

CA저장고의 작동 환경에 따른 감모율 예측

박찬완* · 박석호 · 김진세 · 최동수 · 김용훈 · 이수장

국립농업과학원 농업공학부

Weight Loss Prediction by Operating Conditions of CA Storage

Chun Wan Park*, Seok Ho Park, Jin Se Kim, Dong Soo Choi,
Yong Hun Kim, and Su Jang Lee

Division of Postharvest Engineering, National Institute of Agricultural Sciences

Abstract

Weight loss that influences quality and farmer incomes is affected by the storage environment of agricultural products. The interior of storage should be maintained at high humidity to prevent the weight loss of products which contain a lot of moisture. The research had constantly proceeded with change in the heat exchanger surface areas, humidity systems, and weight loss forecast to maintain high humidity within storage. Relative humidity that exerts an effect weight loss of crop is influenced by storage temperature, leak state, and volume of product. When weight loss is predicted, different conditions of these factors are derived. In case of CA storage, ways of forecasting the weight loss become easier compared to cold storage due to sealed storage with external environment during storage period. In this study, apples were stored in purge-type CA storage and weight loss has been predicted by using operating characteristics and environmental conditions. As a result, humidity variation in the storage fluctuates with the operation of the unit-cooler. Furthermore, unit-cooler operation factor is influenced by outside temperature and respiration heat. Prediction value of weight loss according to temperature and humidity has been most accurately predicted. Prediction value through defrosting water measured shows unit-cooler work quality. K-value needs verification to calculate the VPD method.

Key words: CA storage, weight loss, transpiration, cold storage

서 론

저온저장은 수확 후 저장기간을 연장하고 최상의 품질을 유지하기 위해 가장 일반적으로 활용되고 있는 방법이다. 특히, 대부분의 농산물은 80-95%에 달하는 수분을 함유하고 있으나(ASHRAE, 2006), 증산 또는 호흡에 의해 수분이 손실되고 한계수분손실에 도달할 경우 상품성을 잃게 된다고 보고했다(Deirdre, 2015). 농산물을 저온저장하는 기간 동안 품질을 유지하기 위해 저장고내의 저온 및 고습은 필수적이다. 이때 저온 조건을 위해 냉각하면 저장고 내부의 수분은 유니쿨러(증발기) 표면에서 응축 및 결상되며 제상과정을 통해 저장고 외부로 수분을 배출시킨다. 즉 이러한 냉각과정의 반복은 저장고 내부의 수분을 외부로

배출을 유도해 저장고 내 습도를 낮추고 농산물과 대기의 증기압차를 증가시켜 농산물의 증산작용을 촉진시킨다. 이와 같은 농산물의 수분 손실은 실제 판매중량을 감소시켜 농업인들의 경제적 어려움을 가중시킨다(Watkins & Nock, 2012). 저장고 내부의 습도를 높게 유지하는 방법으로 Yun et al. (2002)은 증발기의 열교환표면적을 넓히고 고내온도와 유니쿨러온도의 열교환 온도차를 줄여 90%RH 이상의 고습도를 유지할 수 있는 유니쿨러에 대해 보고하였고, Delelea et al. (2009)은 낮은 농도의 산소를 유지하는 저장고(ULO, Ultra Low Oxygen) 내부에 가습시스템을 적용하여 내부 습도 및 감모에 미치는 영향에 대해 보고하였다. 또한 내부 온습도 측정(Kwak et al., 2013) 및 증산계수(Bryan & Brian, 1996)를 활용한 감모율 예측모델이 제시되기도 하였다. 온습도 측정을 통한 감모율 예측은 정해진 온습도 범위 내에서 수행되어 계속해서 변화하는 저장고 내부의 온습도에서는 적용이 어려우며, VPD (Vapor Pressure Deficit) 예측식의 경우 증산계수(K-value)가 중요한 인자로 작용하여 일부 실험에 의해 증산계수가 밝혀진 농산물을 제외하면 그 예측식을 활용하기 어렵다. 특히 저온저장고

*Corresponding author: Chun Wan Park, Division of Postharvest Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Jeollabuk-do, 54875, Korea
Tel: +82-63-238-4125; Fax: +82-63-238-4105
E-mail: chunwan1@korea.kr
Received July 3, 2017; revised August 2, 2017; accepted August 18, 2017

