

진공장치를 이용한 동결어류의 해동에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on Thawing of Frozen Fish by the Vacuum System

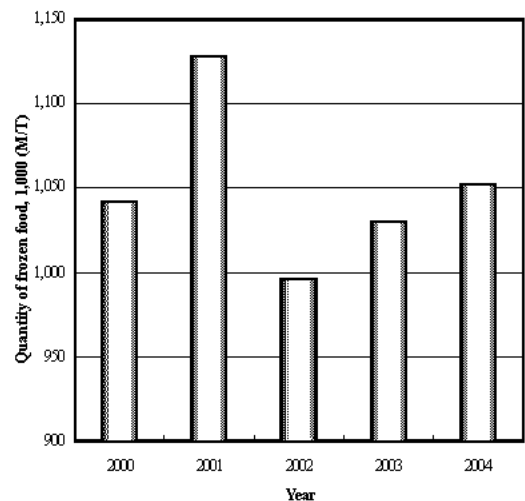
최현규 · 최순열
H. K. Choi and S. Y. Choe

Key Words : Frozen Fish(동결어류), Thawing Curve(해동곡선), Frozen Food(동결식품)

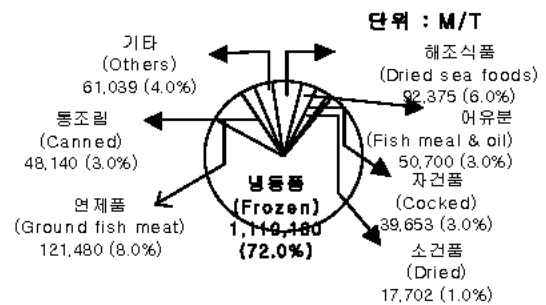
Abstract : The maintenance of continuity on food processing has created a need for the rapid reinstatement of many types of frozen fish to an ambient temperature and good condition. A number of thawing methods are in current use have also several disadvantages in thawing time, discoloration mass loss caused by drying, capital and running cost. These damages are, it is claimed, either eliminated or improves by the vacuum system. An experimental study on the thawing for hair tail and Yellow croaker by the vacuum system were carried out. The Yellow croaker thawing time with this vacuum system took out 170 minutes to reach from -10.3°C to -0.8°C at 20mmHg abs. and hair tail thawing time 220 minutes to reach from -12.2°C to 0°C at 20mmHg abs.

1. 서 론

최근 식품의 보존수단으로 식품을 냉동하는 방법이 광범위하게 이용되고, 이로 인하여 냉동기술의 발달이 이루어 졌다. 최근 식품공업에 있어서는 식품의 가공원료로서, 양적으로나 질적으로 안정적인 공급을 냉동식품에 의존하는 비율이 크게 늘어나고, 이러한 경향은 우리나라 식량생산의 동향에서 살펴 보면 앞으로 더욱 더 증가할 것으로 예상된다. 동결 상태에 있는 식품을 사용할 경우, 일반적으로 해동할 필요가 있으며 이 해동방법이 적절하지 않으면 좋은 품질의 식품을 얻는 것이 어렵다. 따라서 이러한 요구사항을 만족시키기 위해 냉동식품을 취급하는데 있어서는 냉동 공정과 마찬가지로 해동공정도 중요한 요소이다^{1,2)}. 먼저 Fig. 1의 우리나라 냉동식품(수산가공품)의 현황을 살펴보면, (a)의 냉동식품의 연도별 생산량에서 보듯이 2001년도에는 113만 톤이었던 것이, 2002년도에는 100만톤이하로 감소되었다가, 2003년도부터 증가추세로 돌아서고 있다. (b)의 품목별 수산가공품 생산량에서 보면 냉동식품이 차지하는 비율이 72.0%로 최근에는 양적으로나



(a) Yearly production of frozen food



(b) Production value for processed marine product of article

Fig. 1 The fact of processed marine product

접수일 : 2005년 11월 21일
최순열(책임저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학
E-mail : sychoe@kunsan.ac.kr Tel. 063-469-1844
최현규 : 군산대학교 동력기계시스템공학

질적으로 안정적인 공급을 냉동식품에 의존하는 비율이 크게 늘어나고, 이러한 경향은 앞으로 더욱 더 증가할 것으로 예상 된다^{2,4)}.

