

## 고빈도 환기법 (High Frequency Ventilation)

영남대학교 의과대학 내과학교실

이현우 · 이관호

### 서 론

1940년대에 전통적 인공호흡법이 개발<sup>1,2)</sup>된 이래, 현재까지도 전통적 인공호흡법은 호흡부전을 일으키는 여러가지 질환의 치료에 효과적으로 사용되어 오고 있다. 전통적 인공호흡법은 사람의 호흡생리를 응용함으로써 사람의 자발호흡과 가깝게 호흡이 이루어지기 때문에 높은 일회 환기량으로 환기가 이루어진다<sup>3,4)</sup>. 따라서 효과적인 인공호흡을 위해서는 적어도 사강량 (anatomic dead space volume) 이상의 일회 환기량이 필요하다. 이와 같은 높은 일회 환기량은 높은 기도압을 유발하여 심혈관의 장애를 일으키며 또한 폐압 손상을 합병시킬 수 있다<sup>5-7)</sup>. 이외에도 전통적 인공호흡법은 기도압폭의 변동이 심하기 때문에 폐손상을 일으켜 폐포 표면 활성물질을 고갈시켜 성인형 호흡부전을 일으킬 수도 있으리라<sup>7)</sup> 인공호흡을 위해서는 기관삽관을 해야 하는 불편함도 있다. 전통적 인공호흡법의 이와 같은 부작용 및 불편함 때문에 새로운 형태의 인공호흡법의 개발이 요구되었고, 현재 고빈도 환기법이 전통적 인

공호흡법의 단점을 개선할 수 있는 가장 가능성 있는 인공호흡법으로 개발되고 있다.

고빈도 환기법은 사강 (dead space) 이하의 적은 일회 환기량과 빠른 호흡빈도로 가스교환을 이루는 방법으로 적은 일회 환기량을 사용하기 때문에 전통적 인공호흡시의 높은 기도압에 의한 심혈관 장애 혹은 폐압 손상을 예방할 수 있으며, 기관삽관을 하지 않고도 인공호흡이 가능한 환기법이다<sup>8-13)</sup>. 그러나 현재까지도 고빈도 환기법은 고빈도를 일으키는 방법이 연구자마다 다르기 때문에 실제로 임상에 이용되기에는 문제점이 있으며 앞으로 계속 발전되어야 할 것으로 사료된다<sup>9-13)</sup>. 이러한 고빈도 환기법의 개발은 호흡부전의 새로운 치료방법으로서 뿐만 아니라 고빈도시의 환기 생리의 연구에도 중요한 동기가 되어 현재까지 고빈도시의 폐 생리에 관한 연구도 활발하게 되어 오고 있다<sup>12,13)</sup>.

저자들은 고빈도 환기법의 한 형태인 고빈도 제트 환기법과 고빈도 진동 환기법을 설계 제작하여<sup>14,15)</sup>, 고빈도 환기시의 혈액학적 영향<sup>16)</sup>, 환기역학<sup>17-19)</sup>, 조직병리학적 소견<sup>20)</sup>과 호흡부전에서의 환기 효과<sup>21)</sup> 등을 연구한 바 있

다.

전통적 인공호흡법이 갖고 있는 부작용이 해결되지 않은 한 새로운 인공호흡기의 개발은 필수적이라 할 수 있다<sup>9,11,13</sup>). 현재까지는 고빈도 환기법이 전통적 인공호흡법의 부작용을 줄일 수 있는 인공호흡법으로 가장 활발하고 광범위하게 연구되고 있고<sup>12,13</sup>), 실제 임상에서도 몇몇 질환에서 효과적으로 사용되고 있다<sup>8-13</sup>).

앞으로 고빈도 환기법은 전통적 인공호흡법의 부작용을 개선한 새로운 인공호흡법으로 개발되어 임상에 널리 이용될 것으로 기대되며, 저자들은 현재까지 진행되고 있는 고빈도 환기법의 형태, 환기생리, 임상응용, 문제점 등을 고찰해 보고 나아가 앞으로의 연구방향을 전망해 보고자 한다.

## 역사적 배경

고빈도 환기법의 역사는 오래되지 않았다. 전통적 인공호흡법에서는 당연히 정상인과 비슷한 사강량 이상의 일회 환기량과 호흡빈도가 이용되고 왔으나 1915년 Henderson등<sup>22</sup>)은 사강량 이하에서도 가스교환은 충분하게 일어날 수 있다는 것을 동물실험에서 처음으로 보고하였다.

1969년 Öberg와 Sjöstrand<sup>23</sup>)는 경동맥 동반사(carotid sinus reflex)에 관한 동물실험중에 사강량 정도의 일회환기량으로도 가스교환이 효과적으로 일어나는 것을 관찰하여 고빈도 양압환기(high frequency positive pressure ventilation : HFPPV)에 관한 첫 보고를 하였

다. 이들은 적은 일회 환기량으로 환기시에는 빠른 호흡빈도가 필요하다는 것을 관찰하였고, 적은 일회 환기량과 빠른 호흡빈도로 혈압을 떨어뜨리지 않으면서도 충분한 가스교환을 이룩할 수 있다고 하였다. 이들의 이와 같은 연구는, 세계적으로 호흡생리학자들과 임상외들에게 많은 관심을 일으키게 하였고 또한 고빈도 환기법의 가능성으로 제시하였다.

1967년 Sänders<sup>24</sup>)는 기관지경 시술시에 압축가스의 주기적인 제트 공급으로 적은 일회 환기량과 빠른 호흡빈도로 높은 기도압이나 혈압의 감소없이 충분한 이산화탄소와 산소의 교환이 이루어진다고 하였다. 이후 약 10년 동안 고빈도 환기법은 기관지경 시술등에 제한적으로 이용되어 오다가 1977년 Klain과 Smith<sup>25</sup>)가 경기관 도관으로 가스를 흡입할 수 있는 공급기술을 개발하여 고빈도 환기법을 이용한 동물실험을 가능하게 하였고 임상에도 응용할 수 있게 되었다.

1972년 Lunkenheimer등<sup>26</sup>)은 개에서 10-20 ml의 일회 환기량과 23-40 Hz의 진동 빈도로도 전통적 인공호흡시와 동등한 가스교환을 이룩할 수 있었고, 1980년대 Butler등<sup>27</sup>)은 처음으로 사람에서 15 Hz의 빈도로 고빈도 진동 환기를 시킨 결과, 충분한 가스교환외에도 전통적 인공호흡시와 비슷하게 폐단락률(shunt fraction)과 심박출량을 호전시킬 수 있었다.

1983년 Chang등<sup>28</sup>)은 고빈도 흉벽 진동 환기와 고빈도 체표면 진동 환기법을 개발하여 쥐나 개에서 효과적으로 환기를 이룩할 수 있다고 하였지만 현재까지 이 환기법은 임상적으로 응용하기에는 제한이 많다. 그러나

점막섬모청소 (mucociliary clearance)는 다른 형태의 고빈도 환기법보다 더 우수하며, 기관삽관이 필요없다는 점에서도 상당히 발전된 고빈도 환기법이라 할 수 있다.

