

수정된 압력변위법을 이용한 과채류 호흡속도 측정

이현동** · 정헌식** · 강준수* · 정신교 · 최종욱
경북대학교 식품공학과, *동의공업전문대학 식품공학과
**경북대학교 농산물가공저장유통기술연구소

A Respiration Rate Measurement of Fresh Fruits and Vegetables with a Corrected Pressure Variation Method

Hyun-Dong Lee**, Hun-Sik Chung**, Jun-Soo Kang*, Shin-Kyo Chung, Jong-Uck Choi

Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University

**Department of Food Engineering, Dongeui Technical College*

***Postharvest Technology Research Institute, Kyungpook National University*

Abstract

This study was carried out for improvement and correction of the traditional pressure variation method (PVM) in the respiration rate measurements of fresh fruits and vegetables using a microcomputer system and a differential pressure sensor. Water vapor pressure in the container was calculated by equations for psychrometric calculations. At the beginning of experimental period water vapor pressure in the container was increased and maintained constantly in the most experimental period, but was decreased dramatically after CO₂ scrubbing. The percentages of water vapor pressure on total differential pressure were 33~46% at 1°C, 23~45% at 11°C and 35~53% at 21°C. The differences between the respiration rates determined by gas chromatography and corrected pressure variation method (CPVM) were 0.2~0.3 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹ at 1°C, 0.2~2.9 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹ at 11°C and 1.0~9.0 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹ at 21°C, while those between gas chromatography and normal pressure variation method (PVM) were 0.8~1.2 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹ at 1°C, 3.9~11.0 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹ at 11°C and 8.0~32.0 mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹ at 21°C, respectively. The differences of the respiration rates with CPVM were smaller than those with PVM. CPVM, therefore, were more exact and convenient method than PVM in the measurement of respiration rate of fresh produce.

Key words: Pressure Variation Method, Corrected Pressure Variation Method, respiration rate, water vapor pressure

서 론

과채류는 호흡에 의해서 에너지원이 분해되어 노화가 촉진되므로 영양적 가치가 감소될 뿐만 아니라 풍미와 맛 등의 관능적 품질도 저하된다. 따라서 과채류의 수확 후 관리기술은 저온, 환경기체조절 등을 통한 호흡속도 억제에 집중되고 있다^(1,2). 과채류의 호흡속도를 억제하기 위해서는 호흡속도를 정확하게 측정하는 것이 필수적으로 요구된다. 그러나 과채류의 호흡속도는 같은 종류의 과채류라도 작물의 부위, 재배지역, 재배환경, 재배시기에 따라 달라지고 온도, 습도

및 공기조성 등의 환경조건에도 영향을 받기 때문에 다양한 조건을 고려한 실험을 통해서만 정확한 호흡속도 값을 얻을 수 있다^(3,5).

과채류의 호흡속도를 측정하는 다양한 방법 중 호흡에 의한 대기의 압력변화로부터 호흡속도를 측정하는 방법인 마노메타 법은 장치 및 작동원리가 간단하여 쉽게 호흡속도를 측정할 수 있다. Forcier 등⁽⁶⁾은 마노메타 법에서 압력을 측정할 때 발생하는 측정 오차를 줄이기 위해서 압력센서를 이용하여 압력을 측정하는 방법인 압력변위법(pressure variation method, PVM)을 제안하였다. 그러나 이 방법의 가장 큰 문제점은 과채류의 증산작용에 의한 저장환경의 수증기압변화와 호흡에 의한 압력의 변화가 함께 측정되므로 측정값의 정확도가 떨어진다는 것이다. 즉, 호흡에 의해서 변화

Corresponding author: Jong-Uck Choi, Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University, 1370 Sankyuk-dong, Taegu 702-701, Korea

된 CO₂의 분압을 측정하기 위하여 CO₂흡수 scrubber를 가동할 때 수증기가 CO₂와 함께 흡수된다. 따라서 CO₂제거 후 실제 압력센서에서 측정되는 압력을 scrubber에 의해서 제거된 CO₂의 분압보다 더 큰 값을 나타내어 호흡속도 측정의 오차로 작용하게 된다.

