

육류의 선도 극대화를 위한 과냉각 저장 기술 개발

Development of Supercooling Preservation Technology for Maximizing Freshness of Meat

박동현^{1*}, 최미정²(Dong Hyeon Park^{1*}, Mi-Jung Choi²)

¹세계김치연구소 김치산업진흥본부 실용화기술연구단

²건국대학교 축산식품생명공학과

¹Practical Technology Research Group, Kimchi Industry Promotion Division, World Institute of Kimchi

²Department of Food Science and Biotechnology of Animal Resources, Konkuk University

I. 서론

고기는 인간에게 단백질과 같은 필수적인 영양소를 제공하는 식품 공급원으로 인식되고 있다(Lee 등, 2022). 그러나, 육류의 품질은 유통 및 보관 과정에서 미생물의 작용으로 인해 저하되는 문제점이 있다(You 등, 2020). 따라서, 저장 온도는 미생물에 의한 부패, 지질 산화 및 단백질 분해를 포함하여 품질 저하를 초래하는 반응속도를 늦추어 육류의 유통기한을 연장시키는데 중요한 요소이다(Stonehouse와 Evans, 2015). 저온 저장으로 널리 사용되고 있는 방법은 냉장과 냉동이다. 냉장은 주변 환경보다 높은 온도에 존재하는 식품의 열을 제거하는 저장방법으로, 이를 통해 유통기한을 며칠 동안만 연장할 수 있다(Kang 등, 2020). 냉동은 육류의 신선도를 장기간 유지하기 위한 효과적인 저장 방법으로 간주되고 있으나, 냉동과정 중 생성된 얼음 결정체로 인하여 품질 저하가 발생하는 문제점을 지니고 있다(Choi 등, 2018). 따라서, 최근 유통 기한을 연장할 수 있는 새로운 저장 방법으로 제안되고 있는 것이 바로 과냉각 저장이다.

과냉각 저장은 상변화 없이 식품의 온도를 어는점 이하로 낮추는 방법이고, 얼음결정체가 생성되지 않는다(Park 등, 2022a). 이를 이용한 저장방법은 얼음결정체로 인한 조직 손상 없이 식품의 유통기한을 연장하는데 유리하지만(Park 등, 2023), 빙핵 생성이 어느 순간에 일어날 수 있는 매우 불안정한 상태이기 때문에 과냉각 상태를 유지하는 것은 매우 어렵다(Lee, 2020). 이러한 한계점을 극복하기 위해서, 과냉각 저장에 초고압, 전자기장 등과 같은 많은 기술들이 응용되고 있다(Park 등, 2021). 이러한 기술들은 과냉각 상태를 유지하는데 효과적이지만 식품 산업에 적용하는 데 비용이

*Corresponding author: Dong Hyeon Park
Ph.D., Practical Technology Research Group, Kimchi Industrial Promotion Division,
World Institute of Kimchi, Gwangju, Korea
Tel: +82-62-610-1812
Fax: +82-62-610-1850
Email: dhpark@wikim.re.kr

