

직냉식 냉장고의 과냉각 저장을 위한 항온 특성 개선 연구

김진세* · 남소영 · 정현경 · 손재용 · 최동수 · 김용훈 · 이수장 · 박천완 · 김하윤¹ · 박석호²
농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부, ¹농촌진흥청 국립농업과학원 농식품자원부
²농촌진흥청 시설원예연구소

Improvement of Temperature Constancy of Direct Refrigerator for Supercooled Storage

Jinse Kim*, Soyoung Nam, Hyun Kyung Jung, Jae Yong Son, Dong Soo Choi, Yong Hoon Kim, Soo Jang Lee, Chun Wan Park, Ha Yoon Kim¹ and Seok Ho Park²

Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA

¹Department of Agro-food Resources, National Institute of Agricultural Sciences, RDA

²Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA

Abstract

Commercial direct refrigerators have good energy efficiency, but are difficult to use for supercooled storage due to their large temperature deviation. Placing insulators and conductors inside the refrigerator could reduce these temperature deviations to within 0.3 degrees, allowing for the supercooled storage. The supercooled storage of salted Chinese cabbages during ten weeks was progressed to compare the other low temperature storages. The nucleation temperatures of salted Chinese cabbage were around -2.5°C and the freezing points were around -0.4°C, so -2°C was selected for the supercooled storage. The growth rate of lactic acid bacteria and yeast at -2°C storage was lower than that at 2°C storage. The reducing sugar was maintained higher due to the growth rate of lactic acid bacteria. The supercooled storage had an effect of delaying the fermentation of the salted Chinese cabbage, which may have the effect of delaying the fermentation of kimchi. This enhancement method of the direct refrigerator was effective for the supercooled storage and would be promising for commercial use.

Key words: direct refrigerator, temperature constancy, supercooled storage, salted Chinese cabbage, kimchi

서론

냉장 및 냉동 상태의 항온 저장기술은 식품의 저장 뿐만 아니라 의약품의 저장을 위해서도 필요한 기술이다(Esmon, 2010). 냉장 상태에서 온도가 일정하게 유지되지 않고 변동이 클 경우 미생물의 성장이 증가되고, 식품의 건조가 촉진되는 문제가 있으며(Gill, 1996; Ho *et al.*, 2002), 냉동 상태에서 온도변화가 클 경우 얼음의 승화를 통한 재결정화 및 세포 파괴를 촉진하는 문제가 있다(Ullah *et al.*, 2014). 저장기간을 더욱 연장하기 위해 어느점보다 낮은 온도에서 얼지 않은 상태로 저장하는 과냉각 연구가 진행되고 있지만, 온도를 일정하게 유지하는 것이 필수적이다

(James *et al.*, 2009). 간접냉각 방식으로 온도를 일정하게 유지하는 항온냉장고가 산업용으로 판매되고 있지만, 가정에서도 사용하려면 에너지 효율이 높은 항온 저장 기술의 개발이 필요한 실정이다.

효율적으로 냉장고의 온도를 유지하려면 열차단율이 높은 단열재를 사용하는 것이 효과적이다. 관행적으로는 스티로폼이나 우레탄폼과 같은 열차단율이 높은 단열재가 사용되었으며, 최근에는 단열 성능이 더욱 우수한 진공 단열재가 연구되고 있다(Verma and Singh, 2019). 냉동용 컴프레셔는 동일한 평균온도 유지를 위해 짧은 간격으로 자주 동작하는 것보다는 긴 간격으로 동작할 때 에너지효율이 좋지만 온도 편차는 커지는 문제가 있다. 상변화물질(PCM, phase change material)을 이용하여 동작 간격을 길게 하며 온도 편차를 줄이는 연구도 진행되고 있다(Bista *et al.*, 2018). 냉장고의 열손실을 줄이기 위해서는 전면 개폐형 보다는 상부 개폐형이 유리한데, 전면 개폐형 냉장고의 경우 열손실이 많기 때문에 도어 개폐 직후 냉각된 공기를 순환하는 간접냉각방식이 주로 사용된다(Laguerre,

*Corresponding author: Jinse Kim, Division of Postharvest Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju, Jeollabuk-do, 54875, Korea
Tel: +82-63-238-4127; Fax: +82-63-238-4105
E-mail: ferroj@korea.kr
Received October 2, 2019; revised November 13, 2019; accepted November 15, 2019

2010).

음료수에 대한 과냉각 저장을 위한 냉장고는 국내외에서 상용화되어 판매되고 있으며, 최근에는 과냉각 상태로 저장한 음료수를 즉석에서 초음파 진동으로 핵형성을 유발하여 슬러시 상태로 음용하는 기술이 공개되었다(Shuntich, 2018). 이러한 특허 기술은 과냉각 저장 중 핵형성이 발생했을 경우 어느점 이상으로 품온을 높여서 녹인 뒤 온도를 낮추는 기술도 포함하고 있다(Shuntich, 2018). 음료수와 다르게 식품의 경우 과냉각 저장 중 냉동되면 최대 빙결정 형성대에서 얼게 되어 얼음결정이 크게 성장하고 세포파괴로 인한 영양분 손실이 증가하게 된다(Kono *et al.*, 2017). 호기성 미생물과 같은 불순물이 핵형성을 유발할 수 있기 때문에 식품의 핵형성 온도는 살균이 가능한 음료보다는 분포 범위가 넓으며, 농식품별 과냉각 저장이 가능한 한계온도는 다양하게 분포한다(Kim *et al.*, 2018).

