

식육의 동결, 냉동냉장 및 해동시 내부압력 변화

정진웅 · 김종훈
한국식품개발연구원

Changes of Internal Pressure during Freezing, Frozen Storage and Thawing of Meats

Jin-Woong Jeong and Jong-Hoon Kim
Korea Food Research Institute

Abstract

The destruction of tissues by volume increase at food freezing is accepted as one of the factor responsible for quality damage. For this reason, the internal pressure developed in meats were investigated with a pressure transducer during freezing, frozen storage and thawing. Increases of 6.33% for volume and 942.17 kg/cm² for density at -20°C for beef were shown. In quick and slow freezing of beef, internal pressure reached to highest point after reached to the lowest point at initial of the zone of ice crystal formation. The internal pressure was approximately 8~10 psig and pressure difference was about 1 psig, which was bigger in immersion freezing than that of still-air freezing. During frozen storage of pork, internal pressure of 1.84~2.32 psig occurred repeatedly as a function of sample weight at material temperature difference of ±1°C. The internal pressure during thawing of pork was decreased slowly after rapid increase to the maximum for less than 5min at the beginning of thawing. Internal pressure value at thawing was higher than that at freezing in most cases. Internal pressure of beef with thermal equalized freezing was about 1~4 psig, which was lower than that of non-thermal equalized freezing. Also, freezing time was shortened to 10~20%.

Key words: internal pressure, freezing, frozen storage, thawing, meat

서 론

냉동은 식품의 온도를 저하시켜 조직내의 자유수를 빙결정화 하여 미생물의 성장과 효소 활성의 억제로 식품의 품질저하를 최대한 방지하는 데 목적을 지닌 품질보존의 수단으로, 최근에 들어서는 냉동식품의 생산량이 증대함에 따라 상업적으로 급속동결하는 경향이 일반적이다. 이로 인하여 반경이 수cm 이상의 대형식품은 공기동결이나 접촉동결과 같이 비교적 높은 동결온도에서는 동결제품의 표면에 균열 또는 융기의 발생을 초래하지 않지만 LN₂나 CaCl₂ 브라인 침지/살포와 같은 급속동결의 경우에는 부피변화와 동시에 stress로 인해 표면 균열이 생기거나 형태가 찌그러져 상품성 및 영양소 손실을 초래하게 된다⁽¹⁾. 이에 관한 연구로는 Lorentzen가 액체질소에 의한 청어의

동결에서 팽창부위의 균열 및 파괴를 발견한 이래, Kagan과 Ukrainets은 압력transducer system을 사용하여 액체 탄산가스 및 송풍식 동결시의 우육 및 돈육 중심부에서 압력을 측정하였고⁽²⁾, Miles와 Morley⁽²⁾는 -10~50°C사이의 동결온도별에 따른 동결 및 냉동저장 시의 우육에 있어 내부압력을 측정하였으며, Ogawa⁽³⁻⁵⁾는 염화칼슘과 에탄올 브라인에 의한 참치와 가다랑어, 햄, 소시지의 동결 중의 내부압력 발생에 따른 균열 및 융기에 관해 연구한 것에 불과한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 내부압력에 따른 조직파괴를 방지하기 위한 기초연구로써 동결처리에 의한 내부압력과 아울러 냉동냉장 및 해동시의 내부압력 변화에 대하여 연속적으로 살펴보았다.

재료 및 방법

공시재료

본 실험에 사용한 우육 및 돈육은 도살후 24시간 경

Corresponding author: Jin-Woong Jeong, Korea Food Research Institute, San 46-1 Baekhyun-dong, Bundang-gu, Songnam-si, Kyonggi-do 463-420, Korea

과한 등심근을 축협직매장(경기도 성남)에서 구매하여 polypropylene포장지에 넣어 5°C 온도에서 1일간 보관한 것을 일정 크기로 절단한 후 표피지방을 제거하여 동결 및 냉동냉장 실험에 사용하였으며, 동결시 균온처리는 -1 ± 0.5 , -10 ± 0.5 및 $-18 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 3단계에서 각각 6시간 동안 행하였다. 해동은 실온에 그대로 방치하면서 품온이 $+1^{\circ}\text{C}$ 에 도달할 때까지 실시하였다.