본 연구에서는 PVM으로 호흡속도를 측정할 때 가장 큰 오차요인인 수증기압에 의한 압력 변화를 보정하기 위해서 수정된 압력변위법(Corrected PVM, CPVM)을 도입하였다. 이 방법에는 호흡속도 측정 용기내의 수증기압 변화를 경시적으로 측정하여 scrubber가동전후의 수증기압 차이를 호흡속도를 계산할 때 보정하여 주어 보다 정확하고 간편하게 호흡속도를 측정할 수 있도록 하였다.

재료 및 방법

재료

사과, 바나나, 자두, 토마토를 호흡속도 측정시료로 사용하였다. 시료의 유통 및 저장 온도를 고려하여 1°C, 11°C, 21°C로 설정하였다. 그러나 1°C에서 저온 장애를 받는 바나나와 토마토는 11°C와 21°C에서만 실험을 수행하였다. 호흡속도를 정확하게 측정하기 위하여 각 구간의 실험을 수행하기 전에 시료를 실험 온도에서 12시간동안 방치하여 시료의 온도와 대기의 온도가 평형을 이루도록 하였다.

호흡속도 측정 장치

장 치: 계측장치와 CO₂ scrubber, 마이크로컴퓨터 시스템으로 Fig. 1과 같이 호흡속도 측정장치를 제작하였다. 계측용기는 압력변화에 의한 용기의 형태변화를 방지하기 위하여 두께 5 mm의 아크릴 파이프(직

경 15 cm, 높이 20 cm)를 이용하여 설계 제작하였다. 실리콘 개스킷과 볼트와 너트를 이용하여 장치를 밀폐할 수 있도록 하였다. 장치의 뚜껑에는 건습구 온도센서(k-type thermocouple), 압력센서(MPX-10-DP, Motorola), 기체시료 채취구와 scrubber로 통하는 입출구를 설치하였다. 본 연구에 사용된 압력센서는 측정범위가 0~10 kPa이고 감도는 3.5 mV/kPa이며 선형성은 ±1.0% full scale이었다. 장치의 기밀성은 H₂O manometer를 이용하여 가압과 감압상태에서 각 72시간 씩 실험하여 확인하였다. CO₂ scrubber는 길이 20 cm, 직경 3 cm의 유리칼럼에 입상 KOH를 충전한 CO₂흡수 칼럼과 diaphragm pump로 제작하였다. 칼럼 충전물은 유리 칼럼 안의 KOH가 실험 수행 중 수분의 흡수로 그 형태가 허물어지는 시기를 선택하여 교체하였다.

측정장치의 운용

온도평형이 이루어진 시료를 호흡속도 측정용기 용적의 35%~45%정도가 되도록 넣었다. 시료를 넣는 동안에 scrubber를 계속 가동하여 용기내부에 탄산가스가 축적되는 것을 방지하였으며 이 사이에도 건습구 온도 및 압력의 변화를 관찰하였다. 장치를 밀폐 시킨 후 식 (1)에 의해 결정된 방치시간동안 시료를 호흡속도 계측 용기내에 방치하며 압력의 변화와 건습구 온도의 변화를 10초간격으로 모니터링하며 수집하였다. 방치시간이 끝난후 scrubber를 3분동안 가동시켜 용기내의 CO₂를 제거하고 이때 발생하는 압력의 변화와 건습구온도의 변화를 측정하였다. 수집된 압력 변화 및 건습구온도 자료를 이용하여 압력센서로 측정된 압력의 변화량 중에서 수증기압의 변화를 제외한 호흡에 의한 압력의 변화를 구하여 호흡속도를 환산하였다.

