

자가 호기말 양압(auto-PEEP)의 측정 방법

한양대학교 의과대학 내과학교실, ¹울산 대학교 의과대학, 서울 아산 병원 호흡기 내과학교실
손장원, 고윤석¹

Measurement of Auto-PEEP

Jang Won Sohn, M.D., Younsuck Koh, M.D.¹

Department of Internal Medicine, Hanyang University College of Medicine, ¹Division of Pulmonary and Critical Care Medicine, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine

I. 자가 호기말 양압(Auto-PEEP)의 발생

정상 폐 또는 폐실질의 손상을 받은 폐(parenchyma injured lung)는 일반적인 인공호흡기 설정에 의한 인공환기 동안 흡입된 일회 호흡량(tidal volume)이 호기시간 동안 완전히 배출된다. 따라서 다음 흡기 시작 전에 폐용적이 기능적 잔기량(functional residual capacity, FRC)상태로 돌아 온다¹. 기능적 잔기량은 호기말의 폐 실질 및 기도의 용적을 말하며, 정상적인 경우 흡기 동안 축적된 탄성 에너지가 호기를 완결하는데 충분하기 때문에 호기 말(end-expiration)에는 흡기가 완전히 배출되고 탄성 에너지도 소실된다. 즉, 기능적 잔기량 상태에서는 폐실질과 흉벽 간에 탄성력이 평형을 이루어 폐포 내에 발생하는 압력은 없으며 호기 기류(expiratory flow)도 존재하지 않게 된다. 그러나 천식이나 만성 폐쇄성 폐질환과 같은 기류 폐쇄(airflow obstruction) 질환에서는 감소된 호기 유량(expiratory flow)으로 인하여 사전에 설정된 호기 시간 동안 호기가 완결되지 못하고 폐용적이 기능적 잔기량 이상으로 증가된 상태가 계속 진행하여 폐의 동적 과팽창(dynamic hyperinflation)이 초래된다^{2,3}(Fig. 1). 동적 과팽창(dynamic hyperinflation) 상태가 되면 호기 말에 폐 용적이 평형 상태인 기능적 잔기량까지 도달하지 못하고 다음 흡기가 시작 되므로 호기 말의 폐 용적이 기능적 잔기량 이상으로 증가된 상태로 남

게 되면, 호흡기계의 탄성압에 의해 폐포내 압력이 양압을 유지하게 된다^{4,5}. 이러한 경우를 자가 호기말 양압 (auto-PEEP)이라고 하며 호기가 끝나는 시점까지 호기 기류가 계속 유지되게 된다. 정도의 호기류 폐쇄가 있는 경우에는 증가된 폐 용적으로 인하여 폐 탄성이 증가하고 소기도의 확장효과로 호기류(expiratory flow)의 추진력이 증가되어 폐 과팽창이 일종의 적응 과정(adaptation process)으로 작용 할 수 있다. 그러나 심한 기류 폐쇄가 있는 경우에는 폐 용적의 상당한 증가에도 불구하고 adaptation을 하지 못하고 폐 과팽창이 진행하여 호흡역학을 더 악화시킨다¹.

인공 환기 중 auto-PEEP이 발생하는 요인은 크게 나누어 2가지로 분류 할 수 있는데, 첫째는 인공기도, 기관 분비물, 기도 수축, 호기류 제한 등 증가된 기도 저항이며, 둘째는 증가된 호흡수, 과도한 1회 호흡량, 짧은 호기 비율 등 인공 호흡기 설정의 오류에 의한 불충분한 호기시간 이다^{2,3,6,7}.

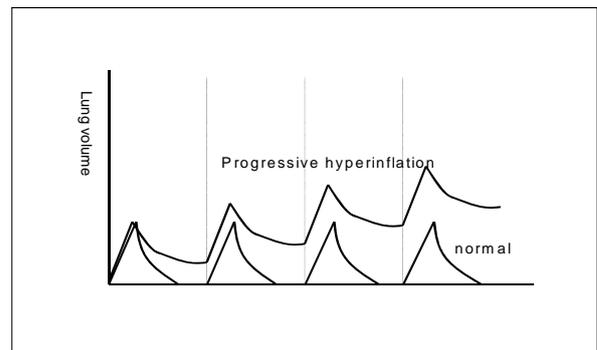


Figure 1. During conventional ventilation of normal lungs, all of tidal volume is exhaled, resulting in a return of lung volume to FRC. In airway obstruction, slow expiratory flow causes incomplete exhalation of tidal volume and results in progressive dynamic hyperinflation.