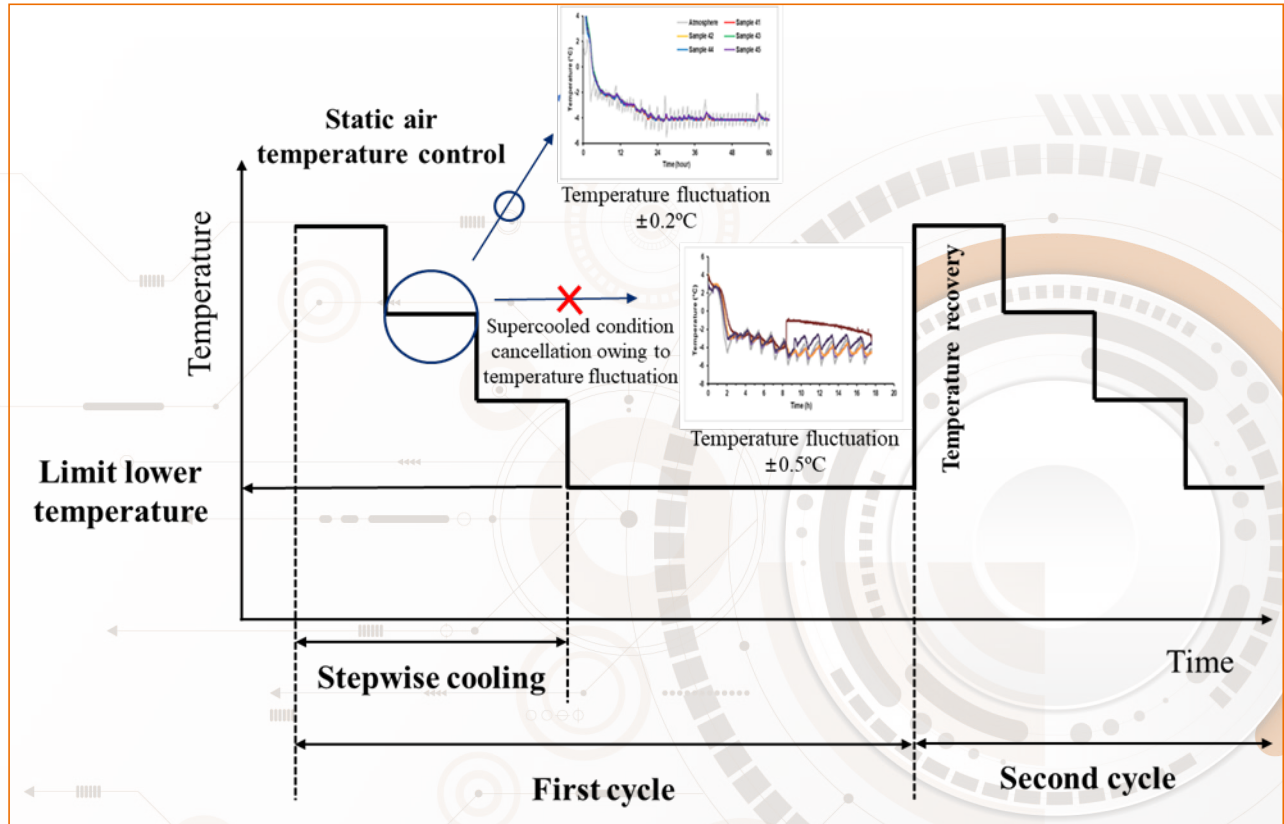
많이 든다는 단점이 있다. 또한, 과냉각 상태를 유지하기 위해 전자기장을 사용하는 것은 논란의 여지가 있고 의미 있는 결론이 내려지지 않았다(Park 등, 2022b). 안정적인 과냉각 상태를 위해 느린 속도로 냉각하는 정온 제어가 대안으로 제안되었다. Fukuma 등(2012)은 방어, 가자미, 참돔을 단계적 냉각방식을 적용한 인큐베이터에서 과냉각 저장 실험을 실시하였다. 저장 온도는 24시간마다 0.5℃ 또는 1℃씩 감소했으며, 그 결과 일부 어종은 -5℃까지 안정적으로 과냉각 상태를 유지하였고, 품질 또한 원물 상태를 유지하는 것이 확인되었다. 단계적 냉각은 냉각속도가 매우 느리기 때문에 얼음 결정화에 필요한 에너지가 부족하고, 근육 내 작은 분자가 어는점을 낮추어 안정적으로 과냉각을 유지하는 것이라 추측된다(Lee 등, 2022). 또한, 단계적 냉각을 이용하면 연어, 고등어, 광어 및 갈치 등을 안정적으로 과냉각 저장할 수 있음이 확인되었다(Park 등, 2022a; Kim 등, 2021). 육류 또한 정밀한 온도제어를 이용한 과냉각 저장 연구가 진행되고 있다. 따라서, 본 글을 통해 육류의 선도 극대화를 위해 단계적 냉각을 이용한 과냉각 저장 연구 결과를 소개하고자 한다.

II. 본론

1. 정온 제어를 이용한 과냉각 저장의 주요 요소

안정적인 과냉각 저장을 위한 정온 제어에 사용되는 단계적 냉각 알고리즘은 (1) 온도 편차 최소화, (2) 식품 종류에 따른 적절한 최하한 온도설정 및 (3) 사이클 종료 후 초기 온도로 복귀의 세 가지 주요 요소가 있다(그림 1). Lee(2020)

그림 1. Concept of supercooling storage controlled by stepwise cooling process adapted from Park (2022).



