

라디오파를 이용한 육류 건식 숙성 단축 기술 개발

김진세* · 손재용 · 최동수 · 김용훈 · 박천완

농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부

Development of Dry Aging Period Shortening with Radio Frequency

Jinse Kim*, Jae Yong Son, Dong Soo Choi, Yong Hoon Kim, and Chun Wan Park

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

Abstract

In order to improve the long aging period and the risk of microbial contamination, the development of technology to safely shorten the dry aging period is required. In this study, a new aging device using radio frequency (RF) heating in a cold chamber was introduced to shorten the dry aging period and suppress the growth of microorganisms during aging. Beef striploin cuts were placed between RF electrodes in a -20°C freezer and heated with 30 and 40 W/kg of RF power. The shear force of beef was decreased by about 12% from 24 h 40 W/kg RF power and 55% from 24 h 30 W/kg RF power. In the case of RF aging in a freezing chamber without defrosting, the growth of aerobic bacteria and coliforms could be inhibited. Chicken breast and pork loin did not show any tenderization by RF aging. Considering that conventional dry aging of beef improves tenderness by 17% for 21 days, RF aging, which improves tenderness by more than 12% in 24 h without microbial growth significantly shortens the dry aging period.

Key words: beef, dry aging, radio frequency, shortening the aging period

서 론

2019년 우리나라 1인당 연간 축산물(소고기, 돼지고기, 닭고기) 소비량은 55.8 kg으로 매년 1.12 kg씩 상승하고 있으며(KASS, 2021), 숙성육에 대해 추가비용을 지불할 의향이 있는가에 대한 소비자 조사에 74.8%가 긍정적인 답변을 하여(RDA, 2019) 숙성육 산업의 발전 가능성을 확인할 수 있다. 하지만, 소고기 건식 숙성의 산업화에는 14 일 이상의 긴 숙성기간과 55% 내외의 낮은 수율이 걸림돌이 되고 있으며(Smith et al., 2008), 숙성기간을 단축하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

육류 건식 숙성의 기대효과는 효소작용에 의한 연도(tenderness) 향상과 건조와 발효에 의한 풍미(flavor) 증가라 할 수 있다(Park et al., 2016). 건식 숙성에서 연육은 calpain, cathepsin, protease, caspase 등 세포 내에 존재하는 자기분해 효소에 의해 이루어 지는데(Lana & Zolla, 2016), 이러한 효소의 반응속도는 온도에 따라 달라지며,

Hwang et al. (2004)은 15°C와 36°C에서의 자기분해 효소 반응이 5°C에 비해 빠른 것으로 보고하였다. 이렇게 육류의 품질을 높게 저장할 경우 효소 반응 활성화를 통해 연육에 걸리는 기간을 단축할 수 있으나, 미생물 증식에 의한 식중독 위험이 있기 때문에 고온 숙성 전에 유해 미생물을 전자빔이나 X-선, 감마선 등으로 살균하는 방법이 시도되었다(Kim et al., 2018).

건식 숙성의 풍미 증가에는 건조에 의한 농축효과와 미생물 발효에 의한 효과가 있는데, *Lactobacillus sake*, *L. plantarum*, *L. curvatus* 등의 유산균이 육류의 풍미를 증가시키는데 효과가 있다고 알려져 있다(Zagorec et al., 2017; Duz et al., 2020). 유산균의 경우 항균성이 있다고 알려져 있으며(Park et al., 2014), 상대습도 75% 이하의 건조한 환경은 *Salmonella*의 증식을 억제하는 효과가 있다고 알려져 있기 때문에(Kinsella et al., 2009), 건식 숙성 기간을 단축하기 위해서는 건조한 환경에서의 유산균 처리를 생각해 볼 수 있다.

육류의 건식 숙성 기간을 단축하기 위해 고기의 품질을 높이고 습도를 낮춰서 자기분해효소 반응을 빠르게 하고 유해미생물의 증식을 억제해야 하는데, 가장 쉽게 구성하는 방법은 가열기와 제습기를 설치하는 방법이다. 두꺼운 고기를 가열할 경우 고기 내부까지 빠르게 가열하는 방법으로 라디오파를 이용한 방법이 있으며(Farag et al., 2011;

*Corresponding author: Jinse Kim, Division of Postharvest Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Jeonju, Jeollabuk-do, 54875, Korea
Tel: +82-63-238-4127; Fax: +82-63-238-4105
E-mail: ferroj@korea.kr
Received October 22, 2021; revised November 10, 2021; accepted November 10, 2021

Wang et al., 2012; Llave et al., 2014; Kim et al., 2016; Zhang et al., 2017), 제습을 위한 냉동기도 필요하다. 따라서, Kim et al. (2016) 이 사용한 냉풍을 가하며 라디오파 가열을 하는 방법은 육류의 해동 뿐만 아니라 고기의 숙성에도 활용할 수 있을 것으로 예상하였다.

본 연구에서는 Kim et al. (2016)이 육류 해동에 사용한 방법을 활용하여 소고기의 건식 숙성 단축을 위한 라디오파 숙성장치를 제작하고, 고기의 품온을 15°C 이상으로 유지하며 표면의 상대습도를 낮추기 위한 최적조건을 제시하고자 한다. 이러한 라디오파 숙성 조건으로 소고기의 연육 효과와 건조 특성, 미생물 생육을 분석하고, 이러한 숙성효과가 돼지고기와 닭고기에도 나타나는지 확인하였다.

재료 및 방법

라디오파 숙성장치

라디오파 숙성장치는 1 kW 급 라디오파 발생기(APG-1 kW, ASENS Co., Yongin, Korea)와 자동 정합기(TST-1000, TST Co., Sungnam, Korea), 단면적 25×45 cm, 간격 0-20 cm 조절이 가능한 평행판 전극을 냉동기(LT-914F, Lassele, Ansan, Korea) 내부에 설치하여 사용하였

다(Fig. 1). 냉동기의 기본 제어장치는 제습기능이 8시간마다 40분씩 자동으로 작동하게 되어 있었으며, 실험 중간에 이를 수동으로 제어할 수 있는 제어장치(FOX-2003, Conotec Co. Ltd., Pusan, Korea)로 교체하여 그 차이를 비교하였다.

평행판 전극을 사용하여 고기를 가열하기 위해서는 사용하는 고기의 두께와 성분 분포가 유사해야 하며, 두께 차이가 있다면 Kim et al. (2016)의 결과와 같이 두꺼운 부분만 가열되는 문제가 생긴다. 또한 고기가 전극에 직접 접촉하면 전기장에 의한 유전가열이 아니라 전기가 직접 흐르는 ohmic 가열이 일어나기 때문에 고기를 절연체로 이루어진 받침에 올려놓고 전극 사이에 배치하여야 한다. 고기 받침은 10 mm 압출스티로폼에 0.3 mm PTFE (polytetrafluoroethylene) 시트를 둘러싼 형태로 제작하여 사용하였다.