김치의 경우 다양한 미생물이 포함되어 있지만, 유산균과 효모는 핵형성을 촉진하는 역할을 하지 않기 때문에 과냉각 저장에 유리하다(Kim *et al.*, 2018). 김치의 숙성을 지연하기 위한 김치냉장고는 김치의 과냉각 현상을 고려하여 동결점인근에서 얼지 않은 상태로 저장하는 냉장고이며, 직접 및 간접 냉각방식, 상부 및 전면 개폐방식으로 다양하게 상용화되어 있다. 직접냉각방식은 에너지 효율이 좋지만, 상부 냉각코일 인근 온도가 낮아서 성애가 발생하고, 이 부근에 접촉된 농산물은 얼어버리는 문제가 있다. 반면, 간접냉각방식 냉장고는 개폐하기 편리하지만, 냉풍이 골고루 순환되는 구조를 가져야 하며, 도어 개폐에 따른 열손실로 인해 에너지 효율이 떨어질 수 있다.

본 연구에서는 에너지 효율이 높은 직접냉각, 상부개폐방식 냉장고를 과냉각 저장에 적합한 온도편차 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지하도록 하는 단열재와 전도체의 배치조건을 계산하였고, 상용 직냉식 냉장고에 적용하여 절임배추의 과냉각 저장 특성을 분석하였다.

재료 및 방법

직냉식냉장고의 온도측정

직냉식 냉장고는 3°C 에서 -25°C 까지의 범위의 온도를 설정할 수 있는 다목적냉동고(BD-320, Zhejiang Xingxing Home Appliance Co. Ltd., Zhejiang, China)를 사용하였다. 직냉식 냉장고 내부 상단 냉각코일 인근과 바닥면의 온도를 테프론 코팅된 지름 0.12 mm의 K타입 열전대(K-12-TE, Delta Ohm, Sunnam, Korea)를 이용하여 측정하였다. 측정된 온도는 자동기록장치(ALMEMO 5690-2, Ahlborn, Holzkirchen, Germany)를 통해 10초 간격으로 저장하였다.

직냉식 냉장고의 냉각코일 인근 온도편차 완화

직냉식 냉장고의 실내온도를 측정하는 센서는 상단 냉각코일과 떨어져 있으며, 이 위치의 온도를 기준으로 냉동기의 가동과 정지를 설정하게 되어 있다. 이렇게 냉동기가 가동하고 정지할 때의 온도 변화를 완화하기 위해 열역학에서 온도 변화의 단열재 투과(penetration of temperature oscillation)에 대한 부분을 참고하였다(Kittel and Kroemer, 1980).

직냉식 부분의 온도변화를 편의상 사인파 형태로 생각하면 다음과 같이 표시할 수 있다. Re는 실수부(real part)를 의미한다.

$$T(0, t) = \text{Re}[T_0 e^{-i\omega t}] \quad (1)$$

여기서 $T(0, t)$ 는 직냉식 부분의 시간에 따른 온도이며, ω 는 사인파의 각속도(angular frequency), t 는 시간을 나타낸다. 두께 x 의 단열재를 통과했을 때의 온도 $T(x, t)$ 는 파수 벡터(wave vector) k 를 이용하여 다음과 같이 표시된다.

$$T(x, t) = \text{Re}[T_0 e^{i(kx - \omega t)}] \quad (2)$$

열확산방정식(diffusivity equation) $D\nabla^2 T = \partial T / \partial t$ 에 대입하면 k 와 ω 는 다음의 관계를 갖는다.

$$Dk^2 = i\omega, D = \text{열확산률(thermal diffusivity)} \quad (3)$$

$k = i^{1/2}(\omega/D)^{1/2}$ 를 (2)에 대입하면 단열재를 통과했을 때의 온도는 다음과 같다.

$$T(x, t) = \text{Re}[T_0 e^{i^{3/2}(\omega/D)^{1/2}x - i\omega t}] \quad (4)$$

$i^{3/2} = \pm(i-1)/\sqrt{2}$ 이나, 두께 x 의 단열재를 통과했을 때 온도편차가 기하급수적으로 증가하는 것은 물리적인 의미가 없으므로, $i^{3/2} = (i-1)/\sqrt{2}$ 를 이용하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} T(x, t) &= \text{Re} \left[T_0 e^{(i-1)\left(\frac{\omega}{2D}\right)^{1/2}x - i\omega t} \right] \\ &= \text{Re} \left[T_0 e^{-\left(\frac{\omega}{2D}\right)^{1/2}x} e^{i\left(\frac{\omega}{2D}\right)^{1/2}x - i\omega t} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 감쇠항 $e^{-(\omega/2D)^{1/2}x}$ 이 온도 변화 진폭을 감쇠하는 역할을 하므로, 열확산률 D , 각주파수 ω 에 따라 온도변화를 줄일 수 있는 두께 x 를 산출할 수 있다.