최근에는 고빈도 환기법을 임상적으로 응용하는 데는 여러가지 문제점이 발견되어 고빈도 환기법과 전통적 환기법이 동시에 가능한 환기 방법이 개발<sup>12,13)</sup>되어 임상에 응용되고 있다. 전통적 인공호흡법의 단점을 개선하기 위한 새로운 환기법의 개발은 필연적이라 할 수 있으며 그 형태로는 고빈도 환기법이 현재까지 가장 많이 개발되어 오고 관심이 기울여지고 있다<sup>12)</sup>. 그러나 아직까지 고빈도 환기법은 개발단계에 있다고 할 수 있으며 고빈도 환기법 자체의 지속적인 개발과 더 정확하고 세밀한 감시 장치 (monitoring techniques)가 개발<sup>10-13)</sup>되면 더 널리 임상적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 고빈도 환기법의 형태

고빈도 환기법의 형태는 매우 다양하게 개발되어 있으며 일반적으로 고빈도 환기법은 정상 호흡빈도의 4배 이상의 호흡빈도를 사용하는 어떤 형태의 인공호흡기로 정의되기도 한다<sup>9-13)</sup>.

고빈도 환기를 대별하면 환기시키는 방법<sup>9,29)</sup>에 따라 경기관 환기법 (transtracheal ventilation)과 경흉곽 환기법 (transthoracic ventilation)으로 나눌 수 있다. 경기관 환기법에는 고빈도 양압 환기법 (HFPPV), 고빈도 제트 환기법 (high frequency jet ventilation : HFJV)과 고빈도 진동 환기법 (high frequency oscil-

latory ventilation : HFOV)등이 있으며, 경흉곽 환기법에는 고빈도 흉벽 진동환기법 (high frequency chest wall oscillation : HFCWO)과 고빈도 체표면 진동 환기법 (high frequency body surface oscillation : HFBSO)등이 있다.

#### 1) 고빈도 양압 환기법 (HFPPV)

1967년 Sjöstrand<sup>30)</sup>에 의해 개발된 고빈도 환기법으로 이들은 기관 내관이 삽관된 기도로 솔레노이드 밸브를 통해서 흡기는 고빈도의 양압으로 하며, 호기는 배출구를 통해 수동적으로 이루어지게 하여 가스의 저류를 방지하였다.

일반적으로 이 고빈도 환기법은 호흡빈도는 분당 60-100회, 일회 환기량은 3-5 ml/kg, 흡기와 호기의 비는 1:4-1:5정도로 사용된다<sup>8,9-13)</sup>. 전통적 인공호흡법에 비해 장점은 인공호흡기와 환자간의 부조화 (asynchrony)를 감소시킬 수 있고, 환자를 진정시킬 필요가 적은 점이다. 단점은 기도압을 임의적으로 조절할 수 없는 것이다<sup>9,11-13)</sup>.

#### 2) 고빈도 제트 환기법 (HFJV)

1967년 Sanders<sup>24)</sup>에 의해 개발된 고빈도 환기법으로 오늘날 임상적으로도 가장 널리 이용되고 있는 고빈도 환기법이다<sup>9)</sup>.

원리는 흡기는 기관내관이 삽관된 기도로 좁은 구멍의 도관을 사용하여 가스를 주입하면 Venturi 원리에 의해서 주변의 공기가 함께 일회 환기량으로 능동적으로 흡입되며, 호기는 수동적으로 호기 배출관으로 이루어진다.

제트 기류는 다양한 종류의 솔레노이드 밸브로 발생되며 제트 기류의 속도는 유도압과 도관의 특성에 좌우되며 유도압, 호흡빈도 및 흡기/호기비는 조절할 수 있게 설계되어 있다. 흔히 사용되는 환기조는 호흡빈도는 분당

10-200회, 흡기와 호기비는 1:2-1:8, 유도압은 15-50psi 정도로 사용되며<sup>8,9,11-13</sup>), 일회 환기량은 정확하게 측정할 수 없으나 해부학적 사강량보다는 약간 큰 것으로 알려져 있다<sup>10,33</sup>). 이 환기법은 간단하고 신뢰성이 높기 때문에 임상적으로 널리 이용되고 있다.

### 3) 고빈도 진동 환기법 (HFOV)

고빈도 진동 환기법은 1972년 Lunkenheimer<sup>20</sup>)이 처음 고안한 고빈도 환기법이며 고빈도 양압 환기 혹은 고빈도 제트 환기와는 몇가지 점에서 차이가 있다<sup>10</sup>). 첫째는 고빈도 양압 환기와 제트 환기에서는 흡기는 능동적으로, 호기는 수동적으로 일어나는데 비해 고빈도 진동 환기는 흡기와 호기가 각각 호흡기에 의해 능동적으로 일어난다. 둘째는 고빈도 양압 환기와 제트 환기에서의 기류 모양은 펄스 (pulse) 혹은 제트형인데 비해 고빈도 진동 환기는 sinusoidal wave이며 흡기와 호기의 비도 1:1이다. 셋째는 고빈도 진동 환기시는 진동 펌프는 밀폐되어 있기 때문에 외부에서 신선한 가스를 공급해 주어야 하는 bias flow 기구를 갖추어야 한다.

흔히 이용되는 환기조건은 호흡빈도는 분당 1-6 Hz (60-3,600회), 일회 환기량은 사강량보다 적은 1-3 ml/kg 정도이다<sup>8,9</sup>). 현재까지 고빈도 진동 환기법은 일회 환기량과 기도압 조절이 정확하게 이루어지지 않고 있기 때문에 임상적으로는 거의 이용되지 않고 주로 동물실험에서 이용되고 있다<sup>10-13</sup>).

### 4) 고빈도 흉벽 진동 환기법 (HFCWO)

경흉곽 환기법으로 흉벽만 진동시키는 환기법이다. 흉벽에 감은 환기기구에 진동 펌프를 이용해서 일정한 진폭 (amplitude)과 환기빈도로 환기시키는 장치이다<sup>20</sup>). 호흡빈도를

10 Hz이하로 작동시키면 무호흡에서는 충분한 가스교환을 이룩할 수 있고, 자발호흡이 있는 경우에는 분당 환기량 (minute ventilation)을 줄일 수 있다. 10 Hz이상으로 사용하면 기도의 점액 배출을 도와줄 수 있다. 임상적으로 고빈도 흉벽 진동 환기법은 거동이 가능한 환자에게 환기를 부분적으로 도와줄 수 있을 뿐만 아니라 흉부 물리치료요법으로도 사용될 수 있다<sup>9,12,20</sup>).

### 5) 고빈도 체표면 진동 환기법 (HFBSO)

경흉벽 고빈도 환기법중 신체 전체 (가슴 두부는 제외)를 환기시키는 방법으로 음압 상태의 탱크에 진동 환기를 하는 형태이다. 항상 응급처치가 요구되므로 성인에서는 이용되지 않고 신체가 적은 영아에게 환기가 가능하며 쥐, 고양이, 토끼등의 작은 동물의 환기법으로 연구되고 있다. 임상적으로 고빈도 체표면 진동 환기법은 신생아의 집중치료에 이용되거나, 고빈도 흉벽 진동 환기와 같이 흉부 물리치료에 이용될 수 있다<sup>20</sup>).