라디오파 가열 출력과 냉동 온도를 조절하여 고기의 품온이 15-39°C 온도구간에 평형을 이루도록 하였으며, 고기의 중심부와 모서리, 챔버 내부의 온도를 광섬유 온도센서(FOTEMP4, Optocon AG, Dresden, Germany)를 이용하여 10초 간격으로 측정하였다.

라디오파 숙성 시 소고기 표면에 유산균이나 효모를 도

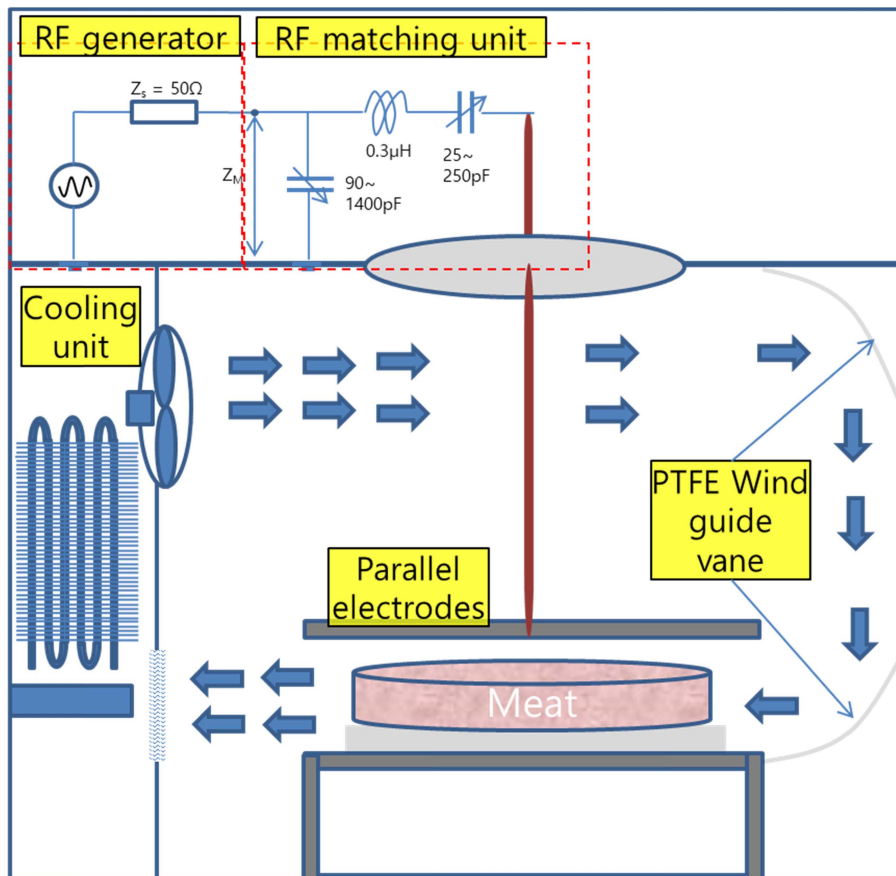


Fig. 1. Schematic design of radio frequency aging device.

포할 경우 숙성 후 유산균이나 효모의 풍미를 소고기에 부가할 수 있었으나 풍미에 대한 정량적 분석을 수행하지 않아서 해당 실험 결과는 내용에서 제외하였다.

육류 재료

소고기는 2020년 9월부터 2021년 3월까지 도축한지 일주일 내외의 사후 경직이 끝난 2B등급 육우와 2A등급 한우 채끝 부위를 쇼핑몰(beef striploin, Minsokchinhanwoo, Gunwi, Korea)에서 구매하여 사용하였다. 함수율은 62-66% 정도였으며, 지방함량은 13-18%의 범위로 나타났다. 채끝 부위는 등심쪽에서 우둔쪽으로 육질이 약간 질겨지는 경향이 있어서, 5 cm 두께로 근섬유 방향과 수직하게 절단하여 번갈아 라디오파 숙성 처리구와 대조구에 배치하였다(Fig. 2a). 소고기의 경우 지방 함량과 중량에 따라 온도 범위를 유지하기 위한 라디오파 출력이 변화하였으며, 지방함량이 적은 2등급 소고기의 경우 온도 범위를 15-30°C 범위로 유지하기 위해서는 30 W/kg, 30-40°C 범위로 유지하기 위해서는 40 W/kg 정도의 라디오파 출력을 적용하였다. 라디오파 숙성시 소고기의 근섬유와 라디오파 교류 전기장 방향이 평행하게 배치하여 숙성하였으며, 대조구는 Kim et al. (2021)이 직냉식 냉장고를 개조한 방식으로 제작한 300 L급 과냉각 냉장고(Supercooled refrigerator, Sinhanplant Co., Chungju, Korea)에서 -2.5°C로 저장하였다

(Fig. 3). 소고기를 어는점 이하의 온도에서 얼지 않고 과냉각 상태로 저장할 경우 품질변화를 최소화하여 저장 가능하기 때문에(You et al., 2020), 품질분석 전의 대조구와 라디오파 숙성 처리 전후에 과냉각 냉장고에 저장하여 숙성 이외의 시간 동안 품질 변화가 최소화 되도록 하였다. 라디오파 숙성 처리 후에 과냉각 냉장고에 12시간 이상 저장하여 대조구와 품온을 동일하게 한 뒤 절단강도, 미생물, pH, 건조감량, 색도 등의 품질분석을 하였다.

닭고기는 2021년 4월 구입한 1 kg 가슴살(chicken breast,

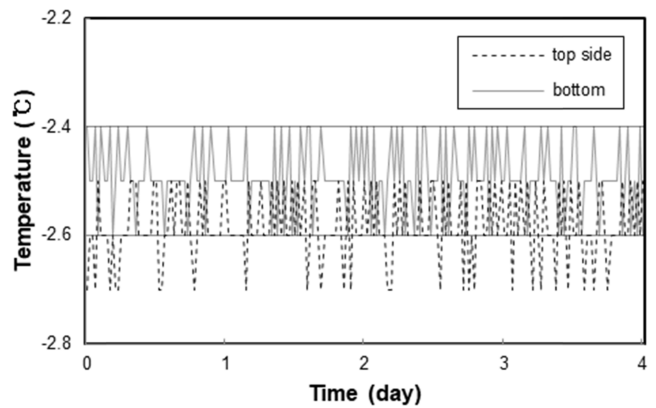


Fig. 3. Temperature profile of the supercooled refrigerator.