Address for correspondence : **Younsuck Koh M.D.**
Division of Pulmonary and Critical Care Medicine,
Asan Medical Center, University of Ulsan College of
Medicine, 338-1, Poongnap-dong, Songpa-gu, Seoul,
138-736, Korea
Phone : 02-3010-3134 Fax : 02-3010-4709
E-mail : yskoh@amc.seoul.kr

II. 자가 호기말 양압의 임상적 의의

1. 호흡근육과 환기에 미치는 효과

동적 과팽창으로 호기말 폐포 압력이 양압 상태로 존재하면 흡기를 시작하기 위해 폐포의 양압(auto-PEEP)을 상쇄 시키는 흉곽 내 음압 발생(또는 상부 기도의 압력 증가)이 있는 후에야 비로소 중심 기도에 흡기에 필요한 압력 차를 유발할 수 있다. 따라서 auto-PEEP이 흡기 시작의 압력 장애물로 작용해서 호흡에 더 많은 노력이 필요하게 된다. 이로 인해 인공호흡을 하는 환자는 흡기의 시작(trigger)에 더 많은 압력 발생이 필요하게 되고 인공 호흡기 이탈기에 있는 환자도 압력 보조 환기의 효과가 떨어지게 된다^{7,8}.

또한 폐의 과팽창으로 횡격막이 하방으로 이동하고 횡격막의 정상 곡선도 소실된다. 늑골도 수평으로 상향 이동이 일어나 효과적인 호흡근육의 작용을 못하게 되고 환기 펌프로의 효과가 떨어지게 된다. 보조 호흡근의 사용이 증가하고 산소 소모량도 증가하여 호흡근육에 필요한 에너지의 공급/소모 불균형으로 근육 피로(muscle fatigue)도 잘 나타난다.

2. 순환기계에 미치는 효과

폐 과팽창으로 흉곽 내 평균 압력이 상승하면 우심방 평균압이 상승하고 정맥혈의 환류도 감소하게 된다. 또한 폐포의 과팽창은 폐 순환의 기계적 저항을 증가시켜 우심실의 후부하(after load)가 증가된다. 이로 인해 심박출량의 감소와 혈압의 하강 등 혈액학적 불안정이 초래된다⁵.

동적 과팽창에 의해 호흡일이 증가되고 혈액학적 불안정이 증대되면 환자는 심한 불안과 호흡곤란을 느끼게 되고 더욱 과호흡과 빈호흡을 하게 된다. 그러나 환자의 이러한 반응은 폐의 과팽창을 더욱 악화시키며 환자가 느끼는 호흡곤란은 더 심해지게 된다. 결국 동적 과팽창이 악화되는 악순환이 지속된다(panic cycle)⁹.

III. 자가 호기말 양압의 확인 및 정도의 평가

1. 임상적 확인

자가 호기말 양압이 있으면 다음 번 흡기가 시작되는 시점에서 호기가 완료되지 못하고 호기 기류가 계속되게 되므로 청진기로 상부 기관 부위나 인공 호흡기의 호기 밸브 부위에서 호기 말 기류(end-expiratory flow)가 존재하는지 청진 할 수 있다. 인공 호흡기의 monitor 상에서 압력과 기류 곡선을 추적하여 호기 말 기류의 존재를 확인 할 수도 있다.

2. 방사선학적 평가

주관적 요소가 많고 폐의 역학 상태를 정확히 반영하지 못한다. 폐의 상하 길이와 횡격막의 위치가 폐 압력 손상의 지표가 된다는 보고가 있으나 동적 과팽창의 객관적 지표로의 방사선학적 소견에 대한 연구는 미진하다¹⁰.

3. 자가 호기말 양압(auto-PEEP)의 정량적 측정

자가 호기말 양압(Auto-PEEP)은 고정된 수치가 아니라 환기가 이루어 지는 각각의 환기 단위마다 각각의 저항과 유순도에 따라 다른 수치를 보이며 일회 호흡량(tidal volume), 호기 시간의 변화에 따라서 auto-PEEP 수치도 달라진다.