공장용 해동장치의 국·내외 기술동향은 국내에서 개발하여 사용 중인 장치는 아직 없으며, 영국 및 일본에서 Table 1과 같은 원리들을 이용한 여러 가지 형태의 제품들이 개발 사용되고 있는데, 최근 환경문제와 에너지절약 차원에서 주로 일본으로부터 수입이 개시되고 있다.

해동장치를 해동 량의 처리규모에 따라 분류하게 되면 공장용의 대용량 장치 그리고 슈퍼 식당 호텔 등의 업무용인 중규모, 가정용의 소규모 해동장치로 분류할 수 있다. 해동장치를 해동방법에 따라 분류하면 Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

이러한 동결수산물의 대형 공장용 해동장치를 자세히 살펴보면 공기를 이용한 해동법으로 정지중인 공기, 공기브라스트 형, 가압에어 브라스트형을 이용하는 방법이 있는데, 특히 따뜻한 공기를 이용하는 방법은 해동 중에 부패가 촉진되고, 파리가 모이게 된다.

Table 1 Distribution of melting method

분류	처리 규모	대규모 해동장치 공장용	중규모 해동 슈퍼, 공장	소규모 해동장치 가정
공기를 이용한 해동장치		정지공기형	공기 브라스트형	가압 에어 브라스트형
물을 이용한 해동 장치		물침지형 1.유수형 2.발포형 3.가압형	스프레이형	수증기형 1.상압형 2.감압형 (진공해동)
접촉식 해동장치				
전기식 해동장치		전기 저항형		전기가열형 1.마이크로파형 2.초단파형
조합형 해동장치				

감압진공법(減壓眞空法)은 저압 포화증기를 이용하여 해동하는 방법으로, 증발잠열을 이용하므로 장치가 작고, 증발에 필요한 에너지만을 소모하며, 해동속도가 매우 빠른 장점이 있다.

전기적인 해동법은 소량의 해동을 위하여 마이크로파를 이용하거나, 동결 생선의 양단에 전극을 이용하여 직접 발열시켜 해동하는 방법으로, 실험 연구를 위하여 소량을 해동할 경우 이용하는 방법이다.

단파(3~27MHz), 초단파(27~300MHz), 극초단파(300~3,000MHz)의 전자파를³⁾ 이용하여 해동하는 방법은 전파 자체의 깊이가 깊어질수록 급격히 전자파의 출력 에너지가 감소하고, 코너부 등에서는 어육이 익거나 타는 상태가 되므로 대량의 수산물 처리에는 적합하지 못하다.

본 연구에서 사용한 해동방법은 감압진공해동 법으로서, 원통형 용기내를 10~25 mmHg abs.의 진공압력으로 유지함으로써, 어육 제조용 동결식품의 해동 최적온도인 10~25℃에서 물을 증발시켜 증발과 응축을 되풀이하는, 소위 상변화 열전달을 이용하여 해동하는 방법이다. 이와 같은 해동법은 유수해동(流水解凍)과 같은 정도의 해동속도를 갖고 있으며, 폐수의 배출이 극히 억제되고, 에너지 절약형이며, 매우 위생적인 특징이 있다. 이와 같은 감압진공 해동장치는 1970년대 초 영국에서 개발되어, 일본에서는 1980년대에 상용화가 이루어져 1회 처리용량 115 kg~2ton 규모의 해동장치가 진공기기 메이커 2개사에 의하여 생산되고 있다. 이에 비하여 우리나라에서는 동결식품을 대기 중에 방치하거나, 40~50℃의 온풍을 이용하여 해동함으로써 부패의 우려를 동반하는 공기해동법을 이용하는 낙후된 기술수준이다.

수협중앙회에서 유수형(流水形)의 해동장치를 일본으로부터 수입하여 어육공장 및 기타 수산물 위판장에 보급중이다⁴⁾.