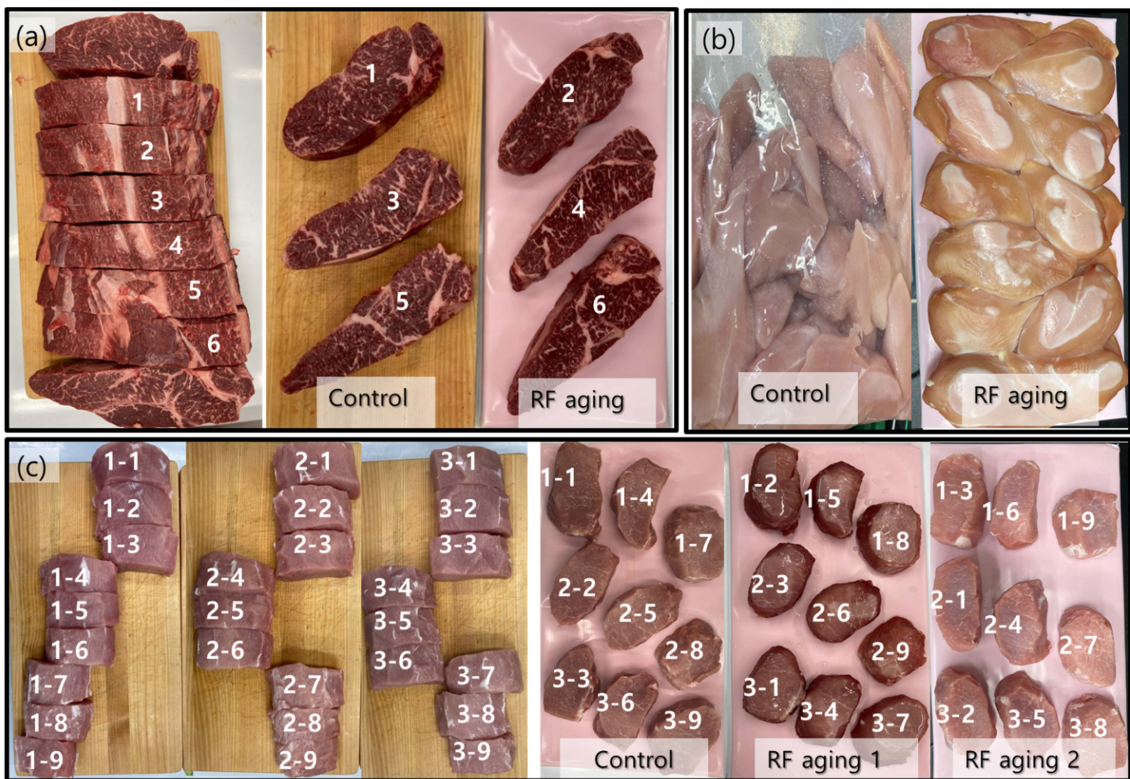


Fig. 2. Randomize of beef sirloin (a), chicken breast (b), and pork loin (c) to the control and radio frequency aging treatments considering the cutting position.

Cherrybro Co., Jinchun, Korea) 5팩을 골고루 섞어서 36 W/kg 라디오파 처리구와 대조구로 나누고 숙성 후의 절단 강도를 비교하였다(Fig. 2b). 닭가슴살의 함수율은 $76\pm 0.5\%$ 로 나타났으며, 지방은 $1.7\pm 0.9\%$ 였다.

돼지고기는 2021년 9월 도축 1주일 이내의 등심 부분육을 정육점(pork loin, Kkamdoya butcher shop, Jinan-gun, Korea)에서 구매하여 사용하였다. 돼지고기 등심의 함수율은 $74\pm 0.3\%$, 지방은 $6.7\pm 1.4\%$ 였으며, 소고기와 마찬가지로 5 cm 두께로 근섬유 방향과 수직하게 절단한 절단육을 라디오파 1차 처리구(RF aging 1)와 라디오파 2차 처리구(RF aging 2), 대조구에 골고루 배치하였으며, 숙성 후의 절단강도를 비교하였다(Fig. 2c). 라디오파 1차 처리 실험에서 돼지고기 중심부 온도가 15°C 이상이 되는 조건을 찾기 위해 출력을 변경하며 실험하였고, 2차실험에서는 62 W/kg로 고정하여 라디오파 숙성 처리 하였다.

중량감소율

라디오파 숙성 중 건조에 의한 중량감소율은 다음의 관계식으로 계산하였다.

$$\text{중량감소율(\%)} = \frac{\text{초기중량(kg)} - \text{라디오파 숙성 후 중량(kg)}}{\text{초기중량(kg)}} \times 100$$

절단강도 분석

소고기의 경우 부분육에서 인접한 부위였던 라디오파 숙성 처리구와 대조구에 속한 절단육을 30 mm 두께로 근섬유에 평행한 방향으로 절단하고 동일한 포장에 진공포장하고, $530\times 325\times 200$ mm 크기 하나의 수조에 2대의 수비드 조리기(AN400, Anova Culinary Inc., San Francisco, USA)를 이용하여 70°C 에서 20분간 조리하였다. 조리 후 30분간 상온에서 온도를 낮춘 뒤 $30\times 30\times 40$ mm 크기로 절단하고, 근섬유에 수직인 방향으로 단면적 30×30 mm에 대한 절단강도를 물성분석기(TA-XT2, Stable Micro System Ltd., Godalming, UK)와 blade set (HDP/BS, Stable Micro System Ltd., Godalming, UK)를 이용하여 분석하였다. 소고기 조각의 절단강도는 그래프에서 높은 순서대로 10개의 peak 값을 평균하여 10번씩 3반복 이상으로 측정하였다.

닭 가슴살의 경우 처리구와 대조구 닭 가슴살 조각을 하나의 진공포장에 같이 포장하는 방법으로 각각 10조각을 70°C 에서 20분간 조리하고, 30분간 식힌 뒤 $20\times 15\times 40$ mm 크기로 절단하고, 단면적 20×15 mm에 대해 절단강도 분석을 하였다.