## 고빈도 환기법의 생리

### 1) 고빈도 환기가 가스 교환, 폐 용적 및 기도압에 미치는 효과

고빈도 환기법이 소개되기 전까지는 폐포 환기는 일회 환기량이 사강량 이상이 되지 않으면 효과적으로 일어날 수 없는 것으로 알려졌다. 그러나 고빈도 환기법이 개발되면서 사강량보다 적은 일회 환기량으로도 이산화탄소의 효과적인 가스 교환이 일어날 수 있다는 사실은 획기적인 보고였다<sup>9-12</sup>).

1915년 Henderson<sup>22</sup>)은 일회 환기량이 사

강량 이하로 되어도 생명은 유지될 수 있다 하였고, 1954년 Briscoe등<sup>34)</sup>도 사강량 이하의 일회 환기량이 폐포까지 도달할 수 있다는 것을 관찰하였으며 이와 같은 이유때문에 몇몇 환자들에서는 매우 적은 일회 환기량으로도 살아갈 수 있다고 하였다. 그러나 고빈도 환기시에 사강량 이하의 일회 환기량으로 효과적이고 충분한 가스 교환이 이루어지는 기전에 대해서는 현재까지도 확실하게 알려져 있지 않다.

현재 알려져 있는 고빈도 환기시의 가스 교환 기전은 고빈도 양압 환기와 고빈도 제트 환기시에는 전통적 인공호흡시와 마찬가지로 가스 교환은 주로 대류 (convection)현상에 의해서 폐포까지 이동된다. 즉, 고빈도 양압과 제트 환기시에 발생하는 빠른 속도의 가스는 proximal conducting airway에서 와류 (turbulence)를 증가시키게 되어 Brownian motion에 의해 가스 입자의 혼합을 증가시켜서 가스 교환을 효과적으로 이룩할 수 있고 이러한 가증된 가스 혼합과정을 "augmented" 혹은 "facilitated" diffusion이라 하였다<sup>8)</sup>. 이와 달리 고빈도 진동 환기법은 가스 교환 양상이 더 복잡하여 대류에 의한 가스 교환은 중요한 역할을 하지 못하며 주로 direct alveolar ventilation by bulk flow, high frequency pendelluft, asymmetric velocity profiles, Taylor dispersion, cardiogenic oscillation, molecular diffusion 등의 6가지 기전에 의해 이루어지는 것으로 알려져 있다<sup>8,11)</sup>. Slutsky<sup>38)</sup>는 폐를 세 부위로 구분하여 각 부위마다 가스 교환이 다르게 일어난다고 하였다. 따라서 고빈도 환기시에도 환기는 폐의 각 부위에 따라 상 기기전이 다르게 작용할 것으로 생각된다.

고빈도 환기법에서 동맥혈 이산화탄소분압을 결정하는 인자는 고빈도 제트 환기법에서는 호흡빈도가 분당 200회 이상에서는 주로 일회 환기량의 크기에 의해서 좌우되며<sup>8)</sup>, 그 이하의 호흡빈도에서는 일회 환기량과 호흡빈도에 좌우된다<sup>36-38)</sup>. FDA에서도 고빈도 제트 환기법에서 호흡빈도를 분당 100-150회로 허가하고 있다<sup>12)</sup>. 고빈도 진동 환기법에서도 고빈도 제트 환기법과 비슷하게 동맥혈 이산화탄소분압은 4 Hz 이하에서는 일회 환기량과 호흡빈도에 영향을 받으며<sup>39)</sup>, 그 이상의 호흡빈도에서는 이산화탄소분압이 오히려 증가할 수 있다<sup>8)</sup>. 이와 같은 고빈도 환기법에서 높은 호흡빈도에서의 가스교환 장애는 높은 기도압과 이로 인한 가스 이동의 장애에 의한 가스 저류때문이라 하였다<sup>37,40)</sup>.

고빈도 환기시의 동맥혈 산소화 (oxygenation) 즉, 산소분압은 기능적 잔기량 (functional residual capacity; FRC)에 주로 좌우되며<sup>40,41)</sup>, 고빈도 환기시에 기능적 잔기량의 증가는 유도압의 증가, 흡기시간의 증가 그리고 증가된 호기종말 양압 (positive end expiratory pressure; PEEP)때문이다<sup>42-44)</sup>. 일반적으로 고빈도 환기시의 산소화는 급성 폐손상이 있는 경우<sup>36)</sup>, 혹은 표면활성물질이 부족한 경우<sup>37)</sup>에 전통적 인공호흡법보다 더 효과가 있다. Smith등<sup>45)</sup>과 Fukuchi등<sup>46)</sup>은 고빈도 환기시에는 전통적 환기법보다 가스교환이 더 균일하게 이루어짐으로써 환기 관류비 불균등이 더 적게 일어나기 때문에 산소화가 더 효과적으로 일어난다고 하였으며 Standifort와 Morganroth<sup>8)</sup>는 고빈도 환기시에는 전통적 환기법보다 가스혼합이 더 가증되어 산소의 흡수가 증가 되므로써 산소화가 더 잘 일어난다고 하였다.

한편 Kolton등<sup>45)</sup>은 두가지 형태의 폐손상 즉, 올레인산 주입과 생리식염수로 세척한 폐실험에서 두가지 형태의 폐손상 모두에서 전통적 인공호흡법에서 보다 고빈도 진동환기시에 산소화가 더 잘 일어났으며 그 원인은 평균 폐용적 (mean lung volume)이 고빈도 진동환기법에서 더 높은 것을 관찰하여 고빈도 진동 환기시의 증가된 폐용적이 산소화의 증가와 관계가 있다고 하였다. Quan등<sup>46)</sup>도 기능적 잔기량 이상의 평균 폐용적이 전통적 인공호흡보다 고빈도 제트 환기시에 더 높아서 가스교환이 더 잘 일어날 것이라고 하였다. 그밖에 Brusasco등<sup>47)</sup>과 Benhamou등<sup>38)</sup>도 고빈도 환기시에는 폐포압이 호기종말압보다 계속 높은 상태인 "auto-PEEP" 현상이 생겨 고빈도 환기시에는 폐포가 가스교환에 더 일찍, 더 완전하게 관여하므로써 산소화가 더 호전된다고 하여 고빈도 환기시에 일어나는 산소화는 증가된 폐용적과 관계있다는 주장을 뒷받침하였다. 실제로 산소화는 일회 환기량, 흡기와 호기의 비, PEEP, inspiratory plateau등과 같은 환기형태보다도 폐에 적용되는 평균 기도압 (mean airway pressure)과 관계가 있으며<sup>49-51)</sup>, 같은 기도압에서는 평균 폐용적이 증가될수록 산소화도 증가된다<sup>50,51)</sup>. 고빈도 환기법에서도 과팽창시에 산소화가 잘 일어나 이러한 과팽창은 전통적 인공호흡시와는 달리 높은 기도압에 의한 기도나 폐실질의 손상없이도 일어날 수 있다는 이론적 장점이 있다.

2) 고빈도 환기법에서의 점막 섬모 청소 Sjöstrand<sup>23)</sup>와 McEvoy<sup>52)</sup>는 고빈도 환기시에 기관에 점액이 상당량 증가한다고 하였으며 이는 고빈도 환기시에 부적당한 습도가 점막

섬모운동을 방해한 것으로 생각하였다. 1981년 Nordin등<sup>53)</sup>은 고빈도 제트 환기시에 과도한 혹은 부족한 습도가 기관의 점막섬모운동에 장애를 일으킨다고 하였다.