동결실험, 내부압력 및 온도 측정

시료 처리조건에 따른 내부압력 및 품온 측정을 위한 주요 장치는 동결장치, 압력 및 온도 측정부 및 데이터 출력부로 구성하였다. 시료의 송풍식 및 정지 공기식 동결은 2원냉동시스템의 초저온동결고(SW-UF 400, 삼원냉열 ENG.)를 이용하여 고내(유효면적: L1,850 × W850 × H980 mm) 중심부에 설치한 트레이 위에 시료를 얹고 $-20\sim-70^{\circ}\text{C}$ 범위에서 온도조절기와 송풍량으로 온도를 조절하도록 하였고, 프로필렌글리콜을 사용한 침지식 동결에서는 브라인 냉각을 위해 2 Hp의 압축기 유니트(저온측: R-503, 고온측: R-502)와 브라인 가열을 위해 2.2 kW의 전열히터를 설치하였다. 그리고 압력측정은 -14.8~100 psi 범위의 pressure transducer (C280E, Setra, USA)의 압력부에 길이 10 cm, 직경 2 mm 동관을 연결하여 나사로 고정시켜 밀봉처리 한 후, 온도를 동시에 측정하고자 K-type의 0.3 mm 동콘스탄탄 열전대를 함께 고정하여 단열처리하였다. 동결시의 내부압력 및 소요시간은 시료의 기하학적 중심부의 온도가 -18°C , 해동시의 내부압력 및 소요시간은 품온이 $+1^{\circ}\text{C}$ 에 도달할 때까지 Hydra data acquisition (2625A, Fluke, USA)을 이용하여 연속 측정하였다. 본 실험에 사용한 내부압력 측정용 transducer의 표준편차는 $\pm 0.40 \text{ psig}$, 열전대는 $\pm 0.12^{\circ}\text{C}$ 이다.

동결소요시간 측정

동결소요시간 계산은 Hung과 Thompson⁽⁶⁾의 방법에 의해 산출하였다. 즉, 측정 시료의 동결 전후의 밀도는 부피에 대한 중량의 비로써 산정하였으며, 동결상태의 경우는 에칠알콜을 저온매체로 사용하여 일정량의 시료를 비중병에 주입한 후 처리온도 별로 약 24시간 동결시킨 후의 체적과 동결전의 중량으로 구하였다. 초기빙결점은 Beckmann법⁽⁷⁾에 의해 열평형 온도대를 외삽하여 결정하였으며, 표면열전달계수는 Creed와 James⁽⁸⁾의 총괄열전달계수의 산출을 위한 transient temperature method를 적용하였고, 비열은 빙결점 이상의 온도에서는 Siebel⁽⁹⁾의 실험식에 의해, 빙결점 이하

의 온도에서는 Yano⁽⁹⁾의 실험식으로 산정하였으며, 잡열은 Woolrich⁽¹⁰⁾의 실험식으로, 동결-동안 제거되는 전열량은 시료의 초기온도와 최종동결온도사이의 total enthalpy 차를 이용하였고, 열전도도를 추정하기 위해 열확산율을 측정하여 $k = \alpha \cdot \rho \cdot Cp$ 식 (여기서 α =열확산율(m^2/hr), ρ =밀도(kg/m^3), Cp =비열($\text{J}/\text{m}^3\text{C}$)으로 산출하였다. 그리고 수분은 상압가열 건조법으로 측정하였다.

