]. 특히 유발변수와 주기변수의 결정요소가 환자의 호흡동인 또는 폐역학인 경우에는 환자유발환기법(patient triggering ventilation), 환자주기환기법(patient cycling ventilation)이라고 부르기도 한다.

3. 조건변수

조건변수는 환기기가 내부에 가지고 있는 "이러면 이렇게 하라"의 조건문으로 이루어져 있는 논리이다. 예를 들어 "환자의 자발호흡이 있으면 흡기호흡을 만들지 말고 환자의 자발호흡이 없으면 흡기호흡을 만들어라" 같은 조건문이 대표적인 조건변수가 된다.

4. 환기법의 분류

환기법은 특정 위상변수와 특정 조건변수의 조합이라고 할 수 있다. 특히 위상변수 중 유발변수와 주기변수가 환자의 호흡동인(respiratory drive)이나 폐역학에 의해 결정되는가 아니면 환기기에 의해 강제적으로 결정되는가 하는 것이 환기법 분류에 가장 중요한 근거가 된다. 조절 강제환기법(controlled mandatory ventilation)은 조건변수 없이 유발변수와 주기변수가 모두 "시간"이 되어 흡기의 시작과 끝이 모두 환기기에 의해 결정되는 환기법이다. 보조 강제환기법(assisted mandatory ventilation)은

유발변수는 환자에 의해 결정되지만 주기변수는 환기기에 의해 결정되는 환기법이고, 보조-조절 강제환기법(assisted-controlled ventilation)은 위의 두 가지를 합쳐 놓은 형태다. 간헐적 강제환기법(intermittent mandatory ventilation)은 조절 강제환기법과 같으나 강제호흡(mandatory breath) 사이에 자발호흡(spontaneous breath)이 가능하도록 하는 것이 다르며 동시성 간헐적 강제환기법(synchronized intermittent mandatory ventilation)이란 강제호흡을 가능한 자발호흡에 맞추어 흡기가 이루어질 수 있도록 유발변수로 환자의 호흡동인을 이용하는 환기법이다. 최근에는 다양한 유발변수를 이용한 자발환기법이 이용되고 있다. 대표적 자발환기법은 압력지원 환기법(pressure support ventilation)인데 이 환기법에서는 유발변수는 환자의 호흡동인에 의해 결정되고 주기변수는 환자의 호흡역학에 의해 결정되며, 흡기가 유지되는 동안에는 압력을 제한변수로 하여 설정한 압력으로 흡기를 유지하게 되는 대표적인 환자유발, 환자주기 환기법이다.

5. 소아에서 환기법의 적용

소아에서 환기법의 적용은 간헐적 강제환기법이 기준이 된다. 환자의 호흡부전의 정도에 따라 환기기의 분당환기수를 환자 연령에 따른 생리적 환기수 이하로 설정할 수 있는 경우에는 간헐적 강제환기법이 적절하지만, 환기기의 분당환기수를 환자의 생리적 환기수보다 더 높게 설정해야 할 만큼 심한 정도의 호흡부전이 있다면 일차적으로 보조-조절 강제환기법을 고려해야 한다. 보조-조절 강제환기법을 적용한 경우에도 환자 상태의 호전에 따라 생리적 환기수 이하로 분당환기수 설정을 줄일 수 있게 되면 간헐적 강제환기법으로의 이탈(weaning)을 고려한다.

고이산화탄소혈증성 호흡부전에서는 일정유량 전략이 일정압력 전략보다 더 유리한 경우가 많다. 특히 기도저항이 현저히 증가되어 시간상수가 매우 길어진 폐 질환인 경우에는 일정압력을 형성하기 위해 흡기 초기에 발생하는 아주 높은 유량은 적절한 환기를 방해하게 된다. 소아 연령에서 일반적으로 많이 보게 되는 저산소혈증성 호흡부전에는 특별한 사유가 없는 한 일정압력 전략이 일정유량 전략보다는 더 효과적인 것으로 알려져 있다. 그 기전은 저산소혈증성 호흡부전을 일으키는 대부분의 폐 질환은 비균질성(non-homogeneous) 병변으로 유순도가 낮은 병변과 유순도가 높은 병변이 섞여 있게 되는데 이런 경우 일정유량 전략을 이용하게 되면 유순도가 높은 병변 부위만 반복적으로 팽창과 허탈을 되풀이하고 유순도가 낮은 병변은 거의 환기가 되지 않기 때문이다(Fig. 2)[8].