사용 중인 직냉식 냉장고의 냉동기가 2500초 간격으로 동작하고, 직냉 부위의 온도편차가 약 10°C 일때 온도편차를 압출 스티로폼(extruded polystyrene)을 이용하여 1/10로 줄이려고 하였다. 압출 스티로폼은 제조방법에 따라 열전도도는 1부터 3×10^{-3} [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]로 편차가 크다(Vo *et al.*, 2011). 압출 스티로폼의 밀도와 비열 또한 $28-77.8$ [kg/m^3], $1280-5350$ [$(\text{W}\cdot\text{s})/(\text{kg}\cdot\text{K})$]로 넓은 편차를 갖고 있다(Al-Ajlan, 2006; Han *et al.*, 2013; Aksit *et al.*, 2019). 열확산

를 D 는 열전도도 λ , 밀도 ρ , 비열 C_p 와 $D = \lambda / (\rho \cdot C_p)$ 의 관계를 갖는데, 이러한 열전도도와 밀도, 비열 범위를 고려할 때 압출스티로폼의 열확산율은 제조방법에 따라 0.0072-27.9 [mm²/s]의 넓은 범위로 나타날 수 있다. 핵 반응로와 관련된 단열재 정보에 따르면 압출 스티로폼의 열확산율은 0.026 [mm²/s]으로 제시되고 있는데(Nuclear-power.net), 이 값과 각주파수 $\omega = 2\pi f = 2\pi / 2,500$ [s⁻¹]를 (5)의 감쇠항에 적용하면 두께 x 는 다음과 같이 계산된다.

$$e^{-\left(\frac{\omega}{2D}\right)^{1/2} x} = e^{-\left(\frac{\pi}{2,500} \cdot \frac{1}{0.026}\right)^{1/2} x} = \frac{1}{10} \quad (6)$$

$$x \cong \frac{\ln(10)}{0.220} \cong 10.5 \text{ [mm]} \quad (7)$$

마찬가지의 방법으로 온도편차를 1/100으로 줄이려면 사용하는 압출 스티로폼의 두께는 다음과 같다.

$$x \cong \frac{\ln(100)}{0.220} \cong 20.9 \text{ [mm]} \quad (8)$$

직냉식 냉장고의 위치별 온도편차 완화

직냉식 냉장고 상부 냉각코일 인근의 온도편차를 단열재를 이용하여 완화하였다면, 이제는 냉장고의 냉각코일 인근과 바닥면의 온도 편차를 줄여야 한다. 냉각코일을 냉장고 상부에만 위치하지 않고 내벽에 고르게 배치한 경우 이러한 편차가 없을 수 있으나, 일부 브랜드를 제외하고 대부분 상용 냉장고는 상부에만 냉각코일이 위치하여 온도 불균형이 생긴다.

직냉식 냉장고의 냉각코일 인근과 바닥면의 온도 최저값 편차는 약 7°C 정도였다. 압출 스티로폼 단열을 내벽에 1 cm로 처리했을 때의 냉각코일 인근 평균온도가 -3°C에서 -1.5°C로 1.5도 상승하였기 때문에 벽면의 전도체를 보강하여 7°C의 온도편차를 1.5°C 수준으로 낮추려고 하였다.

일반적으로 냉장고 내벽은 철재나 스테인리스를 적용하는 경우가 많으며, 스테인리스 2 mm를 사용한 직냉식 냉장고의 온도차이를 줄이기 위한 알루미늄 전도체의 두께를 계산하였다. 온도차이는 열전도도와 거리, 면적과 다음의 비례관계를 갖는다.

$$\text{온도차이} \cong \frac{1}{\text{열전도도}} \cdot \frac{\text{거리}}{\text{두께} \times \text{폭}} \quad (9)$$

스테인리스는 크롬계 스테인리스에서 니켈이 포함된 스테인리스까지 13.4-48.9 [W/m·K]의 범위의 열전도도를 갖고, 알루미늄은 237 [W/m·K]의 열전도도를 갖는다(Bergman *et al.*, 2011). 냉장고 내부가 도장되어 있기 때문에 저렴한 스테인리스를 사용했다고 가정하고 폴리브덴을 함유한 크롬계열 열전도도인 42.3 [W/m·K]을 적용하였다(Bergman *et al.*, 2011). 거리와 폭은 동일하며, 스테인리스 2 mm 두

께로 7°C의 온도편차가 생겼을 때 온도편차 1.5°C를 만드는 알루미늄의 두께는 다음의 비례식으로 계산할 수 있다.

$$\text{온도차이} \times \text{열전도도} \times \text{두께} \cong \frac{\text{거리}}{\text{폭}} = \text{일정} \quad (10)$$

$$7 \times 42.3 \times 2 = 1.5 \times 237 \times x \quad (11)$$

$$x \cong 1.67 \text{ mm} \quad (12)$$

즉, 저장고 내부의 온도편차를 줄이기 위해서는 1.67 mm 두께의 알루미늄을 적용하면 되며, 편의상 2 mm 두께의 알루미늄을 적용하였다.

절임배추의 과냉각 저장

절임배추는 재료의 세척과 절임방법 등에 따라 호기성 미생물의 농도가 달라지기 때문에 저장에 사용할 절임배추를 구매하여 핵형성온도와 동결점을 측정하였다. 절임배추는 해남의 땅끝마을 영농조합에서 ‘남도장군’ 월동배추 품종에 대해 10 kg 단위로 LDPE필름으로 속포장 되어 있으며, 외부에는 골판지박스로 포장된 제품을 구매하여 사용하였다. Kim *et al.* (2018)이 사용한 방법과 같이 품온이 챔버온도 변화를 따라갈 정도의 시간으로 온도를 낮추며 절임배추의 품온을 측정하였으며, 핵형성에 따라 온도가 상승하기 직전의 온도를 핵형성온도, 잠열방출로 온도가 상승하며 일정하게 유지되는 온도를 어는점으로 분석하였다. 10 kg 2박스에 대한 절임배추의 냉동곡선을 분석한 결과 핵형성온도는 -2.8°C, -2.5°C로 측정되었고, 어는점은 -0.4°C, -0.5°C로 측정되었다(Fig. 1). 시료의 부피를 고려하여 온도를 천천히 내렸기 때문에 측정에 15일 이상 소요되었다.