결과 및 고찰

동결에 의한 체적변화

순수한 물이 동결하여 0°C 의 얼음으로 될 때, 미동결시의 체적을 기준으로 8.75%정도 팽창하므로 물이 주성분인 신선식품을 동결시키면 체적은 당연히 팽창하게 될 것이다. 따라서 본 실험에서는 우육을 대상으로 동결중의 체적변화를 살펴보기 위하여 에칠알콜을 저온매체로 사용하여 측정한 결과, Fig. 1에서 보는 바와 같이 우육의 비중은 동결온도가 낮아짐에 따라 체적이 증가하여 $-20 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 에서 0.94217로 나타났으며, 이 때의 체적변화는 6.33% 증가하였다. 이는 Mascheroni & Calvelo⁽⁶⁾가 제안한 우육의 빙결점이하에서의 밀도 계산식에 의한 값, $992.20 \text{ kg}/\text{cm}^3$ 에 비하여 약 5%정도의 오차를 나타내었다.

동결, 냉동냉장 및 해동 중의 내부압력 변화

일반적으로 식품은 동결 시 표면부가 먼저 얼어서 주위를 단단하게 덮은 후 점차적으로 내부의 수분이 빙결되며 이 때 체적팽창을 일어키면서 표면의 동결부에 막혀 팽창을 하지 못하면 식품내부에서 압력이 발생된다고 보고되고 있다⁽¹¹⁾. 이를 확인하기 위하여 종류수를 동결 및 해동 하였을 때의 내부압력을 측정한

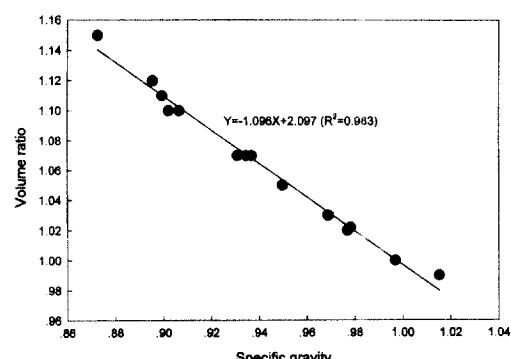


Fig. 1. Specific gravity-volume ratio during freezing on beef.

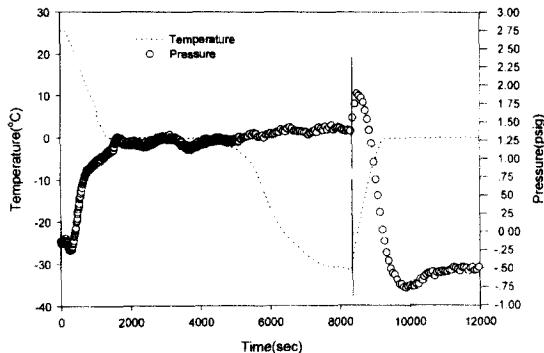


Fig. 2. Changes of pressure and temperature during freezing and thawing on distilled water.

결과, Fig. 2에서 보는 바와같이 초기온도에서는 온도가 내려감에 따라 내부압력은 일시적으로 증가하다가 감소한 후 즉시 0°C부근 까지 증가함을 보여 주었다. 0°C이하에서는 온도가 하강함에 따라 내부압력의 변화는 거의 같은 수준으로 일정하게 나타났다. 이는 일 반적으로 0°C의 순수한 물이 얼어서 0°C의 얼음으로 변화할 때의 체적팽창과 이후의 온도강하에 따른 체적변화 이론과 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고 동결속도에 따른 내압을 비교한 결과, Fig. 3에서 보는 바와같이 급속동결시의 침지식이나 완만동결시의 정지공기식의 내부압력 변화의 경향은 동결직전에는 약 10~11 psig 정도까지 급격히 상승한 후 동결 초기부터 최대빙결정생성대를 통과하는 동안은 급격히 감소하다가 다시 온도가 내려감에 따라 압력변화는 약 2 psig 크기의 수준으로 증가와 감소를 반복하여 상승하는 경향을 보여 주고 있으며 동결동안의 내부압력 크기는 약 8~10 psig 수준으로 이러한 내부압력의 변화