호흡부전 분류에 따른 기계적 환기요법 전략

1. 고이산화탄소혈증성 호흡부전에서의 기계적 환기요법 전략

신경근육질환에 의한 호흡부전인 경우에는 조절 강제환기법이 적절하다. 폐에 특별한 병변이 없는 경우에는 기계적 환기요법에 의한 폐 손상을 최소화하기 위해 가능한 호흡양상을 자발호흡과 유사한 형태로 해 주는 것이 좋다. 따라서 이런 경우에는 압력목표형보다는 용적목표형(volume target) 전략이 더 좋으며 폐 허탈을 방지하기 위해 간간이 심호흡(sigh)을 설정해 주는 것이 좋다. 신경근육질환인 경우에도 환자유발이 가능한 경우에는 간헐적 강제환기법이나 압력지원 환기법도 적용할 수 있다.

폐 또는 흉곽의 제한성(restrictive) 질환인 경우에는 일정압력 전략의 보조-조절 강제환기법 또는 간헐적 강제환기법이 좋다. 이 경우 압력은 일회환기량(tidal volume)이 생리적인 양 정도가 되도록 설정하며 대개는 시간상수가 짧으므로 분당환기수를 원하는 정도로 증가시킬 수 있다.

폐쇄성(obstructive) 폐 질환인 경우에는 일반적으로는 일정유량 전략이 초기의 높은 유량에 의한 높은 최고흡기압(peak inspiratory pressure)을 피할 수 있으므로 권장된다. 적절한 호기말 양압(positive end expiratory pressure)을 적용함으로써 내인성 호기말 양압을 피할 수 있다. 대개 시간상수가 길므로 분당환기수를 증가시키는 것이 오히려 고이산화탄소혈증을 악화시킬 수 있어 만성 질환인 경우에는 관용적 고이산화탄소혈증(permissive hypercapnia)을 고려해 볼 수 있다.

2. 저산소혈증성 호흡부전에서의 기계적 환기요법 전략

전반적인 폐 허탈을 특징으로 하는 경우에는 일정압력 전략의 압력목표형 환기법이 좋다. 호흡부전의 정도에 따라 보조-조절 강제환기법 또는 간헐적 강제환기법을 결정하지만 어느 경우에도 적절한 호기말 양압은 반드시 필요하다. 국소성의 폐 허탈이 있는 폐 질환의 경우 기계적 환기요법이 조금 어려울 수 있다.

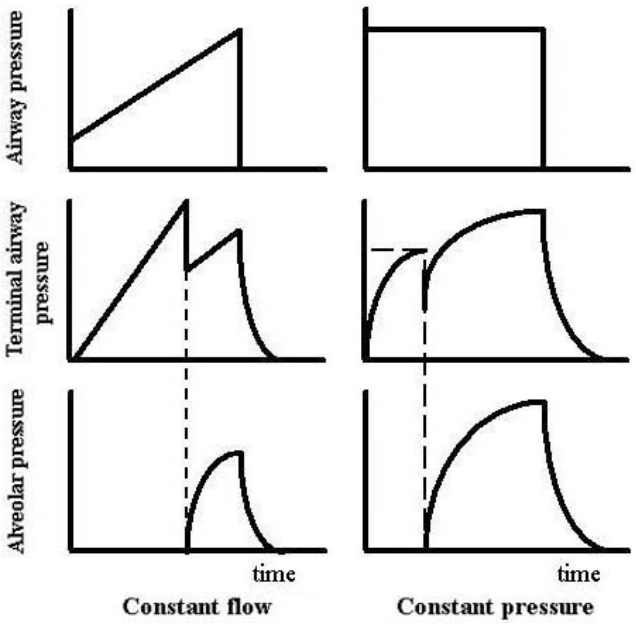

Fig. 2. Hypothetical pressure, volume and flow curves for a two-compartment model consisting of a compliant terminal airway and a collapsed alveolus.

이런 경우에는 시간상수가 그리 길지 않더라도 일정압력 전략의 압력목표형 환기법에서 흡기시간(inspiratory time)을 충분히 설정함으로써 허탈된 부위의 재팽창(reexpansion)을 이룰 수 있다. 이 경우에도 적절한 호기말 양압은 필수이다.