GC를 이용한 호흡속도 측정

본 연구에서는 PVM법과 CPVM법으로 측정한 호흡속도 자료를 검정하기 위하여 같은 실험 조건에 대해서 GC를 이용하여 호흡속도를 측정하였다. 호흡속도 계측장치로부터 구한 실험치와 비교할 수 있는 기준치를 얻기 위하여 방치시간이 끝나는 시간과 scrubbing후 용기내 CO₂의 잔존여부를 조사하기 위하여 scrubber작동 직후에 샘플을 채취하였다. 본 실험에 사용된 GC (Pye Unicam 304, Philips, U.K.)에는 80~100 mesh의 Porapak Q를 충전한 glass column (4 mm × 2.7 m)을 사용하였으며 column 온도 115°C, injector온도 120°C 그리고 detector 온도는 152°C로 설정하여 이동상으로 헬륨가스를 분당 30 ml의 속도로 흘려보내며 CO₂량을 측정하였다.

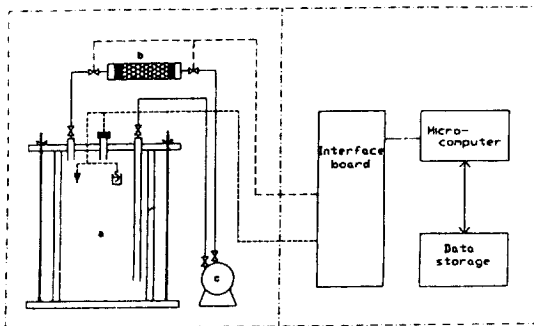


Fig. 1. Schematic diagram of respiration measuring system. a: respiration measuring container b: CO₂ absorbing column c: diaphragm pump.

방치시간 결정식

용기내부의 기체조성에 따라 호흡속도가 바뀌는 현상을 방지하고, scrubber의 CO₂ 흡수능력을 극대화시켜서 용기내의 잔류 CO₂에 의한 실험오차를 줄이기 위해서, 계측용기 내부의 CO₂농도를 일정한 수준으로 조절할 필요가 있다. 본 연구에서는 작물의 호흡에 의해 계측용기 내부의 CO₂ 농도가 약 2%가 될 때 호흡속도를 측정하였는데, 이 때까지의 시간인 방치시간(t_d)을 결정하기 위하여 식 (1)을 도입하였다⁽⁶⁾.

$$t_d = \frac{0.02 P V M_{CO_2}}{R_{CO_2, mp} R T} \quad (1)$$

이 식에서 M_{CO_2} 는 CO₂의 분자량(44000 mg CO₂ mol⁻¹), V는 호흡속도 측정용기 내부의 void volume (m³), R은 기체상수(8.314 m³ Pa mol⁻¹K⁻¹), T는 호흡속도 측정용기 내부의 온도(K), mp=시료의 질량(kg), P=대기압(101325 Pa), R_{CO_2} (mgCO₂·kg⁻¹·h⁻¹)는 호흡속도를 나타낸다⁽²⁾.

호흡속도 계측 용기내의 수증기압

과채류의 증산작용 및 CO₂ scrubber가동에 의한 장치내부의 수증기압의 변화를 구하기 위해서 습윤도표를 curve fitting하여 아래의 식 (2)와 같이 건구온도(T_{db}) 및 습구온도(T_{wb})로부터 절대습도(ω)를 계산할 수 있는 식 (3)을 도출하였다⁽⁷⁾.