Rossing등<sup>10)</sup>은 고빈도 환기때에 점막섬모운동의 장애가 생기고 따라서 점액의 생성이 증가되는데 그 원인으로는 첫째 고빈도 환기때는 가스의 흐름이 빨라서 이 빠른 가스의 흐름 자체가 점막에 자극을 주게 되어 점액의 생성이 증가되고, 둘째로는 기도에 충분한 습기가 공급되지 않으면 기도가 건조해져 점액의 생성이 증가되며, 셋째로는 가스의 흐름이 섬모운동과 역방향으로 생기기 때문에 점액이 기도의 중앙으로 이동되어 기도내 점액이 축적되고 이에 따라 감염의 빈도가 증가되어 기관, 기관지염의 정도가 더 심하게 일어날 수 있다고 하였다.

일반적으로 고빈도 환기법중 경기관 고빈도 환기법에서는 점막섬모기능의 장애가 있으나<sup>9)</sup>, 고빈도 흉벽 진동 환기와 고빈도 체표면 진동 환기법과 같은 경흉벽 고빈도 환기법에서는 오히려 점막섬모 이동이 증가된다<sup>28,54)</sup>. 이와 같은 이유로 Zidulka등<sup>55)</sup>은 고빈도 흉벽 환기법에서는 호기시간이 흡기시간보다 항상 더 짧고, 최고 흡기 기류 (flow)가 최고 호기 기류보다 항상 크기 때문에 호기시에 전단 힘 (shearing force)이 기도 바깥쪽으로 강하게 작용하여 점액을 기도 바깥쪽으로 이동시키기 때문이라고 하였다.

고빈도 환기법에서 점막섬모운동의 장애는 불충분한 습도 공급에 기인하는 것으로 추정되며 충분한 온도와 함께 습도 공급을 해 주는 것은 아직까지도 해결해야 할 고빈도 환기 장치의 설계중 하나이다.

### 3) 고빈도 환기법이 심혈관계에 미치는 영향

전통적 인공호흡시는 높은 흉곽 내압을 일으켜 정맥 환류(venous return)를 감소시키고 결국은 심박출량을 감소시켜 혈압을 떨어뜨릴 수 있다. 고빈도 환기법은 전통적 인공호흡시보다 기도압이 더 낮아서 심혈관계에 미치는 영향이 더 적을 것으로 이론적으로는 알려져 있다. 그러나 실제로는 고빈도 환기법이 심박출량에 미치는 영향은 다양하게 보고되고 있다. Sjöstrand와 Eriksson<sup>31)</sup>은 건강한 개에서 고빈도 양압 환기법과 전통적 인공호흡법을 비교한 바, 심박출량과 다른 순환기 지표에는 의미있는 차이가 없다고 하였고 Carlsson<sup>56)</sup>도 호흡부전 환자에서 전통적 인공호흡과 고빈도 제트 환기법을 실시한 결과 심박출량의 차이가 없다고 하였다. 그러나 Hoff<sup>57)</sup>은 건강한 개에서 고빈도 제트 환기를 시킨 결과 오히려 심박출량이 감소한다고 하였고, Otto<sup>58)</sup>은 저혈압 상태의 개에서 고빈도 제트 환기법은 전통적 인공호흡법보다 혈액역학기능(hemodynamic performance)을 의의 있게 향상시키며 이는 고빈도 제트 환기시의 낮은 기도압때문이라고 하였다.

고빈도 환기법이 심혈관계에 미치는 영향에 대해서는 확실하게는 알려져 있지 않으나 일반적으로는 어떤 형태의 고빈도 환기법이든지 정상혈압의 동물과 사람에서는 정맥환류나 심박출량은 감소되지 않으며 저혈압이 있는 경우에는 심혈관기능을 향상시킨다<sup>9)</sup>.

고빈도 환기법이 폐순환에 미치는 영향은 고빈도 환기법에서는 자발호흡이나 전통적 인공호흡보다 늑막압과 기도압이 더 낮아서 폐순환에 영향을 더 적게 미칠 것으로 생각

된다<sup>9)</sup>. 실제로 Carlsson<sup>56)</sup>은 고빈도 양압 환기시에 폐동맥압과 폐동맥 썬기압에 변화가 없는 것을 관찰하였고, Hoff<sup>57)</sup>도 고빈도 제트 환기와 전통적 인공호흡시에 폐동맥압과 폐동맥 썬기압에 차이가 없다고 하였다. Raju<sup>59)</sup>은 고빈도 진동환기를 정상고양이에서 시킨 결과 폐동맥압과 좌심방압은 일정하다고 하였다. 이와 같은 결과로 보아 고빈도 환기법이 폐순환에 미치는 영향은 적을 것으로 생각된다.

고빈도 환기가 뇌압과 뇌혈류에 미치는 영향은 고빈도 환기시는 흉곽내압이 낮아서 전통적 인공호흡에 비해서 상대적으로 뇌압에 영향을 적게 미친다<sup>11)</sup>. Raju<sup>59)</sup>, Todd<sup>60)</sup>, Fein<sup>61)</sup> 등은 고빈도 환기시 뇌압이 일정하게 유지되는 것을 관찰하였으나 Gioia<sup>11)</sup>은 전통적 인공호흡과 고빈도 진동 환기법에서 뇌 혈류에는 차이가 없다고도 하였다. 따라서 고빈도 환기법에서는 기도압의 변화의 폭이 적기 때문에 뇌압과 뇌혈류에 주는 영향은 적다고 할 수 있다.

고빈도 환기법이 호흡조절에 미치는 영향으로 고빈도 환기시에 무호흡이 생긴다는 보고가 있다<sup>11,62)</sup>. 고빈도 환기시의 무호흡은 폐용적과 화학적 신경 동인(chemical neural drive)과는 무관하며 흉벽 수용체와 미주신경과 관계가 있는 것으로 알려져 있다<sup>63)</sup>.

### 고빈도 환기법의 임상적 응용

고빈도 환기법은 전통적 인공호흡법의 주된 합병증 즉, 높은 기도압에 의한 폐압손상과 심혈관기능저하와 같은 단점을 피하거나 극

복하기 위하여 개발되었다. 고빈도 환기법은 광범위하게 임상에서 시도되고 있으나 각 형태의 고빈도 환기법이 동물실험에서의 결과와 실제 임상응용시의 효과에는 차이가 있기 때문에 실제로는 전통적 인공호흡법에 비해 몇몇 특수한 경우에만 제한적으로 응용되어 오고 있다<sup>12)</sup>. 고빈도 환기법중 고빈도 양압 환기와 고빈도 제트 환기법은 비교적 흔히 임상에서 사용하는 보고가 있으나 고빈도 진동 환기의 임상응용은 소수에 불과하다<sup>12)</sup> 고빈도 양압 환기법은 후두경, 기관지경을 이용한 처치나 미세한 후두 혹은 기관의 수술에 이용되고 있다<sup>8,31,32)</sup>. 그 이유는 기도압의 변화의 폭 (swing)이 적어서 수술시야를 보기 쉽고 수술대상의 움직임이 적어서 외과적 처치가 쉽기 때문이다<sup>11)</sup>. 호흡부전이 있는 성인에서도 고빈도 양압 환기의 사용이 소수에서 보고되고 있으나 그 결과는 전통적 인공호흡과 큰 차이가 없다<sup>64)</sup>.

