

실시간 O₂ 농도 제어 풋고추 용기에서 능동기체치환 시스템이 기체조성과 품질보존에 미치는 효과

조윤희 · 안덕순 · 이동선*

경남대학교 식품생명학과

Atmosphere and Green Pepper Quality Influenced by Active Air Flushing in Fresh Produce Container Controlled in Real-time O₂ Concentration

Yun Hee Jo, Duck Soon An, and Dong Sun Lee*

Department of Food Science and Biotechnology, Kyungnam University, Changwon, 631-701 Korea

Abstract Active air flushing mini-pumps were installed in a rigid polypropylene container (32 cm x 23 cm x 18 cm) containing 900 g of fresh green peppers for effectively controlling its O₂ concentration on real time basis to preserve the product quality. The performance of the constructed system was compared to that of the modified atmosphere (MA) container system with gas diffusion tube controlled in close/open cycles responding to real time O₂ concentration at 10 and 20°C. In the control logic, the O₂ concentration was programmed to be located exactly at 13% or stay in the range of 13-15%. The active air flushing system could control the O₂ concentration in the desired level or range at both temperatures, while the passive diffusion system could work only under the low temperature condition of 10°C. At higher temperature of 20°C, the passive diffusion system could not manage the produce respiration increased more highly than the gas transfer through the diffusion tube, resulting in too low O₂ concentration and too high CO₂ concentration which would be injurious to the green pepper. When tested at 20°C, the MA container system could preserve the green pepper better than the perforated air package in terms of weight loss, ascorbic acid and chlorophyll contents and firmness.

Keywords Modified atmosphere, Green pepper, Gas sensor, Pump, Control

서 론

재사용가능한 신선 농산물 용기에서 실시간 기체 조성에 반응하여 기체 튜브를 개폐시켜서 용기 내외 사이의 기체 이동을 제어하면 바람직한 변형기체(modified atmosphere, MA)를 유지시킬 수 있고, 이를 통하여 농산물 품질보존의 효과도 얻어질 수 있는 것으로 보고된 바 있다¹⁾. 다만, 이러한 제어는 기체 확산 튜브의 물리적 크기의 제한 조건 하에서 가능하며²⁾, 또한 튜브를 통한 기체확산속도의 한계

때문에 농산물 호흡이 빠른 고온조건에서는 기대한 바의 적정 기체농도로의 제어를 얻을 수 없는 것으로 보고된 바 있다³⁾. 즉, 주어진 통기구나 기체확산튜브의 조건이 정해진 온도 조건에서는 잘 작동할 수 있으나, 온도가 높은 조건에 노출되면 과도한 CO₂ 축적이나 혐기적 조건 유발 등의 문제를 발생시킬 수 있으며, 이는 포장내외의 기체이동과 농산물 호흡의 균형이 깨어져서 발생한다. 이러한 한계를 극복하는 대안으로서 능동적인 기체치환이 제안되어 적정 MA 유지와 시금치의 품질보존에 효과적일 수 있음이 보고된 바 있다³⁾.

센서 제어 MA 용기에서 능동기체치환 시스템의 효과를 다른 품목에도 확인할 필요가 있으며, 본 연구에서는 센서 제어 용기에서 다른 품목으로서 풋고추에 대하여 적정기체 조성 유지의 가능성을 시험하여, 수동기체튜브시스템과 비

*Corresponding Author : Dong Sun Lee
Department of Food Science and Biotechnology, Kyungnam University, Changwon 631-701, Korea
Tel : +82-55-249-2687, Fax : +82-505-999-2171
E-mail : dongsun@kyungnam.ac.kr

교하고자 하였다. 또한 품질보존 효과에 대해서는 공기포장과 비교하였다. 제어의 성능을 확인함에는 보다 간단하게 용기 내 MA를 제어할 수 있는 O₂ 센서에 기반한 시스템에서 시험 비교하였다.