는 온도가 낮아짐에 따라 정온 상태를 제어하기 위하여 온도 편차를 최소화하는 것이 가장 중요한 요소라고 밝혔다. 그림 1은 높은 온도 편차가 과냉각 저장 안정성에 미치는 효과를 보여준다. 평균 온도를 설정하더라도 온도 편차는 0.2℃ 이내이어야 한다. 냉각 속도는 천천히 조절되지만, 온도 편차가 0.2℃ 이상 커지면 과냉각 상태가 유지될 가능성이 낮아진다. 두번째 필수 요소는 최하한 온도를 설정하는 것이다. Park(2022)은 빙핵 생성 없이 과냉각 상태를 유지하기 위한 단계적 냉각의 최하한 온도가 식품의 종류에 따라 다르다는 것을 보여주었다. 마지막 중요한 요소는 초기 온도로 다시 회복하는 것이다. 최종 냉각 단계에서 큰 온도 편차 없이 최하한 온도를 조절하더라도 식품의 어는 점 이하에서는 과냉각 상태가 여전히 열역학적으로 불안정한 상태이다. 따라서, 식품의 최하한 온도에 노출되는 시간이 제한된다. 이러한 이유로 과냉각 상태가 예기치 않게 해제되는 것을 방지하려면 온도를 초기 온도로 회복되어야 한다.

과냉각 저장을 산업체에 적용하기 위한 대안적인 방법으로 단계적 냉각 과정에 의해 제어되는 직접 정온의 확인된 주요 변수를 고려한 새로운 개념이 제안되어야 할 것으로 보인다.

2. 정온제어를 이용한 과냉각 저장된 육류의 신선도

정온제어를 이용한 육류의 과냉각 저장에 관한 연구는 돼지, 닭 및 소고기를 이용한 연구들이 있다. 이들 연구에서는 육류를 냉장(3℃), 냉동(-18℃) 및 과냉각 저장을 실시하여 비교하였다. 품질 평가 지표로 드립 손실, 보수력(water holding capacity, WHC), 휘발성 염기태질소(total volatile basic nitrogen, TVBN) 및 총균수(total aerobic count, TAC)를 평가하였다. 이들 실험을 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

1) 돼지고기

돼지고기는 등심 및 삼겹살 부위로 실험을 진행하였고, 과냉각 알고리즘은 2가지로 나누어 진행하였다. 등심의 최하한 온도는 -3℃, 삼겹살은 -2.5℃로 설정해 알고리즘을 구현하였다. Park 등(2023)에 의하면, 식품의 구성 성분에 따라 열전달 속도에 차이가 나기 때문에 최하한 온도를 다르게 설정해 주어야 한다. 따라서, 지방함량이 많은 삼겹살의 경우 최하한 온도를 등심보다 높여서 알고리즘을 구현하였다.

저장온도 및 시간에 따른 등심 및 삼겹살의 드립 손실, 보수력, TVBN 및 총균수를 표 1 및 2에 각각 나타냈다. 등심 및 삼겹살의 드립 손실은 냉장처리구에서 많이 발생하였고, 특히 등심이 삼겹살보다 많은 드립이 발생한 것을 확인하였다. 냉장 삼겹살의 TVBN은 저장 14일차에 가파르게 증가해 20 mg/100 g을 초과하는 것으로 확인된 반면, 과냉각 삼겹살 시료는 완만하게 증가한 것으로 확인되었다. 총균수에서도 TVBN과 유사한 경향성이 나타났으며, 냉장 저장된 돼지고기에서 초기 부패 기준인 6 log CFU/g을 보였다.

2) 닭고기

닭고기는 가슴, 다리 및 날개 부위로 실험을 진행하였고, 단계적 냉각을 적용한 과냉각 알고리즘은 2가지로 나누어 실험을 진행하였다. 닭가슴살의 최하한 온도는 -2.5℃로 설정하였고, 다리 및 날개의 최하한 온도는 -2℃로 설정하여 14 일동안 저장하였다. 닭가슴살은 저장기간 동안 과냉각 상태를 100% 유지하였고, 닭다리 및 날개는 일부 시료에서 과냉각이 해제되었지만 90%이상의 과냉각 성공율을 보여주었다.

표 1. Changes in the drip loss, WHC, TVBN, and TAC of pork loin with various storage temperature and periods.