돼지고기의 경우 인접한 부위로 2가지 라디오파 출력과 대조구에 해당하는 3개의 절단육을 30 mm 두께로 근섬유와 평행하게 절단한 뒤 소고기에서의 경우와 동일하게 70°C 에서 20분간 조리하고 30분간 식힌 뒤 $20\times 30\times 30$ mm

크기로 절단하고, 단면적 20×30 mm에 대해 절단강도 분석을 하였다.

pH 분석

소고기의 경우 사후경직이 풀리는 동안 pH가 낮아지는 데, 사후경직이 풀리며 연육이 되는 현상과 효소작용에 의한 숙성에 의해 연육이 되는 것을 구분하기 위해 pH 측정이 필요하다. 마쇄한 소고기 10 g을 30 mL의 증류수와 혼합하고 교반한 뒤 pH meter (Orion Star A221, Thermo Scientific, Singapore, Singapore)로 측정하였다.

색도 분석

소고기를 라디오파 숙성한 직후에는 높은 품온으로 인해 표면의 색이 어둡지만 저온에 저장할 경우 다시 선홍색으로 바뀐다. 라디오파 숙성 중 건조 현상이 나타나지 않은 아래쪽 면의 숙성 직후의 색도와 24 h, -2.5°C 과냉각 냉장고에 저장한 뒤의 색도를 대조구의 색도와 비교하였다. 색도는 색차계(CM-700D, Konica Minolta, Tokyo, Japan)로 Hunter L, a, b 값을 측정하였는데, L 값은 명도(lightness), a값은 적색도(redness), b값은 황색도(yellowness)를 의미한다.

미생물 분석

소고기 표면을 칼로 긁어서 채취한 핏물과 고형분 혼합물 1 g 혹은 소고기 100 g을 마쇄하여 채취한 1 g을 9 mL 식염수(HAPS, Huko FS Co., Seoul, Korea)와 함께 교반하여 10배 희석액으로 사용하였다. 희석 배수에 따른 용액 1 mL를 호기성 세균과 대장균군 건조배지(Petrifilm AC/EC, 3M, St. Paul, MN, USA)를 이용하여 분주하고, 배양하여 형성된 콜로니를 계수하였다. 호기성 세균과 대장균군 건조배지는 37°C 에서 24 h 배양하였다.

통계 분석

분석결과는 처리구 당 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. 절단강도의 경우 linear mixed model을 이용하여 fixed factor를 라디오파 숙성 처리 유무, random factor를 절단육 번호, 위치 번호로 하여 분석하고, predicted mean과 standard error를 표시하였다.

결과 및 고찰

소고기 라디오파 숙성 예비실험

본격적인 실험에 앞서 건식숙성의 온도범위에서 라디오

파를 가하는 것만으로 연육 효과가 있는지 확인하기 위해, Kim et al. (2016)이 돼지고기 등심 해동에 사용했던 라디오파 처리장치를 그대로 이용하여 라디오파 출력 10 W/kg, 냉풍의 온도 및 풍속을 -6°C , 0.5 m/s로 가하여 2A 등급 한우의 품온을 5°C 로 유지하며 120 h 숙성 처리하였다(Fig. 4d). Fig. 4a와 같이 전극에 직접 접촉하지 않도록 절연체 위에 고기를 올리고 숙성하였으며, 숙성 직후의 상면(Fig. 4b)과 하면(Fig. 4c)의 건조상태가 다르게 나타났다. 중량감소는 약 20.3% 발생하였으며, 심줄이 없는 부위에 대해 대조구의 절단강도는 129.8 ± 39.7 N였으나, 라디오파 처리구의 절단강도는 133.6 ± 33.0 N로 통계적인 차이 없이 약간 높게 나타났다. 소고기의 효소 반응이 활발하지 않은 온도에서 단순히 라디오파를 가하는 것으로는 연육 효과가 나타나지 않는 것을 확인하였으며, Hwang et al. (2004)의 연구에서와 같이 5°C 보다 효소활성이 높은 온도 범위로 라디오파 가열 처리하는 실험을 하게 되었다.

소고기의 라디오파 숙성조건을 결정하기 위해 Fig. 1의 구조로 제작된 숙성장치를 이용하여 소고기의 품온이 $15\text{--}40^{\circ}\text{C}$ 범위로 유지되도록 라디오파 출력을 조정하며 2B등급 육우 채끝 부위에 대해 3반복으로 24 h 숙성처리를 하였다. $15\text{--}40^{\circ}\text{C}$ 범위 중 온도가 높을수록 효소반응이 활발할 것으로 판단하여 초기 라디오파 출력을 60 W/kg으로 하여 25°C 지점에서 40 W/kg으로 조정하여 24 h 동안 최대온도를 소의 체온인 39°C 이하로 유지되도록 하였다(Fig. 5). 저등급 소고기의 경우 지방이 마블링 보다는 뭉

쳐있는 형태로 있는 경우가 많은데, 센서로 측정하는 모서리 부위에 지방이 있는 경우(Fig. 5c)가 그렇지 않은 경우(Fig. 5a, 5b)에 비해 모서리 온도 상승이 높게 나타났다. 지방 함유가 높은 경우 마이크로파를 이용한 유전자열에 의해 온도가 빠르게 상승하는 Das & Rajkumar (2013)의 결과와 유사하다.

라디오파 숙성처리구의 중량감소율은 $10.39 \pm 0.26\%$ 였으며, 각각의 절단육의 경우 중량 대비 표면적 값과 비례하게 중량감소율을 나타냈다. 라디오파 숙성 소고기에 대한 절단강도의 predicted mean 값은 126.71 N으로 대조구의 값인 144.43 N에 비해 통계적으로 유의미한 낮은 값을 나타냈으며, 이때 standard error는 14.10 N 이었다. 라디오파 숙성 처리의 절단강도는 하루만에 $12.27 \pm 0.19\%$ 감소한 것으로 나타났으며, 이는 Smith et al. (2008)의 건식숙성 21일간 절단강도 17% 감소에 비해 단 시간에 연육이 이루어진 것으로 확인되었다. 라디오파 숙성 처리구와 대조구 소고기의 pH는 각각 5.58 ± 0.02 와 5.53 ± 0.02 로 차이가 없었으며, 라디오파 숙성에 의한 연육은 사후경직과 관련 없이 효소반응에 의한 연육으로 판단되었다. 소고기는 산소가 충분한 경우 선홍색을 띄지만, 고기가 겹쳐서 산소가 부족한 부분은 적갈색의 색을 띤다. 대조구 소고기의 산소가 충분한 경우와 겹친 부분의 색도와 라디오파 숙성 직후 및 라디오파 숙성 후 과냉각 저장 24 h 이후의 색도를 비교하였다(Fig. 6a). 라디오파 숙성 직후의 건조가 적게 발생한 소고기 바닥면의 redness와 yellowness는 30°C 이상의