2. 실험장치와 실험방법

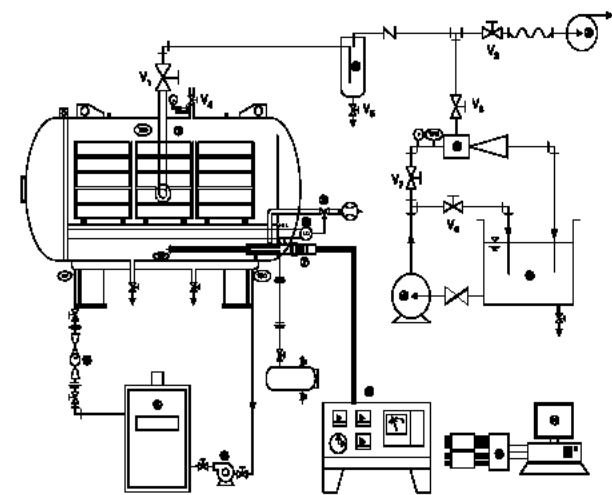
Fig. 2는 진공실험장치의 배치도를 나타내었다. Vacuum chamber는 $\varnothing 1,000 \times 1,220$ mm인 원통형 용기이며 고기상자 5개가 들어가는 Tray가 들어갈 수 있다. 하부에는 자켓으로 되어 물이 흐르도록 되어있는데 거기에 히터 2kw 2개 4kw 2개를 설치하여 온도조절이 가능하도록 하였다, Vacuum unit용 진공펌프로서는 수구동 기체흡입 Ejector와 진공펌프를 설치하여 진공해동에 맞는 최적의 추기장치가 될 수 있도록 하였다. 순환펌프(circulation pump), 레벨게이지(level gauge), 수량계(flowmeter), 각 부의 온도 및 압력을 실시간 측정하기 위한 온라인 측정장치(on-line measuring unit) 등으로 구성하였다. 그리고 내부의 상황을 볼 수 있도록 $\varnothing 200$ 의 관찰 창을 설치하였다.

해동원리는 진공상태에서 발생한 수증기의 응축잠열을 냉동어육에 공급하면서^{5,6)} 해동하는 것이며

실험방법은 진공용기 내부의 온도와 진공압력과 상관계가 있는 것을 이용하고 진공용기의 저부에 가득 채워진 물의 온도를 측정하면서 진공압력을 제어하는 방법이다.

실험재료의 중심과 위쪽 그리고 오른쪽 중앙부에 온도 센서를 설치하고 주위에 압력센서를 설치하여 포화온도 10~25℃에서 해동과정에서 동결어류 중앙부의 온도분포, 해동속도, 열프릭스 등을 온라인 계측 하였다.

실험에서는 모든 측정 항목이 컴퓨터를 이용하여 측정과 기본분석이 자동으로 이루어지도록 하였다. 실험에 사용된 시료는 영하 30~40℃ 상태로 냉동된 생선을 택하였다.



- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| ① Vacuum chamber | ② Rotary type oil vacuum pump |
| ③ Water jet air ejector | ④ Driving pump |
| ⑤ Boiler | ⑥ Circulation pump |
| ⑦ Electric heater | ⑧ Level gauge |
| ⑨ Solenoid valve | ⑩ Flowmeter |
| ⑪ Water tank | ⑫ Vapor/water separator |
| ⑬ Data logger | ⑭ Personal computer |
| ⑮ Control panel | |

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

어묵 제조에 사용되는 갈치, 조기를 맛과 선도가 유지되는 10~25℃ 전후에서 진공장치로 해동을 실험하였다.

3. 가열온수의 열 설계

Jacket를 통하여 진공용기 내부로 공급되는 열량을 계산하기 위해서는 경계조건에 해당하는 미지의 값인 전열면의 표면온도나 표면에서의 대류 열전달 계수 h 값을 알아야 한다.

따라서 Fig. 3에서 보는 바와 같이 Jacket 내부

를 흐르는 가열수에 의하여 강제대류가 일어나는 부분에 대하여는 Dittus-Boelter식을 이용하여 계산하였고, 진공용기내부의 자연대류가 일어나는 부분에 대하여는 McAdams식을 이용하여 계산하였다.