폐부종의 경우에는 심장인성이든 아니든 상당히 높은 정도의 호기말 양압을 설정할 필요가 있다. 충분한 흡기시간이 필요하고 경우에 따라서는 역비율 환기법(inverse ratio ventilation)이 도움이 되는 경우도 있다. 폐부종의 경우에도 일정압력 전략이 일정유량 전략보다 더 효과적이다.

기계적 환기요법에서 환기기 설정의 실제

1. 최고흡기압

압력목표형 환기법에서는 최고흡기압과 호기말 양압의 차이(압력차, tidal pressure)에 의해 일회환기량이 결정된다. 즉 흡기말의 용적은 환자의 정적 유순도에 압력차를 곱한 값이다. 최근에 개발된 환기기는 대개 유량계가 있어서 실제 환자에게 들어가는 일회환기량을 알 수 있다. 최고흡기압에 의해 일회환기량이 결정되고 일회환기량에 분당환기수를 곱한 값이 분당환기량이 되어 동맥혈 이산화탄소분압에 직접적인 영향을 주게 된다. 같은 정도의 분당환기량을 위해 일회환기량을 높이는 것보다는 분당환기수를 높이는 것이 기계적 환기요법에 의한 폐 손상을 감소시키는데 더 유리한 것으로 알려져 있다. 또한 일정압력 전략으로 압력목표형 환기법을 이용하는 경우 최고흡기압은 평균기도압에 영향을 주어 동맥혈 산소분압에 영향을 주지만 평균기도내압을 위해서는 최고흡기압을 조정하는 것보다는 호기말 양압을 조절하는 것이 더 효율적이고 폐 손상도 줄일 수 있다. 일정압력 전략을 위해 압력목표형 환기법을 이용하는 경우 압력차는 일회환기량이 7-10 mL/kg 정도가 되도록 설정한다.

2. 일회환기량

용적목표형 환기법에서는 일회환기량을 직접 설정해 주어야 하며 이때는 최고흡기압이 환자의 유순도에 따라 피동적으로 결정된다. 일정유량 전략으로 환기기를 설정할 때 신경근육계 질환으로 인한 경우에는 생리적 일회환기량인 7 mL/kg 정도 설정하면 되지만 폐쇄성 폐질환의 경우에는 긴 시간상수로 인해 분당환기수를 충분히 증가시킬 수 없는 경우가 많으므로 일회환기량을 10-15 mL/kg 정도로 충분히 증가시켜 설정한다. 하지만 기계적 환기요법과 관련된 합병증의 주요한 원인이 용적손상(volutrauma)이므로 가능한 과팽창 되는 것은 방지해야 한다.

3. 흡기산소농도(fraction of inspired oxygen)

흡기산소농도는 동맥혈 산소분압을 높이는데 가장 중요한 설정이다. 하지만 고농도의 산소는 그 자체로 심각한 독성을 보이고 또 고농도의 산소를 흡입하면 탈질소화 무기폐(denitrogenation atelectasis)가 나타나므로 응급한 경우 짧은 시간 투여할 때를 제외하고는 가능한 흡기산소농도를 0.7 이상으로 높이지 않는다. 동맥혈 산소분압을 결정하는 요소는 흡기산소농도와 평균기도압인데 평균기도압을 결정하는데 가장 중요한 요소는 호기말 양압이다. 따라서 흡기산소농도와 호기말 양압은 상호 보완적인 관계에 있는데 가장 적절한 설정은 필요한 흡기산소농도에 20을 곱한 수치로 호기말 양압을 설정하는 것이다[9]. 예를 들어 흡기산소농도가 0.7이면 호기말 양압은 적어도 14 cmH_2O가 되어야 한다. 즉 0.7/12 cmH_2O 조합에서 저산소혈증을 보이면 호기말 양압을 높여야 되고, 고산소혈증을 보이면 흡기산소농도를 내려야 한다.