핵형성 온도가 -2.5°C 인근으로 나타나므로, 직냉식 저장고의 보관 온도를 -2°C를 기준으로 하였고, 2주 간격으로 10주간 품질조사를 하였다.

이화학적 품질 특성

절임배추의 당도 및 염도, 환원당, 산도, 경도, 색도를 조사하였다. 절임배추를 마쇄한 뒤 착즙액에 대해 당도는 디지털 굴절당도계(RX-5000a, Atago Co.)로 염도는 디지털 염도계(ES-421, Atago Co.)를 이용하여 측정하였다. 환원당은 착즙액 5 mL를 3000 rpm에서 20분간 원심분리한 뒤 상등액을 50배 희석하여 dinitrosalicylic acid (DNS)법으로 측정하였다. 적정산도는 착즙액 1 mL을 취하여 49 mL의 증류수에 희석한 후 자동 적정기(Titro-Line 500, Si Analytics, Mainz, Germany)를 이용하여 pH 8.3이 될 때까지 0.01 N NaOH 용액으로 적정하여 측정된 값을 lactic acid로 환산하였다. 경도는 안쪽 세번째 잎에 대해 두께 5 mm 인근의 연백부를 지름 2 mm 프루브를 관통하는 방법으로 통과시키는 방법으로 물성분석기(TA-XT2, Stable

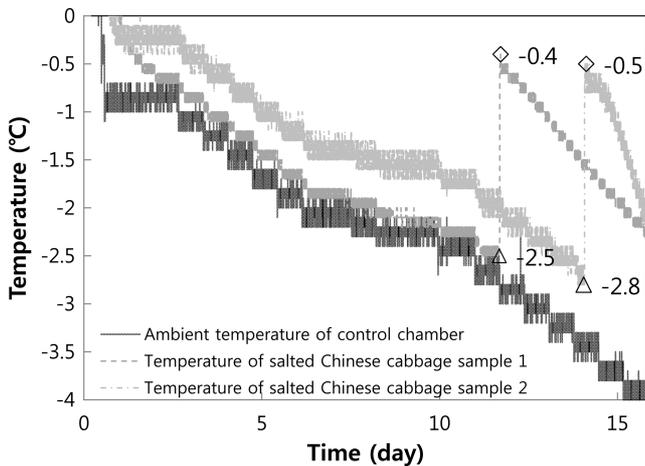


Fig. 1. Freezing curves of salted Chinese cabbage. Triangle symbols (Δ) mean nucleation temperatures and diamond symbols (\diamond) mean freezing points.

Micro System Ltd., Godalming, UK)를 이용하여 최대 힘 (N)을 측정하였다. 색도는 절임배추의 겉에서 3번째 잎의 안쪽 연백부를 색차계(CM-700D, Konica Minolta, Tokyo, Japan)로 Hunter L, a, b 값을 측정하였다. Hunter L, a, b 값은 명도(lightness)를 나타내는 L값, 적색도(redness)를 나타내는 a값과 황색도(yellowness)를 나타내는 b값 의미한다.

미생물학적 품질 특성

절임배추에 대해 건조배지(Petrifilm AC/LAB/YM, 3M, Paul, MN, USA)를 사용하여 분석하였으며, 호기성 세균은 aerobic count (AC) 배지, 유산균은 lactic acid bacteria count (LAB) 배지, 효모 및 곰팡이는 yeast and mold count

(YM) 배지를 이용하여 분석하였다. 시료는 배추 1/4 절단 크기로 절여진 절임배추를 마쇄한 뒤 20 g을 채취하여 180 mL의 멸균식염수(HAPS, Huko FS Co., Seoul, Korea)로 희석한 것을 기준으로 사용하였다. AC 배지와 LAB 배지는 37°C에서 24-48시간, YM 배지는 25°C에서 72-96시간 배양하여 콜로니의 개수를 분석하였다.

통계분석

모든 분석결과는 실험구당 3회 반복 이상 실험한 결과를 평균값과 표준편차로 나타내었으며 통계분석은 IBM SPSS Statistics (25, IBM Corp., Armonk, NY, USA)의 ANOVA test와 Duncan's multiple range test를 통해 시료 간 유의적 차이($p < 0.05$)를 검정하였다.

결과 및 고찰

직냉식냉장고의 온도편차 완화

온도편차가 크게 발생하는 직냉식냉장고에 단열재와 전도체를 배치하여 냉각코일 인근과 바닥 면의 온도 편차를 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 이내로 줄일 수 있었다(Fig. 2). 이러한 실험은 냉장고 내부가 비어 있는 상태에서 전도체와 단열재를 설치하기 전과 후에 Fig. 3의 ①, ②와 같이 냉각코일 근처 측면과 바닥면에 센서를 설치하여 측정한 결과이다. Fig. 2의 화살표는 단열재와 전도체를 Fig. 3과 같이 배치한 시점을 표시하며, 개선 전에는 0°C 로 설정 시 최저온도 -9°C , 최고온도 1°C 로 진폭이 약 10°C 였으나, 개선 후에는 동일 위치의 온도편차는 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 부위별 온도편차는 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 로 유지되었다. 재료 및 방법의 냉각코일 인근 온도편차 완화를 위한 계산에 따르면, 약 2 cm의 압출 스티로폼을 사용하