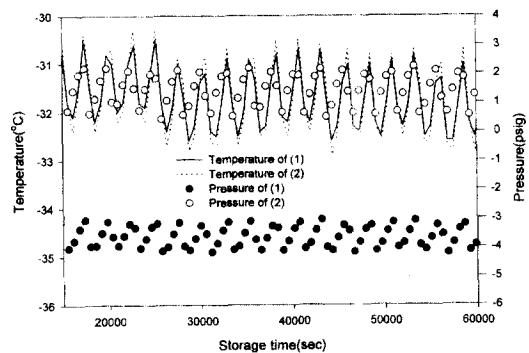


Fig. 4. Changes of internal pressure and temperature during frozen storage on pork. (1) weight=351.0 g, thickness=4.5 cm. (2) weight=536.8 g, thickness=7.0 cm

경향은 정지공기식보다 침지식에서 약 1 psig 정도 크게 나타내었다. Fig. 4는 동결돈육의 냉동냉장 동안에 일어나는 내부압력으로 상하변동은 저장기간 중에서도 약 1~2 psig 범위에서 반복하여 일어나고 있음을 볼 수 있으며, 고내온도의 온도변화에 따라 품온의 온도차가 ±1°C의 오차를 보일 때, 중량이 큰 시료에서는 2.32 psig, 중량이 적은 시료에서는 1.84 psig정도의 내부압력 차가 발생됨을 알 수 있었다. 그리고 해동시의 온도상승에 따른 내부압력 변화는 Fig. 5에서 보는 바와같이 내부압력은 해동개시 후 즉시, 급격히 상승하여 5분이내에 최고 압력에 달하며, 그 이후에는 온도상승과 더불어 점차 떨어진 후 -1~-5°C범위에서부터 일정한 압력을 유지하다가 0°C부근에서 0 psig에 접근하게 된다. 한편, Table 1, 2 및 3은 동결, 냉동냉장 및 해동시의 처리조건에 따른 내부압력을 측정한 것으로, Table 1에서 보면 -70°C 동결시에 체적팽창 및 수

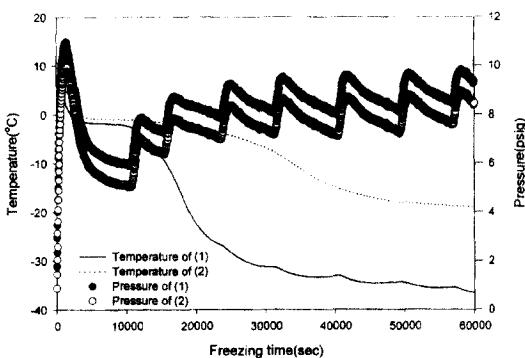


Fig. 3. Changes of internal pressure and temperature on beef without thermal equalized freezing. (1) weight=485 g, thickness=6.2 cm, immersion freezing, (2) weight=465 g, thickness=6.0 cm, still-air freezing.

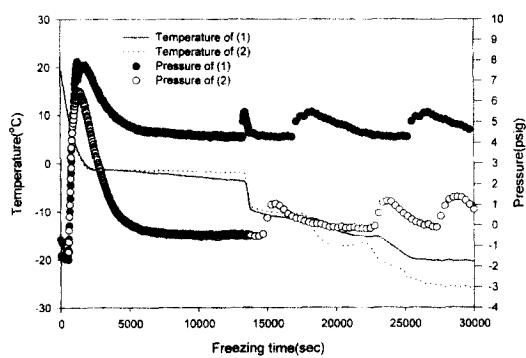


Fig. 5. Changes of internal pressure and temperature on beef with thermal equalized freezing. (1) weight=65.4 g, thickness=1.0 cm, immersion freezing, (2) weight=68.8 g, thickness=1.4 cm, still-air freezing.