내부에 증발기가 설치되어 있을 경우 결상 및 제상과정의 반복으로 인한 수분배출 또한 지속적으로 반복되기 때문에 저장고의 운전환경을 고려해야 하지만 대부분의 저장특성에 관한 연구는 증발기의 영향이 없는 실험조건하에서 수행되고 있다. 국내에서는 증산작용에 의한 감모는 농산물 저장에 있어 매우 중요한 인자임에도 불구하고 필름을 이용한 배추감모 억제(Yang et al., 1993) 등 특정작목에 한하여 연구가 이루어지고 있다. 특히 저온저장고의 방열문 개폐 및 완벽하지 않은 저장고의 기밀로 인해 발생하는 수분의 입·출입으로 인하여 감모율을 예측하기가 매우 어려웠다. 하지만 최근 CA (Controlled Atmosphere)저장고는 APC (대형) 또는 일부 농가(소형)에 보급되어 이용되며 입고에서 출고까지 기밀이 확보된 저장고에 장기저장이 이루어지고 있어(Chun et al., 2016) 품질관리를 위한 감모율의 예측 및 활용성이 증가하고 있다.

본 연구에서는 밀폐된 CA저장고에 사과를 저장하였으며, 저장기간 동안 저장고 내부 온습도 데이터 및 냉장시스템의 운전특성을 측정하고 이를 이용해 실제 계측된 감모율과 비교하였다. 또한 VPD를 이용한 감모율을 이용하여 내부에 저장된 사과의 증산계수를 추정하였다.

재료 및 방법

실험재료

본 연구에 이용된 후지사과는 전라북도 장수군에서 2015년 10월 수확하여 200-250 g의 크기 선별 후 4.5 ton을 CA저장고에 저장하였다. 저장된 사과는 밀증감소를 위해 3주간 0°C에서 저온저장 후 기체조성을 진행하였고 3개월간 CO₂ 0.5% 이하를 유지하고, 이후 CO₂ 범위를 1%이하로 유지하여 저장하였다. 저장기간 동안 O₂는 2%, 온습도는 각각 0°C, 99%RH를 유지하였으며 245일간 CA저장하였다.

실험장치

실험장치는 5 ton 규모의 기밀이 유지되는 저장고(38 m³, Cooltainer Co., Iksan-si, Korea), 컨덴싱유닛(Comp. 2hp, Jimyung Co., Iksan, Korea), 제어장치(SM-7000T, DDC-478, Systronics Co., Bucheon, Korea), 통합센서(O₂, CO₂, Temp. Hum, Sohatech Co., Seoul, Korea), 질소발생기(6 Nm³, GSA Co., Gwangju, Korea)로 구성된다. 기밀저장고는 CA저장을 위한 압력변화 시험방법(Kader, 2002)에서 제시하는 압력변화시간(3 cmAq→1.5 cmAq)을 120분 유지하는 기밀도를 충족시켰다. 이때 저장고 내부의 온도 및 기체치환에 따른 압력변화는 공기주머니(3 m³)를 이용하여 일정하게 대기압으로 유지시켰다. 컨덴싱유닛은 3 hp의 압축기와 5 hp의 증발기를 이용하여 구성하였으며, 이는 저온다습한 환경에 노출된 증발기의 결상에 의한 열교환 면

적 감소를 고려한 결과이다. 제어장치는 제어화면(SM-7000T)과 제어부(DDC-472)로 구성되어있으며, 농촌진흥청에서 개발한 배출식 CA저장고 제어프로그램(Park et al., 2016)을 이용해 온습도 및 기체조성을 제어하였다. 이때 통합센서는 온도, 습도, O₂, CO₂를 정밀하게 측정하여 제어장치로 데이터를 공급한다. 이때 기체조성 조절을 위해 질소발생기를 이용하며 질소발생기는 PSA (Pressure Swing Adsorption) 방식으로 CMS (Carbon molecular seive) 흡착제를 이용하여 고농도의 질소(99%)를 생성하고 이를 저장고 내부로 공급하여 N₂-O₂를 치환과정을 통해 O₂농도를 조절한다. Fig. 1은 실험에 이용된 CA저장고의 개략도를 나타냈으며, Table 1은 CA저장고 및 통합센서의 성능특성을 나타내었다.