재료 및 방법

1. 수동기체확산튜브나 능동치환펌프를 장착시킨 MA 용기

Jo 등³⁾이 사용한 조건과 동일하게 수동기체확산튜브나 능동치환펌프를 장착한 용기를 사용하였다. 즉, 용기로는 32 cm × 23 cm × 18 cm 크기의 2 mm 두께를 가진 폴리프로필렌 박스를 사용하였으며, 용기 내부의 O₂ 농도를 감지하기 위해서 용기 뚜껑의 아랫부분에 O₂ 센서(SS2118, Senko, Ansan, Gyeonggi, Korea)를 부착하였다. 수동확산기체튜브 시스템은 O₂ 센서에서 감지된 O₂ 농도에 반응하여 개폐되는 직경 1 cm, 길이 5.5 cm인 금속 튜브를 장착하여 구성하였고, 능동기체치환 시스템은 측정된 O₂ 농도([O₂])에 반응하는 2개의 극소형 모터(6V)가 동시에 개폐 작동되는 직경 3 mm의 원형 주입구와 배출구를 용기 뚜껑 위에 장착하였다. 제어 logic에 따라 펌프가 작동할 시에는 주입구 및 배출구가 열리면서 분당 2.5 L의 공기가 용기 내부로 주입되게 되며, 용기 내부로 외부공기를 효과적으로 주입시키기 위해서, 주입구에서부터 20 cm의 긴 플라스틱 튜브를 연결하여 용기 하부까지 도달되도록 하였다. 센서에 의해 측정된 O₂ 농도는 기체확산튜브를 개폐하거나 능동기체치환펌프를 작동시키는 제어 시스템에 input 정보로 제공되게 하였다. 또한, 용기 내부에 CO₂ 농도 ([CO₂])를 측정할 목적으로 비분산형 적외선 타입의 K33 CO₂ 센서(SenseAir, Delsbo, Sweden)를 O₂ 센서와 함께 설치하였다. 용기에는 150 g의 풋고추(*Capsicum annuum* L.) 6묶음을 담아서 일정 온도 조건에서 저장하면서 실험을 수행하였다.

2. 실시간 O₂ 농도에 반응하는 제어 logic 체계

실시간 O₂ 농도에 반응하는 단순화된 제어 logic을 고안하여 제작된 풋고추 용기 시스템에 적용하였다. 풋고추의 최적 MA 범위는 3~5% O₂, 2~8% CO₂로 설정하였다¹⁾. 실시간 O₂ 농도에 따라 기체확산튜브 개폐나 능동기체치환펌프 작동을 제어하기 위한 의사결정방법을 고안 정립하였다. 즉, 튜브나 펌프는 [O₂]값이 지정된 값까지 감소되면 열리거나 작동되게 되고, [O₂]값이 지정값을 상회하면 닫히거나 펌프가 동작되게 된다. [CO₂]의 증가에 따른 생리장해를 피하는 방법으로서 최적 MA의 CO₂ 농도 상한값([CO₂]_H, 풋고추에 대해서 8%) 아래에 [CO₂]를 위치시키는 간접적 방법으로서 정해진 [O₂]값 21%에서 [CO₂]_H 값을 차감하여 설정하였다⁴⁾. 이는 천공을 가진 농산물 포장에서 통상적으로 성립되

는 단순관계인 [O₂]+[CO₂]=21%의 가정 하에서 얻어진 것이고^{5,6)}, 8%의 [CO₂]_H를 가진 풋고추에서는 이 [O₂] 제어 기준값이 13%가 되게 된다.

제어 시스템에서 빈번한 on-off 조작에 따른 피로도를 감소시키는 방법으로서 O₂ 농도 제어기준에 2%의 범위를 허용하는 방법이 또한 시도되었다. 확산튜브나 펌프는 O₂ 농도 범위의 하한값에서 개방 혹은 작동되다가, 그 범위의 상한값에 [O₂]가 도달되면 닫히거나 혹은 작동이 멈추게 되도록 고안되었다. [O₂] 제어 범위로는 2%를 사용하는 조건에서 풋고추에서는 13~15%가 설정 사용되었다. 풋고추를 담은 용기를 설정된 제어 logic(지정값 제어와 범위 제어)으로 작동되게 하면서 10°C 및 20°C에서 저장하였고, 저장 중 O₂ 및 CO₂ 농도를 각각의 센서로 측정하였다. 풋고추 시료는 창원의 슈퍼마켓에서 구입하여 사용하였다.