4. Auto-PEEP 측정 방법

1) 호기말 호기관 폐쇄법(end-expiratory port occlusion, static auto-PEEP)

인공 환기 동안 auto-PEEP이 존재하여도 인공 호흡기의 호기 관(expiratory port)이 열려 있으므로 폐포의 양압이 압력계에 반영되지 않는다. 그러나 호기 말에 호기관을 막으면 약 0.5-1초가 경과한 후 폐포 압력이 중심기도로 전달되어 압력계에 반영되어 측정이 가능하다⁵. 이때 측정되는 수치는 호흡이 정지된 상태에서 측정되므로 정적 자가 호기말 양압(static

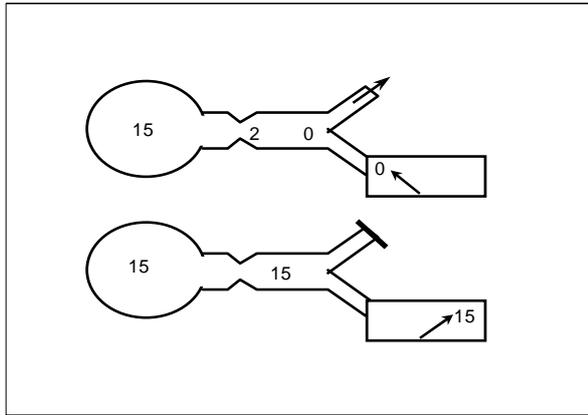


Figure 2. Measurement of auto-PEEP by expiratory port occlusion. With severe airflow obstruction, alveolar pressure remained elevated and slow flow continues. The ventilator manometer does not sense pressure because it is open to atmosphere. With gas flow stopped by occlusion of the expiratory port, pressure equilibrates throughout the lung-ventilator system and is displayed on the manometer.

auto-PEEP)이라고 하며, 모든 폐포 압력의 평균 수치를 나타낸다¹¹. 수동적 측정도 가능하지만 요사이 사용되는 거의 모든 인공호흡기에는 간단히 측정할 수 있는 장치가 부착되어 있다(Fig. 2). 이 방법을 이용할 때는 환자의 자발 호흡이 없어야 하므로 큰 이완제와 안정제를 투여하여 환자의 호흡노력이 없는 상태에서 측정하여야 한다.

2) 흡기 유발 압력 상쇄법(proto-inspiratory counterbalancing, dynamic auto-PEEP)

근위부 기도 압력이 폐포의 양압을 상쇄하고 그 보다 더 높아지면 흡기 기류가 발생하기 시작한다. 기도압의 상승과 흡기 기류의 발생이 동시에 일어나면 auto-PEEP이 없다고 판단하며 기도압이 상승하면서 호기 기류가 흡기 기류로 바뀌는 순간 (즉, 기류가 0인 시점)의 기도압이 auto-PEEP을 상쇄한 압력 이므로 auto-PEEP으로 측정한다(Fig. 3). 자발 호흡이 있는 환자는 식도 풍선 카테터를 삽입하여 흉곽 내압의 변화를 측정하면 같은 방법으로 auto-PEEP을 측정할 수 있다¹². 즉, 식도 풍선 카테터에 나타나는 pleural pressure의 변동과 기류를 같이 측정하여 흡기 기류가 시작되는 시점의 식도 내압의 감소 폭을 auto-PEEP으로 측정한다. 이 방법은 호흡이 정지되지 않고 계속

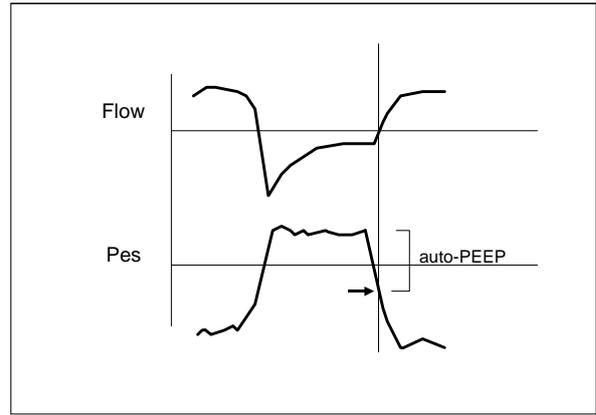


Figure 3. Recording of flow and esophageal pressure (Pes). Dynamic auto-PEEP is measured as the negative deflection in Pes from the start of inspiratory effort to the onset of inspiratory flow.