Fig. 3에서 보는 것처럼 Jacket 내부를 흐르는 가열수에 의하여 강제대류가 일어나는 부분에 대하여는 Dittus-Boelter의 식(1)을 이용하여 계산하였다⁷⁾.

$$N_{D} = 0.023 Re_{D}^{0.8} Pr^{0.3} \quad (1)$$

식(1)은 온도차 $T_s - T_m$ 에 대하여만 사용되어야 하며, 모든 물성치들은 Jacket 내부를 흐르는 가열수의 입, 출구온도의 평균값인 T_m 에서 평가된다. 이때 Re_D 의 계산에서 수력학적 직경 (Hydraulic diameter) D 는 다음 식과 같이 정의되며, A_c 는 유동단면적 P 는 접수주변길이(Wetted perimeter)이다.

$$D = \frac{4 A_c}{P} \quad (2)$$

진공용기내부의 자연대류가 일어나는 부분에 대하여는 McAdams의 식(3)을 이용하여 계산하였다⁸⁾.

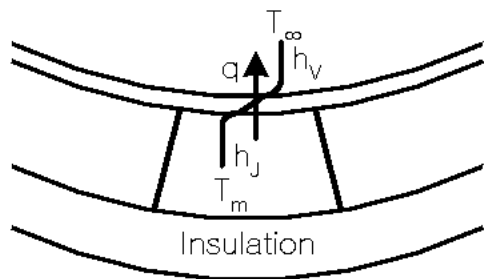


Fig. 3 A cross section of jacket

$$Nu = 0.15 Ra_L^{1/3} (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}) \quad (3)$$

여기서 Ra_L 는 Raleigh수로 식(4)과 같이 정의된다. 또한 상관식에서 기준이 되는 특성길이를 변경함으로써 더 개선된 정확도를 얻을 수 있으며, 그 특성길이는 식(5)과 같다.

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_{\infty}) L^3}{\nu \alpha} \quad (4)$$

$$L = \frac{A_s}{P} \quad (5)$$

여기에서 A_s 는 평판의 면적이며, P 는 면적에 대한 둘레의 길이이다. 외부에 Jackets이 있는 열교환기에서 열전달은 다음과 같은 식이 성립된다.

$$Q = U A \Delta T_{LM} \quad (6)$$

여기에서, 총괄열전달계수 U 는 식(7)과 같은 5개의 열저항으로 결정되며, 내부와 외부의 열전달 면적이 거의 비슷한 경우, 즉 진공용기의 두께에 비해 직경이 큰 거의 모든 Jacket type 열교환기에 적용 된다^{9,10}.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_v} + f_v + \frac{x}{k_v} + f_j + \frac{1}{h_f} \quad (7)$$

h_v : 진공용기의 내부 자연대류 열전달계수
[kcal/m²hr°C]

f_v : 진공용기의 내부 오염계수 [m²hr°C/kcal]

x : 진공용기의 두께 [m]

k_v : 진공용기의 열전도도 [kcal/mhr°C]

f_j : Jacket의 외부 오염계수 [m²hr°C/kcal]

h_f : Jacket 내부 강제대류 열전달계수 [kcal/m²hr°C]

또한 ΔT_{LM} 은 진공용기와 Jackets의 입, 출구 온도차는 로그평균온도차(LMTD, Log Mean Temperature Difference)이다.

여기에서는 진공용기 내부 물의 온도는 T_w 로 정하고, Jackets 내부를 흐르는 가열수의 온도가 입구는 T_{k1} , 출구는 T_{k2} 이므로, ΔT_{LM} 은 다음과 같다.

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (8)$$

$$\Delta T_2 = T_w - T_{k2} \quad (9)$$

$$\Delta T_1 = T_w - T_{k1} \quad (10)$$

진공해동장치를 장시간 운전하게 되면, 진공용기 내부 물이나 Jacket 내부를 흐르는 가열수내에 용해된 각종 성분이 분리되거나 유체 중에 함유된 부유물 또는 이물질 등이 내 외면에 침적되어 스케일이 형성된다. 이는 전열효과를 현저히 저하시키므로 전열관의 열 설계 시에는 스케일, 즉 오염물질

의 영향을 반드시 고려하여야 한다. 이를 오염계수로 정의하며, 열 저항에 부가되어 이를 증가시키는 원인이 된다. 일반적으로 오염계수는 유체의 물성치, 온도, 유속, 전열관의 재질, 표면의 가공 상태 및 운전시간에 의하여 변하는 것으로 알려져 있다.