4. 호기말 양압

기계적 환기요법에서 호기말 양압의 중요성은 두 가지 면에서 강조된다. 첫째는 지속 확장(sustained expansion)의 개념으로 기계적 환기요법과 관련된 폐 손상의 주요 기전 중의 하나가 폐포가 확장과 허탈을 반복해서 생기는 손상이므로 가능한 폐포가 호기말에 허탈 되지 않도록 해야 한다는 것이고[10], 두 번째는 호기말 양압은 평균기도압에 직접적으로 영향을 주어 동맥혈 산소분압을 결정한다는 것이다. 적절한 호기말 양압을 결정하는 것은 실제 임상에서 그렇게 쉽지는 않다. 가장 적절한 호기말 양압은 생리적 잔기용량(functional residual capacity)을 유지하는 값이다. 하지만 임상에서 폐기능 검사를 매 환자마다 시행하는 것이 매우 어렵고 특히 기계적 환기요법이 필요한 기저 질환이 폐 실질병변에 의한 경우에는 적절한 호기말 양압을 결정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 일반적으로 폐 실질병변이 없는 경우, 즉 유순도가 정상이라고 생각될 경우에는 기도내관 삽관에 의해 손실된 생리적 호기말 양압을 회복시켜 주는 정도인 3-4 cmH_2O의 호기말 양압이 적절하다. 폐 실질병변이 있어 유순도가 감소되어 있는 경우에는 이미 상당수의 폐포가 허탈상태에 있고 또 여러 가지 이유로 폐포의 표면장력이 증가된 상태이므로 상당한 압력의 호기말 양압이 필요하게 된다. 중등도의 호흡부전으로 흡기산소농도를 0.3-0.5 정도로 기계적 환기요법을 시작하게 되는 경우에는 6-10 cmH_2O의 호기말 양압이 적절하고, 심한 저산소혈증성 호흡부전의 경우에는 흡기산소농도를 0.5 이상 심한 경우 1.0까지 높여야 하는데 이런 경우에는 호기말 양압을 10 cmH_2O 이상 심한 경우에는 20 cmH_2O까지 호기말 양압이 필요한 경우도 있다. 이 경우 앞서 언급한 것처럼 흡기산소농도와 호기말 양압의 관계는 20배 정도가 가장 적절하다. 이렇게 높은 호기말 양압을 설정해야 하는 경우에는 필연적으로 정맥환류량(venous return)이 감소하게 되므로 충분한 수액공급과 적절한 혈관수축제의 투여가 필요하다.

5. 흡기시간

흡기시간을 직접 설정하거나 흡기/호기 비율을 설정하여 분당환기수와의 관계에서 간접적으로 흡기시간이 결정되거나 어느 경우든 적절한 흡기시간을 설정해야 한다. 압력목표형 환기법에서 적절한 흡기시간은 설정한 압력차에 의해 얻을 수 있는 최대

용적의 95%가 흡기되는 시간인 시간상수의 3배의 시간이 가장 적절한 흡기시간이다. 일반적으로 소아의 정상 시간상수는 0.15-0.2 정도이므로 적절한 흡기시간은 0.5-0.7초이다. 하지만 질환에 따라 시간상수가 다르므로 기저질환에 따라 흡기시간을 설정해야 한다. 폐쇄성 폐질환의 경우에는 가능한 충분한 흡기시간을 설정해 주어야 하고 제한성 폐질환의 경우에는 특별히 긴 흡기시간이 필요한 경우는 많지 않다. 흡기시간과 분당환기수가 결정되면 호기시간이 결정되는데 호기시간은 흡기된 공기의 99%가 호기되는 시간인 시간상수의 5배의 시간이 필요하다. 경우에 따라 환자의 호흡부전이 너무 심해 시간상수의 8배에 해당하는 한 주기 호흡을 위한 시간이 확보되지 않을 수도 있는데 이때는 필연적으로 흡기시간 또는 호기시간 중 한 가지를 포기해야 하고 환자 상태에 따라 어느 시간을 포기해야 할 것인가를 결정해야 한다.

6. 유 량

유량제어형 환기기를 이용하여 압력목표형의 환기법을 적용하고자 할 때는 충분한 양의 유량을 설정해야 한다. 일반적으로 환자가 호기된 가스를 재호흡할 위험성이 없도록 호기 가스를 완전히 배출하는데 필요한 기저유량은 분당환기량의 2-4배다. 유량제어형 환기기를 이용하여 압력목표형의 환기법으로 일정압력 전략을 적용하기 위해서는 분당환기량의 4-6배 이상 정도의 기저유량을 설정한다. 성인 기준으로 30 L/min 이상이면 충분한 호기 가스의 배출이 이루어지며 소아에서는 0.8 L/min/kg 정도의 기저유량이 적절하다. 이런 환기기를 이용하여 기계적 환기요법을 할 때도 폐쇄성 폐질환에서 지나치게 기저유량을 높이면 초기의 고유량으로 인한 높은 압력으로 적절한 환기가 되지 않을 수 있으므로 주의해야 한다.