Parameter	Treatment	Storage periods (days)		
		0	8	16
Drip loss (%)	Refrigeration (3 °C)	-	10.46 ± 1.60 ^{aA}	10.54 ± 0.58 ^{aA}
	Supercooling (-3 °C)	-	8.24 ± 2.43 ^{aA}	9.44 ± 1.16 ^{aA}
	Freezing (-18 °C)	-	9.20 ± 3.12 ^{aA}	6.74 ± 0.69 ^{bB}
WHC (%)	Refrigeration (3 °C)	85.10 ± 0.90 ^A	82.70 ± 2.70 ^{aAB}	84.20 ± 1.80 ^{aA}
	Supercooling (-3 °C)	85.10 ± 0.90 ^A	83.70 ± 1.60 ^{aA}	83.10 ± 3.30 ^{abA}
	Freezing (-18 °C)	85.10 ± 0.90 ^A	81.60 ± 1.90 ^{aAB}	78.30 ± 2.70 ^{bB}
TVBN (mg/100 g)	Refrigeration (3 °C)	5.85 ± 0.17 ^B	6.67 ± 0.17 ^{aA}	6.84 ± 0.17 ^{aA}
	Supercooling (-3 °C)	5.85 ± 0.17 ^A	6.16 ± 0.20 ^{bA}	6.16 ± 0.15 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	5.85 ± 0.17 ^A	6.11 ± 0.26 ^{bA}	6.11 ± 0.26 ^{bA}
Total aerobic count (log CFU/g)	Refrigeration (3 °C)	3.80 ± 0.20 ^B	-	6.08 ± 0.07 ^{aA}
	Supercooling (-3 °C)	3.80 ± 0.20 ^A	-	3.28 ± 0.16 ^{bB}
	Freezing (-18 °C)	3.80 ± 0.20 ^A	-	3.26 ± 0.10 ^{bB}

^{a-b}Means with different letters within the same storage period are significantly different ($p < 0.05$).

^{A-B}Means with different letters within the same storage condition are significantly different ($p < 0.05$).

표 2. Changes in the drip loss, WHC, TVBN, and TAC of pork belly with various storage temperature and periods.

Parameter	Treatment	Storage periods (days)		
		0	7	14
Drip loss (%)	Refrigeration (3 °C)	-	0.74 ± 0.08 ^{aB}	2.28 ± 0.37 ^{aA}
	Supercooling (-2.5 °C)	-	0.10 ± 0.03 ^{bA}	0.32 ± 0.19 ^{cA}
	Freezing (-18 °C)	-	0.93 ± 0.18 ^{aA}	1.07 ± 0.43 ^{bA}
WHC (%)	Refrigeration (3 °C)	90.95 ± 1.55 ^A	88.08 ± 1.36 ^{aA}	85.33 ± 1.34 ^{bB}
	Supercooling (-2.5 °C)	90.95 ± 1.55 ^A	90.05 ± 0.73 ^{aA}	88.21 ± 0.78 ^{aA}
	Freezing (-18 °C)	90.95 ± 1.55 ^A	89.53 ± 1.04 ^{aA}	88.29 ± 0.94 ^{aA}
TVBN (mg/100 g)	Refrigeration (3 °C)	3.27 ± 0.43 ^C	9.11 ± 0.70 ^{aB}	21.15 ± 1.02 ^{aA}
	Supercooling (-2.5 °C)	3.27 ± 0.43 ^B	3.74 ± 0.79 ^{bB}	6.95 ± 1.77 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	3.27 ± 0.43 ^B	3.78 ± 0.46 ^{bAB}	4.48 ± 0.46 ^{cA}
TAC (log CFU/g)	Refrigeration (3 °C)	2.87 ± 0.04 ^C	4.25 ± 0.07 ^{aB}	6.94 ± 0.05 ^{aA}
	Supercooling (-2.5 °C)	2.87 ± 0.04 ^C	3.64 ± 0.31 ^{bB}	5.03 ± 0.23 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	2.87 ± 0.04 ^B	3.11 ± 0.07 ^{cA}	3.19 ± 0.04 ^{cA}

^{a-c}Means with different letters within the same storage period are significantly different ($p < 0.05$).

^{A-C}Means with different letters within the same storage condition are significantly different ($p < 0.05$).

표 3. Changes in the drip loss, WHC, TVBN, and TAC of chicken breast with various storage temperature and periods.