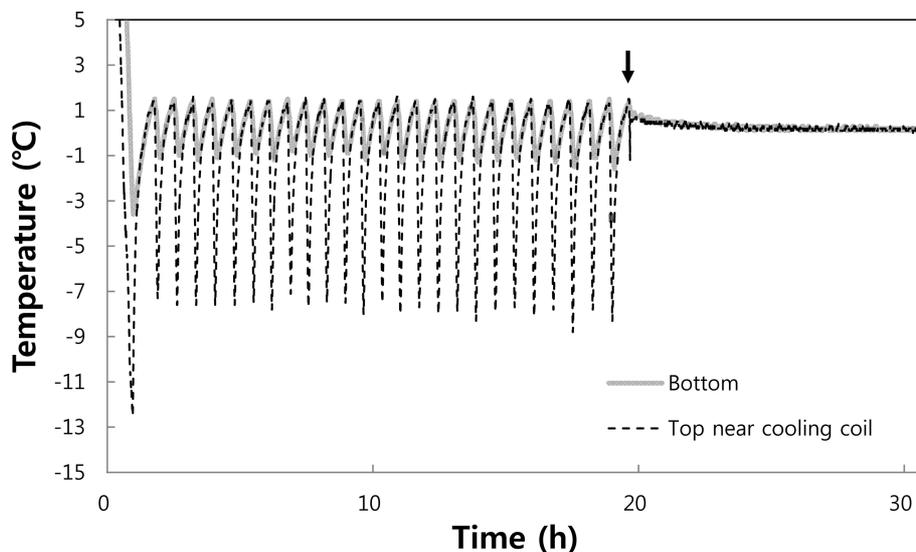


Fig. 2. Temperature fluctuation change of direct refrigerator by attaching thermal insulator and conductor. Downward arrow (\downarrow) means the time attaching thermal insulator and conductor.

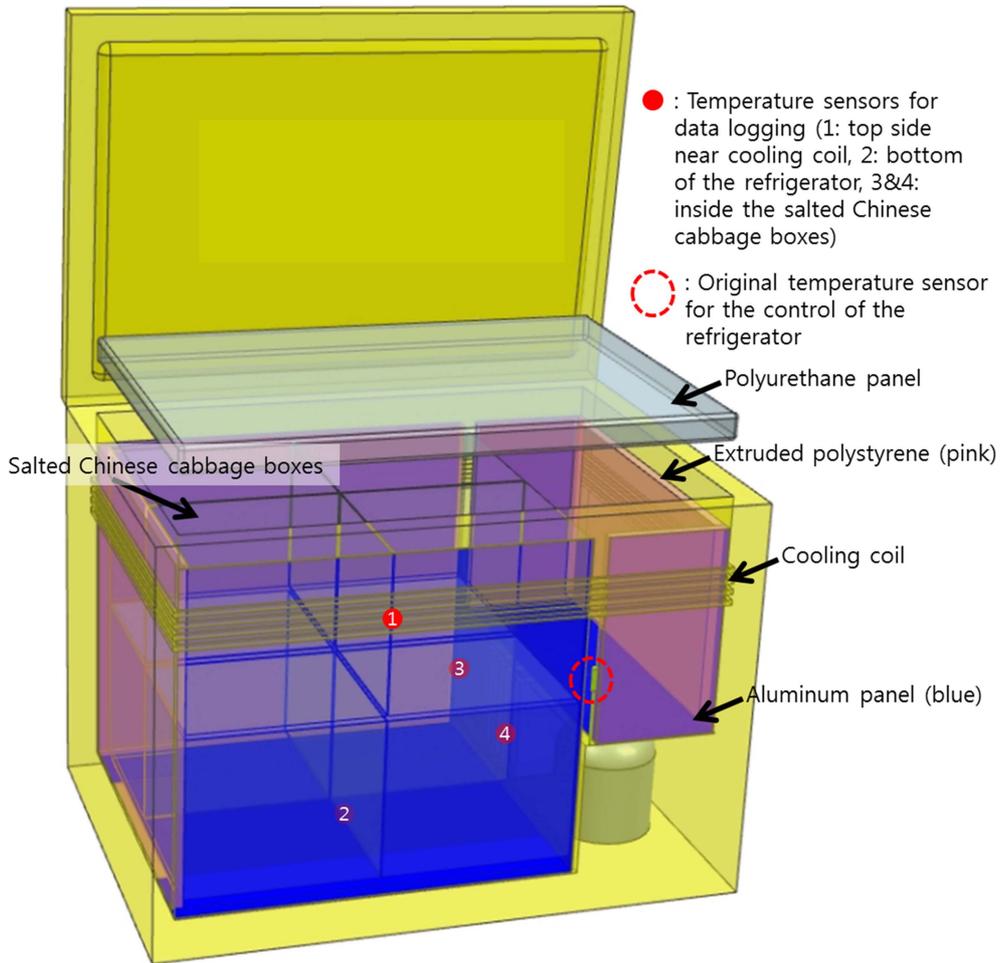


Fig. 3. Attachment of aluminum panels and extruded polystyrene panels at the direct refrigerator.

면 온도편차가 1/100로 줄어들기 때문에 10°C 진폭은 0.1°C 즉 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 로 유지되어야 한다. 실제로 사용된 압출 스티로폼은 건축용으로 판매되는 일반적인 제품이어서 원 자로에서 사용하는 고급 제품과는 열확산률에서 10배 이상 차이가 있을 것으로 생각된다. 하지만, 냉동기의 운전 주기가 2500 초였어도, 실제 온도가 급격히 변하는 부분을 사 인과 형태로 고려하면 주기는 1/10 정도로 짧아질 수 있기 때문에 이러한 오차가 상쇄되며 동일 위치의 온도편차는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 부위별 온도편차는 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 로 목표 값에 근접하게 유지될 수 있었다.