Table 1. Comparison of static and dynamic auto-PEEP

	static auto-PEEP	dynamic auto-PEEP
Flow	flow stop	flow continuing
Auto-PEEP	average value	least value
Level	higher	lower
Mode	controlled	controlled & spontaneous

되는 상태에서 측정되므로 동적 자가 호기말 양압 (dynamic auto-PEEP)이라 하고 압력 상쇄로 흡기가 시작되는 가장 낮은 auto-PEEP 수준을 반영하므로 일반적으로 static auto-PEEP보다 낮다(Table 1)^{12,13}.

3) 호기말 양압 상쇄법(PEEP substitution)

Auto-PEEP을 일종의 압력 장벽으로 생각하여, auto-PEEP 보다 낮은 수준의 외부 PEEP의 적용은 auto-PEEP을 상승 시키지 않는다는 가정 하에 (waterfall analogy), PEEP을 점차 상승시켜 호기말 기류가 소실되는 (또는 plateau pressure가 증가하지 않는) 최소의 PEEP을 auto-PEEP을 상쇄하는 압력 수준으로 추정하는 방법이다^{14,15}. 폐기종과 같이 동적 기류제한이 있는 경우에는 auto-PEEP의 약 85% 수준의 PEEP 적용은 폐 용적의 증가가 없다고 알려져 있으므로 이런 경우에 한해서 적용해 볼 수 있다¹⁶. 동적 기류 제한은 호기 동안 소기도의 허탈을 방지해 주는 주변 폐실질의 파괴로 인해 호기 동안에 소기도 내부의 압력 (intraluminal pressure)보다 높은 주위 압력으로 소기도의 폐쇄가 일어나 강한 호기 노력이나 기도압의 변

화가 있어도 소기도 주변의 압력차에 의해서 소기도 폐쇄가 동적으로(dynamic) 더 심해져 호기 기류(expiratory flow)의 증가가 나타나지 않는 현상이다. 그러나 천식과 같이 호기 시에 동적 기류 제한(dynamic flow limitation)이 없으면 PEEP적용으로 호기가 방해되어 PEEP에 비례하여 낮은 수준의 외부 압력 적용에도 폐용적이 증가한다. 결국, 이 방법의 적용 가능 여부는 호기동안 동적 기류 제한(dynamic flow limitation)의 유무에 달려있다^{8,16,17}.

5. 흡기 정지 기도압(end-inspiratory plateau pressure)

흡기 정지 기도압은 흡기 종료 후의 최대 폐포압을 반영하는 지표로 흡기에 의해 발생한 탄성압과 흡기 시에 이미 존재 했던 auto-PEEP의 합이다. 따라서 일회 호흡량 (tidal volume)이 일정하다면 흡기 정지 기도압의 변동은 폐 과팽창의 변동을 잘 반영한다. 통상적인 인공 환기 상태에서 plateau pressure를 측정하고 호기 시간을 충분히 늘려서 폐 과팽창을 해소한 뒤에 plateau pressure를 다시 측정하면 그 차이를 과팽창의 정도(auto-PEEP)로 표현 할 수 있다.

6. 포획 가스 방출(release of trapped gas)

호기 시간을 충분히 길게 하여 (30초 이상) 이때 방

출되는 호기의 용적을 측정후 일회 호흡량과 비교하면 과 팽창되었던 공기의 용적을 구할 수 있다(Fig. 4). 자발호흡이 없는 상태에서 pneumotachygraph로 호기량을 측정할 수 있다. 이때 환자는 자발 호흡노력이 없어야 하므로 충분한 근 이완제와 안정제 투여가 필요하다. 일반적인 인공 호흡기는 30초 이상의 무호흡을 지속할 경우에 사전에 안전 장치로 설정된 강제 환기가 일어나므로 인공 호흡기를 제거하고 호기 가스 용적을 측정하여야 한다. 상업적으로 이용이 가능한 장비는 여러 종류가 있으며, 국내의 여러 병원에서 보유하고 있는 CP-100 pulmonary monitor (BiCore, USA)를 측정에 이용할 수 있다. 기능적 잔기량 이상으로 증가된 폐 용적을 측정하면 이 자체로도 과 팽창