고빈도 제트 환기법은 가장 널리 그리고 효과적으로 임상에서 응용되고 있다. 이는 기능뿐만 아니라 제작하기가 쉽고 호흡빈도를 분당 150회 이하로 할 경우에는 FDA 공인도 쉽기 때문이다<sup>11)</sup>. 고빈도 제트 환기법이 가장 효과적으로 이용되는 경우는 폐압손상과 관계있는 질환으로, 기관지-늑막루, 수술이나 외상후 기도의 파괴, 혹은 기흉등이다<sup>11)</sup>. 이외에도 흉곽수술, 후두 혹은 기관지경을 이용한 처치, 전기속파 쇄석술 (ESWL; electric shock wave lithotripsy)<sup>8,65)</sup>, 영아 호흡부전증 후군, 선천성 횡경막 탈장, 수술후의 호흡부전, 성인형 호흡부전증<sup>11-13)</sup>, 인공호흡기의 이탈 (weaning)<sup>8,9)</sup>등에 이용되고 있다.

고빈도 진동 환기법은 극히 제한적으로 임

상에 적용되고 있으며 신생아 집중치료실에서 영아호흡부전증의 치료에 사용되고 있다<sup>8,27)</sup>.

고빈도 흉벽 진동 환기법은 보행이 가능한 환자의 환기부전의 치료로 이용될 수도 있으나 이보다는 흉부 물리치료요법으로 더 효과적으로 이용될 수 있으며 고빈도 체표면 진동 환기법은 신생아 호흡부전의 집중치료에 이용되기도 하며 기관지 분비물이 많은 환자의 점액 배출을 도와주는 보조적인 치료에도 이용될 수 있다.

## 합 병 증

현재까지 고빈도 환기법은 제한적으로 임상에서 이용되고 있기 때문에 그 합병증이 정확하게는 보고되지 않고 있다. 고빈도 환기법에서도 전통적 인공호흡법에서와 같이 인공호흡기의 기능장애, 우연한 disconnection 그리고 불충분한 습도공급이 가장 중요한 합병증으로 여겨지고 있다.

고빈도 환기법은 그 특성상 충분한 습도를 공급하기에 어려운 점이 있으므로 충분한 습도 공급의 장애로 피사성 기관, 기관지염의 보고가 있고 이는 치명적인 합병증이 될 수 있다<sup>8)</sup>. Carlon등<sup>56)</sup>은 고빈도 환기법의 합병증으로 기관에 생길 수 있는 문제점을 보고한 바 있고 이들에 의하면 고빈도 제트 환기법을 사용한 17명의 성인중 2명이 출혈성 기관염으로 사망하였다. Pokora등<sup>66)</sup>도 고빈도 진동 환기법을 사용한 10명의 영아에서 기도 폐쇄 장애로 사망한 1례의 부검에서 점막괴사와 점막하 염증이 심하다고 하였다.

Harris등<sup>67)</sup>과 Neu등<sup>68)</sup>도 고빈도 제트 환기와



전통적 인공호흡법 사용후 각각 8명의 신생아에서 폐조직을 비교하였던 바 고빈도 제트 환기군에서 전통적 인공호흡군보다 더 심한 피사성 기관, 기관지염이 생겼다. 이와 같은 피사성 기관, 기관지염은 고빈도 진동환기보다 고빈도 제트 환기에서 더 심한 것으로 알려져 있다.

피사성 기관, 기관지염의에도 고빈도 환기시에는 기관지 분비물 혹은 가스가 폐에 저류될 수 있고, 기도가 고빈도의 가스에 노출되므로 기도의 상피세포가 손상을 받을 수가 있다<sup>6)</sup>.

고빈도 환기법의 합병증은 고빈도 환기법이 계속 개발되고 임상에 응용되면서 더욱 자세하게 밝혀질 것으로 기대된다.

### 금 기

고빈도 환기시에는 흡입가스가 폐에 저류되면서 폐가 과팽창될 수 있으므로 만성 폐쇄성 폐질환이나 발작성 기관지 천식환자에서의 사용은 금기이다<sup>3)</sup>. 또한 일측성 폐질환 환자에서 양측 폐에 적용된 고빈도 환기법은 건강한 폐를 과팽창시켜서 가스교환과 심혈관계에 장애를 초래할 수 있으므로 일측성 폐질환 환자에서도 사용하지 않아야 한다.

### 현재까지의 연구 동향과 전망

고빈도 환기법이 index medicus에 기재된 것은 약 5년 정도밖에 되지 않는다<sup>12)</sup>. 그러나 그동안 고빈도 환기법에 관한 관심과 연구는

전세계적으로 광범위하고 활발하게 되어 오고 있다. 그 이유는 전통적 인공호흡기의 부작용이 해결되지 않는 한 새로운 인공호흡기의 개발은 필연적이기 때문이다. 전통적 인공호흡법의 단점을 개선하기 위하여 고빈도 환기법이 개발되었으나 실제로는 고빈도 환기법도 상당한 문제점이 아직까지 해결되지 않고 있으며 이와 같은 문제점을 해결하려는 노력이 많은 연구실에서 이루어지고 있다.

고빈도 환기법의 문제점 혹은 앞으로 해결되어야 할 것으로는 고빈도 환기시의 효과적인 산소화, 환기 생리, 점막섬모청소, 폐압 손상, 고빈도 환기장치의 정확한 설계 및 감시기구의 개발등이다.

고빈도 환기시의 충분한 산소화에 가장 중요한 영향을 주는 것은 폐용적으로 알려져 있다. 그러나 폐용적을 증가시키기 위해서는 높은 기도압이 요구되기 때문에 고빈도 환기법의 장점인 낮은 기도압의 유지와는 서로 상반되는 문제점이 있다. 고빈도 환기시 허탈된 폐포를 확장시키는 압과 다시 허탈시키는 압의 차이는 극히 적을 것으로 생각되며 이 사이의 적당한 압을 선택하여 기도압을 유지한다면 폐압 손상을 주지 않으면서 폐용적을 증가시켜 산소화를 충분히 이룩할 수 있다. 고빈도 환기법에서 이러한 기술은 현재 끊임없이 연구되고 있으며, 그러한 방법으로는 허탈한 폐를 일시적으로 과팽창시키는 방법<sup>21,66-71)</sup>과 고빈도 환기시 분당 1-2회 정도 주기적으로 폐포를 확장시켜 주는 방법등이 있다<sup>66,70)</sup>. 현재까지는 이와 같은 방법중 어느 것이 더 안전하고 효과적인지는 알 수 없으나 이러한 방법이 고빈도 환기법에서 가스교환에 상당한 도움을 주는 것은 사실이다<sup>12,21)</sup>. 또한

이와 같은 방법을 적용하는 시간적인 문제에 있어서도 병의 경과중 초기에 할 것인지 혹은 말기에 할 것인지는 윤리적으로 문제점이 있다<sup>12)</sup>.