절임배추의 핵형성 온도가 -2.5°C 인근으로 나타났기 때문에 과냉각 상태로 저장하기 위한 온도를 -2°C 로 결정하였으나, 저장고에 설치된 온도센서는 Fig. 3에서와 같이 단 열재 내부의 벽면 중간에 위치하여 실제 저장고 내부 온도를 대표하지 못한다. 이러한 이유로 저장고 내부의 온도보다 낮은 온도로 설정온도를 수정하여야 했으며, Fig. 4의 화살표와 같이 5 차례 설정 온도를 수정하여 실내온도를 -2°C 인근에 유지되도록 실험하였다. 설정 온도는 -4°C 에서 조금씩 낮추다가 -5°C 에서 다시 올려 -4.6°C 에서 최종적으로

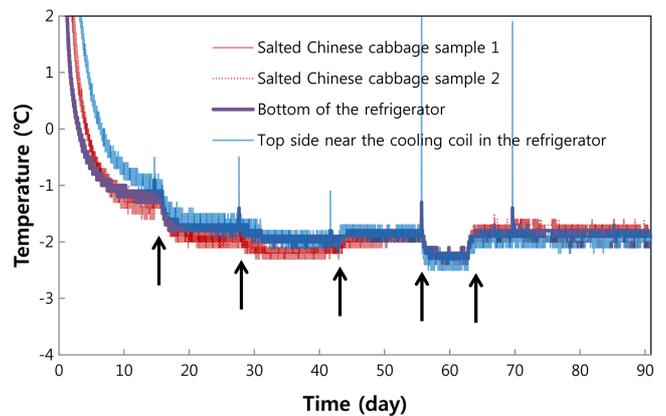


Fig. 4. Temperature changes of the salted Chinese cabbage using the improved direct refrigerator. Upper arrows (↑) mean the manual changes of the targeted temperature.

로 저장하였다. 2주 간격으로 품질조사를 위해 냉장고를 열었기 때문에 온도가 주기적으로 상승하였고, 품질조사가 끝난 이후에도 그대로 과냉각 상태로 얼지 않고 저장되는 것을 확인하였다(Fig. 4). 저장초기에는 상부 절임배추 박

Table 1. Physicochemical quality changes of salted Chinese cabbages during the storage at 2°C and -2°C (supercooled state)

Storing day	0		14		28		42		56		70	
	Initial value	2°C	-2°C	2°C	-2°C	2°C	-2°C	2°C	-2°C	2°C	-2°C	
Soluble solid content (°Brix)	7.01±0.59 ^{ab*}	7.24±0.73 ^a	6.90±0.71 ^{ab}	6.39±0.30 ^{abc}	6.99±0.49 ^{ab}	6.20±0.27 ^{bc}	6.28±0.16 ^{bc}	6.28±0.32 ^{bc}	6.5±0.47 ^{abc}	5.87±0.39 ^c	6.14±0.30 ^{bc}	
Reducing sugar (µg/mL)	40.62±6.23 ^a	33.69±2.41 ^b	34.90±0.88 ^b	20.33±2.14 ^{cde}	24.45±0.46 ^c	15.55±1.72 ^e	22.11±4.32 ^{cd}	9.34±4.32 ^f	16.16±1.05 ^{de}	6.52±1.63 ^f	16.79±2.1 ^{de}	
Salinity (%)	1.59±0.35 ^{ND**}	1.56±0.26	1.61±0.15	1.41±0.20	1.69±0.34	1.45±0.08	1.54±0.27	1.49±0.30	1.72±0.23	1.52±0.29	1.54±0.19	
Titrateable acidity	0.19±0.02 ^a	0.24±0.01 ^{bc}	0.21±0.03 ^{ab}	0.33±0.03 ^c	0.26±0.02 ^c	0.41±0.01 ^f	0.27±0.02 ^{cd}	0.54±0.04 ^g	0.30±0.01 ^{de}	0.54±0.03 ^g	0.32±0.02 ^e	
Hardness (N/Φ2 probe)	6.51±0.76 ^b	6.95±1.29 ^b	6.61±1.04 ^b	6.95±1.48 ^b	7.47±1.73 ^b	7.51±1.66 ^b	9.25±1.47 ^a	9.56±3.30 ^a	7.58±1.21 ^b	7.51±1.38 ^b	7.42±2.05 ^b	

*The values represent mean±SD for triplicate experiments. Means with same letters within a line are not significantly different at $p<0.05$ by Duncan's multiple range test.

