

후지사과 호흡지수를 이용한 생리감응형 기체환경자동제어 알고리즘

박천완*, 손재용°, 김미나*, 최승영*, 최동수*, 김용훈*, 김진세*

Automatic Gas Control Algorithm for Controlled Atmosphere Storage System Using 'Fuji' Apple Respiration Quotient

Chun-wan Park*, Jae-yong Son°, Mi-na Kim*, Seoung-young Choi*, Dong-soo Choi*,
Yong-hoon Kim*, Jin-se Kim*

요약

농산물의 유통손실률을 절감하고 수급조절을 원활하게 하기 위한 장기저장 기술로 CA저장이 활용되고 있다. 특히, 저장장해를 최소화하기 위한 DCA 연구가 활발하다. 본 연구에서는 기밀 챔버를 이용해 CA저장환경을 관찰하고 호흡지수를 이용한 기체환경 제어알고리즘을 개발하였다. 그 결과, 1% 이하의 저산소 유지를 위한 기밀도는 0.25 (mmAq/min) 이하가 요구되었다. 산소농도와 이산화탄소 농도의 변화량을 측정하여 호흡지수 계산이 가능하며, 호흡지수와 에탄올을 이용한 혐기보상점은 약 9일 차이가 나타났다. 기체 제어 특성을 고려한 기체 변화량 측정점을 4가지 종류로 분류하였고 이를 바탕으로 호흡지수 계산 및 산소제어 알고리즘을 설계하였다. 설계된 알고리즘을 이용해 호흡지수를 계산한 결과 0.5-1.7 사이에서 계산되었으며 호흡지수를 이용한 DCA 제어를 위해 센서 정밀도 향상, 기체 환경 균일화, 기체 환경에 따른 농산물의 생리 특성 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

키워드 : 기체제어저장, 호흡지수, 산소, 이산화탄소, 저온저장고

Key Words : Controlled atmosphere storage, Respiration quotient, Oxygen, Carbon dioxide, Cold storage

ABSTRACT

CA storage is being used as a long-term storage technology to reduce the distribution loss rate of agricultural products and to control supply and demand. In particular, DCA research to minimize storage disorder is active. In this study, CA storage environment was observed using airtight chamber and automatic gas control algorithm using respiratory quotient was proposed. As a result, the airtightness for maintaining low oxygen concentration of less than 1% was required to be less than 0.25 (mmAq/min). The oxygen and carbon dioxide concentration were measured to calculate the respiratory quotient, and the anaerobic compensation point using the respiratory quotient and ethanol showed a difference of about 9 days. The gas change measurement points considering gas control

※ 본 연구는 농촌진흥청 기관고유사업(과제번호:PJ014182) 지원에 의해 이루어진 것임

• First Author : Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, chunwan1@korea.kr, 박사후연구원, 정회원

° Corresponding Author : Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, son1892@korea.kr, 농업연구원, 정회원

* National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, (kmm8824@korea.kr, 정회원; csy21780@korea.kr; choi0ds@korea.kr; yhkim@korea.kr; ferroj@korea.kr, 정회원

논문번호 : 202006-118-0-SE, Received May 29, 2020; Revised June 23, 2020; Accepted June 26, 2020

characteristics were classified into four types. The respiratory quotient calculation and oxygen control algorithm were designed based on measurement point of four types. The respiration quotient was calculated between 0.5-1.7 using the designed algorithm. In order to control DCA using the respiratory quotient, it is necessary to improve sensor precision, uniformize the gas environment in CA storage, and study on the physiological properties of agricultural products according to the gas environment.

I. 서 론

최근 기후변화로 인한 농산물 생산량 변화로 수급 조절을 어렵게 하고 가격 변동성이 커져 농산물 가공 업체와 소비자의 부담이 증가하고 있다. 특히, 저장 및 유통과정에서 상품성을 상실한 농산물 폐기물 증가와 품질 저하가 발생하여 장기간 신선도를 유지할 수 있는 장기저장기술이 요구된다. CA저장은 기밀이 유지되는 저장고를 이용하여 산소와 이산화탄소 농도를 조절해 농산물의 호흡과 생리작용을 억제하여 저장 기간을 연장하는 대표적인 장기저장기술이다. CA저장기술은 기체 제어방식에 따라 배출식(Purge-type)과 순환식(Circulation-type)으로 구분되며^[1] 산소농도 조절방식에 따라 저산소를 유지하는 ULO(Ultra low oxygen)-CA^[2], 산소농도를 48시간 이내에 낮추는 R(Rapid)-CA^[3] 등 다양한 연구가 진행되었다. 특히, 기체환경을 측정하는 센서 정밀도 향상은 보다 정밀한 CA저장을 가능하게 했으며 저장된 농산물의 생리상태를 파악함으로써 능동적으로 기체농도를 조절하는 D(dynamic)-CA에 대한 연구가 급격히 늘어나고 있다^[4-6].