고빈도 환기법과 폐손상과의 관계는 일반적으로 인공호흡기에 의한 폐손상은 급성폐압손상이다. 고빈도 환기법에서는 기도압의 변화의 폭이 크지 않으므로 가스 누출이 적을 것으로 생각되나 계속되는 폐포확장압 때문에 폐포가 파괴될 수 있다. 그러나 이러한 갑작스런 가스 누출이 만성 폐손상을 일으키지는 않으므로 고빈도 환기시에 생기는 만성적인 폐손상은 기도압의 변화보다는 고빈도 환기법의 형태와 관계있는 것으로 알려져 있다<sup>72)</sup>. McCulloch<sup>73)</sup>는 폐포 표면활성물질이 소실된 폐에서 폐손상을 예방하기 위해서는 고빈도 환기의 형태와 폐용적이 중요하다고 하였다. 따라서 고빈도 환기법을 실시할 때 폐용적은 산소화에 영향을 줄 뿐만 아니라 폐손상에도 영향을 줄 수 있으므로 주의깊게 결정하여야 하겠다<sup>12)</sup>. 그러나 현재까지도 고빈도 환기법의 형태에 따른 만성 폐손상의 기전에 관해서는 확실하게 규명되어 있지 않기 때문에 더 연구되어야 할 것이다.

다음으로 해결해야 할 문제로는 고빈도 환기 장치의 정확한 설계 및 감시 장치의 개발이다. 고빈도 환기시에 어느 정도의 일회 환기량과 호흡빈도로 환기를 시켜야 할 것인지는 각 연구자마다 차이가 있다. 따라서 현재까지도 이와 같은 일회 환기량과 호흡빈도의 조건은 경험적으로 적용되어 오고 있는 실정이다.

현재까지 고빈도 환기법에 관한 동물실험의 자료는 많으나 사람에서의 연구자료는 적은

편이다. 앞으로 고빈도 환기법에서 해결해야 할 과제로는 충분한 산소화를 이룩하는데 필요한 폐용적을 공급하는 방법에 관한 연구, 다양하게 실시되고 있는 고빈도 환기법 형태에 관한 체계적인 연구<sup>12)</sup>, 점막섬모청소<sup>57,74,75)</sup>, 폐의 림프계의 영향<sup>76,77)</sup>, 그리고 폐순환등에 관한 생리학적인 연구<sup>78-80)</sup>등도 아울러 이루어져야 할 것으로 생각된다.

## 요 약

고빈도 환기법은 최근에 개발되어 임상에 응용되면서 호흡생리학, 마취학, 집중치료의 학등의 분야에서 호흡부전의 새로운 치료법으로 관심이 집중되고 있는 환기법이다. 현재까지 고빈도 환기법중 고빈도 양압 환기와 제트 환기는 비교적 많은 연구가 되고 있고 임상적으로 사용되고 있으나 고빈도 진동 환기법은 제한적으로 사용되고 있다. 앞으로 고빈도 진동 환기법에 대해서도 더 많은 연구가 되어야 할 것이다. 또한 최근 개발되고 있는 고빈도 흉벽 진동 환기와 체표면 진동 환기에도 관심을 기울이면 호흡부전 환자의 치료에 바람직한 새로운 환기법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

현재 고빈도 환기법의 몇몇 적용형태는 기관지-늑막루등의 폐압손상으로 인한 병변의 치료의에도 기관수술, 흉부수술, 뇌수술에서 수술부위의 움직임 최소화시키면서 충분한 가스교환을 이룩할 수 있어서 효과적으로 이용되고 있다. 그러나 응급심폐소생술, 폐쇄성 폐질환, 성인 또는 영아 호흡곤란증후군등과 같은 질환에서의 적용은 더 규명되어야하겠

다.

고빈도 환기법의 여러가지 문제점중 적절한 환기빈도의 결정, 충분한 습도를 공급하는 장치, 고빈도 환기의 정확한 감시장치의 개발등은 앞으로 우선적으로 해결해야 할 문제점이다. 또한 임상에 더욱 효과적으로 응용될 수 있는 새로운 환기법이 되기 위해서는 고빈도 환기법의 호흡생리와 안정성등에 관한 연구도 병행되어야겠다.

### 참고문헌

1. Burns HL : Pneumatic balance resuscitation. *Ari Surg Bull* 2 : 306, 1945.
2. Motley HL, Werko L, Cournand A, Richards DW : Observation on the clinical use of intermittent positive pressure. *J Aviat Med* 18 : 417, 1947.
3. Perel A, Stock MC : Handbook of mechanical ventilatory support. 1st ed, Williams and Wilkins, Baltimore, 1992, p 7.
4. Tisi GM : Pulmonary physiology in clinical medicine. 2nd ed, Williams and Wilkins, Baltimore, 1985, p 229.
5. Kirby RR, Desautels D, Modell JH, Smith RA : Mechanical ventilation. In Burton CG, Gee GN, Hodgkin JE : Respiratory care : a guide to clinical practice. JB Lippincott Co, Philadelphia, 1977, p 583.
6. Webb HH, Tierney DF : Experimental pulmonary edema due to intermittent positive pressure ventilation and high inflation pressures : protection by positive end-expiratory pressure. *Am Rev Respir Dis* 110 : 556-565, 1974.
7. Taghizadeh A, Reynolds ER : Pathogenesis of bronchopulmonary dysplasia following hyaline membrane disease. *Am J Pathol* 82 : 241, 1976.
8. Standiford TJ, Morganroth ML : High-frequency ventilation. *Chest* 96(6) : 1380, 1989.
9. Chang HK, Harf A : High-frequency ventilation : a review. *Respiration Physiology* 57 : 135, 1984.
10. Rossing TH, Slutsky AS, Drazen JM : Harrison's principles of internal medicine. Update V, McGraw-Hill book Co, USA, 1984, p 219.
11. Wezel RC, Gioia F : High frequency ventilation : *Pediatric Clinics of North America*. 34(1) 5-38, 1987.
12. Frose A, Bryan C : High frequency ventilation : *Am Rev Respir Dis* 135 : 1363-1374, 1987.
13. Slutsky A : Nonconventional methods of ventilation : *Am Rev Respir Dis* 138 : 175-183, 1988.
14. 이준하, 정재천 : 위상동기투프방식을 이용한 고빈도 Jet 환기장치의 설계에 관한 연구. *영남의대학술지* 6(2) : 63-70, 1989.
15. 이상학, 정동교, 이준하, 이관호, 김영조, 정재천, 이현우, 이석강 : 위상동기투프방식을 이용한 고빈도 진동환기장치의 설계. *영남의대학술지* 6(2) : 217-222,