감모율 측정 및 예측방법

기준 감모율값은 저장고에 저장된 사과상자의 무게를 저울로 측정했다. 감모율 예측방법은 온습도 측정을 통해 수증기량의 무게를 분석한 감모율 예측법, 유닛쿨러의 제상수를 이용한 감모율 예측법, 그리고 수증기분압차(VPD)와 증산계수(K-value)를 이용한 감모율 예측법을 이용하였다. 제상수 및 사과 무게 측정은 전자저울(150A, CAS Co., Yangju, Korea)을 이용하였으며, 제상수는 5 L 물통을 이용하여 1주일 단위로 측정하고, 사과의 무게는 CA저장고의 특성상 저장고의 개방이 어려워 22, 165, 245일 3회 측정하였다.

온·습도를 통해 예측된 감모율은 포화수증기와 계측된

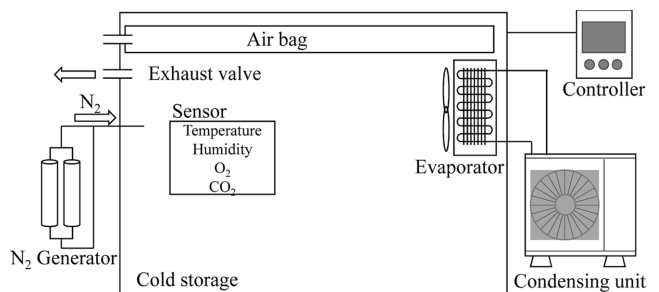


Fig. 1. Schematic diagram of CA storage.

Table 1. Characteristic of CA storage and sensor

Item	Specification	
CA storage	Size	6.0 × 2.4 × 2.7 m
	Condensing unit	3 hp
	Unit-cooler	5 hp
	Airbag size	5.0 × 2.0 × 0.3 m
N2 Generator	Amount of supply	6 (Nm ³ /hr)
Sensor	Temperature	-20-60°C (±0.1°C)
	Humidity	0~99%RH (±4.5%RH)
	Oxygen	0~25% (±0.22%)
	Carbon dioxide	0~5% (±0.01%)

상대습도를 이용해 계산된 저장고내의 수증기량 차이를 이용해 계산하였으며, 식 (1)에 나타내었다. 밀폐된 저장고 내부의 상대습도 변화는 수분의 생성과 배출과정에 지배적 영향을 받는다. 저장고 내부의 수분은 사과의 호흡과 증산 과정에 의해 생성되며, 유닛쿨러가 냉각을 하는 도중에 순차적으로 응축·결상·제상과정이 일어나 수분을 배출한다. 따라서 저장고 내부 온습도를 계측하여 변화하는 수증기 무게값을 계산하고 이를 통해 감모량을 예측하였다.

$$\text{Weight loss} = \sum_{d=1}^n (m_{\text{sat}} - m_{\text{RH}}) \quad (1)$$

유닛쿨러의 제상수를 이용한 감모율은 배출되는 제상수의 무게를 주기별로 측정하여 제상수 무게만큼 감도가 이루어진 것으로 추정하였다. 그 계산식을 식 (2)에 나타내었다.

$$\text{Weight loss} = \left(1 - \frac{W_{\text{dw}}}{W_{\text{tot}}}\right) \times 100 \quad (2)$$

마지막으로 VPD를 이용한 감모율은 식 (3)과 같으며, 이때 K-value는 Jonathan=35, Golden Delicious=58, Bramley's seedling=42, 그리고 그 외 품종은 평균 42로 보고되어 있다(ASHRAE, 2006).