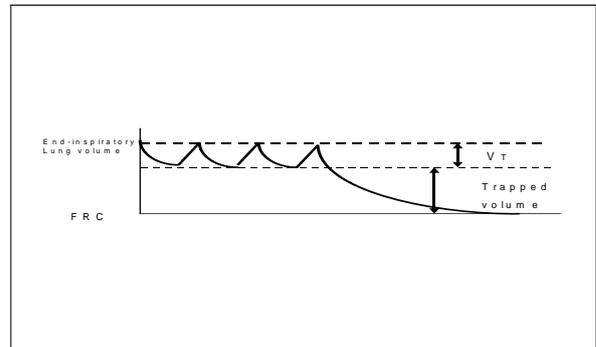


Figure 4. Schematic representation of the measurement of end-inspiratory lung volume. The difference between end-inspiratory lung volume and tidal volume represents the trapped volume.

Table 2. Individual values of measured and calculated auto-PEEP.

Patient No.	Measured auto-PEEP(cmH ₂ O)	Calculated auto-PEEP(cmH ₂ O)	Trapped vol. (ml)	Compliance (ml/cmH ₂ O)
1	8	10	300	30
2	11	12.3	370	30
3	6	4.6	220	48.2
4	6.5	7.8	211	27
5	11	10.7	165	15.4
6	11	11.1	396	35.8
7	6.5	7.1	182	25.8
8	10	11.9	397	33.3
9	10	12.9	429	33.3
10	8	7.1	390	55
11	8	7.7	505	65.8
12	12	7.5	150	20
13	8	9	610	68
14	11	11.1	572	51.7
15	17	15.9	650	40.8
Mean ± SD	9.60 ± 2.82	9.78 ± 2.90		

(Calculated auto-PEEP = trapped lung volume / static compliance)
(This data are unpublished yet.)

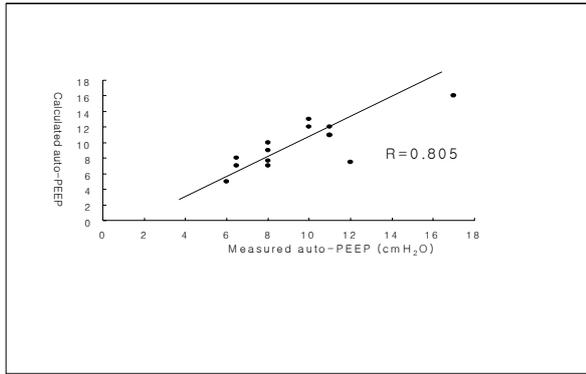


Figure 5. Relationship between measured auto-PEEP and calculated auto-PEEP. This data showed statistically significant relationship between measured auto-PEEP obtained by end-expiratory port occlusion method and calculated auto-PEEP calculated by trapped lung volume and compliance.

의 정도를 알 수 있는 지표가 된다^{17,18}. 호흡기계의 탄성(static compliance)에 의해 과 팽창된 폐 용적만큼의 양압이 발생된 것이 auto-PEEP이므로, 이론적으로 기능적 잔기량 이상으로 팽창된 폐 용적을 정적 탄성으로 나눈 값은 static auto-PEEP과 같은 의미를 가지게 된다. 이와 같은 가정을 실제로 확인하여 발표한 연구는 지금까지 없었으나, 저자 등이 호흡부전으로 중환자실에 입원하여 인공호흡기 치료를 받는 환자 중 자가 호기말 양압이 높았던 15명의 환자를 대상으로 하여 호기말 호기관 폐쇄법으로 측정된 auto-PEEP과 기능적 잔기량이상 과팽창된 폐 용적을 정적 탄성으로 나누어 구한 auto-PEEP 수치를 직접 비교해본 결과 동일한 결과를 보임을 확인할 수 있었다 (Table 2, Fig. 5).

IV. Auto-PEEP의 치료

Auto-PEEP과 폐의 동적 과팽창은 환자 자체의 요인도 있으나 인공호흡기 설치 및 구동 설정의 잘못에 의해서 악화될 수 있다. 충분한 기관지 확장제 투여와 큰 직경의 기관 내관의 사용 및 기도 분비물의 제거도 필요하며, 인공 호흡기 치료 초기에는 환자를 안정시키고 폐 과팽창 유무를 수시로 확인하며 불필요하게 과도한 일회 호흡량과 호흡수를 가능한 줄여서 폐 과팽창의 발생을 예방한다.