DCA 저장기술은 CA저장 초기와 저장 중 산소농도를 임의로 조절할 수 있는 시스템으로 넓게 정의되고 있으며, CA저장과정에서 발생하는 생리적인 장애를 조절하고 수확후 품질을 유지하는데 초점을 맞춰왔다^[7]. DCA 저장중 산소농도 제어를 위한 기준으로 엽록소 형광(CF, chlorophyll fluorescence), 호흡지수(RQ, respiration quotient), 에탄올(ET, ethanol) 측정 센서를 활용하고 있으며 과수산업에서 엽록소형광센서가 가장 일반적으로 사용되고 있다^[7]. 하지만 엽록소 형광은 햇빛 노출 상태에 따라 신진대사에 차이가 발생하며 산소농도를 적절하게 유지하는데 어려움이 있다^[8,9]. 이러한 문제점을 보완하기 위해 호흡지수 측정을 통해 산소농도를 제어하는 기술이 연구되고 있다.

국내에서는 사과, 대추 등 소규모 농가 및 협동조합을 대상으로 소형 CA저장고가 일부 설치되어 운영되고 있으며 CA저장 품질 우수성이 알려져 보급량이 점

차 늘어나고 있다. 하지만 일부 갈변 등 생리장해가 확인되어 DCA 저장에 대한 요구가 증가하고 있다.

본 연구에서는 기밀챔버에 사과를 저장하고 기체환경 측정 및 분석을 통해 생리변화 특성 분석을 통해 호흡지수 기반의 능동 기체제어 시스템 적용 가능성을 확인하고자 했다. 세부적으로 기밀도, 산소, 이산화탄소의 변화량을 통해 호흡지수를 계산했으며 그에 따라 한계산소농도를 파악하여 생리상태에 따라 능동적으로 산소농도를 제어하는 제어알고리즘을 구현하고 현장적용 가능성을 파악하고자 했다.

II. 호흡지수 관찰을 위한 시험장치 및 방법

2.1 호흡지수 측정 시험장치

2.1.1 기체환경제어장치

다수의 챔버를 질소발생기 1대로 기체환경을 제어하기 위해서 제어장치는 기체제어장치와 중계기로 구분된다. 기체제어장치는 통합센서(SH-VT250_O2, Sohatech co., Seoul-si, Korea)를 이용하여 챔버 내부 환경(산소, 이산화탄소, 온도, 상대습도)을 측정하고 설정된 산소와 이산화탄소 농도를 유지할 수 있도록 제어하는 역할을 한다. 중계기는 다수의 챔버 기체제어를 순차적으로 진행할 수 있도록 공급밸브 및 질소 발생기 작동신호를 제어한다. 이때 제어장치와 컨트롤러(SM-7000T, DDC-478, Systronics co., Bucheon, Korea)는 배출식 CA저장고 제어프로그램을 적용하여 작동시켰다.

2.1.2 다중질소농도 연속공급장치

다중질소농도 연속공급장치(GNG-2N-6. GSA Co., Gwanju, Korea)는 기밀이 유지되는 챔버 내부로 고농도의 질소를 공급하여 산소 및 이산화탄소 농도를 제어한다. 고농도 질소를 안정적으로 공급하기 위해 PSA(presure swing adsorbtion)방식의 질소발생기를 이용하였으며 흡착제는 CMS(carbon molecular sieve)를 삽입하였다. 질소발생기는 챔버의 산소농도가 높을 경우 99%의 고농도 질소를 연속공급하여 산소를 제거하며 챔버의 산소농도가 낮을 경우 95% 또

는 그 보다 낮은 농도의 질소를 연속공급하여 산소농도를 높여준다. 이때 공급유량과 흡착시간을 조절하여 공급되는 산소농도를 일정하게 유지할 수 있다.

2.1.3 기밀챔버

기밀챔버(580×550×600mm)는 스텐레스 스틸(5t)로 제작되었으며 정면은 아크릴(10t)를 나사조임 방식으로 체결하여 가시화 및 기밀도를 조절할 수 있도록 구성했다. 기밀챔버 내부는 순환팬을 이용해 공기를 강제대류 시켜 공기질을 일정하게 유지되도록 하였고 통합센서를 이용하여 환경측정을 진행했다. 챔버의 기밀도는 압력 시험방법을 통해 진행했다^{110,111}. 실험이 진행되는 동안 특정 기밀도가 요구될 경우 체결된 아크릴판의 나사를 이용하여 기밀도를 조절하였다. 챔버 내부에는 과일용 P-box (520×360×320mm)를 이용하여 상태 양호한 'Fuji' 사과 약 20kg의 사과를 적재 후 저장하였다.

2.1.4 기체환경 분석장치

기체환경 분석 장치는 통합센서에서 측정되는 산소와 이산화탄소의 정밀도 및 정확도를 확인하기 위한 기체분석기(checkmate, Dansensor co., Denmark)와 생리작용에 따른 에틸렌과 에탄올 변화량 측정을 위한 기체분석기(INNOVA1312, Lumasene technologies, Ballerup Denmark)로 구성되었다. 기체분석장치는 챔버의 입출구와 연결되어 있으며 기체환경 측정과정에서 챔버 내부 기체변화를 최소화하기 위해 측정된 기체는 챔버 내부로 회수되는 순환구조로 설치하였다.