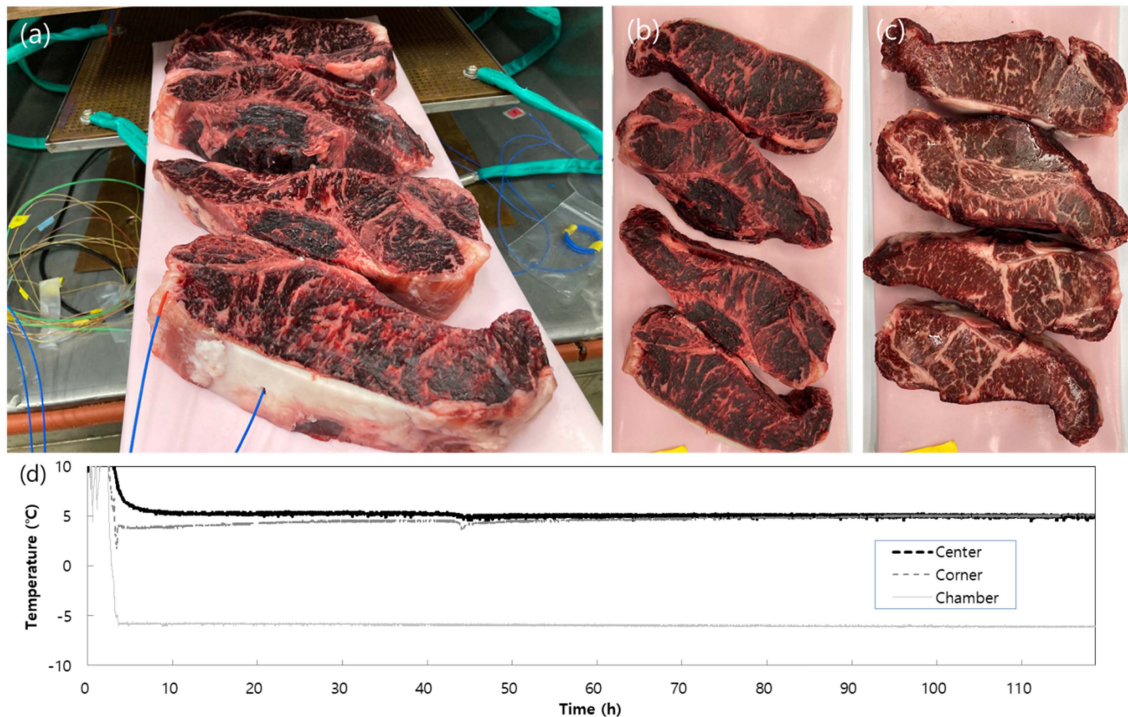


Fig. 4. Radio frequency aging with 10 W/kg using thawing unit of Kim et al. (2016) (a), upper side (b) and lower side (c) of aged beef, and time-temperature profiles during the RF aging (d).

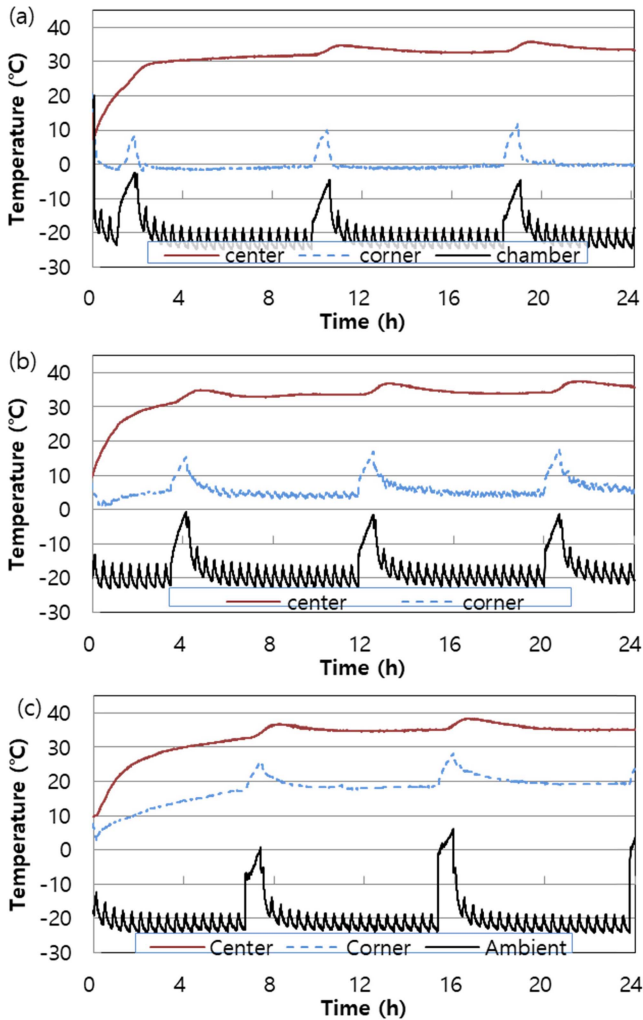


Fig. 5. Triplicated time-temperature profiles for radio frequency aging of beef with 40 W/kg.

높은 품온으로 인해 산소가 부족한 대조구보다 낮은 값을 나타냈으나, 과냉각 냉장고에서 저장하며 산소가 공급된 경우 redness와 yellowness가 다시 증가하여 산소가 부족한 경우와 충분한 경우 대조구 색도의 중간 값을 나타냈다 (Fig. 6b). 건조가 활발하게 이루어진 소고기 절단육 측면의 색도는 redness 8.27 ± 3.30 , yellowness 5.29 ± 2.64 로 짙은 갈색을 나타내는 것으로 볼 때 숙성육 바닥면의 redness와 yellowness의 감소는 건조에 의한 육즙 농축에 의해 나타난 것으로 판단된다. 육류 표면을 칼로 긁어서 얻은 핏물과 고형분의 혼합물을 이용한 미생물 분석에서 호기성 세균은 $3.3 \pm 0.2 \log \text{CFU/mg}$ 에서 $6.9 \pm 0.6 \log \text{CFU/mg}$ 로, 대장균군은 $1.69 \pm 0.2 \log \text{CFU/mg}$ 에서 $4.3 \pm 0.3 \log \text{CFU/mg}$ 로 라디오파 숙성 시 증가하였다. 내용에서는 생략하였으나, 제상이 없는 짧은 시간의 라디오파 숙성인 5시간 처리의 경우 미생물 증식이 나타나지 않았던 것을 고려할 때, 미생물 증식 문제는 Fig. 5에서 8시간마다 제상이 40분간 이루어지는 것으로 인해 발생한 것으로 판단하여, 제상기능을 수동으로 작동하도록 할 수 있게 제어장치를 교체하고 실험하였다.