$$\omega = -0.0004 \times T_{db} + C \quad (2)$$

여기서, $C = Y + 0.0004 \times T_{wb}$

$$Y = 0.00395237 \times \text{EXP}(0.0648395 \times T_{wb})$$

$$\text{수증기압(Pa)} = \frac{101325\omega}{(0.622 + \omega)} \quad (3)$$

호흡속도

식 (3)에서 구한 호흡속도 측정 용기 내부의 증기압 자료와 식 (4)와 (5)를 이용하여 방치시간동안 호흡속도 측정 용기내의 압력 변화량(ΔP_T , Pa)와 CO₂ scrubber가동시 CO₂제거로 발생하는 압력의 변화($\Delta P'_{CO_2}$, Pa)를 계산하여 구하였다. CO₂제거중에도 저장 과채류의 호흡에 의해서 CO₂는 발생하므로 실제 흡수된 CO₂의 양($\Delta P'_{CO_2}$, Pa)은 방치시간(t_d)동안 발생한 CO₂양과 CO₂ Scrubber 가동중에 발생한 CO₂양의 합과 같다. 따라서 이를 보정하고자 식 (6)을 사용하여 방치시간동안 시료의 호흡에 의해 발생한 순수한 CO₂의 분압(ΔP_{CO_2} , Pa)을 구하였다⁽⁶⁾.

$$\Delta P_T = \Delta P_{S1} - \Delta P_{V1} \quad (4)$$

$$\Delta P'_{CO_2} = \Delta P_{S2} - \Delta P_{V2} \quad (5)$$

$$\Delta P_{CO_2} = \Delta P'_{CO_2} - 0.05[\Delta P'_{CO_2} + \text{abs}(\Delta P_T - \Delta P'_{CO_2})]t^{-1} \quad (6)$$

이식에서 ΔP_{S1} 은 방치시간동안 sensor로 측정한 호흡속도 계측 용기내의 압력변화량(Pa), ΔP_{V1} 은 방치시간동안 호흡속도 계측 용기내의 수증기압의 변화량(Pa), ΔP_{S2} 는 CO₂ scrubber 가동중 sensor로 측정한 압력의 변화량(Pa)이며 ΔP_{V2} 는 CO₂ scrubber 가동중 수증기압의 변화량(Pa)이다.

식 (6)에서 구한 CO₂의 분압(Δp_{CO_2})을 이상기체 상태 방정식을 이용한 식 (7)에 적용시켜 시료의 호흡속도 (mg CO₂ kg⁻¹h⁻¹)를 계산하였다.

$$R_{CO_2} = \frac{(\Delta P_{CO_2})M_{CO_2}V}{RTmp_t} \quad (7)$$

결과 및 고찰

저장 중 압력변화

각 시료의 저장온도에 따른 호흡속도 계측 용기 내부의 저장 중 압력변화는 Fig. 2~4와 같이 실험조건에 관계없이 유사한 경향을 나타내었다. 전반적으로 저장초기에 압력이 급격히 상승한 후 완만한 증가 양상을 나타내었다. 저장 초기의 압력이 대수적으로 증가하는 것은 저장 과채류의 호흡 및 증산작용 때문에 일어나는 현상으로 생각된다. 밀폐된 공간에서 호흡속도를 측정할 경우 수증기압의 평형이 이루어 질 때까지는 증산에 의한 압력의 증가가 훨씬 빨리 일어나므로, 저장 초기의 압력변화는 과채류의 증산작용에 의한 압력의 증가가 주 요인으로 생각된다⁽²⁾. 이와 같은

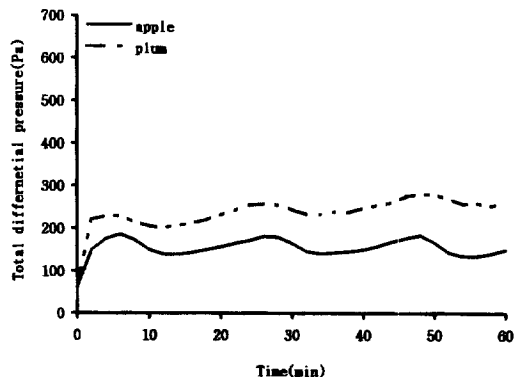


Fig. 2. Changes of total differential pressure in a respiration-rate measuring container (1°C).