2.2 호흡지수 관찰을 위한 시험방법

수확 후 농산물은 유기호흡을 통해 산소를 소비하고 이산화탄소와 수분을 생성하며, 무기호흡을 통해 에탄올과 이산화탄소를 생산한다¹²¹. 이때 호흡과정에서 소비하는 산소와 이산화탄소 변화량의 비를 통해 호흡지수(RQ)를 계산할 수 있으며 식 (1)과 같다.

$$RQ = \frac{\Delta CO_2}{\Delta O_2} \tag{1}$$

CA저장 중 저장고의 산소농도가 한계산소농도 보다 낮아지게 되면 산소를 소비하는 유기호흡에서 무기호흡으로 변하며 발효 또는 부패와 함께 에탄올이 생성되고 이러한 변화점을 혐기보상점이라 한다¹³¹. 즉, 호흡지수 변화를 분석하여 혐기보상점을 찾아내고

표 1. 호흡지수 실험 조건
Table 1. Experimental condition for respiration quotient

Test No. (Chamber No.)	Air tightness (mmAq/min)	O ₂ control (range, %)	CO ₂ control (range, %)
a(1)	0.5	None (I.C.1) 3)	None (I.C. 0.1)
b(2)	0.25	None (I.C. 3)	None (I.C. 0.1)
c(3)	0.2	control (1.5-2.5)	control (0.2-1.0)
d(4)	0.19	control (1.5-2.5)	control (0.2-1.5)
e(5)	0.25	control (1.5-3.5)	control (0.2-2.0)
f(6)	0.56	control (1.5-2.5)	control (0.2-0.5)

1) I.C.는 내부조건을 의미함
1) I.C. means initial contition

혐기보상점보다 높은 산소농도를 유지함과 동시에 농산물 한계산소농도에 근접한 정밀제어를 진행할 수 있다. 따라서 정확한 호흡지수 계산을 위해 기밀도, 기체변화량, 기체제어에 따른 환경변화 등 다양한 변수를 고려해야 한다. Table 1은 기밀도 및 기체환경제어에 따른 호흡지수 변화특성을 알아보기 위한 시험조건을 나타낸 표이다. Test (a, b)는 서로 다른 기밀도 조건의 챔버를 이용하여 초기 산소조건을 3%로 고정하고 챔버 내부에 저장된 사과의 호흡에 의한 기체농도 변화를 관찰하였다. Test (c, d, e)는 Test (a, b)의 결과를 바탕으로 저산소를 유지하기 위해 기밀도를 0.3 (mmAq/min) 이하로 유지하며 기체환경(산소, 이산화탄소)을 서로 달리하여 호흡지수 계산을 위한 기체환경 및 기체제어 특성을 관찰하고자 하였다. Test (f)은 현장 적용되어 운전되고 있는 CA저장고를 모사하기 위해 20분(0.625 mmAq/min) 이상의 기밀도를

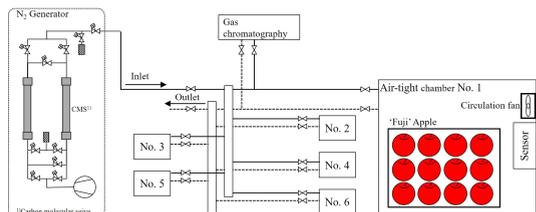


그림 1. 호흡지수 분석 실험장치의 도식도
Fig. 1. Schimetic of experimental device for analysis of respiration quotient

유지함과 동시에 ‘Fuji’사과의 기체저장환경을 적용하였고 제시된 기체제어 알고리즘을 통해 호흡지수 분석 가능성을 확인하였다.

III. 기체변화 특성 및 호흡지수 관찰

3.1 기밀도에 따른 기체환경 및 생리 특성 분석

3.1.1 기체환경 변화 특성 분석

Fig. 2은 서로 다른 기밀도를 갖는 챔버를 이용하여 초기 산소 및 이산화탄소 농도를 각각 3%와 0.1%로 제어한 뒤 사과의 호흡에 의한 기체변화를 관찰한 그래프이다. 기밀도가 높을수록 챔버 내부로 유입되는 산소량이 제한되어 농산물의 생리 활동에 따른 기체변화를 보다 정밀하게 관찰할 수 있으며, 낮은 산소농도를 유지하는데 유리하다. Fig. 2의 (a)는 기밀도가 0.51 (mmAq/min)으로 약 24분방에 해당하는 기밀도이며, 산소농도는 3%부터 점차 감소하여 40일 이후 1%까지 감소하며 이산화탄소는 최대 5.79%까지 증가한다. (b)는 0.25 (mmAq/min)으로 약 50분방에 해

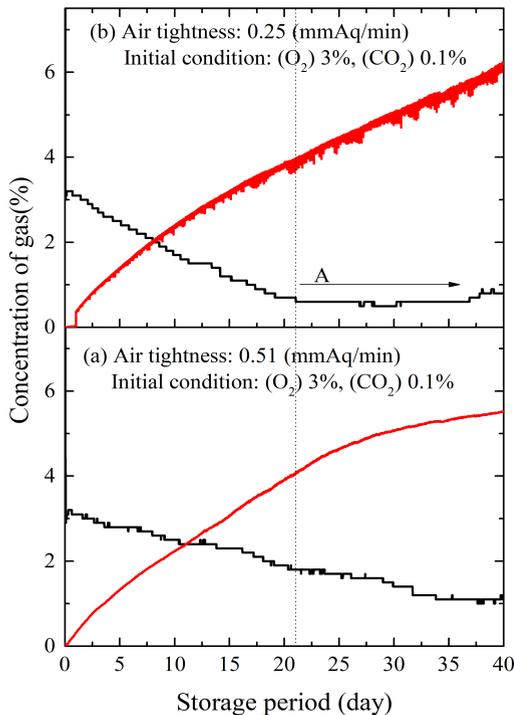


그림 2. 기밀도 별 후지사과 호흡에 의한 기체변화 특징 ((a),(b)는 실험 a와 b를 나타낸다)
Fig. 2. Characteristics of gas change by ‘Fuji’ apple respiration in different air-tightness ((a), (b) means test a and b)