진공용기 내부의 물이나 Jacket 내부를 흐르는 가열수의 온도가 50 °C 이하일 경우에는 유속에 관계없이 오염계수가 0.0002 m²hr°C/kcal이므로 본 연구에서는 이 값을 열설계시 사용하였다¹⁰.

4. 실험결과

조기와 갈치를 해동실험한 결과를 Table 2에 나타내었으며, 표에서 알 수 있는 바와 같이, 각 동결 어류의 크기, 무게변화, 해동온도(수증기온도), 동결 어류의 초기온도(온도는 시료 최대 두께부의 중심 온도를 측정), 해동후의 온도, 해동에 필요한 시간을 알 수 있었다.

크기 360W×590L×150H mm, 무게 20kg의 조기 불럭을 가열수 온도 22°C에서 해동하면서 초기온도의 변화와 해동완료시간을 산출하였고, 동결어류의 상태를 확인하였다.

Table 2 Data of vacuum thawing

Material	Size (mm)	Weight		Steam temp. °C	Initial temp. °C	Final temp. °C	Time min
		Initial	Final				
		kg					
Yellow croaker	360×590×150	20	18	22	-10.3	-0.8	170
Hair tail	360×590×150	20	18.2	22	-12.2	0.0	220

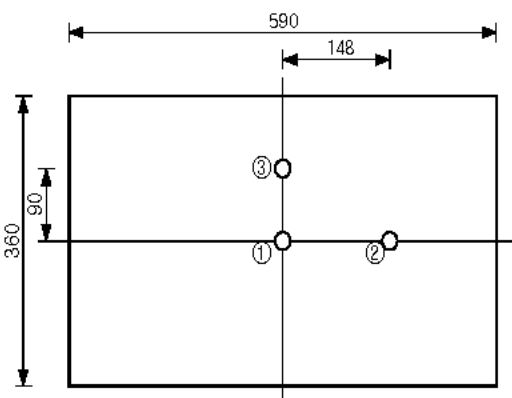


Fig. 4 Position of temperature measurement

Fig. 4는 시료의 온도측정 위치를 나타낸 것으로서, 측정위치 ①은 시료의 가장 두꺼운 부위의 중심부위이며, 측정위치 ②는 중심부로부터 오른쪽으로 148mm 떨어진 곳이다. 그리고 측정위치 ③은 중심부에서 위쪽으로 90mm 떨어진 곳에 위치하며, 각 측정위치는 깊이방향으로 80mm에서 온도를 측정하였다. 중앙 ①의 위치에서 측정한 온도로서 해동의 완료여부를 판단하였다.

조기에 대하여 진공압력 20mmHg abs. 가열수 온도를 22℃로 유지하여 해동한 결과, 시료의 가장 두꺼운 부분의 중심온도인 측정위치 ①의 온도가 -10.3℃에서 -0.8℃까지 상승하는데 170분이 소요되었으며 측정위치 ①, ②, ③에서의 온도변화를 Fig. 5에 나타내었다. 또한 무게변화는 실험결과 비교해서 2kg 줄어든 것을 확인하였는데 이는 얼음만 녹고 시료자체의 무게변화는 거의 없음을 나타낸다.

이 해동은 자연공기해동과 병행해서 실시해 본 결과, 자연공기해동은 시간이 30~40시간 걸릴 뿐만 아니라 장시간 해동함으로써 표면이 건조해져 품질이 떨어지는 현상을 보였지만, 진공장치를 이용하여 해동하였을 경우는 이런 현상을 보이지 않았고 품질을 살펴보았을 때 외관, 신선도, 색상에 있어서 선어의 상태에 가까워 해동 후의 상태는 매우 우수함을 알 수 있었다.