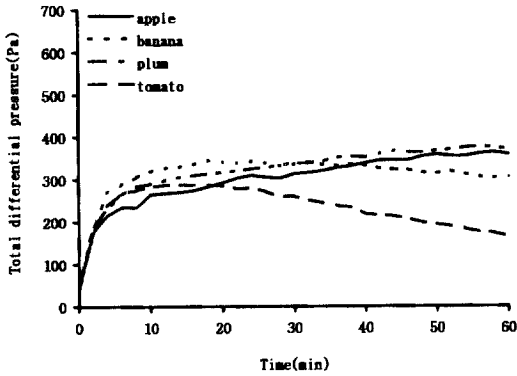


Fig. 3. Changes of total differential pressure in a respiration-rate measuring container (11°C).

압력의 변화양상은 Forcier 등⁽⁶⁾의 결과와 유사한 경향을 나타내었으나 그 값에는 약간의 차이를 보였는데 이는 용기내의 void volume과 과실 개체수의 차이에 의한 것으로 판단된다.

호흡속도 측정 용기 내부의 수증기압의 변화

각 시료를 방치시간동안 저장했을 때의 수증기압변화(ΔP_{v1})와 scrubber 가동전후의 수증기압(ΔP_{v2})과 전체 상대압의 변화(ΔP_{s2})를 Table 1에 나타내었다. CO₂ scrubber를 가동할 때의 수증기압 변화는 저장시간동안 수증기압의 변화보다 그 변화 폭이 매우 크게 나타났다. 그 이유는 CO₂ scrubber를 가동할 때 scrubber에 의해서 저장 중 과채류의 증산에 의해서 발생하는 수증기와 저장용기 내의 저장초기 수증기 일부가 함께 제거되기 때문이라 볼 수 있다. 또한 저장 온도가 낮을수록 용기내부의 수증기압 변화의 크기는 작아지나 각 온도구간에서 전체압력의 변화에서 차지하는 비율은 20~50%로 나타났으며 온도에 따른 차이는 거의 없

Table 1. Effect of vapor pressure on the total differential pressure in a respiration rate measuring container

Temp. (°C)	Sample	ΔP_{v1} (pa)	ΔP_{v2} (pa)	ΔP_{s2} (pa)	$(\Delta P_{v2}/\Delta P_{s2})^*$ 100 (%)
1	Apple	90.4	227.2	489.7	46
	Plum	52.0	244.0	739.3	33
11	Apple	219.3	507.1	1139.3	45
	Banana	157.8	334.5	1471.8	23
	Plum	134.0	444.6	1661.8	27
	Tomato	255.2	485.3	1464.8	33
21	Apple	631.0	1169.9	2213.0	53
	Banana	335.7	880.1	1979.2	44
	Plum	705.2	1037.6	2456.6	42
	Tomato	775.2	1035.2	2996.4	35

었다. 따라서 이 정도 크기의 수증기압은 (4)식에서 ΔP_1 와 ΔP_{CO_2} 의 값에 영향을 미쳐 압력의 변화로 호흡속도를 환산할 때 무시할 수 없는 오차요인으로 작용함을 알 수 있었다.

호흡속도

시료의 호흡속도를 GC, PVM 그리고 CPVM으로 구한 결과를 Fig. 5~7에 각각 나타내었다. 두 시료 모두 수증기압을 보정해 주고 구한 호흡속도가 PVM으로 구한 호흡속도에 비하여 GC값에 근사하게 나타났다. CPVM으로 호흡속도를 환산하였을 때 GC로 측정된 호흡속도와는 1°C에서 0.2~0.3 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹, 11°C에서 0.2~2.9 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹, 21°C에서 1.0~9.0 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹의 차이를 나타내었다. 한편 PVM으로 호흡속도를 환산하였을 때 GC로 측정된 호흡속도와는 1°C에서 0.8~1.2 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹, 11°C에서 3.9~11.0 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹, 21°C에서 8.0~32.0 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹의 차이를 나타내어 CPVM으로 보다 정확하게 호흡속도를 측정할 수