Parameter	Treatment	Storage periods (days)		
		0	7	14
Drip loss (%)	Refrigeration (3 °C)	-	4.11 ± 0.38 ^{ab}	5.55 ± 0.37 ^{aA}
	Supercooling (-2.5 °C)	-	1.37 ± 0.15 ^{cb}	2.57 ± 0.09 ^{cA}
	Freezing (-18 °C)	-	1.74 ± 0.15 ^{bb}	3.29 ± 0.36 ^{bA}
WHC (%)	Refrigeration (3 °C)	91.13 ± 2.10 ^A	88.93 ± 1.64 ^{abB}	86.69 ± 1.94 ^{ab}
	Supercooling (-2.5 °C)	91.13 ± 2.10 ^A	90.44 ± 2.47 ^{aA}	88.95 ± 2.81 ^{aA}
	Freezing (-18 °C)	91.13 ± 2.10 ^A	89.60 ± 2.28 ^{aA}	88.31 ± 2.69 ^{aA}
TVBN (mg/100 g)	Refrigeration (3 °C)	7.89 ± 0.93 ^C	12.14 ± 0.54 ^{ab}	18.82 ± 3.32 ^{aA}
	Supercooling (-2.5 °C)	7.89 ± 0.93 ^A	7.80 ± 1.59 ^{bA}	7.78 ± 2.97 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	7.89 ± 0.93 ^A	8.12 ± 1.59 ^{bA}	8.73 ± 2.97 ^{bA}
TAC (log CFU/g)	Refrigeration (3 °C)	2.52 ± 0.01 ^C	3.32 ± 0.01 ^{ab}	5.29 ± 0.02 ^{aA}
	Supercooling (-2.5 °C)	2.52 ± 0.01 ^C	3.09 ± 0.04 ^{bb}	4.69 ± 0.03 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	2.52 ± 0.01 ^C	2.94 ± 0.02 ^{cA}	2.86 ± 0.03 ^{cb}

^{a-c}Means with different letters within the same storage period are significantly different ($p < 0.05$).

^{A-C}Means with different letters within the same storage condition are significantly different ($p < 0.05$).

표 4. Changes in the drip loss, WHC, TVBN, and TAC of chicken leg with various storage temperature and periods.

Parameter	Treatment	Storage periods (days)		
		0	7	14
Drip loss (%)	Refrigeration (3 °C)	-	4.93 ± 0.44 ^{ab}	7.85 ± 0.57 ^{aA}
	Supercooling (-2 °C)	-	4.21 ± 0.20 ^{bb}	5.54 ± 0.99 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	-	4.65 ± 0.41 ^{abA}	4.93 ± 0.34 ^{bA}
WHC (%)	Refrigeration (3 °C)	88.38 ± 3.41 ^A	84.79 ± 0.06 ^{ab}	88.33 ± 2.03 ^{abB}
	Supercooling (-2 °C)	88.38 ± 3.41 ^A	87.37 ± 2.54 ^{aA}	85.72 ± 1.04 ^{aA}
	Freezing (-18 °C)	88.38 ± 3.41 ^A	85.31 ± 1.42 ^{aAB}	84.97 ± 1.59 ^{bB}
TVBN (mg/100 g)	Refrigeration (3 °C)	5.56 ± 0.71 ^C	13.26 ± 1.40 ^{ab}	26.57 ± 2.30 ^{aA}
	Supercooling (-2 °C)	5.56 ± 0.71 ^C	7.47 ± 0.96 ^{bb}	9.54 ± 1.56 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	5.56 ± 0.71 ^{AB}	4.39 ± 0.82 ^{cb}	7.10 ± 1.33 ^{cA}
TAC (log CFU/g)	Refrigeration (3 °C)	3.12 ± 0.09 ^C	6.20 ± 0.02 ^{ab}	8.05 ± 0.02 ^{aA}
	Supercooling (-2 °C)	3.12 ± 0.09 ^C	4.99 ± 0.99 ^{bb}	6.14 ± 0.31 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	3.12 ± 0.09 ^C	3.52 ± 0.08 ^{cb}	3.58 ± 0.06 ^{cA}

^{a-c}Means with different letters within the same storage period are significantly different ($p < 0.05$).

^{A-C}Means with different letters within the same storage condition are significantly different ($p < 0.05$).