Table 1. Internal pressure and material temperature during freezing

Expt. No.	Freezing temp. (°C) and methods	Materials	Initial temp. (°C)	Dimensions		Max.		Min.		Difference (psig)	Freezing time ²⁾ (min)
				Weight (g)	Size (cm)	I. P. ¹⁾ (psig)	Temp. (°C)	I. P. ¹⁾ (psig)	Temp. (°C)		
1	-70 Still-air	Beef	10.0	375.0	10.0×9.5×5.0	0.3	9.8	-12.05	-63.5	12.35	93.3
2	-50 Air-blast		6.0	175.0	10.5×5.5×4.5	-0.02	1.3	-6.71	-35.9	6.73	52.8
3	-40 Immersion		20.1	324.9	10.0×9.0×5.0	0.53	-26.0	-1.27	1.3	1.80	107.8
4	-70 Still-air	Pork	11.5	527.6	11.5×10.0×7.5	0.33	11.5	-8.38	-57.0	8.71	189.5
5	-70 Still-air		12.0	268.6	10.0×7.0×4.5	0.85	11.1	-6.19	-53.1	7.04	136.7
6	-40 Immersion		10.1	242.4	10.0×8.5×4.5	0.51	-25.2	-1.48	-1.2	1.99	87.4
7	-40 Immersion		7.9	162.8	12.0×8.0×2.5	-0.11	7.3	-6.04	-26.8	5.93	227.3
8	-50 Air-blast		6.7	536.8	14.5×7.8×7.0	-0.11	6.7	-5.20	-32.8	5.09	104.7
9	-50 Air-blast		6.5	254.1	12.5×7.5×3.0	0.22	6.5	-3.85	-32.2	4.07	143.7

¹⁾Internal pressure.²⁾Time taken for center to reach -18°C.**Table 2. Internal pressure and material temperature during frozen storage**

Expt. No.	Freezing temp. (°C) and methods	Materials	Dimensions		Max.		Min.		Difference (psig)
			Weight (g)	Size (cm)	I. P. ¹⁾ (psig)	Temp. (°C)	I. P. ¹⁾ (psig)	Temp. (°C)	
1	-70, Still-air	Beef	375.0	10.0×9.5×5.0	-1.74	-62.1	-2.05	-60.0	0.34
2	-50, Air-blast		175.0	10.5×5.5×4.5	-3.46	-31.3	-6.66	-35.5	3.20
3	-40, Immersion		324.9	10.0×9.0×5.0	0.53	-26.0	-0.97	-26.8	1.50
4	-70, Still-air	Pork	527.6	11.5×10.0×7.5	-8.19	-56.8	-8.38	-57.0	0.19
5	-70, Still-air		268.6	10.0×7.0×4.5	-4.96	-57.1	-5.65	-56.0	0.69
6	-50, Air-blast		536.8	14.5×7.8×7.0	-3.05	-30.7	-4.89	-34.9	1.84
7	-50, Air-blast		254.1	12.5×8.5×3.0	-0.72	-31.6	-2.74	-34.7	2.02
8	-40, Immersion		242.4	10.0×8.5×4.5	-1.74	-62.1	-2.05	-60.0	0.31
9	-40, Immersion		162.8	12.0×8.0×2.5	-4.83	-29.8	-5.81	-29.1	0.98

¹⁾Internal pressure.**Table 3. Internal pressure and material temperature during thawing**