소고기 라디오파 숙성시간과 연육효과

라디오파 숙성시간에 따른 연육 효과를 분석하기 위해 처리시간을 0, 8, 16, 24 h로 하여 숙성시간에 따른 연육 효과를 분석하였다(Fig. 7). 다만 40-43°C에서 소고기를 라디오파 숙성할 경우 연육효과가 나타나지 않아서, 소의 체온인 39°C 인근까지 높이는 것보다는 15-36°C 온도범위 중 30°C 이하의 온도에서의 숙성효과가 더 좋을 것으로 판단하여 지방함량이 적은 2B등급 육우의 라디오파 출력은 30 W/kg 수준으로 적용하였다. 상온에서 절단한 직후

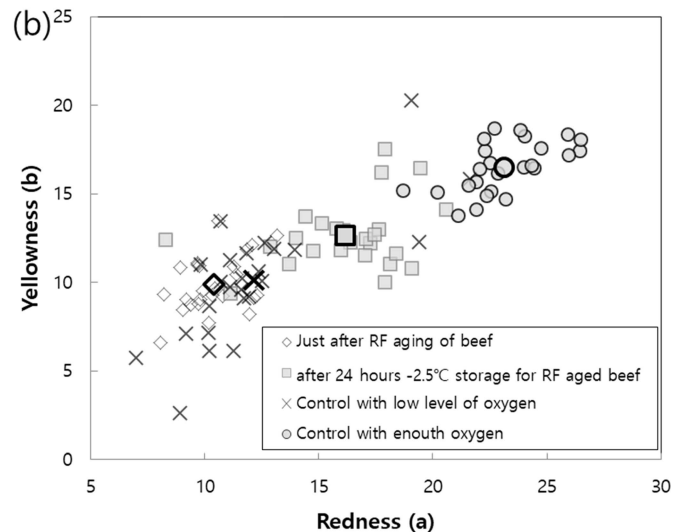


Fig. 6. Comparison of images (a) and Hunter's colors (b) between radio frequency aged beef and the control considering redness and yellowness. Large size symbols mean the average value of each group.

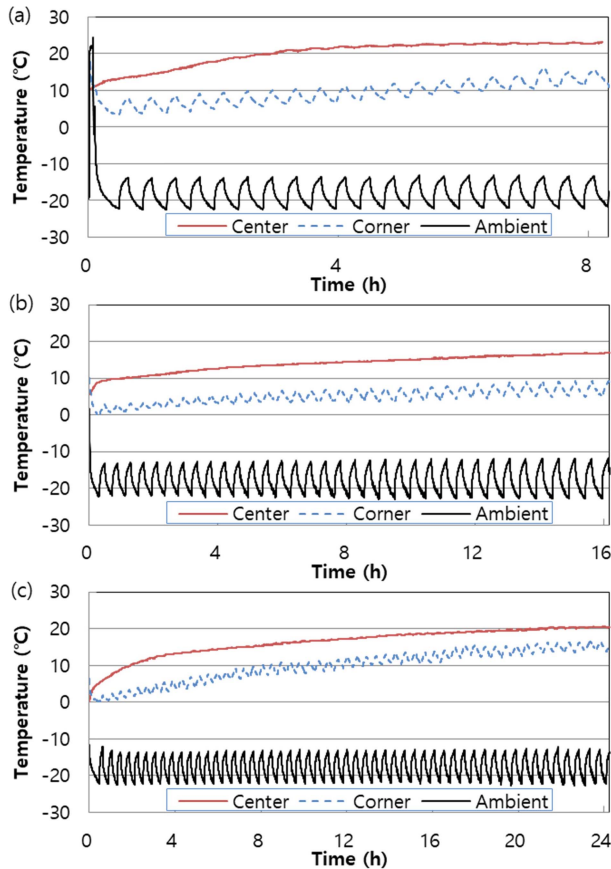


Fig. 7. Time-temperature profiles for radio frequency aging of beef with 30 W/kg considering aging period 8 (a), 16 (b), and 24 h (c).

8 h 라디오파 숙성실험을 하였기 때문에 Fig. 7a의 초기 온도는 10°C로 높았으며, 과냉각 냉장고에서 -2.5°C로 저장한 고기를 이용하여 16, 24 h 라디오파 숙성실험을 하였기 때문에 Fig. 7b와 7c의 초기 온도는 0°C 인근에서 시작하였다. 8 h 처리구와 초기 온도 차이를 보정하기 위해 16 h 처리구의 경우 10°C 이상으로 빠르게 도달하도록 출력을 50 W/kg 수준으로 높여서 가열한 뒤 30 W/kg으로 조정하였으나(Fig. 7b), 24 h 처리구는 온도를 올리는 중 다른 일정이 생겨서 중심부 온도 4°C부터 30 W/kg으로 가열하였다(Fig. 7c). 처리구별 5개의 절단육을 동시에 가열하였기 때문에 증량대비 표면적이 넓은 절단육과 표면적이 작은 절단육에는 온도 차이가 발생하였으며, 4개의 절단육을 동시에 가열하는 예비실험에서 이러한 온도 차이는 평균값

의 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내로 확인되었다(예비실험 결과는 생략). Fig. 7a의 경우 온도센서를 설치한 절단육이 5개의 절단육 중 단위증량 당 표면적이 작은 편이어서 더 높은 온도가 유지되었다.