3. 저장된 풋고추의 품질측정

능동기체치환 MA 시스템에 대한 품질보존 효과를 확인하기 위해서, 용기에 담겨서 저장된 풋고추의 품질을 20°C에서 5일 저장한 후 중량손실, ascorbic acid 함량, chlorophyll 함량, 경도를 측정하였다. 이와 함께 대조구로서, 직경 5 mm 크기의 통기구 4개를 가진 30 μm 두께의 연신 폴리프로필렌 필름 봉지(16 cm × 18 cm)에 150 g 단위로 포장하여 동일 온도 조건에 저장하였다. 중량손실은 포장을 제거한 후 시료의 중량만을 측정하여 그 감소량을 저장 전 초기 중량에 대한 백분율(%)로 나타내었다. Ascorbic acid 함량은 AOAC 방법에 따라 측정하였다(AOAC, 1995). Chlorophyll 함량은 80% acetone으로 추출한 채소 추출액을 분광광도계로 663 nm와 645 nm에서 흡광도를 측정하여 결정하였다(MacKinney, 1941). 경도는 Rheometer Compac-100(Sun Scientific Co., Tokyo, Japan)을 사용하여 풋고추의 중간 부분에 직경 5 mm의 원통형 probe가 60 mm/min의 속도로 침투할 때 얻어지는 최대힘으로 측정하였다. 모든 품질 측정은 최소한 3반복 이상으로 이루어졌고, 품질특성에 대한 포장 처리구간의 유의차 검증은 유의수준 5%에서 분산분석 및 Tukey의 HSD(Honestly Significant Difference) 검사를 실시하였다⁷⁾.

결과 및 고찰

1. 기체확산튜브시스템과 능동기체치환시스템의 비교

풋고추를 담은 단일 O₂ 센서 용기에 장착된 수동기체튜브 시스템과 능동치환시스템은 지정값 제어 시 10°C에서는 별 차이 없이 용기 내에서 거의 동일한 기체 조성을 유지시키는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 1(A)). 지정값 제어에서 O₂ 농도는 저장 약 4일 후에 두 시스템 모두에서 제어 지정값인 13%에서 머물렀으며, 이와 함께 O₂ 농도가 13%로 제어

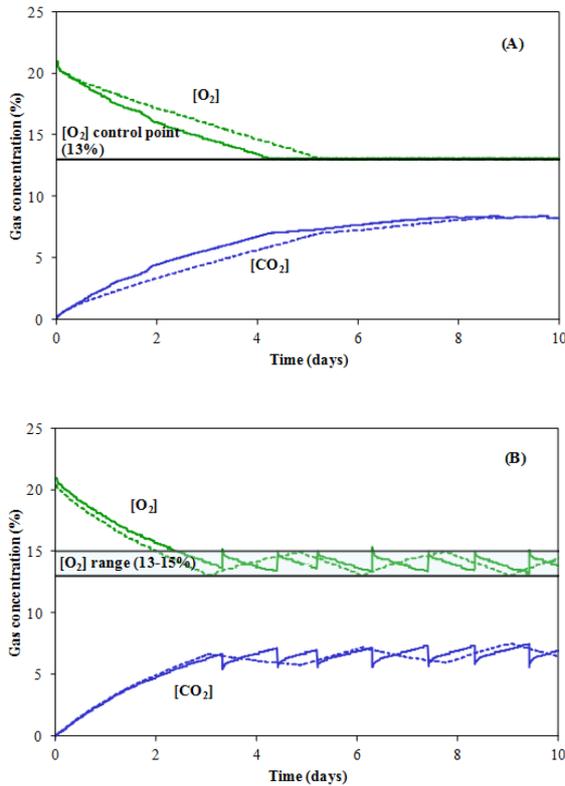


Fig. 1. Comparison between passive diffusion tube and active flushing systems adopted to green pepper container, which was subjected to control at (A) a set O₂ concentration of 13% and (B) a set range of O₂ concentration of 13~15% at 10°C. Solid lines are for active flushing system while dashed lines are for passive diffusion tube system.

됨에 따라 CO₂ 농도는 자연스럽게 7.0~8.2%에 위치했다. O₂ 농도 13% 제어에 따라서 CO₂ 농도 8% 부근 유지되는 본 연구의 제어 logic에서 예상된 것이었고, [CO₂]_H 8%를 짧은 시간 동안 약간 넘는 것은 허용될 수 있는 것으로 생각된다. 범위 제어 또한 O₂ 농도가 설정 범위 13~15%의 O₂ 농도 범위 내를 유지하여 두 시스템 모두에서 잘 작동하였고 CO₂ 농도도 5.4~7.4%의 범위 내에서 비슷한 범위에 유지되었다 (Fig. 1(B)). 다만 O₂ 및 CO₂ 농도에서의 진동빈도는 능동기체치환 시스템에서 보다 빈번한 것으로 나타났다.