Expt. No.	Freezing temp. (°C) and methods	Materials	Initial temp. (°C)	Dimensions		Max.		Min.		Difference (psig)	Thawing time ²⁾ (min)
				Weight (g)	Size	I. P. ¹⁾ (psig)	Temp. (°C)	I. P. ¹⁾ (psig)	Temp. (°C)		
1	-70, Still-air	Beef	-63.3	375.0	10.0×9.5×5.0	5.34	-50.4	-11.89	-63.3	17.23	136.7
2	-50, Air-blast		-31.9	175.0	10.5×5.5×4.5	0.51	-23.3	-5.12	-31.9	5.63	61.3
3	-40, Immersion		-26.9	324.9	10.0×9.0×5.0	2.25	5.2	-14.8	-5.8	17.05	56.9
4	-70, Still-air	Pork	-57.0	527.6	11.5×10.0×7.5	2.30	-51.2	-10.48	-9.1	12.78	261.4
5	-70, Still-air		-57.0	268.6	10.0×7.0×4.5	3.81	-42.1	-4.97	-57.0	8.78	167.6
6	-40, Immersion		-27.7	242.4	10.0×8.5×4.5	0.96	-25.5	-14.3	-5.1	15.26	104.7
7	-40, Immersion		-29.3	162.8	12.0×8.0×2.5	-4.10	-18.9	-6.83	-0.96	2.73	85.0
8	-50, Air-blast		-30.7	536.8	14.5×7.8×7.0	0.87	-25.6	-10.63	2.3	11.50	77.0
9	-50, Air-blast		-30.7	254.1	12.5×7.5×3.0	3.58	-23.7	-4.78	1.0	8.36	192.4

¹⁾Internal pressure.²⁾Time taken for center to reach +1°C.

축에 따른 내부압력차가 가장 크게 나타나며, -40°C의 동결에서 가장 적게 나타나 동결온도가 낮을수록 내압의 크기는 크다는 것을 알 수 있었다. 또한, 돈육의 경우도 우육과 마찬가지로 -70, -50 및 -40°C의 순으로

내압의 차이를 보였다. 또한 Table 3에서 보면, 우육 및 돈육의 해동시 침지식에 의해 급속동결처리한 시료가 체적팽창 및 수축에 의한 내부압력의 차가 다른 처리조건 보다 크게 나타나는 것이 특징적이며, 동결

Table 4. Comparison of freezing time between non-thermal equalizing and thermal equalizing

Sample	Initial temp. (°C)	Freezing temp. (°C) and methods	Width (m)	Thickness (m)	Average thickness ¹⁾ (m)	Freezing time(min)		Difference (%)
						Thermal equalizing	Non-thermal equalizing ²⁾	
Beef	10.7	-20 Still-air	0.105	0.095	0.09975	817.8	899.83	-9.12
	13.6	-50 Air-blast	0.05	0.02	0.02857	54.7	57.87	-5.48
	20.1	-40 Immersion	0.09	0.05	0.06429	107.8	117.91	-8.57
Pork	13.1	-70 Still-air	0.11	0.04	0.05867	147.6	155.10	-4.84
	10.1	-40 Immersion	0.085	0.04	0.05440	87.4	113.19	-22.78
	7.9	-40 Immersion	0.11	0.05	0.05310	109.0	146.35	-25.52
	6.5	-50 Air-blast	0.075	0.03	0.04286	83.8	94.12	-10.96

¹⁾By equation ($=2w^*d/(w+d)$, w=width, d=thickness).²⁾Computed value by Hung & Thompson (1983).

시에 발생한 내부압력이 적을수록 해동시에 일어나는 내부압력의 크기도 상대적으로 적게 나타날 뿐만 아니라, 해동시에 발생한 내부압력의 값은 동결시의 내부압력 값보다도 대부분 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 내부압력이 (+)로 나타나는 것은 동결초기의 수축이 동결에 따른 체적팽창보다 크며, (-)로 나타나는 것은 체적팽창이 수축보다 크기 때문이며, 동결온도가 -20°C수준 이하에서 (+)로 변환하는 것은 동결에 의한 팽창이 거의 정지되기 때문이다⁽⁵⁾. 이와같은 결과에서 미루어 볼 때, 동결속도에 따른 내부압력 발생 크기는 우육 및 돈육에서는 대체로 -70°C의 정지공기식 및 -40°C의 침지식에서는 체적팽창에 따른 내부압력이 발생되며, 식품내부의 파괴는 내부압력이 비교적 큰 (+)값의 경우에 생길 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 이는 동결속도가 빨라 피동결체의 외부에서 중심으로 동결이 진행되는 동안 생성되는 빙결점이, 내부의 미동결 부분에서의 동결로 인해 생기는 체적팽창을 억제하므로써 피동결체 전체가 팽창할 수 없게 되어 팽창압에 상당하는 압력이 피동결체의 내부에서 발생하기 때문이다. 이와같이 피동결체의 내부에서 발생한 팽창압은 동결 진행과 동시에 증가하여 동결한 식품의 표면에서 균열 또는 융기가 생기는 것으로 추측되고 있다^(12,13). 따라서 동결중에 발생하는 내압을 발산시킬 수 있다면 동결에 의한 식품의 변형 및 파괴를 막을 수 있을 것으로 여겨진다.