Fig. 5와 같은 제상에 의한 온도상승은 미생물 증식에 영향을 주기 때문에, 라디오파 숙성 중에 제상 기능을 끄고 실험하였으며, 소고기를 100 g 마쇄하여 1 g을 채취하고 희석배수로 미생물 분석을 하였을 때 10배 희석액에서 호기성 세균과 대장균군은 모든 처리구에서 검출되지 않았다. 따라서, 제상으로 인한 온도 상승이 미생물 증식에 영향을 준 것이 확인되었다. 0, 8, 16, 24 h 숙성 처리구의 pH는 5.6 ± 0.1 , 5.5 ± 0.1 , 5.5 ± 0.1 , 5.5 ± 0.1 로 통계적인 차이가 없어서 사후경직과 관련이 없었다. 절단 강도의 경우 숙성 시간에 따라 164.52 N에서 73.69 N으로 55.2% 감소한 것으로 나타났는데(Table 1), 2등급 소고기의 심줄이 있는 부위를 포함한 절단강도 실험이라 큰 폭의 감소가 나타난 것으로 판단된다. 건조에 의한 증량감소는 8, 16, 24 h 처리구 각각 $4.83\pm 0.10\%$, $7.96\pm 0.19\%$, $10.42\pm 0.26\%$ 였으며, 표면이 건조됨에 따라 시간에 따른 증량감소 속도가 완화된 것을 확인할 수 있으며, 육류의 형상 분포가 유사하였기 시간에 따른 증량감소 편차가 증가하며 표준편차의 변화도 평균값의 변화와 비슷하게 나타났다. 라디오파 숙성 출력 40 W/kg 였던 Fig. 5에 비해 30 W/kg인 Fig. 7의 경우 숙성 온도가 낮아서 24 h 숙성의 증량감소 더 작을 것 같았으나 10.39%와 10.42%로 큰 차이는 없었다. 건조에 의한 증량감소는 표면의 수분 손실보다 내부의 수분이 표면으로 나오는 시간과 관련되어 있어 차이가 적은 것이라 판단된다. 라디오파 숙성 출력에 따른 절단강도 감소는 12.27%에서 55.2%로 비약적인 차이가 있었는데, 이는 심줄을 포함하지 않은 실험과 포함한 실험의 차이로 나타난 현상으로 생각되나, 24 h 라디오파 숙성 시 절단강도가 126.71 N에서 73.69 N으로 감소한 것을 고려했을 때, 30°C를 초과하는 온도 대역보다 10-30°C의 온도 대역이 효소활성화에 의한 연육에 효과적인 것으로 판단된다.

닭가슴살 및 돼지고기 등심의 라디오파 연육효과

돼지고기 및 닭고기에 대한 pulsed electric field, high pressure 등 다양한 처리에서 연육 효과에 대한 상반된 연구자료가 상존하고 있다(Bhat et al., 2018, Nam et al., 2021). 소고기에 라디오파 숙성을 한 방법과 유사하게 닭

Table 1. Predicted shear forces of radio frequency aged beef considering treated periods

Shear force (N)	RF aging period (h)				Decrease rate per 1 day (%)
	0	8	16	24	
Predicted mean	164.52 ^a	145.53 ^a	94.79 ^b	73.69 ^b	55.2
Standard error	13.72	11.77	12.09	13.06	

*Predicted means with different superscripts within a line have differences more than the estimate of least significant difference at 5% critical value.

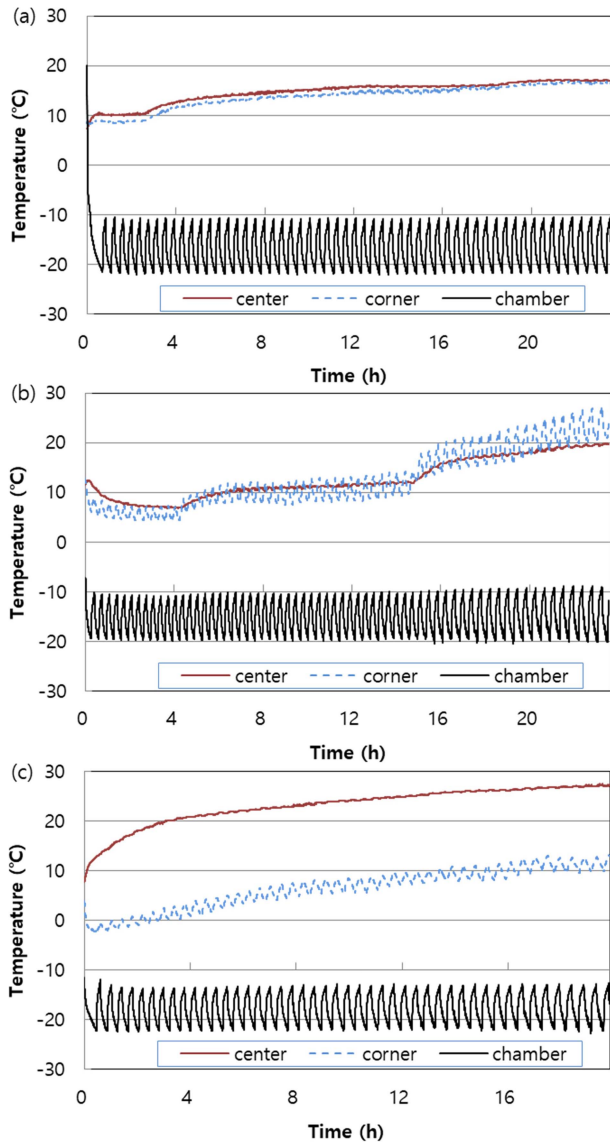


Fig. 8. Time-temperature profiles for radio frequency aging of chicken breast with 36 W/kg (a), pork loin with 30 - 49 W/kg (b), and pork loin with 62 W/kg (c).

가슴살에는 36 W/kg으로 24 h 숙성처리하였다(Fig. 8a). 돼지고기의 경우 30 W/kg로 시작하여 40 W/kg에서 49 W/kg으로 출력을 상승하여 숙성온도를 조절하며 1차실험을 하였고(Fig. 8b), 2차에는 62 W/kg으로 24 h 라디오파 숙성처리하였다(Fig. 8c). 닭가슴살과 돼지고기 등심의 절단강도는 라디오파 숙성 처리와 대조구의 통계적인 차이가 없이 나타났다(Table 2). 닭가슴살의 경우 PTFE로 덮여서 측면처럼 완전히 마르지는 않았으나 약간 건조된 표면이 절단강도를 측정할 때 포함되어 평균값은 약간 증가한 것으로 나타났으며, 돼지고기는 표면 부분을 제외하고 측정하였기 때문에 절단강도의 평균값에 차이가 없었다. 소고기와 닭고기 및 돼지고기의 숙성 품온을 유지하기 위한 단위 중량 당 라디오파 출력이 다른 것은 각각의 고기의 함수율

Table 2. Predicted shear forces of radio frequency aged chicken breast and pork loin

Shear force (N)	Control	RF aging 1	RF aging 2	Standard error
Chicken breast	18.18	20.18	-	5.51
Pork loin	68.12	69.66	66.91	3.52

*Predicted means have differences less than the estimate of least significant difference at 5% critical value.

및 지방함량에 따른 유전율 차이로 라디오파를 흡수하는 비율이 다르기 때문으로 판단된다. 이러한 가열성능 차이는 Kim et al. (2017)의 5°C, 0.5 m/s 냉풍환경에서 동일한 라디오파 출력으로 해동 이후 도달한 최종온도가 다른 것과 유사하다. 고기 종류에 따라 고기의 종류별 숙성에 의한 연육효과가 다르게 나타나는 것에 대해서는 효소와 세포의 차이 등을 고려한 추가적인 연구가 필요해 보인다.