표 5. Changes in the drip loss, WHC, TVBN, and TAC of pork loins with various storage temperature and periods.

Parameter	Treatment	Storage periods (days)		
		0	7	14
Drip loss (%)	Refrigeration (3 °C)	-	5.25 ± 0.38 ^{aB}	8.18 ± 0.27 ^{aA}
	Supercooling (-2 °C)	-	2.78 ± 0.10 ^{cB}	4.46 ± 0.20 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	-	3.15 ± 0.19 ^{bA}	3.41 ± 0.13 ^{cA}
WHC (%)	Refrigeration (3 °C)	91.02 ± 1.91 ^A	88.09 ± 2.75 ^{aAB}	85.04 ± 3.76 ^{bB}
	Supercooling (-2 °C)	91.02 ± 1.91 ^A	89.40 ± 1.75 ^{aA}	89.00 ± 2.23 ^{aA}
	Freezing (-18 °C)	91.02 ± 1.91 ^A	89.80 ± 1.08 ^{aAB}	86.54 ± 2.20 ^{bB}
TVBN (mg/100 g)	Refrigeration (3 °C)	3.95 ± 0.93 ^C	13.21 ± 1.40 ^{bB}	18.82 ± 3.32 ^{aA}
	Supercooling (-2 °C)	3.95 ± 0.93 ^C	5.22 ± 0.85 ^{bB}	11.21 ± 1.83 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	3.95 ± 0.93 ^B	4.77 ± 1.54 ^{bAB}	4.94 ± 1.02 ^{cA}
TAC (log CFU/g)	Refrigeration (3 °C)	3.73 ± 0.02 ^C	5.13 ± 0.03 ^{aB}	7.06 ± 0.11 ^{aA}
	Supercooling (-2 °C)	3.73 ± 0.02 ^C	4.50 ± 0.28 ^{bB}	6.10 ± 0.07 ^{bA}
	Freezing (-18 °C)	3.73 ± 0.02 ^B	4.02 ± 0.01 ^{cA}	4.03 ± 0.23 ^{cA}

^{a-c}Means with different letters within the same storage period are significantly different ($p < 0.05$).

^{A-C}Means with different letters within the same storage condition are significantly different ($p < 0.05$).

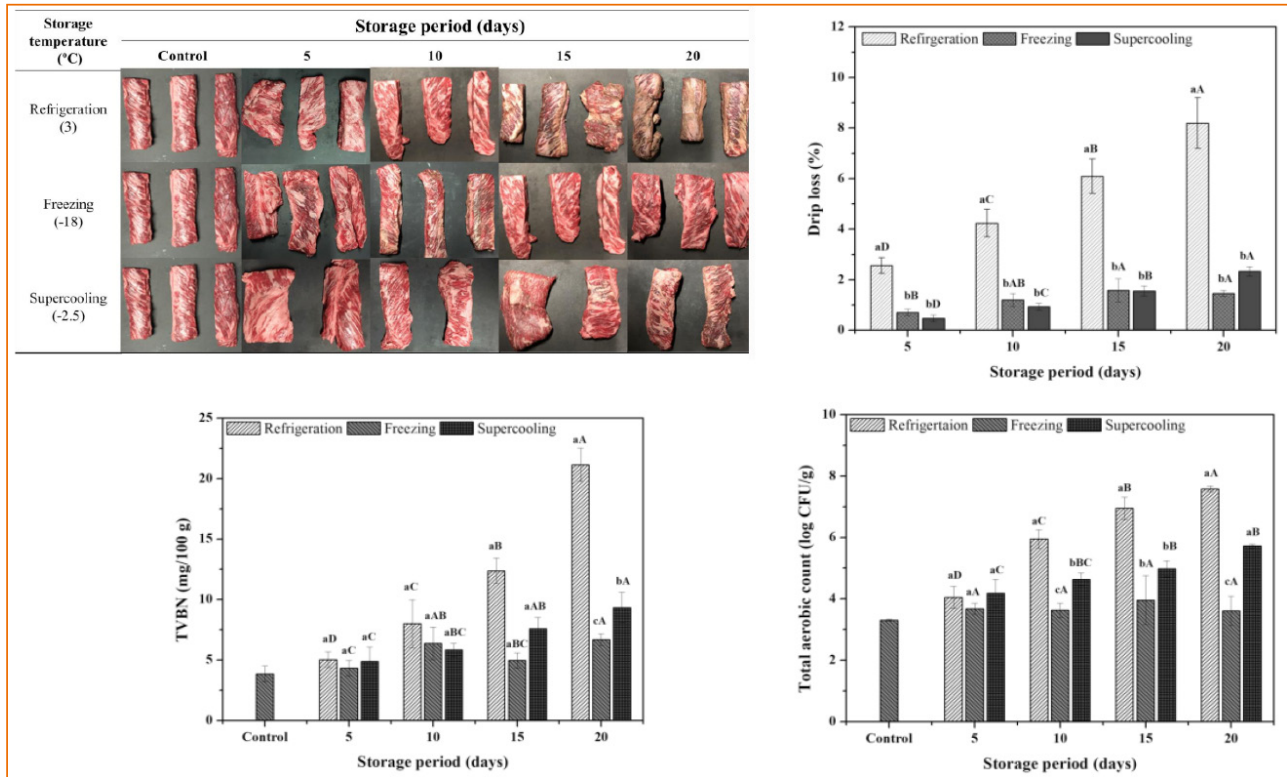
저장온도 및 기간에 따른 닭고기(가슴, 다리 및 날개)의 드립 손실, 보수력, TVBN 및 총균수를 표 3, 4 및 5에 각각 나타냈다. 특히, 과냉각 저장된 닭가슴살에서는 냉동 저장된 시료보다 드립이 적게 발생하였다. 보수력에서도 과냉각 저장된 가슴살과 날개가 14일 후에도 가장 높게 나타났다. TVBN은 냉장 저장된 육류들에서 급격하게 증가하였다. 저장 14일차에는 냉장 시료의 TVBN 값이 18 mg/100 g을 초과하였다. 총균수는 냉장 저장된 닭고기에서 저장 7일차 시점에 6 log CFU/g을 초과하거나 유사한 값을 보여주었고, 이는 식품의 부패 및 변질 기준에 충족하는 결과를 보여주었다(Lee 등, 2022).