기체농도의 범위제어에서 능동기체치환 시스템은 수동기체튜브 시스템과 비교해서 저장 기간 동안 보다 빈번한 진동을 보였는데, 이는 펌프를 통한 공기의 강제 주입에 따라 더 즉각적인 O₂ 농도 증가와 CO₂ 농도 감소를 가져오기 때문이다(Fig. 1(B)). 전체적으로, 10°C에서의 Fig. 1의 결과에서는 수동기체튜브 시스템과 능동기체치환 시스템 모두가 설정된 O₂ 농도를 잘 유지하고 CO₂ 농도 범위도 유효한 수준에 머물러 있는 것으로 판단할 수 있다.

한편으로 10°C보다 높은 20°C의 온도 조건에서는 수동기체튜브시스템에서는 요구되는 수준으로 풋고추 용기 내부의 O₂ 농도를 제어하지 못했다(Fig. 2). 이는 용기의 내외부 사이의 분압 차이에 비례적으로 의존하는 O₂와 CO₂의 기체 확산 과정은 비교적 그 속도가 느리므로 높은 온도에서 풋고추의 높은 호흡에 맞출 수 없는 상황에 기인하는 것으로 추정된다. 따라서 생리장해를 받을 수 있는 수준을 넘어서는 CO₂ 농도의 증가([CO₂] 8% 상회)와 함께 O₂ 농도의 제어 설정 지점 ([O₂] 13%) 이하로의 지속적인 감소를 일으켰다. 수동기체확산튜브 시스템에서는 튜브의 물리적 구조는 해당되는 저장 온도와 포장 단위에 대하여 농산물 호흡 속도와 적절히 맞추어지는 조건으로 설계되어야 한다는 점이 다시 한번 확인된다²⁾. 수동기체튜브 시스템과는 다르게 능동기체치환시스템은 높은 온도 20°C 조건에서도 적정 기체 수준이나 범위를 충분히 제어할 수 있었다. 이는 장착된 미니 펌프를 사용하여 용기 내부에 공기를 강제로 주입함에 따라 원하는 가스 농도를 얻기 위해 요구되는 내외부 사이의 가스 교환을 빠르게 얻을 수 있기 때문이다. 능동적으로 유입구를 통하여 높은 O₂농도의 공기를 주입시키고 유출구를 통해서 내부 CO₂를 배출시킴에 의해서 O₂ 농도의 설정된 값에 따라 용기 내부 O₂ 농도를 빠르게 증가시키고 동시에 안전한 CO₂ 농도의 범위로 CO₂ 농도를 빠르게 감소시키는 즉각적인 효과를 얻을 수 있었다. 실온에서 능동적 기체치환의 유효성은 Berrios⁸⁾ 및 Jo 등³⁾에 의하여 확인된 바 있다.

특정의 O₂ 농도인 13%에 맞추어 제어하는 방법에 비교하여, 13~15%의 O₂ 농도 범위로 제어하는 경우가 [O₂]의 범위 내 진동에 따라, [CO₂]도 상응하여 상하로 반복적으로 이동하였다(Fig. 1(B) 및 Fig. 2(B)). 이러한 진폭범위를 가진 제어는 [O₂] 13%의 특정 지정값 제어에 비해 2%의 높은 [O₂](15%까지)와 이에 상응하는 낮은 [CO₂]를 형성시키는 역할을 하였다(Fig. 1과 Fig. 2에서 (A)와 (B)의 비교). 높은 O₂ 농도와 낮은 CO₂ 농도는 상대적으로 호흡과 추수를 빠르게 할 수 있기 때문에 품질보존 면에서 약간 부정적일 수 있다. 다른 면에서는 범위제어는 통기구의 on-off 작동의 빈도를 줄여줄 수 있어서 제어기기의 유지에는 긍정적인 영향을 줄 것으로 생각된다.