참 고 문 헌

1. Tuxen Dr, Lane S. The effects of ventilatory pattern on hyperinflation, airway pressure and circulation in mechanical ventilation of patients with severe airflow obstruction. *Am Rev Respir Dis* 1987;136: 827-9.
2. O'Donnell DE, Bertley JC, Chau LK, Webb KA. Qualitative aspects of exertional breathlessness in chronic airflow limitation: pathophysiologic mechanisms. *Am J Respir Crit Care Med* 1997;155: 109-15.
3. Haluszka J, Chartrand DA, Grassino AE, Milic-Emili J. Intrinsic PEEP and arterial PaCO₂ in stable patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Am Rev Respir Dis* 1990;141:1194-7.
4. Kimball WR, Leith DE, Robins AG. Dynamic hyperinflation and ventilator dependence in chronic obstructive pulmonary disease. *Am Rev Respir Dis* 1982;126:991-5.
5. Pepe PE, Marini JJ. Occult positive end-expiratory pressure in mechanically ventilated patients with airflow obstruction: the auto-PEEP effect. *Am Rev Respir Dis* 1982;126: 166-70.
6. Marcy TW, Marini JJ. Inverse ratio ventilation in ARDS: rationale and implementation. *Chest* 1990; 100:494-504.
7. Rossi A, Polese G, Brandi G, Conti G. Intrinsic positive end-expiratory pressure (PEEPi). *Intensive Care Med* 1995;21:522-36.
8. Smith TC, Marini JJ. Impact of PEEP on lung mechanics and work of breathing in severe airflow obstruction. *J Appl Physiol* 1998;65:1488-99.
9. Fleury B, Murciano D, Talamo C, Aubier M, Pariente R, Milic-Emili J. Work of breathing in patients with obstructive pulmonary disease in acute respiratory failure. *Am Rev Respir Dis* 1985;131:822-7.
10. Johnson MM, Ely EW, Chiles C, Bowton DL, Friedman RI, Choplin RH, et al. Radiographic assessment of hyperinflation: correlation with objective chest radiographic measurements and mechanical ventilator parameters. *Chest* 1998;113:1698-704.
11. Gottfried SB, Reissman H, Ranieri VM. A simple method for the measurement of intrinsic positive end-expiratory pressure during controlled and assisted modes of ventilation. *Crit Care Med* 1992;20:621-9.
12. Maltais F, Reissmann H, Navalesi P, Hernandez P, Gursahaney A, Ranieri VM, et al. Comparison of static and dynamic measurements of intrinsic PEEP in mechanically ventilated patients. *Am J Respir Crit Care Med* 1994;150:1318-24.
13. Yan S, Kayser B, Tobiasz M, Sliwinski P. Comparison

- of static and dynamic intrinsic positive end-expiratory pressure using the Campbell diagram. *Am J Respir Crit Care Med* 1996;154:938-44.
14. Tobin MJ, Lodato RF. PEEP, auto-PEEP, and waterfalls. *Chest* 1989;96:449-51.
 15. Hoffman RA, Ershowsky P, Kreiger BP. Determination of auto-PEEP during spontaneous and controlled ventilation by monitoring changes in end-expiratory thoracic gas volume. *Chest* 1989;96:613-6.
 16. Ranieri VM, Giuliani R, Cinnella G, Pesce C, Brienza N, Ippolito EL, et al. Physiologic effects of positive end-expiratory pressure in patients with chronic obstructive pulmonary disease during acute ventilatory failure and controlled mechanical ventilation. *Am Rev Respir Dis* 1993;147:5-13.
 17. Tuxen DV. Detrimental effects of positive end-expiratory pressure during controlled mechanical ventilation of patients with severe airflow obstruction. *Am Rev Respir Dis* 1989;140:5-9.
 18. Tuxen DV, Williams TJ, Scheinkestel CD, Czarny D, Bowes G. Use of a measurement of pulmonary hyperinflation to control the level of mechanical ventilation in patients with acute severe asthma. *Am Rev Respir Dis* 1992;146: 1136-42.
-