3) 쇠고기

쇠고기는 갈비 부분을 이용하여 과냉각 저장을 실시하였고, 최하한 온도는 -2.5°C로 설정하였다. 이후 20일간 저장하면서 5일 간격으로 시료를 취하여 품질 변화를 관찰하였다. 갈비의 최하한 온도는 -2.5°C로 설정하여 진행하였고, 저장 기간 동안 모든 시료가 과냉각 상태를 유지하였다.

저장 온도 및 기간에 따른 갈비살의 외관, 드립 손실, TVBN 및 총균수를 그림 2에 나타냈다. 저장 기간이 경과할수록 냉장 저장된 갈비의 외관은 저장 10일차부터 색도 변화가 시작되어 15일차에는 시료 표면의 70% 이상이 갈변되었음이 확인되었다. 이에 반해, 과냉각 저장된 갈비는 15일차부터 일부분만 색 변화가 시작되는 것이 관찰되었다. 드립 손실 또한 냉장 저장 시료가 가장 높은 수치를 보였고, 저장 초기에는 냉동 저장이 과냉각 저장에 비하여 더 많은 드립이 발생하였다. 이는 얼음결정체로 인한 조직 손상으로 인한 것으로, 해동 과정에서 더 많은 드립이 발생한 것으로 판단된다.

그림 2. Changes in the appearance, drip loss, TVBN and TAC of beef rib with various storage temperature and periods.



^{a-c}Means with different letters within the same storage period are significantly different ($p < 0.05$).

^{A-D}Means with different letters within the same storage condition are significantly different ($p < 0.05$).

(Park, 2022). 냉장 저장된 갈비의 TVBN 값은 색도 변화가 발생한 시점인 저장 10일차부터 급격하게 증가하는 것으로 나타났고 20일차에는 20 mg/100 g 이상을 나타내었다. 과냉각 저장은 15일차부터 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 총균수에서도 TVBN 결과와 유사하게 나타났다. 이는 낮은 온도로 인하여 미생물로 인한 증식이 억제된 것으로 사료된다(Park 등, 2022).