당하는 기밀도이며 산소농도는 3%에서 0.6%까지 감소하는데 약 21일 걸렸으며 이산화탄소는 지속적으로 증가하여 최대 7.45%까지 증가하였다. 이를 통해 기밀도의 차이는 외기의 유입량을 증가시키며 1% 이하의 저산소 환경을 유지하기 위해서는 0.25 (mmAq/min)에 가까운 기밀도를 유지해야 함을 알 수 있다.

3.1.2 호흡지수(RQ) 분석

저장기간 40일 동안 측정된 기체환경 데이터를 바탕으로 호흡지수를 계산해 Fig. 3에 나타냈다. 호흡지수는 저장 초기 기체환경 대비 저장일수에 따른 기체 변화량을 이용했으며 계산 주기에 따른 호흡지수의 차이를 확인하기 위해 10분 단위와 12시간단위로 구분하여 계산하였다. test(a)는 ‘Fuji’사과 호흡으로 감소하는 산소량이 외기의 유입으로 인해 변화량이 적게 나타나 호흡지수가 상대적으로 높게 나타나고 있다. test(b)는 test(a)보다 높은 기밀도를 유지하며 산소농도 변화가 빠르게 일어나 호흡지수가 1.5로 일정하게 나타난다. 저장기간 동안 기체제어 과정이 없어 계산 시간에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 저장

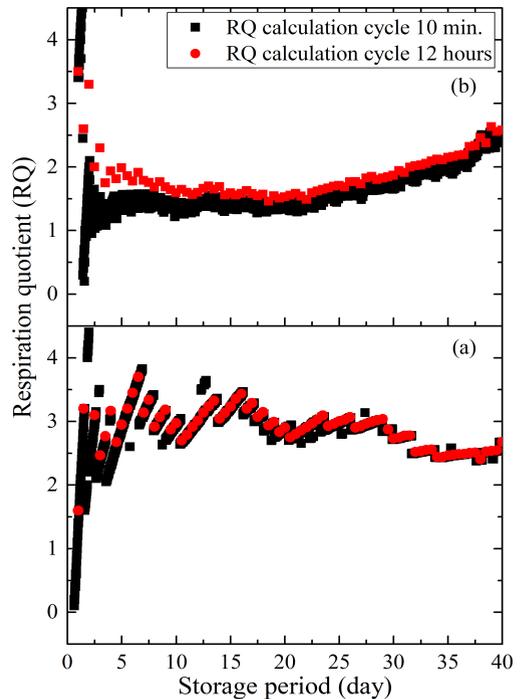


그림 3. 실험조건에 따른 호흡지수 계산 ((a),(b)는 실험 a와 b를 나타낸다)
Fig. 3. Respiration quotient calculation according to test condition ((a), (b) means test a and b)

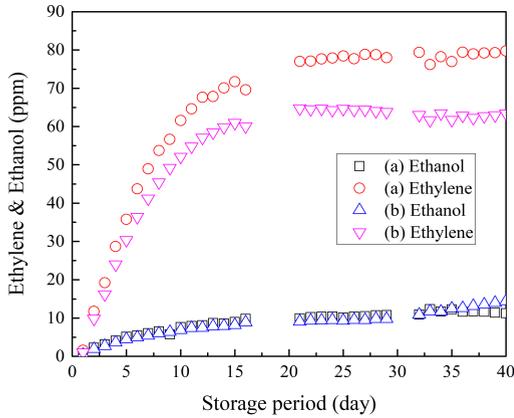


그림 4. 실험 (a)와 (b)의 저장기간에 따른 에틸렌과 에탄올 농도 변화량
 Fig. 4. Amount of change of ethylene and ethanol concentration on storage period of test (a) and (b)

21일 이후 test(b)는 산소농도가 0.6%까지 감소한 Fig. 2 (b)의 A구간과 호흡지수가 증가하는 구간이 일치하는 것으로 보다 저산소에 의한 무기호흡으로의 전환과 함께 0.6%의 산소농도가 ‘Fuji’사과의 혐기보상점일 것으로 예측된다. 호흡지수 계산 주기에 따른 차이는 크게 나타나지 않고 있으나 저장 초기 호흡지수 편차가 크게 나타났다. 이는 계산 주기가 짧을수록 기체 변화량이 작아 계산값에 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 따라서 기체제어 후 호흡지수 계산을 위해 안정화시간이 필요할 것으로 판단된다.

다. 에틸렌 및 에탄올 변화

Fig. 4는 기체제어가 없는 저장기간동안 내부에 축적된 에틸렌과 에탄올 농도의 변화를 나타내고 있다. 에틸렌의 경우 약 15일까지 급격히 증가 후 증가추세가 둔화 되었다. 무기호흡의 지표인 에탄올의 경우 test(a), (b) 모두 30일동안 약 10 ppm 까지 꾸준히 증가하고 있다. 이후 test(a)는 증가 추이가 둔화되는 반면에 test (b)는 증가 추이가 높아지는 것을 알 수 있다. Fig. 2의 A구간보다 호흡지수 증가구간이 약 9일 정도 늦게 현상이 나타났으며 기체농도변화에 따라 생리변화가 급격하게 변하지 않는 것으로 판단된다.