**Means with ND are not significantly different at $p<0.05$ by Duncan's multiple range test.

Table 2. Color changes of salted Chinese cabbages during the storage at 2°C and -2°C (supercooled state)

Storing day	0		14		28		42		56		70	
	Initial value	2°C	-2°C	2°C	-2°C	2°C	-2°C	2°C	-2°C	2°C	-2°C	
Lightness L	74.34±3.23 ^{ab*}	73.22±3.05 ^{ab}	74.61±2.64 ^{abc}	75.06±4.26 ^{abc}	74.94±4.87 ^{abc}	74.07±4.49 ^{ab}	73.47±3.47 ^{ab}	75.46±2.79 ^{bc}	74.51±4.37 ^{abc}	72.96±4.00 ^a	76.63±3.55 ^c	
Redness a	0.18±0.10 ^{bc}	0.09±0.07 ^a	0.10±0.07 ^{ab}	0.10±0.09 ^{ab}	0.13±0.11 ^{ab}	0.24±0.22 ^{cd}	0.26±0.22 ^d	0.27±0.19 ^d	0.16±0.10 ^{ab}	0.26±0.18 ^d	0.11±0.10 ^{ab}	
Yellowness b	6.23±0.60 ^{ab}	6.26±0.64 ^{ab}	6.00±0.57 ^a	6.34±0.50 ^{ab}	6.58±0.89 ^b	6.25±0.59 ^{ab}	6.36±0.85 ^{ab}	6.01±0.73 ^a	6.44±0.62 ^b	6.23±0.87 ^{ab}	6.57±0.62 ^b	

*The values represent mean±SD for triplicate experiments. Means with same letters within a line are not significantly different at $p<0.05$ by Duncan's multiple range test.

Table 3. Microbial quality changes of salted Chinese cabbages during the storage at 2°C and -2°C (supercooled state)

Storing day	0		14		28		42		56		70	
	Initial value	2°C	-2°C	2°C	-2°C	2°C	-2°C	2°C	-2°C	2°C	-2°C	
Aerobic bacteria (logCFU/mL)	5.21±0.48 ^{ab*}	5.69±0.34 ^a	5.56±0.27 ^{ab}	5.49±0.82 ^{ab}	4.89±0.48 ^{abc}	4.11±1.04 ^c	4.6±0.19 ^{bc}	4.73±0.05 ^{abc}	4.69±0.94 ^{abc}	3.97±0.56 ^c	4.04±0.02 ^c	
Lactic acid bacteria (logCFU/mL)	3.18±0.52 ^a	6.23±0.31 ^{bc}	6.12±0.42 ^{bc}	7.24±0.56 ^d	6.33±0.34 ^{bc}	7.05±0.19 ^d	6.72±0.08 ^{cd}	7.29±0.86 ^d	5.95±0.55 ^b	7.35±1.08 ^d	5.75±0.57 ^b	
Yeast (logCFU/mL)	2.98±0.27 ^a	3.94±0.7 ^b	3.73±0.39 ^{ab}	5.51±0.48 ^c	4.1±0.34 ^b	ND**	ND	6.05±0.62 ^{cd}	4.64±0.65 ^b	6.40±0.5 ^d	4.59±0.59 ^b	
Mold (logCFU/mL)	1.57±0.29 ^{***}	2.61±1.14	2.68±0.17	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	

*The values represent mean±SD for triplicate experiments. Means with same letters within a line are not significantly different at $p<0.05$ by Duncan's multiple range test.

**Not detected

***Means with no letter are not significantly different at $p<0.05$ by Duncan's multiple range test.

스가 바닥 박스에 비해 천천히 냉각이 되어 상부 벽면의 온도가 다른 위치에 비해 약간 높게 측정되었으나, 상부의 4박스가 품질조사로 사용된 저장 후기에는 상부의 온도가 약간 낮게 측정되었다. 대조구 절임배추는 배추를 저장하는 2°C 저온저장고에 저장하였으며, ±2°C의 온도편차로 온도 변화가 측정되었으나 일반적인 데이터이므로 생략하였다.

절임배추의 이화학적, 미생물학적 품질분석

2°C 저장과 -2°C 과냉각 저장으로 구분하여 당도, 환원당, 염도, 적정산도, 경도 및 색도를 측정하였다(Table 1, 2). 배추의 환원당은 김치 발효의 진행에 따라 유산균의 먹이로 사용되어 감소하고, 유산균의 양과 산도가 증가한다(Kim *et al.*, 1994). 절임배추의 경우도 유산균의 증가에 따라 환원당이 감소하고, 산도가 증가하는 특성이 나타나는데, -2°C의 과냉각 상태에서는 2°C 저온저장에 비해 유산균의 증식 속도가 줄어들기 때문에(Table 3), 유산균의 먹이인 환원당이 더 높게 유지되고 산도도 느리게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 환원당의 감소현상과 유사하게 가용성 고형분도 과냉각 저장이 더 높게 유지되었다.

염도는 저장 중 통계적인 차이 없이 유지되었으며, 경도의 경우 절여지는 시간에 수분이 손실되어 질겨지는 특성이 나타났으나, 과냉각과 저온저장의 저장방법에 따른 차이를 구분하기는 어려웠다. 절임배추 연백부의 색도는 Table 2와 같이 변화가 크지 않았으나, 육안으로 관찰시 잎사귀 부분의 갈변이 나타났다. 절임배추의 갈변은 염수에 구연산 등을 첨가하여 지연시킬 수 있으나(Choi *et al.*, 2015), 본 실험에 사용한 절임배추의 염수에는 구연산 처리가 되어 있지 않아서 갈변이 진행된 것으로 판단된다.

Jeong *et al.* (2011)은 절임배추의 호기성 세균 농도가 7 logCFU/mL를 초과할 경우 상품성이 없는 것으로 판단하였으나, 본 저장실험에서는 모든 처리구의 호기성세균 농도가 6 logCFU/mL 보다 낮게 유지되었다. 특히 유산균과 효모가 증식하며, 2°C 저장의 절임배추의 호기성세균이 과냉각 저장보다 낮아졌다. 호기성세균 농도가 기준보다 낮다면, 절임배추의 저장기간은 김치를 담궜을 때 유산균 발효에 영향을 주는 환원당의 농도를 기준으로 설정하는 것이 바람직해 보인다.