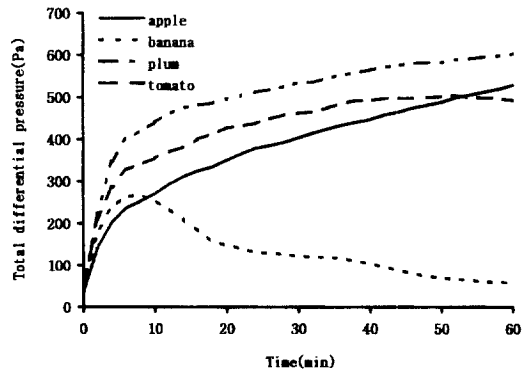


Fig. 4. Changes of total differential pressure in a respiration rate measuring container (21°C).

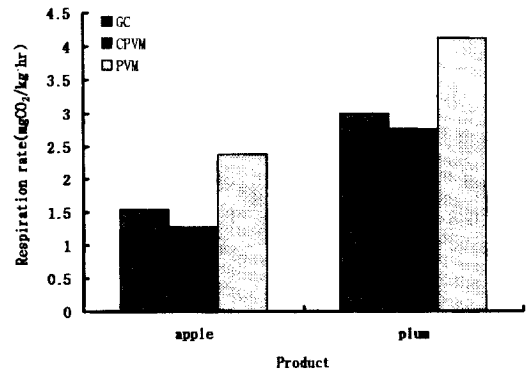


Fig. 5. Comparison of respiration rate obtained with GC, PVM and CPVM (1°C).

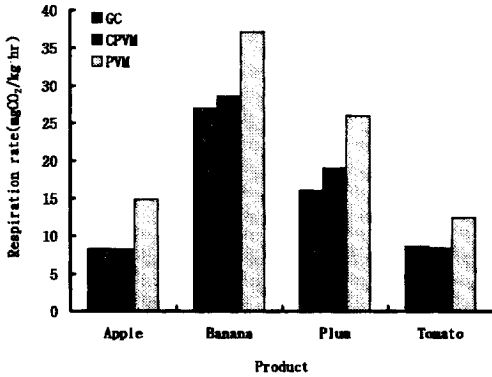


Fig. 6. Comparison of respiration rate obtained with GC, PVM and CPVM (11°C).

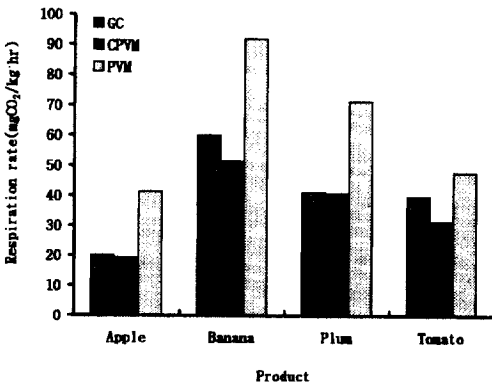


Fig. 7. Comparison of respiration rate obtained with GC, PVM and CPVM (21°C).

있음을 알 수 있었다.

CA저장 중의 사과를 시료로 하여 CPVM으로 호흡속도를 측정된 결과 유사한 저장조건에서 사과의 호흡속도가 2.21 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹이라는 Alique와 Plaza⁽⁶⁾의 결과와 비슷하였다. 또한 자두의 경우에도 0°C에서 2.0~3.0 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹의 호흡속도를 가진다는 Claypool과 Allen 등⁽⁹⁾의 결과와도 일치하였다. 본 연구에서 구한 20°C바나나의 호흡속도는 51.51 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹로 이⁽¹⁰⁾의 보고와 일치하고 있으며 같은 온도에서 측정한 토마토의 경우에도 24.0~44.0 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹의 호흡속도를 가진다는 Workman과 Prat⁽¹¹⁾의 결과와도 일치하였으며, 본 실험에 사용된 시료 대부분의 호흡속도가 미국 농무성 자료와 일치하였다⁽²⁾.