균온처리에 의한 내부압력

앞에서 살펴본 바와같이 식품의 동결중에 일어나는 내부압력은 일반적으로 식품의 종류, 크기 및 동결방법에 따라 다르며 주로 수분함량이 많고 두께가 두꺼운 식품을 급속동결하면 발생되는 내압도 크고 균열도 심하다. 따라서 동결 중에 품온을 일정시간 유지하면서 단계적으로 품온을 낮추는 처리방법인 균온처리

는 동결 중에 발생하는 내압을 줄이기 위하여 동결시 균온처리 및 균온처리하지 않은 우육에 있어서의 내부압력을 비교한 결과, Fig. 3에서 보는 바와같이 균온처리하지 않은 동결에 있어서는 급속동결시의 침지식이나 완만동결시의 정지공기식의 내부압력 변화의 경향은 동결직전에는 급격히 상승한 후 동결 초기부터 최대빙결정생성대를 통과하는 동안은 급격히 감소한 후 다시 온도가 내려감에 따라 압력변화는 약 2 psig 크기의 수준으로 증가와 감소를 반복하여 상승하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 균온처리한 우육은 Fig. 5에서 보는 바와같이 균온처리하지 않은 우육의 경우와 마찬가지로 내부압력의 진행 경향은 유사하지만 동결직전에 약 6~8 psig 정도의 최고 압력을 보이다가 동결초기 이후부터 최종 동결까지 약 1~2 psig 수준으로 거의 일정하게 나타났으며, 내부압력의 크기도 1~4 psig 수준으로 균온처리하지 않은 경우에 비하여 상당히 낮게 나타났다. 또한, 해동시에 있어서도 균온처리한 시료의 내부압력 크기가 균온처리하지 않은 내부압력 크기보다 상대적으로 적게 나타났으며,

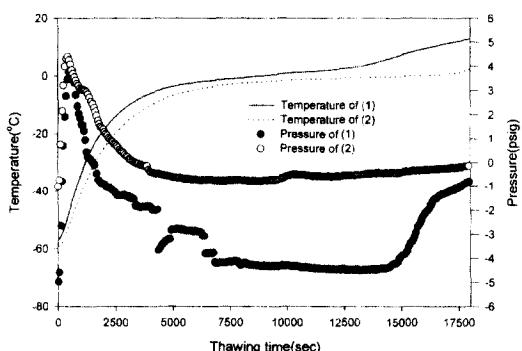


Fig. 6. Changes of internal pressure and temperature during thawing on frozen pork. (1) without thermal equalizing, (2) with thermal equalizing.

해동후 -10°C] 후에는 내부압력이 거의 0 psig 수준으로 거의 일정하게 나타났다(Fig. 6). 그리고 Table 4에서 보는 바와같이 처리조건별에 따른 동결소요시간을 살펴보면 균온처리한 시료는 균온처리를 하지 않은 것에 비하여 동결소요시간이 약 10~20% 정도 짧게 나타나 냉동창고의 운영에 있어 에너지 절약 및 경비 면에 있어 상당한 효과가 있을 것으로 여겨진다.