다시 한번 10°C와 20°C에서 두 기체이동기작, 즉 수동기체튜브 시스템과 능동기체치환 시스템의 특성을 정리하면, 전자는 비교적 저온에서 원하는 수준이나 범위에 적절하게 용기의 O₂ 농도를 제어할 수 있었지만, 농산물의 높은 호흡 활성을 갖는 고온에서는 목적에 맞게 작동할 수 없었으며, 설정된 허용 기체농도 범위를 벗어났다. 반면 능동기체치환시스템은 저온과 고온의 모든 조건에서 원하는 수준이나 범위에서 용기 내부 기체 농도를 효과적으로 제어하였다. 10°C에서의 O₂ 농도 범위 제어에서는, 능동기체치환 시스템은

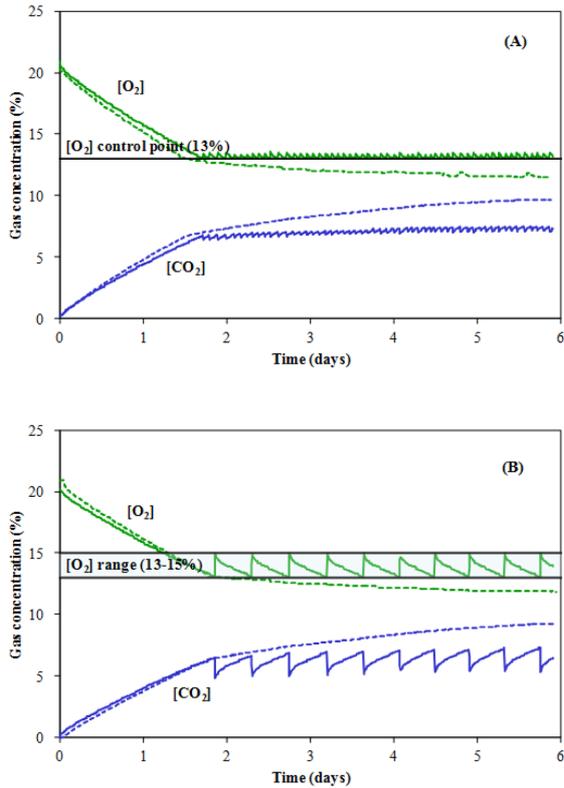


Fig. 2. Gas concentration in green pepper container applied to (A) one point control of 13% O₂ and (B) range control of 13~15% O₂ at 20°C. Solid lines are for active flushing system while dashed lines are for passive diffusion tube system.

수동기체치환 시스템보다 최저/최고 [O₂] 경계선 사이의 변동 반응성에서 더 즉각적이었다. 이러한 점은 시금치를 담은 용기에 대한 이전의 연구에서도 확인된 바 있고³⁾, 풋고추 용기에 대해서도 본 연구는 능동기체치환 시스템의 보편적 적용가능성을 보여 주었다.

2. 풋고추의 품질 보존에 있어서 능동지원시스템의 효과
 능동기체치환 시스템에 의해서 용기 내부에 형성된 바람

직한 MA조건은 풋고추의 신선도 유지에 효과적일 것으로 기대되어서, 20°C의 해당 용기에서 5일 동안 저장된 풋고추의 품질을 측정하여 대조구 포장과 비교하였다(Table 1). 지정값 제어와 범위 제어 모두에서 O₂ 농도를 감지하고 제어하는 능동기체치환 시스템은 통기성의 대조구 포장보다 낮은 중량손실, 높은 ascorbic acid와 chlorophyll 함량과 경도 유지를 보여주어서, 보다 더 신선하게 풋고추의 품질을 보존하는 것으로 나타났다. 지정값 제어와 범위 제어 사이에는 유의한 차이를 발견할 수 없었다(Table 1). 두 제어 mode에서의 MA 조성에서 약간의 차이는 측정된 품질 특성에 유의적 차이를 보여주지 못했다. 능동기체치환 시스템에 의해 제어된 MA 조건은 온도증가가 우려되는 저장이나 유통 조건에서 효과적인 품질 보존을 도모할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만, 앞에서 본 바와 같이 저온에서는 수동기체치환 시스템으로도 원하는 MA 제어가 가능하기 때문에, 능동기체치환 시스템의 상대적인 장점은 저온에서는 미미할 것으로 생각된다.

수동기체치환 시스템은 20°C에서 적정 MA 조건을 만족시키지 못하고 생리장해를 유발시킬 수 있는 고 [CO₂]를 발생시켰기 때문에 품질보존효과의 비교에서는 검토되지 않았다. 즉, 품질보존을 위해서 적정 MA 조성의 유지가 필요하다. 가정과 전제하에서는 수동기체치환 시스템은 상대적으로 고온인 20°C에서는 고려대상이 될 수 없다.