$$\text{Weight loss} = \text{K-value} \times \text{VPD} \quad (3)$$

결과 및 고찰

CA저장고 내부 온·습도 및 기체농도 변화

Fig. 2은 CA저장고 내부에 사과를 입고한 후 200-210일

사이의 온습도 및 O₂, CO₂의 농도변화를 나타낸 그래프이다. CA저장고의 운전은 크게 온도를 유지하기 위한 유닛쿨러 작동과 기체농도 조절을 위한 질소발생기 작동으로 구분된다. CA저장고 내부의 습도는 93-95%RH를 유지하며 유닛쿨러가 작동할 경우 80-85%RH까지 감소한다. 특히 유닛쿨러가 작동하고 제상에 의해 온도가 상승할 경우 습도는 최소 67%RH까지 감소하기도 한다. 이는 저장고 내부의 다습한 공기가 유닛쿨러의 낮은 표면온도에 쉽게 응축·결상되며 제상과정을 통해 제상수가 외부로 배출되기 때문이다(Park, 2016). 유닛쿨러가 작동하여 온도를 유지하는 동안에 저장고 내부의 CO₂는 농산물의 호흡에 의해 지속적으로 증가하게 된다. 증가된 CO₂는 고농도의 질소(98%)를 공급하는 동시에 내부기체를 외부로 배출시켜 산소는 2%를 유지시키고 CO₂는 0.8→0.2%까지 감소시킨다. 질소발생기는 외부 공기를 제습기와 흡착타워에 통과시켜 고농도의 질소가스를 생산하며 이 과정에서 수분이 제거된다. 따라서 건조한 질소가스가 저장고 내부로 공급되어 저장고 내부의 상대습도를 감소시킬 우려가 있다. 하지만 질소가스가 공급되는 동안에 온도 및 습도는 변화가 관찰되지 않았다. 질소발생기를 통해 생성된 N₂는 저장고 내부로 공급되는 동안 냉각이 이루어진다. 절대습도가 동일하게 유지될 경우 온도가 감소하면 상대습도는 증가하게 된다(Yunus & Michael, 2011). 즉 상대습도가 낮은 N₂는 저장고 내부로 공급되어 냉각이 진행되며 상대습도가 높아져 저장고 내부의 습도변화에 큰 영향을 주지 못하게 된다.

외기온도에 따른 유닛쿨러 운전율과 제상수 배출

Fig. 3은 CA저장고가 설치된 장수군의 계절별 외기 평균기온과 그에 따른 유닛쿨러의 운전율을 나타낸 그래프이

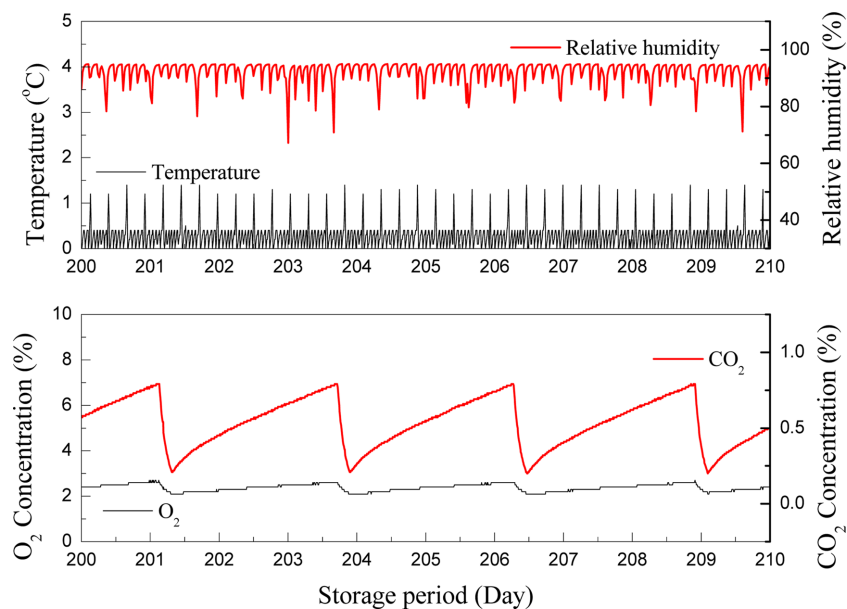


Fig. 2. Change in environment conditions (temperature, humidity, O₂, CO₂) inside CA container.

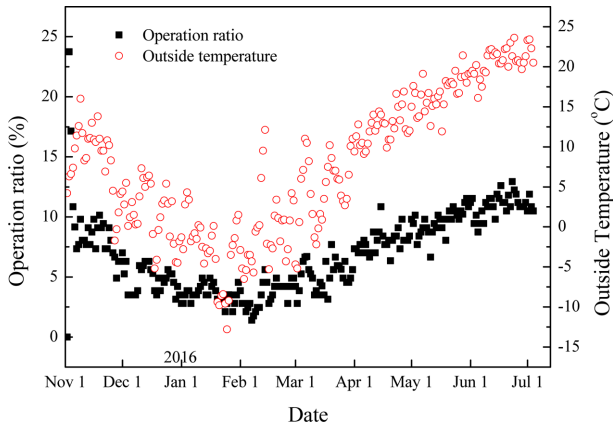


Fig. 3. The average temperature and the unit-cooler operation ratio according to season of Jangsu-gun.