갈치에 대하여 진공압력 20mmHg abs., 가열수 온도를 22℃로 유지하여 해동한 결과 시료의 가장 두꺼운 부분의 중심온도인 측정위치 ①의 온도가 -12.2℃에서 0.0℃까지 상승하는데 220분이 소요되었으며, 측정위치 ①, ②, ③의 온도변화를 Fig. 6에 나타내었다. 갈치의 무게변화에 있어서는 1.8kg의 무게 변화를 보였다.

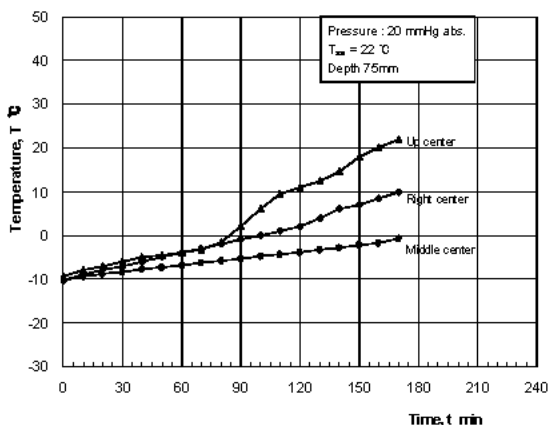


Fig. 5 Thawing curve. (Yellow croaker)

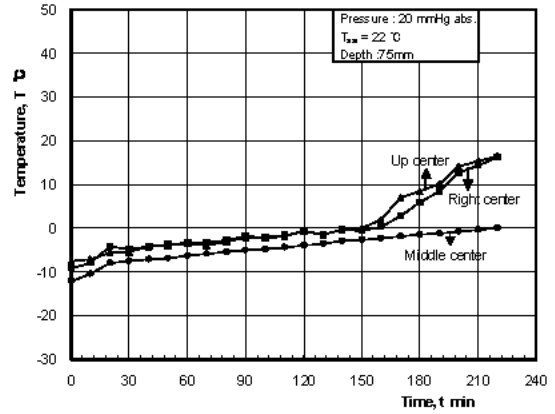


Fig. 6 Thawing curve. (Hair tail)

5. 결 론

진공장치에 의한 동결어류의 해동방법에 관한 기초 연구를 냉동어류 블럭을 대상으로 설계 제작하여 실험한 결과 진공장치를 이용한 동결어류해동은 전열 측면에서 해동성능이 매우 우수함을 확인하였고 정량적인 열설계 데이터를 습득하였으며, 실험결과와는 다음과 같다.

- 1) 진공압력 20 mmHg abs., 가열수 온도 22℃, 크기 360W×590L×150H mm, 무게 20 kg의 냉동조기 블럭을 초기온도 -10.3℃에서 -0.8℃까지 해동하는데 170분이 소요되었다.
- 2) 진공압력 20 mmHg abs., 가열수 온도 22℃, 크기 360W×590L×150H mm, 무게 20 kg의 냉동갈치 블럭을 초기온도 -12.2℃에서 0.0℃까지 해동하는데 220분이 소요되었다.

후 기

이 논문은 2004년도 군산대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

1. 日本眞空協會關西支部; 1994, “알기쉬운 眞空技術”, 세화
2. 이영춘 저, 1995, “식품냉동공학”, 신광출판사
3. 阿曾好修, 1995, “高周波解凍裝置”, 冷凍, 制70卷, 809号, pp. 13-18
4. 냉동물제조 수산업 협동조합, 1997, “냉동식품의 이론과 실제”
5. 村治 哲男, 1975, “眞空解凍裝置による食品の解

- 凍曲線”, 일본냉동협회, 제50권, 제570호
pp.21-25
6. Mitsuo Anjo, 1991, “Vacuum Coolers and Their Use”, 食品新技術における低温の利用
 7. 최인규, 조성환, 노승탁 역, 1996, “열전달”, 보성문화사
 8. Masaaki Sugimoto, 1991, “The Thawing Technic of Frozen Fishes”, 食品解凍の理論と實際
 9. 이재현 역, 1997, “열전달 및 유체유동 수치해법”, 대한교과서
 10. 김세영 역, 1995, “열교환기 설계핸드북”, 도서출판 한미
 11. Fig 1 자료출처 : 해양수산부 홈페이지 자료실 (<http://www.momaf.go.kr/>)