3.2 호흡지수 계산을 위한 기체환경 특성 분석

3.2.1 기체환경 변화 특성 분석

Fig. 5는 시험 챔버마다 설정된 서로 다른 산소와 이산화탄소 농도에 따라 기체제어 장치를 이용한 기체제어 특성을 나타내었다. 기밀도는 1절에서 언급한 바와 같이 정밀한 호흡지수를 계산하기 위해

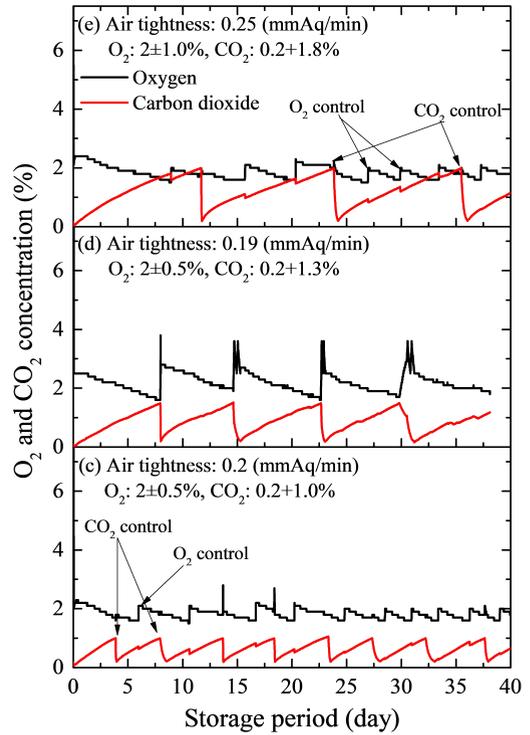


그림 5. ‘후지’ 사과의 호흡과 기압조건에 따른 기체 변화 특징
 Fig. 5. Characteristics of gas change by ‘Fuji’ apple respiration and atmosphere control

0.25mmAq/min 이하를 유지하도록 하였으며, 산소농도와 이산화탄소 농도의 제어범위를 서로 다르게 하여 기체조절에 따른 기체환경 변화를 관찰했다. test (c, e) ‘Fuji’사과의 호흡으로 이산화탄소가 증가하는 동안 산소가 소비되는 과정에서 설정산소 이하로 낮아져 산소공급이 이루어지며 40일 동안 기체조절과정이 각각 18회 10회 진행됐다. test (d)는 이산화탄소가 제어되는 동안 산소제어가 동시에 진행되어 40일동안 4회 조절되었다. 제어하는 이산화탄소가 제어되는 동안 질소발생기를 통해 공급되는 산소농도를 정밀하게 제어할 경우 기체효율을 높이고 보다 안정적인 기체 환경제어가 가능할 것으로 판단된다.

3.2.2 호흡지수(RQ) 분석

Fig. 6은 기체조절이 끝난 직후부터 다음 기체조절이 시작되기까지 측정된 챔버 내부의 기체변화량을 기준으로 호흡지수를 계산한 결과이다. 호흡지수 계산 주기를 10분으로 했을 경우 산소변화량이 이산화탄소 변화량에 비해 작게 나타나 0.1부터 점차 상승하는 경향을 보인다. 호흡지수 계산 주기를 12시간으로 늘릴

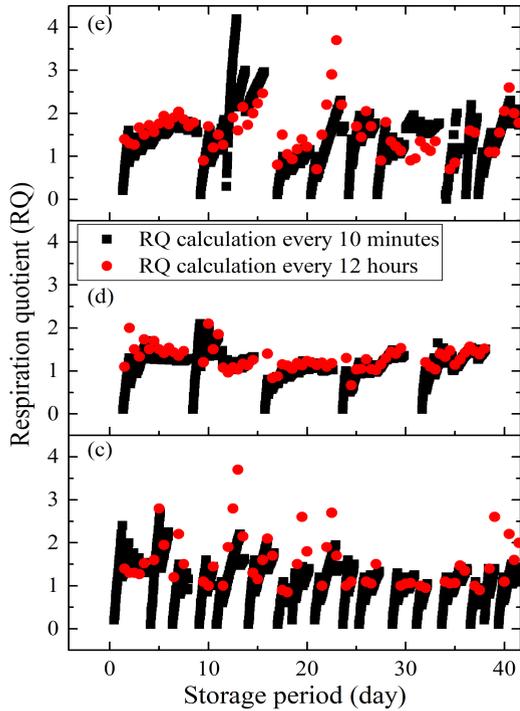


그림 6. 실험조건에 따른 호흡지수 계산(c), (d), (e)는 실험조건 c,d,e를 나타냄
Fig. 6. Respiration quotient calculation according to test condition ((c), (d), (e) means test c, d and e)

경우 ‘Fuji’ 사과의 호흡에 의한 산소감소량이 관측되어 평균 호흡지수와 비슷한 분포를 보인다. 하지만 계산된 12시간 이내에 기체조절구간이 포함될 경우 실제 호흡지수보다 높게 측정되기도 한다. 따라서 실제 호흡지수를 계산하기 위해서는 기체조절구간 및 안정화 시간을 모두 고려해야 한다.