7. 분당환기수

보조-조절 강제환기법이나 간헐적 강제환기법에서는 강제호흡의 분당환기수를 설정해야 한다. 폐 실질병변이 없는 경우에는 환자의 생리적 호흡수를 설정하면 되지만 폐 실질병변이 있는 호흡부전에서는 초기 분당환기수를 생리적 호흡수 보다 더 높게 설정해야 할 수도 있다. 분당환기수는 일회환기량과 더불어 분당환기량을 결정하고 일회환기량은 용적손상의 가능성으로 인해 지나치게 높일 수 없으므로 환기에 가장 중요한 변수는 분당환기수가 되어 동맥혈 이산화탄소 분압을 결정하지만 분당환기수를 높여야 할 경우 지나치게 빠른 호흡으로 인해 사강환기(dead space ventilation)만 이루어지거나, 내인성 호기말 양압이 발생할 가능성이 있다. 분당환기수가 높아져 호기시간이 시간상수의 5배를 유지하지 못할 경우에는 더 이상 분당환기수를 높이지 말고 관용적 고이산화탄소혈증을 고려한다.

결 론

기계적 환기요법의 설정은 한두 가지의 이론에 의해 결정된다고 하기보다는 환자 상태에 따라 아주 다양한 양상을 보일 수 있다. 또한 한 환자에서도 질환의 상태에 따라 호흡동인과 호흡역학이 지속적으로 변화하므로 특정하게 한번 환기기의 각종 변수를 설정하였다고 하여도 지속적으로 환자의 호흡역학 및 동맥혈 가스분석 등의 감시를 통해 환기기의 변수를 수정하여 설정해야 한다.

최근에는 공학의 발달에 힘입어 환기기 자체도 많은 발전이 있었고 환기법도 매우 다양하게 개발되어 있다. 환기기와 환기법은 모두 의료인이 환자에게 기계적 환기요법을 적용하는데 가능한 한 편리하게 하고 또한 가능한 합병증을 최소화하는 방향으로 발전하고 있다. 이런 발전에 힘입어 기계적 환기요법의 합병증은 많이 감소했지만 이런 발전들은 의료인들이 환기기와 환기법을 이해하는데 더 많은 노력을 요구하고 있는 것도 사실이다.

앞으로도 환기기와 환기법은 더욱 발전할 것이지만 기존에 사용되어 온 환기기와 환기법에 대한 정확한 이해는 추후의 발전된 환기요법의 적용을 위해서 매우 중요하다고 하겠다.

References

1) Colice GL. Historical perspective on the development of mechanical ventilation. In : Tobin MJ, editor. Principles and practices of mechanical ventilation. New York : McGraw-Hill, Inc, 1994:1-35.
2) Aldrich TK, Prezant DJ. Indications for mechanical ventilation. In : Tobin MJ, editor. Principles and practices of mechanical ventilation. New York : McGraw-Hill, Inc, 1994:155-89.
3) Bergman NA, Waltemath CL. A comparison of some methods for measuring total respiratory resistance. J Appl Physiol 1974;36:131-4.
4) Martin LD, Bratton SL, Walker LK. Principles and practice of respiratory support and mechanical ventilation. In : Rogers MC, Helfaer MA, editors. Handbook of pediatric intensive care. Baltimore : Williams & Wilkins, 1999:149-97.
5) AARC. Concensus statement on the essentials of mechanical ventilators-1992. Respir Care 1992;37:1000-8.
6) Branson RD, Chatburn RL. Technical description and classification of modes of ventilator operation. Respir Care 1992;37:1026-44.
7) Chatburn RL. A new system for understanding mechanical ventilators. Respir Care 1991;36:1123-55.
8) Martin RJ, Carlo WA. Chatburn RL. Mechanical ventilation in the neonatal and pediatric setting. In : Tobin MJ, editor. Principles and practices of mechanical ventilation. New York : McGraw-Hill, Inc, 1994:511-28.
9) Suter PM, Fairley HB, Isenberg MD. Optimum end-expiratory pressure in patients with acute pulmonary failure. N Engl J Med 1975;292:284-9.
10) MacIntyre NR. Alveolar capillary gas transport. In : MacIntyre NR, Branson RD, editors. Mechanical ventilation. Philadelphia : W.B. Saunders Co., 2001:161-72.