- 1989.
16. 김태년, 김영조, 이준하, 정재천, 이석강 : 고빈도 Jet 환기의 혈역학적 영향에 관한 연구. 대한내과학회잡지 34(6) : 781-788, 1988.
  17. 이경희, 안재희, 김태년, 정재천, 이현우, 이상학, 이준하 : 고빈도 Jet 환기법에 의한 인공호흡시 폐환기에 미치는 인자에 관한 연구. 대한내과학회잡지 37(1) : 95-103, 1988.
  18. 도준영, 이재익, 이관호, 김영조, 정재천, 이현우, 이석강 : 고빈도 진동 환기가 동맥혈의 호흡성 가스에 미치는 영향. 영남의대학술지 6(2) : 47-55, 1989.
  19. 안재희, 노진우, 이관호, 정재천, 이현우, 이석강 : 고빈도 환기법에서의 기도 및 폐포압의 변화에 대한 연구. 대한내과학회잡지 39(5) : 603-612, 1990.
  20. 이관호, 김영조, 정재천, 이현우, 남혜주, 이태숙 : 전통적 인공호흡과 고빈도 환기시 폐의 조직, 병리학적 소견의 비교관찰. 영남의대학술지 6(2) : 39-42, 1989.
  21. 이관호, 박시화, 노진우, 김태년, 정진홍, 이현우, 이석강 : 폐세척으로 유발된 호흡부전에서 고빈도 Jet 환기법의 효과. 대한내과학회잡지 43(6) : 814-826, 1992.
  22. Henderson Y, Chillingsworth FP, Whitney JL : The respiratory dead space. Am J Physiol 38 : 1, 1915.
  23. Öberg PA, Sjöstrand U : Studies of blood pressure regulation : common carotid artery clamping in studies of the carotid - sinus baroreceptor control of the systemic blood pressure. Acta Physiol Scand 75 : 276, 1969.
  24. Sanders RD : Two ventilating attachments for bronchoscopes. Del State Med J 39 : 170, 1967.
  25. Klain M, Smith RB : High frequency percutaneous transtracheal jet ventilation. Crit Care Med 5 : 280, 1977.
  26. Lunkenheimer PP, Frank I, Ising H : Intrapulmonaler Gaswechsel unter simulierter Apnoe durch transtrachealen periodischen intrathorakalen Drickwechsel. Anaesthetist 22 : 232, 1972.
  27. Butler WJ, Bohn DJ, Bryan AC, Froese AB : Ventilation by high-frequency oscillation in humans. Anesth Anal (Cleve) 59 : 577, 1980.
  28. Chang HK, M. King DM, Phillips A, Zidulka : Tracheal mucus clearance during high frequency ventilation. Proc Int Union Physiol Sci 15 : 304, 1983.
  29. Hamilton LH, Neu J, Calkins JM : High frequency ventilation. 1st ed., CRC Press, Inc, USA; 1986, p 1.
  30. Sjöstrand V : High-frequency positive-pressure ventilation(HFPPV) : A review. Crit Care Med 8 : 345, 1980.
  31. Borg U, Eriksson I, Sjöstrand U : High-frequency positive pressure ventilation (HFPPV) : a review based upon its use during bronchoscopy and for laryngoscopy and microlaryngeal surgery under general anesthesia. Anesth Analg 59 : 594, 1980.

32. Poling HE, Wolfson B : Technic of ventilation during laryngoscopy and bronchoscopy. *Br J Anesth* 47 : 382, 1975.
33. Rouby JJ, Simonneau G, Benhamou D, et al. : Factors influencing pulmonary volumes and CO<sub>2</sub> elimination during high-frequency jet ventilation. *Anesthesiology* 63 : 473, 1985.
34. Briscoe WA, Forster RE, Comroe JH : Alveolar ventilation at very low tidal volumes. *J Appl Physiol* 7 : 27, 1954.
35. Slutsky AS : Mechanisms affecting gas transport during high frequency oscillation. *Crit Care Med* 12 : 713, 1984.
36. Wright D, Lyrene RK, Truog WE, Standaert TA, Murphy J, Woodrum DE : Ventilation by high-frequency oscillation in rabbits with oleic acid lung disease. *J Appl Physiol* 50 : 1056, 1981.
37. Hamilton PP, Onayemi A, Smyth JA, Gillan JE, Cutz E, Froese AB, Bryan AC : Comparison of conventional and high-frequency ventilation : oxygenation and lung pathology. *J Appl Physiol* 55 : 131, 1983.
38. Benhamou D, Ecoffey C, Rouby JJ, Fuscicardi J, Wiars P : Impact of changes in operating pressure during high-frequency jet ventilation. *Anesth Analg* 63 : 19, 1984.
39. Rossing TH, Slutsky AS, Lehr JL, Drinker PA, Kamm R, Drazen JM : Tidal volume and frequency dependence of carbon dioxide elimination by high-frequency ventilation. *N Engl J Med* 305 : 1375-1379, 1981.
40. Walsh V, Knopp TJ, Schmid Rehder K : Ventilation-perfusion relationship during high-frequency ventilation. *J Appl Physiol* 55 : 454, 1984.
41. Brusasco V, Knopp TJ, Schmid Rehder K : Ventilation-perfusion relationship during high-frequency ventilation. *J Appl Physiol* 55 : 454, 1984.
42. Keszler H, Klain M : Importance of position of jet orifice in HFJV. *Crit Care Med* 10 : 234, 1982.
43. Smith RB, Sjöstrand UH, Babinski MF : Technical consideration using high frequency positive ventilation and high frequency jet ventilation. *Int Anesth Clin* 21 : 183, 1983.
44. Smith RB, Klain M : Experimental HFJV. *Int Anesth Clin* 21 : 39, 1983.
45. Smith RB, Klain M, Babinski M : Limits of high frequency percutaneous transtracheal jet ventilation using a fluidic logic controlled ventilator. *Can Anaesth Soc J* 27 : 351, 1980.
46. Fukuchi U, Roussos CS, Macklem T : Convection, diffusion, and cardiogenic mixing of inspired gas in the lung : an experimental approach. *Respir Physiol* 26 : 77, 1976.
47. Kolton M, Cattran CB, Kent G, Peng GV, Froese AB, Bryan AC : Oxygenation during high-frequency ventilation compared with conventional mechanical ventila-

- tion in two models of lung injury. *Anesth Analgesic* 61(40) : 323, 1982.
48. Quan SF, Milizzer HW, Calkins JM, Sobonya RE, Waterson CK, Otto CW, Conahan TJ : Comparison of high-frequency jet ventilation with conventional mechanical ventilatin in saline-lavaged rabbits. *Crit Care Med* 12(9) : 759, 1984.
  49. Boros BJ : Variations in inspiratory : expiratory ratio and airway pressure wave form during mechanical ventilation : the significance of mean airway pressure. *J Pediatr* 94 : 114, 1979.
  50. Herman S, Reynolds EOR : Methods form improving oxygenation in infants mechanically ventilated for severe hyaline membrane disease. *Arc Dis Child* 48 : 612, 1973.
  51. Cheney FW, Martin WE : Effects of continuous positive-pressure ventilation on gas exchange in acute pulmonary edema. *J Appl Physiol* 30 : 378, 1971.
  52. McEvoy RD, NJH, Davies G, Hedenstierna MT, Hartman RG : Lung mucociliary transport during high-frequency ventilation. *Am Rev Respir Dis* 126 : 452-456, 182.
  53. Nordin U, Keszler H, Klain M : How does high frequency jet ventilation effect mucociliary transport ? *Crit Care Med* 9 : 160, 1981.
  54. Gross D, O'Brien C, Wight D, Rosenthal L, Zidulka A, King M : Enhanced peripheral mucus clearance with high frequency chest wall compression. *Physiologist* 26 : A35, 1983.
  55. Zidulka A, Gross D, Minami H, Vartian V, Chang HK : Ventilation by high-frequency chest wall compression in dogs with normal lungs. *Am Rev Respir Dis* 127 : 709-713, 1983.
  56. Carlon GC, Teba L, Parker S, Maloney BW : High frequency positive pressure ventilation(HFPPV) and hemodynamic variables. *Crit Care Med* 8 : 232, 1980.
  57. Hoff B, Smith RB, Wilson E, Babinski M, Phillips W, Bennett E : High frequency ventilation during bronchopleural fistula. *Anesthesiology* 55 : a71, 1981.
  58. Otto CW, Quan SF, Conahan TS, Calkins JM, Waterson CK, Hameroff SR : Hemodynamic effects of high-frequency jet ventilation. *Anesth Analg* 62 : 298-304, 1983.
  59. Raju TND, Braverman B, Nadkarny U, Kim WD, Vidyasagar D : Intracranial pressure and cardiac output remain stable during high frequency oscillation. *Crit Care Med* 11 : 856-858, 1983
  60. Todd M, Toutant M, Shapiro M : The effects of high-frequency positive pressure ventilation on intracranial pressure and brain surface movement in cats. *Anesthesiology* 54 : 496, 1981.
  61. Fein IA, Rackow EC, Winslow L : The effect of high and low frequency ventilation on intracranial pressure. *Am Rev Respir Dis* 123 : 85, 1981.