3.3 호흡지수 계산 알고리즘 설계 및 분석

3.3.1 기체제어 특성을 고려한 호흡지수 계산 알고리즘

Fig. 7은 test (c, d, e)를 바탕으로 호흡지수를 계산하는 과정에서 발생할 수 있는 기체조절 구간 및 기체 변화량 검출구간을 대표적인 4가지로 정리하여 나타낸 것이다. case 1은 호흡지수 측정주기 중간에 기체조절이 이루어지는 경우이며 case 2는 측정주기 처음과 끝 구간, case 3, 4는 측정주기 처음과 끝 구간에 기체조절이 이루어진 경우이다. 기체조절 구간은 호흡지수를 계산할 수 없다. 따라서 측정주기 내에서 정밀한 호흡지수를 계산하기 위해서는 기체조절구간을 제외하고 새롭게 기체변화 측정구간을 설정하여 호흡지수를 계산해야 한다. 이를 적용한 호흡지수 계산을 위

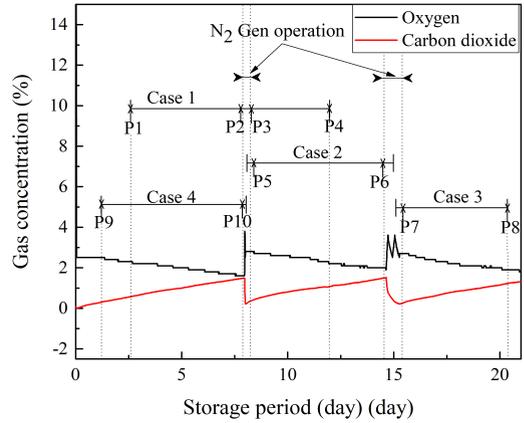


그림 7. 경우 4의 호흡지수 계산 측정부분
Fig. 7. Case 4 of measurement point for respiration quotient calculation

한 전제 알고리즘에 대한 Flow-chart를 Fig. 8에 나타냈으며, 세부적으로 호흡지수 계산을 위한 기체환경 측정방법은 Fig. 9, 호흡지수 결과를 반영한 기밀챔버 산소농도 제어방법을 Fig. 10에 나타냈다. 호흡지수 계산과정은 기체환경 측정, 기체조절 여부 확인, 기체 변화량 산출 단계를 거친다. 호흡지수 계산을 위한 기체환경 측정방법은 Fig. 7에 나타낸 기체조절구간(case 1-4)을 고려하여 측정점(P 1-10)에서 측정된 값

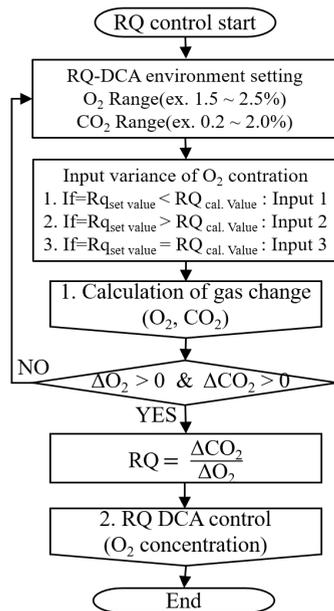


그림 8. 호흡지수 그리고 산소농도 조절 방법의 순서도
Fig. 8. Flow chart of respiration quotient and oxygen concentration control method

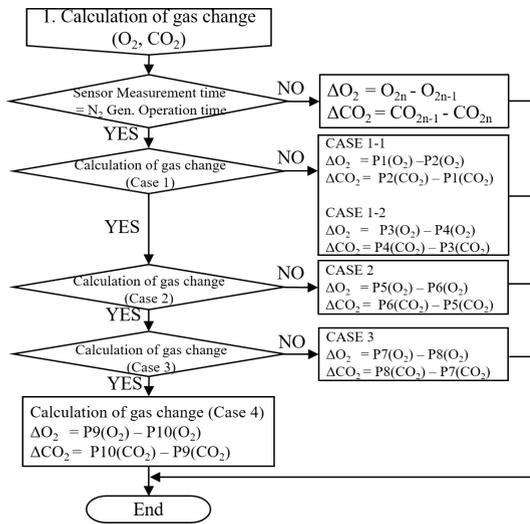


그림 9. 경우 1에서 4의 기체 변화량 계산방법
Fig. 9. Amount of gas change calculation method on case 1 to 4

을 사용한다. 측정값을 기준으로 산소와 이산화탄소의 변화량을 산출한 후 식 1을 통해 호흡지수를 최종적으로 계산한다. 호흡지수 계산결과는 호흡지수 설정값과 비교하여 Fig. 8의 Input 1-3에 해당하는 산소농도로 기밀챔버의 기체환경을 제어한다.