요 약

소고기의 건식 숙성 기간을 단축하고자 연육과 관련된 효소 활성이 높은 15-36°C 온도범위에서 저습도로 숙성할 수 있는 라디오파 숙성장치를 개발하였다. 이 장치는 평행 판 전극 사이에 소고기를 넣고 라디오파를 가하여 유전가열이 되는 현상으로 고기의 온도를 높였고, 냉풍을 이용하여 습도를 낮춰서 고기표면이 건조되게 하였다. 이 장치를 이용하여 2등급 소고기 채끝 부위를 숙성시킨 결과 40 W/kg로 가열하여 고기 품온이 30°C를 초과하는 온도 범위 24 h 숙성할 경우 12.3%, 10-30°C 온도 범위에서 숙성시킬 경우 55.2% 연육효과가 나타났다. 라디오파 숙성 중 제상 과정 없이 냉풍을 계속 가할 경우 미생물 증식에 의한 문제가 발생하지 않았으며, 이러한 연육 효과는 기존 건식숙성 21일간 절단강도 17% 감소하는 것에 비해 매우 단시간 나타난 것으로 숙성기간을 크게 단축할 수 있음을 확인하였다. 닭고기와 돼지고기는 육질의 차이로 라디오파 숙성에 의한 연육 효과가 나타나지 않았다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호 : PJ01535701)의 지원에 의해 이루어진 것으로 감사드립니다.

References

- Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AEA. 2018. Applied and emerging methods for meat tenderization: A comparative perspective. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 17: 841-859.
- Das AK, Rajkumar V. 2013. Effect of different fat level on microwave cooking properties of goat meat patties. *J. Food Sci. Tech-*

- nol. 50: 1206-1211.
- Duz M, Dogan YN, Dogan I. 2020. Antioxidant activity of *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus sake* and *Lactobacillus curvatus* strains isolated from fermented Turkish Sucuk. An. Acad. Bras. Cienc. 92: 4.
- Farag KW, Lyng JG, Morgan DJ, Cronin DA. 2011. A comparison of conventional and radio frequency thawing of beef meats: Effects on product temperature distribution. Food Bioprocess Tech. 4: 1128-1136.
- Hwang IH, Park BY, Cho SH, Lee JM. 2004. Effects of muscle shortening and proteolysis on Warner-Bratzler shear force in beef longissimus and semitendinosus. Meat Sci. 68: 497-505.
- KASS. 2021. Livestock consumption per capita in Korea. <https://kass.mafra.go.kr>.
- Kim J, Park JW, Park S, Choi DS, Choi SR, Kim YH, Lee SJ, Park CW, Han GJ, Cho BK. 2016. Study of radio frequency thawing for cylindrical pork sirloin. J. Biosystems Eng. 41: 108-115.
- Kim J, Park SH, Choi DS, Choi SR, Kim YH, Lee SJ, Park CW, Han GJ, Cho BK, Park JW. 2017. Frozen food thawing and heat exchanging performance analysis of radio frequency thawing machine. Food Eng. Prog. 21: 57-63.
- Kim SY, Yong HI, Nam KC, Jung S, Yim DG, Jo C. 2018. Application of high temperature (14 °C) aging of beef *M. semimembranosus* with low-dose electron beam and X-ray irradiation. Meat Sci. 136: 85-92.
- Kim J, Choi DS, Kim YH, Son JY, Park CW, Park SH, Hwang Y. 2021. Supercooling as a potentially improved storage option for kimchi. J. Food Sci. 86: 749-761.
- Kinsella KJ, Prendergast DM, McCann MS, Blair IS, McDowell DA, Sheridan JJ. 2009. The survival of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium DT104 and total viable counts on beef surfaces at different relative humidities and temperatures. J. Appl. Microbiol. 106: 171-180.
- Lana A, Zolla L. 2016. Proteolysis in meat tenderization from the point of view of each single protein: A proteomic perspective. J. Proteomics 147: 85-97.
- Llave Y, Terada Y, Fukuoka M, Sakai N. 2014. Dielectric properties of frozen tuna and analysis of defrosting using a radio-frequency system at low frequencies. J. Food Eng. 139: 1-9.
- Nam JH, Kim CB, Ko DH, Chun JY. 2021. Change in quality of pork belly and pork shoulder with low temperature hydrostatic pressure and ultrasound treatment during storage. Food Eng. Prog. 25: 147-154.
- Park SY, Jang JY, Lee JH, Park HW, Choi HJ, Kim TW. 2014. Antibacterial activity of lactic acid bacteria isolated from kimchi. Curr. Top. Lact. Acid Bact. Probiotics 2: 19-22.
- Park HJ, Kim TH, Um KH, Kim JS, Kim BS, Song SH. 2016. Changes of qualities in dry-aged beef products made from 3rd quality grade Hanwoo beef (Korean native cattle) according to aging periods. Food Eng. Prog. 20: 67-72.
- RDA. 2019. Beef consumption trend survey. https://www.rda.go.kr/board/board.do?boardId=farmprmninfo&prgId=day_farmprmninfoEntry&currPage=141&dataNo=100000759351&mode=updateCnt&searchSDate=&searchEDate=.
- Smith RD, Nicholson KL, Nicholson JDW, Harris KB, Miller RK, Griffin DB, Savell JW. 2008. Dry versus wet aging of beef: Retail cutting yields and consumer palatability evaluations of steaks from US Choice and US Select short loins. Meat Sci. 79: 631-639.
- Wang J, Luechapattaporn K, Wanf Y, Tang J. 2012. Radio-frequency heating of heterogeneous food - Meat lasagna. J. Food Eng. 108: 183-193.
- You Y, Her JY, Shafel T, Kang T, Jun S. 2020. Supercooling preservation on quality of beef steak. J. Food. Eng. 274: 109840.
- Zagorec M, Champomier-Verges MC. 2017. *Lactobacillus sakei*: A starter for sausage fermentation, a protective culture for meat products. Microorganisms 5: 56.
- Zhang S, Huang Z, Wang S. 2017. Improvement of radio frequency (RF) heating uniformity for peanuts with a new strategy using computational modeling. Innov. Food Sci. Emerg. 41: 79-89.

Author information

- 김진세: 국립농업과학원 농업공학부 수확후관리공학과 농업연구사
- 손재용: 국립농업과학원 농업공학부 수확후관리공학과 | 농업연구관
- 최동수: 국립농업과학원 농업공학부 수확후관리공학과 농업연구사
- 김용훈: 국립농업과학원 농업공학부 수확후관리공학과 농업연구사
- 박천완: 국립농업과학원 농업공학부 수확후관리공학과 박사후연구원