다. 외기온도는 계절에 따라 -12.8-23.6°C까지 분포해 있으며 운전율은 1.4-23.8%까지 외기온도와 비례하여 변화한다. 반면에 입고 초기 사과의 품온을 낮추는 과정에서는 외기와 상관없이 20% 이상의 높은 운전율을 유지하고 있다. 일반적으로 유닛쿨러의 운전율은 냉각부하에 의해 결정되며 실험에 이용된 CA저장고의 냉각부하는 사과의 호흡열과 저장고 외부로부터 발생한 침투부하로 구분된다(SAREK, 2011). 사과의 호흡열은 저장온도에 따라 달라지며 본 실험의 저장온도 및 입고된 사과의 무게를 고려할 경우 호흡열은 86.9 W이다(ASHRAE, 2006). 또한 CA저장고의 단열벽체에 대한 침투부하는 외기와 저장온도의 온도차와 단열벽체의 열전도율에 의해 결정되며, 저온저장고 냉각부하 계산식에 의해(SAREK, 2011) 온도차 1°C당 11 W의 침투부하가 발생한다. 저장된 사과의 호흡열을 고려할 경우 저장고는 외기온도 -8°C부터 0.8 W 난방부하가 필요하며 유닛쿨러의 운전이 필요없게 된다.

Fig. 4는 외기온도에 따른 유닛쿨러의 냉각능력과 저장고의 냉각부하를 이용하여 계산된 운전율과 장수에 설치된 저장고의 실제 운전율을 나타낸 그래프이다. 유닛쿨러의 운전율은 외기온도와 비례하여 증가한다. 하지만 외기온도 -6.3°C에서 운전율 23.75%로 가장 높게 나타나고 있다. 이는 입고 초기 사과의 품온을 낮추는 과정에서 유닛쿨러의 운전이 지속적으로 진행되었기 때문이다. 또한 -8°C 이하에서는 냉각부하가 더 이상 작용하지 않지만 2~3%의 운전율이 나타나고 있다. 저온저장고는 6시간 주기로 20분 제상을 진행하며, 하루의 일교차로 인해 냉각부하가 발생하기 때문이다.

Fig. 5는 유닛쿨러의 운전율에 따른 제상수 배출량을 나타낸 그래프이다. 제상수는 1주일에 한번 측정하였으며, 제상수 무게를 측정주기로 나눠 일당 제상수량을 나타냈다. 제상은 하루 4회 진행되었으며 운전율 최소 0.07 kg (운전율 6%)에서 최대 0.68 kg (운전율 12.8%)까지 제상수가 배출되었다. 유닛쿨러의 운전율이 100%이고 저장고 내부의

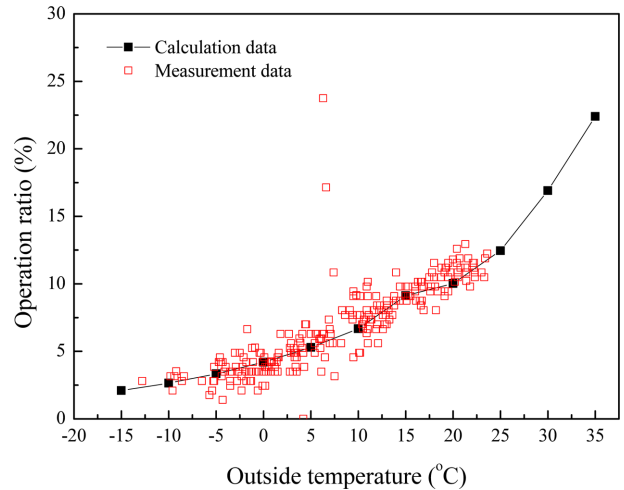


Fig. 4. Operating ratio of unit-cooler according to outside temperature.

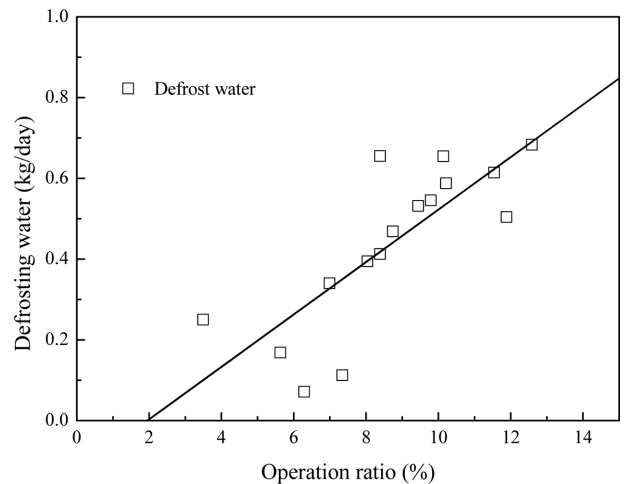


Fig. 5. Weight of defrosting water according to operating ratio.