3.3.2 호흡지수 계산 결과

Fig. 11은 현장 보급된 사과 CA저장 환경을 모사한 챔버의 기체환경 변화 데이터를 이용해 호흡지수를 계산한 결과이다. 현재 보급되어 운영 중인 사과 CA저장고는 저장장해를 최소화하기 위해 2±0.5%, 이산화탄소농도 0.2-0.5%로 제어되고 있으며, 사과가 저장된 기밀챔버의 기체환경 및 기체제어 상태를 이와 동일하게 유지하였다. 농산물의 호흡지수는 서로

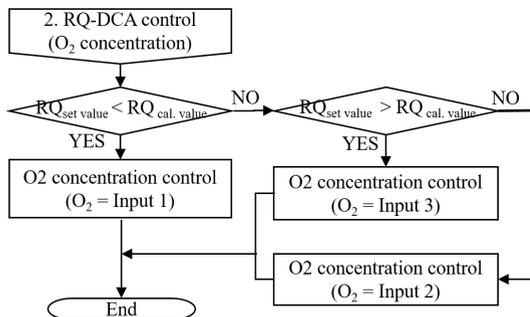


그림 10. 호흡지수를 기반으로 한 산소 조절방법
Fig. 10. Oxygen control method base on respiration quotient

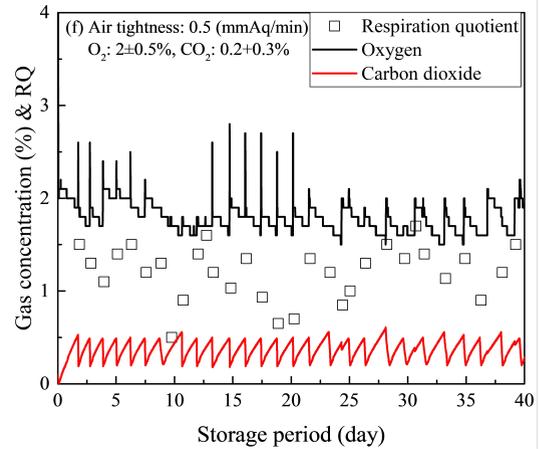


그림 11. 현장 사과 CA저장조건에 따른 호흡지수 계산
Fig. 11. Respiration quotient calculation according to on-site apple CA storage condition

다르게 보고되고 있으나 유기호흡 반응에 의하면 소비한 산소의 양과 이산화탄소의 양이 동일하기 때문에 1이 기준이 된다^[12]. 'Fuji' 사과를 이용한 호흡지수는 평균 1.16으로 계산되었다. 하지만 호흡지수의 분포는 0.5에서 1.7%로 넓게 나타나고 있어 호흡지수를 이용한 챔버 산소조절은 호흡지수의 반복 평균, 편차 등을 고려해야 하며, 센서의 정밀도 및 챔버 내부의 기체 환경을 균일하게 유지하는 연구와 함께 호흡지수 기반으로 산소농도를 제어할 경우 농산물의 생리 특성 및 저장장해에 미치는 영향이 함께 연구되어야 할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 호흡지수를 이용한 능동 기체환경 제어(RQ-DCA) 가능성을 확인하기 위해 기밀도가 조절되는 챔버를 이용하여 사과를 저장한 후 기체환경 변화를 관찰하여 호흡지수를 계산하였고 호흡지수 및 이를 이용한 산소농도 제어알고리즘을 제시하였다.

1% 이하의 저산소를 유지하기 위해서 기밀도는 0.25mmAq/min 이하가 요구되었다. 호흡지수 계산 결과 계산 주기가 짧으면 기체제어 종료 직후 낮은 호흡지수를 보였으며, 계산 주기가 길면 기체제어 구간이 포함되어 오차가 증가구간이 나타났다. 또한 호흡지수에 의한 혐기보상점과 에탄올 분석을 통한 혐기보상점은 약 9일 차이를 보여 유기호흡과 무기호흡의 변화구간이 명확하게 나타나지 않았다. 서로다른 기체 농도에서 기체조절 및 호흡지수 특성을 분석한 결과 4