요 약

능동적 기체치환 소형 펌프를 900 g의 풋고추를 담은 폴리프로필렌 용기(32 cm × 23 cm × 18 cm)에 설치하여 품질 보존에 도움이 되도록 실시간으로 O₂ 농도를 효율적으로 제어하고자 하였다. 10°C와 20°C에서 제작된 능동기체치환 시스템과 실시간 O₂ 농도에 따라 튜브의 개폐가 제어되는 수동기체치환 시스템을 수행효과 면에서 비교하였다. 제어 logic에서는 O₂ 농도가 바로 13%에 위치하거나 13~15%의 범위에 머물도록 프로그램되었다. 10°C에서는 두 시스템 모두가 요구된 적정 수준이나 범위의 O₂ 농도를 유지할 수

Table 1. Quality attributes of green pepper stored for 5 days in O₂ concentration controlled containers equipped with active flushing mini-pumps at 20°C

Quality attributes*	Control package	One point control**	Range control***
Weight loss (%)	6.8±1.0 ^b	0.7±0.1 ^a	0.5±0.2 ^a
Ascorbic acid (mg/100 g)	83.8±3.1 ^b	101.0±2.5 ^a	102.5±3.6 ^a
Chlorophyll (mg/100 g)	8.3±0.02 ^b	8.6±0.03 ^a	8.6±0.02 ^a
Firmness (N)	8.4±3.1 ^b	14.3±2.1 ^a	15.1±3.1 ^a

Values are means±standard deviations. Same alphabetical superscripts within a row mean non-significant difference at α=0.05 between treatments. *Initial ascorbic acid, chlorophyll and firmness were 94.84 mg/100 g, 10.39 mg/100 g and 13.82 N, respectively. **Container atmosphere was by the mode of Fig. 2(A). ***Container atmosphere by the mode of Fig. 2(B).

있었으나, 높은 20°C의 온도에서는 수동기체튜브 시스템은 높은 풋고추의 호흡으로 인하여 과도하게 낮은 O₂ 농도와 허용범위 이상의 CO₂ 농도를 형성시켰다. 이에 반하여 능동기체치환 시스템은 높은 온도에서도 실시간 O₂ 농도에 즉각적으로 반응하여 적정수준이나 범위의 MA를 유지할 수 있었다. 20°C에서 능동기체치환 시스템으로 제어된 MA 용기는 통기성 대조구 포장에 비하여 5일 저장 후에 낮은 중량손실, 높은 ascorbic acid와 chlorophyll 함량과 경도 유지를 나타내어서 품질보존 효과가 우수하였다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부 융복합연구센터지원사업에 의하여 이루어졌음(Project #710003-1).

참고문헌

1. Jo, Y.H., Kim, N.Y., An, D.S., Lee, H.J. and Lee, D.S. 2013. Modified atmosphere container equipped with gas diffusion tube automatically controlled in response to real-time gas concentration. *Biosystems Eng.* 115: 250-259.
2. Jo, Y.H., An, D.S. and Lee, D.S. 2013. Gas tube dimension in sensor-controlled fresh produce container system to maintain the desired modified atmosphere. *Korean J. Packag. Sci. Technol.* 19: 61-65.
3. Jo, Y.H., An, D.S. and Lee, D.S. 2014. Active air flushing in a sensor-controlled fresh produce container system to maintain the desired modified atmosphere. *Biosystems Eng.* 125: 122-127.
4. Jo, Y.H., An, D.S. and Lee, D.S. 2013. Effectiveness of real-time oxygen control in fresh produce container equipped with gas-diffusion tube. *Korean J. Packag. Sci. Technol.* 19: 119-123.
5. Mannapperuma, J.D. and Singh, R.P. 1994. Modeling of gas exchange in polymeric packages of fresh fruits and vegetables. In: *Minimal Processing of Foods and Process Optimization*. Singh, R.P. and Oliveira F.A.R. (eds). CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 437-458.
6. Paul, D.R. and Clarke, R. 2002. Modeling of modified atmosphere packaging based on designs with a membrane and perforations. *J. Membrane Sci.* 208: 269-283.
7. Daniel, W.W. 1978. *Biostatistics*. John Wiley & Sons, New York, pp. 203-220.
8. Berrios, J.d.J. 2002. Development of a dynamically modified atmosphere storage system applied to avocados. *Food Sci. Technol. Int.* 8: 155-162.