습도가 90% 이상을 유지할 경우 1회의 제상사이클동안 2 kg 이상 배출이 되기도 한다(Park et al., 2014). 이와 같이 유닛쿨러의 운전율이 높아짐에 따라서 제상수의 배출량이 증가하는 이유는 운전율이 높아질수록 다습한 공기와 차가운 유닛쿨러의 표면 접촉 시간이 늘어나 응축 및 결상 발생확률이 증가하기 때문이다(Yunus & Michael, 2011; Reindl & Todd 2009).

감모율 예측 및 비교

Fig. 6은 온습도, 제상수, VPD와 K-value를 이용한 감모율 예측값을 실제 측정된 감모율과 비교한 그래프이다. 실제 감모율은 3.34%이며, 온습도를 이용한 감모율은 3.34%, 제상수를 이용한 감모율은 3.08%, VPD와 K-value (30, 42)를 적용한 감모율은 각각 3.31%, 4.65%로 예측되었다. 온습도를 이용하여 감모율을 예측한 경우 기온기가 계절에 상관없이 완만하게 나타나 유닛쿨러의 운전율 변화에 따른

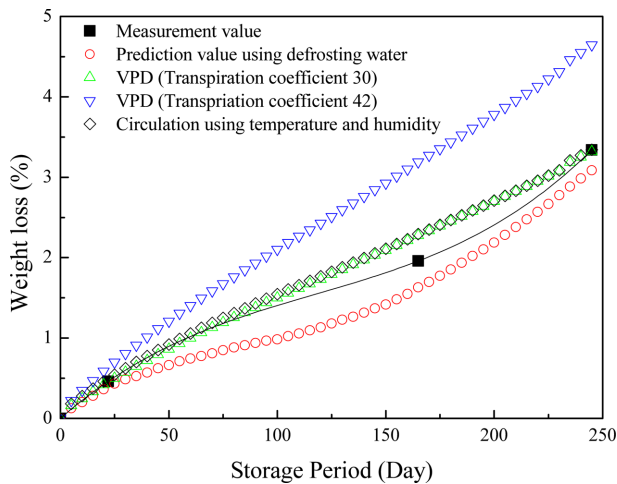


Fig. 6. Weight loss according to analysis method.

영향을 나타내지 못했다. 반면에 제상수를 이용한 감모율 예측값은 계절에 따른 영향이 뚜렷하게 나타났다. 겨울철에 외기가 낮을 때 유닛쿨러의 낮은 운전율로 수분의 응축량이 줄어들어 감모의 진행은 현저하게 느려진다. 하지만 입고 초기와 4월 이후에는 사과의 품온 및 높은 외기온도에 의한 침투부하에 의해 운전율이 높아져 수분의 응축 및 배출량이 증가한다. 이때 저장고 내부의 상대습도는 낮아지며 증산작용이 활발해지기 때문에 감모의 진행이 가속되기 때문이다. 또한, 제상수를 이용해 예측한 감모율은 실제 계측된 감모율보다 낮게 나타난다. 배출된 제상수를 이용해 감모율을 예측할 경우 저장고 벽면, 바닥 등 저장고 내부표면에 응축되어 존재하는 수분을 저장고 외부에서 계측하기 어렵기 때문이다(Reindl & Todd, 2009). VPD를 이용하여 감모율을 예측할 경우 일반적으로 보고된 사과의 증산계수인 “42”를 적용하여 감모율을 계산하면 실제 감모율과 1.3%p 차이를 보이며 예측오차가 가장 크게 나타난다. 다만 K-value를 “30”으로 낮추었을 경우 0.02%p로 매우 근사값을 보이며 실제 감모율과도 유사한 패턴으로 감모율이 예측되는 것을 확인할 수 있다. 증산계수의 영향을 크게 받는 VPD 예측방법을 이용하기 위해서는 품종에 대한 증산계수의 정밀한 검증이 필요할 것으로 보인다.