요 약

과채류의 수확 후 저장에 있어서 중요한 생리적 지

표가 되는 호흡속도를 마이크로컴퓨터와 압력센서(MPX-10-DP, Motorola)를 사용하여 종래의 마노메타법의 문제점인 수증기압을 보정하여 간편하고 신속하게 측정할 수 있는 방법에 관해 연구하였다.

과채류 호흡속도 측정 중 각 온도구간에서 호흡속도 측정용기 내의 온도 변화는 ±0.5°C이었다. 수식화한 습윤도표를 이용하여 호흡속도 측정용기 내의 수증기압을 환산한 결과 실험초기에 수증기압이 일시적으로 상승한 후 방치시간동안은 일정한 수증기압을 유지하였으며, CO₂ scrubber 가동 후에는 수증기압이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 저장용기 내부의 전체 상대압력에서 수증기압이 차지하는 비율은 1°C에서 33~46%, 11°C에서 23~45%, 21°C에서 35~53%로 각 실험온도 구간에서 거의 일정한 비율을 나타내었다. PVM으로 구한 호흡속도와 GC를 이용하여 측정된 값과의 차이는 1°C에서 0.8~1.2 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹, 11°C에서 3.9~11.0 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹, 21°C에서 8.0~32.0 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹의 차이를 나타내었다. CPVM으로 구한 호흡속도와 GC를 이용하여 측정된 값은 1°C에서 0.2~0.3 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹, 11°C에서 0.2~2.9 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹, 21°C에서 1.0~9.0 mgCO₂kg⁻¹h⁻¹의 차이를 나타내었다. CPVM으로 구한 호흡속도가 PVM으로 구한 값보다 GC로 측정한 값과의 편차가 적은 것으로 나타나, 이 방법을 이용하면 보다 간편하고 정확하게 과채류의 호흡속도를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

문 헌

1. Kader, A.A., Kasmire, R.F., Mitchell, F.F., Reid, M.S., Sommer, N.F. and Thmpson, J.F.: *Postharvest Technology of Horticultural Crops*, University of California., Division of Agriculture and Natural Resources, p.3 (1985)
2. Hardenburg, R.E., Watada, A.E. and Wang, C.E.: *The Commercial Storage of Fruits, Vegetables and Florist and Nursery Stock*, U.S. Department of Agriculture, p.9 (1986)
3. 임경빈, 백수봉, 임용규 : 일반 식물학. 향문사, p.157 (1986)
4. 맹주선 : 식물생리학. 선진문화사, p.105 (1988)
5. Salisbury, F.B and Ross, C.W.: *Plant Physiology*, 2nd ed., Wadsworth, p.266 (1992)
6. Forcier, F., Raghavan, G.S.V. and Garipey, Y.: Electronic sensor for the determination of fruit and vegetable respiration. *Rev. Int. Froid*, 10, 353 (1987)
7. 村田敏 : H-X空氣線圖(45°C 70°C), 日本農業機械學會誌, 52(6), 95 (1990)
8. Alique, R. and De La Plaza, J.S.: Dynamic controlled atmosphere for apple storage. I.I.F.-I.I.R.-Commissions B2, C2 and D1, 342 (1982)
9. Claypool, L.L. and Allen, F.W.: The influence of tem-

- perature and oxygen level on the respiration and ripening of Wickson plums. *Hilgardia*, **21**, 129 (1951)
10. 이현우 : 처리조건에 따른 바나나의 추속 및 Shelf-life 특성. 경북대학교 석사 학위논문 (1990)
11. Workman, M. and Pratt, H.K.: Studies on the physiology of tomato fruit. II. Ethylene production at 20°C as related to respiration, ripening and date of harvest. *Plant Physiol*, **32**, 330 (1957)
-
- (1997년 4월 7일 접수)