본 실험에서는 절임배추에 대한 과냉각 저장효과를 분석하였으나, 이러한 발효는 김치를 담근 뒤에도 동일하게 일어나기 때문에, 항온특성을 개선하여 과냉각상태로 김치를 저장할 경우에도 발효를 지연시키는 효과가 있을 것으로 판단된다.

요 약

0°C로 설정 시 최저온도 -9°C 최고온도 1°C로 온도편차

가 10°C 발생하는 직냉식 냉장고 내부에 단열재와 전도체를 배치하여 온도편차를 목표온도에서 ±0.3°C 이내로 유지하는 조건을 이론적으로 계산하였고, 상용 판매되는 직냉식 냉장고에 적용하여 효과를 확인하였다. 항온 특성이 개선된 직냉식 냉장고에 -2°C의 과냉각 상태로 절임배추를 저장할 경우 2°C의 저온저장 대비 유산균과 효모의 증식이 완화되었고, 유산균의 먹이가 되는 환원당도 높게 유지되었다. -2°C 과냉각으로 절임배추를 저장할 때 발효가 지연되는 효과가 나타났기 때문에, 김치를 저장할 경우에도 발효 지연의 효과가 있을 것으로 판단된다. 상용 직냉식 냉장고를 단열재와 전도체의 추가만으로 경제적으로 항온냉장고로 전환이 가능하기 때문에 산업적인 활용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 농촌진흥청 기관고유사업(과제번호: PJ01343901)의 지원에 의해 이루어진 것으로 감사드립니다.

References

- Aksit M, Zhao C, Klose B, Kreger K, Schmidt HW, Altstadt V. 2019. Extruded polystyrene foams with enhanced insulation and mechanical properties by a benzene-trisamide-based additive. *Polymers* 11, 268:1-10
- Al-Ajlan SA. 2006. Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Appl. Therm. Eng.* 26: 2184-2191.
- Bista S, Hosseini SE, Owens E, Phillips G. 2018. Performance improvement and energy consumption reduction in refrigeration systems using phase change material (PCM). *Appl. Therm. Eng.* 142: 723-735.
- Bergman TL, Lavine AS, Incropera FP, Dewitt DP. 2011. Fundamentals of heat and mass transfer-Seventh ed. John Wiley & Sons, Danvers, MA, USA. pp 983-990.
- Choi EJ, Chung YB, Han AR, Chun HH. 2015. Combined effects of sanitizer mixture and antimicrobial ice for improving microbial quality of salted Chinese cabbage during low temperature storage. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 44: 1715-1724.
- Esmon A. 2010. Effective vaccine storage. *Global Hospital & Healthcare Management.* New Delhi, India.
- Gill CO. 1996. Cold storage temperature fluctuations and predicting microbial growth. *J. Food Prot.* 59: 43-47.
- Han RS, Zhu GQ, Zhang GW. 2013. Experiment study on the ignition point of XPS foam plastics. *Procedia Engineer.* 52: 131-136.
- Ho JC, Chou SK, Chua KJ, Mujumdar AS, Hawlader MNA. 2002. Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality. *J. Food Eng.* 51: 65-75.
- James C, Seignemartin V, James SJ. 2009. The freezing and supercooling of garlic (*Allium sativum* L.). *Int. J. Refrig.* 32: 253-260.
- Jeong JK, Park SE, Lee SM, Choi HS, Kim SH, Park KY. 2011. Quality changes of brined baechu cabbage prepared with low temperature stored baechu cabbage. *J. Korean Soc. Food Sci.*

- Nutr. 40:475-479.
- Kim DG, Kim BK, Kim MH. 1994. Effect of reducing sugar content in Chinese cabbage on Kimchi fermentation. *J. Korean Soc. Food Nutr.* 23: 73-77.
- Kim JS, Park JW, Jung HK, Park SH, Choi DS, Kim YH, Lee SJ, Park CW, Lee YH. 2018. Influential factors on supercooling of nineteen fruits and vegetables. *Food Eng. Prog.* 22: 321-327.
- Kittel C, Kroemer H. 1980. *Thermal physics*, W. H. Freeman and Company, New York, USA.
- Kono S, Kom M, Araki T, Sagara Y. 2017. Effects of relationships among freezing rate, ice crystal size and color on surface color of frozen salmon fillet. *J Food Eng.* 214: 158-164.
- Laguerre O. 2010. Heat transfer and air flow in a domestic refrigerator. *Mathematical Modelling of Food Processing*, Mohammed M. Farid (ed.), CRC Press, Boca Raton, USA, pp. 445-474.
- Nuclear-power.net. Thermal conductivity of extruded polystyrene. Available from: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/heat-losses/insulation-materials/thermal-conductivity-of-extruded-polystyrene/>
- Shuntich DJ. 2018. Precision supercooling refrigeration device. USA patent NO. 20180180353.
- Ullah J, Takhar PS, Sablani SS. 2014. Effect of temperature fluctuations on ice-crystal growth in frozen potatoes during storage. *LWT-Food Sci. Technol.* 59: 1186-1190.
- Verma S, Singh H. 2019. Vacuum insulation in cold chain equipment: A review. *Enrgy. Proced.* 161:232-241.
- Vo CV, Bunge F, Duffy J, Hood L. 2011. Advances in thermal insulation of extruded polystyrene foams. *Cell. Polym.* 30:137-155.