요 약

감모율에 영향을 주는 인자를 파악하고 온습도 변화, 제상수, VPD방법을 이용해 감모율을 예측하였으며 실제 감모율과 비교분석을 진행하였다. 저장고 내부의 습도변화를 이용하여 예측한 결과 질소주입과정보다 유닛쿨러의 운전과정에서 발생하는 응축·결상·수분배출 과정이 지배적인 영향을 준다. 또한 온습도를 이용한 감모율 예측방법이 실제 감모율과 가장 근사값을 나타냈다. 제상수를 이용해 예측한 결과 감모량은 유닛쿨러의 운전율이 높아질수록 많아졌

으며 온습도를 이용한 예측방법보다 운전특성에 따른 감모율 변화가 더 뚜렷하게 나타났다. 이때 유닛쿨러의 운전율은 외기온도와 비례하였으며, 저장고 내부에서 응축된 수분량의 계측이 어렵기 때문에 실제 감모율과 오차가 발생한 것으로 보인다. VPD를 이용한 감모율 예측은 증산계수(K-value)의 영향이 지배적이며, 보고되어진 본 연구에서 이용한 후지사과의 증산계수값(42)에 대한 검증이 필요하다. 본 연구에서 후지사과의 K-value를 30으로 수정하였을 때 가장 근사한 예측값을 계산할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호:PJ011640) 및 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호:PJ01164005)의 지원에 의해 이루어진 것임

References

- ASHRAE. 2006. ASHRAE Handbook : Food Storage and Equipment, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, USA.
- Bryan RB, Brian AF. 1996. Transpiration and Respiration of Fruits and Vegetables. In: New developments in refrigeration for food safety and quality. Proceedings IIR, Paris, France, pp. 110-121.
- Chun HH, Park SH, Choi DS, Choi SR, Kim JS, Lee JS. 2016. Effect of controlled atmosphere conditions on the quality and internal disorder of early season ‘Fuji’ apples during storage. Korean J. Food Preserv. 23: 131-138.
- Deirdre H. 2015. Water relations in harvested fresh produce, PEF (The Postharvest Education Foundation), No. 15-1, pp. 1-16.
- Delelea MA, Schenk A, Tijksensa E, Ramona H, Nicolaï BM, Verbovena P. 2009. Optimization of the humidification of cold stores by pressurized water atomizers based on a multiscale CFD model. J. Food Eng. Prog. pp. 228-239.
- Kader AA. 2002. Postharvest technology of horticultural crops. University of California Agriculture and Natural Resources, Publication 3311, Oakland, California.
- Kwak YS, Lee JY, Cho MA, Kim HJ, Shin HH, Song SI. 2013. A study on the Quality Measurement and Environment Monitoring for Farm Products based on Sensor Network. J. KIIT. pp. 159-164.
- Park CW, Lee DG, Im KB, Kang CD. 2014. Performance evaluation of a defrosting system using the condensation heat of a refrigerator in cold storage. Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng. 26: 72-78.
- Park C. 2016. Effects on performance of the refrigerator to a novel defrost system using waste heat by condensation. Ph. D. thesis, Chonbuk National Univ., Jeonju, Korea.
- Park SH, Chun HH, Lee JS, Choi DS, Choi SR, Kim JS, Oh SS. 2016. Storage system for storing agricultural products and method for the same, Korea patent No. 10-2014-0158017.
- Reindl DT, Todd BJ. 2009. Frost: on air-cooling Evaporators. J. ASHRAE 51: 27-34.

- SAREK. 2011. SAREK Handbook : Refrigeration, Deasung Press. Seoul, Korea.
- Watkins CB, Nock JF. 2012. Production guide for storage of organic fruits and vegetables. Cornell Univ., NY, USA, p. 20.
- Yang YJ, Jeong JC, Chang TJ. 1993. CO₂ Production and Trimming Loss Affected by Storage Temperature and Packaging Methods in Chinese Cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. Pekinensis) Grown in spring, J. Hortic. Sci. Technol. pp. 267-272.
- Yun HS, Lee WO, Chung H, Lee HD, Cho KH, Park WK. 2002. Cooling System for High Relative Humidity and Low Temperature Storage. J. Hortic. Sci. Technol., p. 37.
- Yunus AC, Michael AB. 2011. Thermodynamics 7th, Mcgraw-hill Korea, Seoul, Korea, p. 738.