III. 결론

본 연구는 육류를 단계적 냉각을 이용한 과냉각 저장을 적용하기 위해 필요한 요소와 연구현황을 분석하였고, 이에 산업체에 적용해 보고자 하였다. 정온을 이용한 과냉각 저장에 있어서 주요 점은 (1) 온도 편차 최소화, (2) 식품 별 최하 한온도 설정, (3) 초기온도로의 회복이었다. 이러한 주요 요소들을 고려해 육류 부위별 단계적 과냉각 알고리즘을 구상 및 적용하였다. 단계적 냉각을 이용한 육류의 과냉각 저장은 저장기간동안 모든 육류를 안정적으로 과냉각 저장하였다. 신선도 품질 비교에 있어서, 과냉각 저장은 냉장저장에 비해 식품의 신선도가 길게 유지되는 것이 확인되었다. 특히, 저장 14일 차에도 TVBN에서 원물과 크게 차이가 나지 않았다. 또한, 냉동 저장과 비교 시, 낮은 드립이 발생하는 것이 확인되었고, 보수력에서도 냉장 및 냉동저장에 비해 우수하게 나타났다. 총 미생물 수에서도 냉장 저장한 육류들은 저장 1주일 이후 시점부터 급격하게 증가하는 것으로 나타났으나, 과냉각 저장은 서서히 증가하는 것을 확인하였다. 최근 저

장고 제조기술이 발전하고 있어서 대형 저장고의 온도 편차를 0.2℃ 내외로 유지할 수 있는 기술들이 개발되고 있다. 따라서 정온제어 과냉각 저장의 세가지 요소를 고려해 육류에 맞는 알고리즘을 구상하고 적용한다면, 단계적 냉각을 이용한 과냉각 저장방법이 산업체에서 충분히 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

1. Choi MJ, Abduzukhurov T, Park DH, Kim EJ, Hong GP. 2018. Effect of deep freezing temperature for long-term storage on quality characteristics and freshness of lamb meat. *Food Science of Animal Resources* 38:959-969.
2. Fukuma Y, Yamane A, Itoh T, Tsukamasa Y, Ando M. 2012. Application of supercooling to long-term storage of fish meat. *Fish Science* 78:451-461.
3. Kang T, You Y, Jun S. 2020 Supercooling preservation technology in food and biological sampels: A review focused on electric and magnetic field applications. *Food Science and Biotechnology* 29:303-321.
4. Kim JJ, Park DH, Kim EJ, Choi MJ. 2021. Effect of supercooling controlled by step-cooling algorithm on freshness of Hairtail (*Trichiurus lepturus*). *Food Engineering Progress* 25(3):255-263.
5. Lee SY, Park DH, Kim EJ, Kim H, Lee Y, Choi MJ. 2022. Development of temperature control algorithm for supercooling storage of pork loin and its feasibility for improving freshness and extending shelf life. *Food Science of Animal Resources* 42(3):467-485.
6. Lee SY. 2020. Feasible strategies to improve freshness and wholesomeness of pork loin during extended storage. Ph.D. dissertation, Konkuk Univ., Seoul, Korea.
7. Park DH, Kim EJ, Choi MJ. 2023. Supercooling phenomena in protein based food matrix composed of various fat, salt, and water contents. *Food Bioscience* 51:102274.
8. Park DH, Lee SY, Byeon YM, Kim EJ, Cho MJ. 2022a. Effect of supercooling storage applied with stepwise algorithm for fishes (salmon and olive flounder) and its freshness during extended storage. *Food Bioscience* 49:101950.
9. Park DH, Lee SY, Kim EJ, Jo YJ, Choi MJ. 2022b. Development of a stepwise algorithm for supercooling storage of pork belly and chicken breast and its effect on freshness. *Foods* 11:380.
10. Park DH, Lee SY, Lee J, Kim EJ, Jo YJ, Kim H, Choi MJ, Hong GP. 2021. Stepwise cooling mediated feasible supercooling preservation to extend freshness of mackerel fillets. *LWT* 152:112389.
11. Park DH. 2022. Development of food compositions based stepwise cooling algorithm for novel supercooling preservation. Ph.D. dissertation, Konkuk Univ., Seoul, Korea.
12. Stonehouse GG, Evans JA. 2015. The use of supercooling for fresh foods: A review. *Journal of Food Engineering* 148:74-79.
13. Yun YC, Ramachandraiah K, Hong GP. 2021. Effect of precooling conditions on the ice nucleation temperature and freezing characteristics of semisolid matrices. *Journal of Food Engineering* 291:110232.