32. Marchak BE, Thompson WK, Duffty P, et al : Treatment of RDS by high-frequency oscillatory ventilation : a preliminary report. *J Pediatr* 99 : 287-192, 1981
63. Thompson WK, Marchak BE, Bryan AC, Froese AB : Vagotomy reverses apnea induced by high-frequency oscillatory ventilation. *J Appl Physiol* 51 : 1484-1487, 1981.
64. Wattwil LM, Sjöstrand UH, Borg UR : Comparative studies of IPPV and HFPPV with PEEP in critical care patients. I : a clinical evaluation. *Crit Care Med* 11 : 30-37, 1983.
65. Schulte EJ, Kochs E, Meyer WH : Use of high frequency jet ventilation in extracorporeal shock-wave lithotripsy. *Anesthesist* 34 : 294-298, 1985.
66. Pokora T, Bing D, Mammel M, et al : Neonatal high-frequency ventilation. *Pediatrics* 72 : 27-32, 1983.
67. Harris TR, Gouch W III, Wilson JF, et al : Necrotizing tracheobronchitis associated with high-frequency jet ventilation in neonates. *Clin Res* 32 : 131, 1984.
68. Neu J, Hamilton L, Lineham J, et al : Long-term high-frequency jet ventilation in neonates. *Crit Care Med* 12 : 833, 1984.
69. Gallagher J : Clinical use of high-frequency jet ventilation in intensive care. In : Carlon GC, Howland WS ed. High-frequency ventilation in intensive care and during surgery. New York, Marcel Dekker, 1985, p 159.
70. Gettinger A, Glass DD : High-frequency positive pressure ventilation. Use in neonatal and adult intensive care. In : Carlon GC, Howland WS, eds. High-frequency ventilation intensive care and during surgery. New York, Marcel Dekker, 1985, p 63.
71. Boynton BR, Mannino FL, Davis RF, Kopotic RJ, Friederichsen G : Combined high-frequency oscillatory ventilation and intermittent mandatory ventilation in critically ill neonates. *J Pediatr* 105 : 297-302, 1984.
72. Coalson J, Kuehl T, Ackerman N, Escobedo M, Null D, deLemos R : Ventilator-associated lung injury in the premature baboon with hyaline membrane disease (abstract). *Am Rev Respir Dis* 131 (suppl : A251), 1985.
73. McCulloch PR : The role of lung volume maintenance in the prevention of lung injury during high frequency oscillatory ventilation. M Sc Thesis Queen's University, Kingston, Ontario Jan, 1986.
74. George RJ, Johnson MA, Pavia D, Agnew JE, Clake SW, Geddes DM : Increase in mucociliary clearance in normal man induced by oral high frequency oscillation. *Thorax* 40 : 433-437, 1985
75. George RJ, Moore-Gillon B, Geddes DM : High frequency oscillations improve nasal mucociliary transport. *Lancet* 7(2)10-12, 1984.

76. Jefferies AL, Hamilton P, O'Broovich HM : Effect of high-frequency oscillation on lung lymph flow. *J Appl Physiol* 55 : 1373-1378, 1983.
77. Van der zee H, Bizios R, Malik AB : Effects of high frequency ventilation on lung lymph dynamics and prostaglandin generation. *Respir Physiol* 61 : 31-42, 1985.
78. Truog W, Standaert TA : Effect of high-frequency ventilation on gas exchange and pulmonary vascular resistance in lambs. *J Appl Physiol* 59 : 1104-1109, 1985.
79. Wetzel RC, Gordon JB, Gregory TJ, Gioia FR, Adkinson NF Jr, Sylvester JT : High-frequency ventilation attenuation of hypoxic pulmonary vasoconstriction. the role of prostacyclin. *Am Rev Respir Dis* 132 : 99-103, 1985.
80. Hall SM, Chapleau M, Cairo J, Levizky MG : Effect of high-frequency positive-pressure ventilation on halothane ablation of hypoxic pulmonary vasoconstriction. *Crit Care Med* 13 : 641-645, 1985.



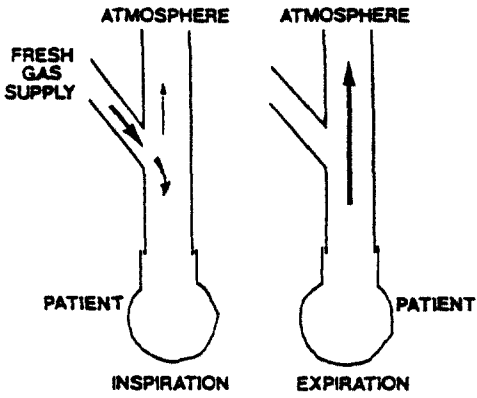


Fig. 1. Schematic diagram of gas flow during high-frequency positive-pressure ventilation.

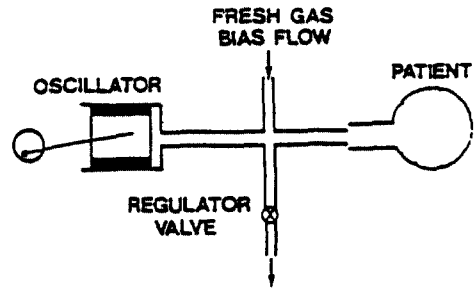


Fig. 3. Schematic diagram of gas flow during high-frequency oscillatory ventilation.

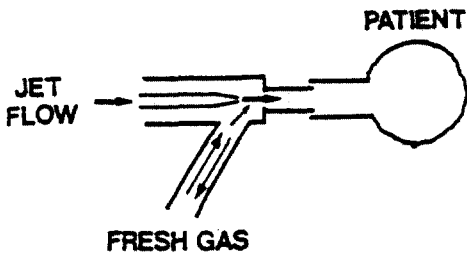


Fig. 2. Schematic diagram of gas flow during high-frequency jet ventilation.

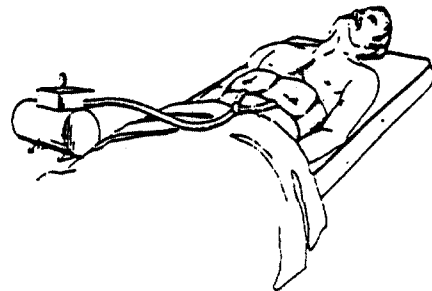


Fig. 4. A sketch of the apparatus used in high-frequency chest wall oscillation.