요 약

식품동결에 의한 품질손상에 있어 크게 영향을 미치는 인자중의 하나가 체적변화에 의한 조직 파괴이므로 본 연구에서는 압력변환기를 사용하여 식육의 동결, 냉동냉장 및 해동시에 일어나는 내부압력을 조사하였다. 그 결과, 우육은 -20°C 에서 밀도는 942.17 kg/cm^3 으로, 체적은 6.33% 증가하였으며, 급속 및 완만동결시 우육의 내부압력 변화 경향은 동결 직전에 급격히 상승한 후 동결 초기부터 최대빙결정생성대를 통과하는 동안은 급격히 감소하다가 다시 온도가 내려감에 따라 압력변화는 증가와 감소를 반복하여 상승하는 경향을 보여 주었고, 동결시의 내부압력 크기는 약 8~10 psig 수준이며, 내부압력의 변화 경향은 정지공기식보다 침지식에서 약 1 psig 정도 크게 나타났다. 냉동냉장시에 일어나는 내부압력의 상하변화는 돈육의 품온차가 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 일 때, 시료중량에 따라 1.84~2.32 psig 정도의 내부압력 차가 반복적으로 발생됨을 알 수 있었다. 또한, 돈육의 해동시 내부압력은 해동 개시 후 급격히 상승하여 5분 이내에 최고압력에 도달한 이후에는 서서히 하강하였으며, 해동시에 발생한 내부압력의 값은 동결시의 내부압력 값보다도 대부분 크게 나타났다. 또한, 균온처리한 우육의 동결시 내부압력 값은 약 1~4 psig 수준으로 균온처리하지 않은 우육에 비하여 매우 적게 나타났으며, 동결소요시간도 약 10~20% 정도 짧게 나타났다.

문 현

- Ogawa, Y.: Studies on gape and heave of foodstuffs due to internal pressure during freezing. *Trans. JAR*, **4**(2), 81-92 (1987)
- Miles, C.A. and Morley, M.J.: Measurement of internal pressures and tensions in meat during freezing, frozen storage and thawing. *J. Food Technol.*, **12**, 387-402 (1977)
- Ogawa, Y.: Studies on gape and heave of foodstuffs due to internal pressure during freezing. *Trans. JAR*, **4**(3), 81-88 (1987)
- Ogawa, Y.: Studies on gape and heave of foodstuffs due to internal pressure during freezing. *Trans. JAR*, **5**(2), 21-32 (1988)
- Ogawa, Y.: Studies on rupture of fish body during freezing. *Trans. JAR*, **13**(1), 37-47 (1996)
- Hung, Y.C. and Thompson, D.R.: Freezing time prediction for slab shape foodstuffs by an improved analytical method. *J. Food Sci.*, **48**, 555-560 (1983)
- Henningson, R.W.: Thermister cryoscopy in the food industry. *Food Technol.*, **21**, 28-31 (1967)
- Creed, P.G. and James, S.J.: Heat transfer during the freezing of liver in a plate freezer. *J. Food Sci.*, **50**, 285-288 (1985)
- Jeong, J.W.: Freezing time prediction of slab shape foodstuffs by modification of plank's equation. Ph. D. Thesis, Natioal Fisheries Univ. of Pusan, Korea (1989)
- Woolrich, W.R.: Specific and latent heat of foods in the freezing zone. *ASHRAE J.*, 43-47 (1966)
- Sanz, P.D. and Alonso, M.D.: Equations for the prediction of thermophysical properties of meat products. *Latin American Applied Research*, **19**, 155-163 (1989)
- Ogawa, Y. and Hagura, Y.: Measurement of young's modulus and poisson's ratio of tuna fish. *Trans. JAR*, **9**(3), 283-290 (1992)
- Munro, P.A.: The tensile properties of frozen and thawed lean beef. *Meat Science*, **8**, 43-61 (1983)
- Grujic, R., Petrovic, L., Pikula, B. and Amidzic, L.: Definition of the optimum freezing rate. *Meat Science*, **33**, 301-318 (1993)

(1999년 1월 21일 접수)