가지 형태의 기체측정을 통한 호흡지수 계산이 가능했으며, 이를 바탕으로 호흡지수 계산 및 산소 제어알고리즘을 제시하였다. 제시된 알고리즘을 통해 현장 보급된 CA저장고를 모사한 기밀챔버의 기체변화량으로 호흡지수를 계산한 결과 호흡지수는 0.5에서 1.7 사이에 나타났으며 평균 1.16으로 계산되어 RQ-DCA 제어 가능성을 확인했다. RQ-DCA기술의 완성을 위해서는 센서 정밀도 향상, 기체환경 균일화와 함께 DCA제어에 따른 농산물의 생리특성이 연구되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] E. M. Yahia, *Modified and Controlled Atmospheres for the Storage, Transportation, and Packaging of Horticultural Commodities*, CRC Press, 2008.
- [2] A. Ortiz, J. Graell, and I. Lala, "Cell wall-modifying enzymes and firmness loss in ripening 'Golden Reinders' apples: A comparison between calcium dips and ULO storage," *J. Food Chem.*, vol. 128, no. 4, pp. 1072-1079, 2011.
- [3] A. Kader, *Postharvest Technology of Horticultural Crops*, 3rd Ed., University of California Agricultural and Natural Resource, Publication 3311, 2002.
- [4] R. K. Prange, A. H. Wright, J. M. Delong, and A. Zanella, "History, current situation and future prospects for dynamic controlled atmosphere (DCA) storage of fruits and vegetables, using chlorophyll fluorescence," *ISHS Acta Horticulturae 1012*, pp. 905-915, Kuala Lumpur, Malaysia, Jun. 2012.
- [5] A. Weber, A. Brackmann, R. O. Anese, V. Both, and F. R. Thewes, "Respiratory quotient: Innovative method for monitoring Royal Gala apple storage in a dynamic controlled atmosphere," *Scientia Agricola*, vol. 72, no. 1, pp. 28-33, 2015.
- [6] A. Wright, J. Delong, J. Arul, and R. Prange, "The trend toward lower oxygen levels during apple (*Malus × domestica* Borkh) storage," *J. Horticultural Sci. and Biotechnol.*, vol. 90, no. 1, pp. 1-13, 2015.
- [7] A. Mditshwa, O. A. Fawole, and U. L. Opara, "Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apple - A review," *J. Food Packaging and Shelf Life*, vol. 16, pp. 59-68, 2018.
- [8] F. Feng, M. Li, F. Ma, and L. Cheng, "Effects of location within the tree canopy on carbohydrates, organic acids, amino acids and phenolic compounds in the fruit peel and flesh from three apple (*malus × domestica*) cultivars," *Horticulture Res.*, vol. 1, pp. 1-6, 2014.
- [9] S. Sun, L. Xin, H. Gao, J. Wang, and P. Li, "Response of phenolic compound in 'Golden Delicious' and 'Red delicious' apple peel to fruit bagging and subsequent sunlight re-exposure," *J. Scientia Horticulturae*, vol. 168, pp. 161-167, 2014.
- [10] J. A. Bartsch and G. D. Blanpied, *Refrigeration and controlled atmosphere storage for horticultural crops*, The Northeast Regional Agricultural Engineering services, Cornell University, p. 42, 1984.
- [11] G. S. V. Raghavan, C. Vigneault, Y. Gariépy, N. Markarian, and P. Alvo, *Refrigerated and controlled/modified atmosphere storage*, CRC Press, 2004.
- [12] J. O. Choi, "The Korean type CA storage distribution system for the high quality of the agricultural product," *J. Food Sci. and Ind.*, vol. 30, no. 4, pp. 142-151, 1997.
- [13] N. Bessemans, P. Verboven, B. Verlinden, and B. Nicolai, "A novel type of dynamic controlled atmosphere storage based on the respiratory quotient (RQ-DCA)," *Postharvest Bio. and Technol.*, vol. 115, pp. 91-102, 2016.

박 천 완 (Chun-wan Park)



2009년 2월 : 전북대학교 기계공학과 학사
2011년 2월 : 전북대학교 기계공학과 석사
2016년 2월 : 전북대학교 기계공학과 박사
2016년 1월~현재 : 국립농업과학원 박사후연구원

<관심분야> 냉동공학, 환경제어, 센서공학, 저장유통
[ORCID:0000-0002-1485-6331]

최 등 수 (Dong-soo Choi)



1991년 2월 : 충남대학교 농업기계공학과 학사
1993년 2월 : 충남대학교 농업기계공학과 석사
2001년 2월 : 충남대학교 농업기계공학과 박사
1998년 2월~현재 : 국립농업과학원 수확후관리공학과 농업연구사

<관심분야> 농업공학, 냉동공학
[ORCID:0000-0003-2492-8324]

손 재 용 (Jae-yong Son)



1993년 2월 : 경북대학교 농업기계공학과 학사
1995년 8월 : 경북대학교 농업기계공학과 석사 졸업
2004년 8월 : 경북대학교 생물산업기계공학과 박사 졸업
1992년 7월~현재 : 국립농업과학원 수확후관리공학과 농업연구관

<관심분야> 저장유통기계, 근적외선 분광분석
[ORCID:0000-0003-3559-0082]

김 용 훈 (Yong-hoon Kim)



1995년 2월 : 한국외국어대학교 화학과 학사
1997년 2월 : 한국외국어대학교 대학원 화학과 석사
2005년 : The graduate university for advanced studies (일본) 박사

2009년 1월~현재 : 국립농업과학원 수확후관리공학과 농업연구사
<관심분야> 화학공학, 저장유통공학, ICT 융복합
[ORCID:0000-0001-7214-1388]

김 미 나 (Mi-na Kim)



2011년 2월 : 상명대학교 식물산업공학과 학사
2015년 8월 : 상명대학교 식물식품공학과 석사
2017년 2월~현재 : 국립농업과학원 수확후관리공학과 연구원

<관심분야> 저장유통공학, 농생명공학
[ORCID:0000-0001-9286-9499]

김 진 세 (Jin-se Kim)



1998년 2월 : 고려대학교 물리학과 학사
2000년 2월 : 고려대학교 물리학과 석사
2018년 8월 : 충남대학교 농기계공학과 박사
2013년 10월~현재 : 국립농업과학원 수확후관리공학과 농업연구사

<관심분야> 냉동공학, 저장유통공학
[ORCID:0000-0001-5514-3445]

최 승 영 (Seoung-young Choi)



1994년 2월 : 전주비전대학교 비서학과 전문학사
2018년 3월~현재 : 한국방송통신대학교 농학과 학사
2017년 1월~현재 : 국립농업과학원 수확후관리공학과 연구원

<관심분야> 유전공학, 원예학, 빅데이터
[ORCID:0000-0002-3504-1107]