

3. 특집 : 냉동냉장시설 기준과 현황

선박 냉동장치의 설계기준

Design Basis of Marine Refrigeration system



박 기 원

Ki-Won Park

- 여수대학교 냉동공학과
- E-mail : pkw@yosu.ac.kr

1. 서 론

선박은 사람 또는 물건을 적재하고 물에서 항해하는 구조물로 정의할 수 있는데, 선박은 부양성, 적재성, 이동성 등의 특징을 가지고 있다. 선박의 종류는 사용 목적에 따라 상선, 군함, 어선, 특수선, 화물선(Cargo ship), 조선(槽船, Tanker) 등으로 분류할 수 있다. 이 중 상선의 경우에는 그 종류가 객선(Passenger ship), 화물선(Cargo ship), 유조선(Tanker) 등으로 사용목적에 따라 분류되고, 군함은 전함(Battle ship), 순양함(Cruiser), 구축함(Destroyer), 항공모함(Aircraft carrier), 잠수함(Submarine), 순시정(Patrol ship) 등으로 분류된다. 어선에는 어획물의 종류와 어획 방법에 따라 선미트롤(Stern trawler), 기선저인망어선(Bull trawler), 참치연승어선(Tuna long liner), 유자망어선(Gill netter), 모선(Mother ship), 운반선(Fish carrier), 건착망어선(Purse seines), 공모선(Factory ship) 등의 종류가 있다. 또 특수선에는

병원선(Hospital ship), 해난구조선(Salvage ship), 소방선(Fire ship), 도선(Pilot ship), 순시선(Patrol craft), 차도선(Ferry boat), 부선(Barge), 예인선(Tug boat), 쇄빙선(Ice breaker), 공장선(Factory ship) 등이 있다. 화물선의 경우에도 컨테이너선, 마지 운반선, 목재 운반선, 시멘트 운반선 등 적재화물에 따라 선종이 여러 종류로 분류되며, 유조선의 경우 역시 유제품 운반선, 화학제품 운반선, LNG(Liquefied natural gas) 운반선 등으로 분류된다. 이 외에도 해양법규, 선형 등에 의한 구분에 따라 여러 종류의 선박들로 분류되지만, 각 선박의 냉동장치 시스템은 반드시 선박의 용도와 사용목적에 적합한 시스템이 적용되어야 한다. 또한 선체의 선형, 적재성, 이동성 등을 고려한 냉동장치의 설계가 이루어져야 하고, 선박의 종류에 따라 그 선박이 가지는 고유의 특징인 적재능력, 속도, 안전성 등에 부합하는 냉동장치의 설계가 이루어져야 한다.

따라서 선박 냉동장치를 설계하기 위해서는 선박의 종류와 사용목적 외에 대상선박의 구조와 특

성을 잘 이해하고, 대상선박의 조선 기술적인 사항까지도 알아야만 목적에 가장 부합하는 이상적인 냉동장치의 시스템을 설계할 수 있을 것이다.

이와 같은 냉동장치의 설계에 있어서 냉동기의 용량과 압력용기, 관련기기 및 부품, 방열 등의 선정을 위한 기초적인 계산이 열량계산이다. 열량계산을 수행하기 위해서는 선박의 종류, 항해구역, 항해기간, 규정선급 등을 파악하고 선박의 주위온도, 외기온도, 해수온도 등을 정하여야 하며, 이로부터 냉동부하(Heat load)를 산정한다. 이에 본고에서는 주로 어선을 중심으로 선박의 냉동장치 설계에 적용될 수 있는 냉동부하 산출에 대한 설계기준을 서술하고자 한다.

2. 선박 냉동설비의 설계 및 장비에 대한 기본

냉동장치의 설계는 대상선박에 따라 그 시스템이 달라지며, 냉동방식과 냉각방식 등을 여러 가지로 설계할 수 있다.

앞에서와 같이 많은 종류의 선박일지라도 일반적으로 선실부 외의 식료저장을 위한 냉동장치의 설계나 대상화물의 사용목적에 따른 냉동장치의 설계는 냉동 용량의 크고 작음 외에는 특별한 시스템이 요구되지 않는 일반적인 냉동장치의 설계가 가능하다.

하지만 어선의 경우에는 어선의 종류와 어획물의 종류에 따라 냉동장치의 설계는 여러 방식으로 다양하고 복잡해지는 시스템이 된다. 즉, 어획물의 특성에 따라 동결되는 시간과 동결속도, 동결방식의 선정 등은 대상어획물의 어가와 직결되는 매우 중요한 요소이며, 동결과 보냉을 장기간 유지할 수 있는 기계적인 냉동장치와 동결방식, 보냉방식, 그리고 방열설계 등이 적절한 균형을 이루는 설계 및 설비가 가장 중요한 핵심 기술이 되는 것이다.

3. 선박 냉동장치의 설계 기준

3-1 온도조건

설계를 위해서는 여러 가지 온도조건 등이 먼저

설정되어야 하는데, 외기조건에 대해서는 표 1, 냉각해수온도에 대해서는 표 2, 주위온도에 대해서는 표 3에 각각 나타내었다.

3-2 식료저장고의 설계 기준

3-2-1 식료저장고내 유지온도기준

<표 1> 외기조건

구분	항해구역	기준값	
		진구온도 [°C]	상대습도 [%]
하기 외기	페르시아만, 인도, 동남아	35	70
	열대지역	32	70
	일반지역	30	70
동기 외기	북미구역	-20	50
	유럽, 북해도	-10	50
	일반지역	0	50

주) 하기 외기의 온도규정기준은 하기최고온도 월을 정하고, 그 해 당월의 일 최고 월 평균 온도를 기준 한 것이며, 동기외기온도의 온도규정기준은 동기최저온도 월을 정하고 그 해 당월의 일 최저 월 평균 최저온도를 기준 한 것임.

<표 2> 냉각해수온도 [°C]

적 용	기준값
일반 항해선	32
국내항로 항해선	27

<표 3> 주위온도 [°C]

주위조건	구역	외기온도	외기온도	비고
		35°C 기준	32°C 기준	
태양의 복사열을 받는 면	갑판 (직사광)	60	55	
	갑판(그늘)	40	40	
	벽(직사광)	50	45	
	벽(그늘)	40	40	
비공조 구역	선실	35	32	외기 온도로 함
	거주구 통로	실온+5	실온+5	
	기관실	40	40	
공조구역	공조기실	30	27	

<표 4> 식료저장고내 유지온도 [°C]

구역	평균온도 [°C]	기타 규정온도 [°C]		
		BOT ¹⁾	SDS ²⁾	NR ³⁾
MEAT RM	-8	-7.8	-5	-12
FISH RM	-8	-7.8	-5	-12
VEG RM	2	1.7	2	2
LOBBY	8	-	8	-

- 주) 1) BOT : Board of Trade, The merchant shipping
- 2) SDS : 조선설계기준
- 3) N.R. : Sea worthiness of ships, Norwegian Regulation
- 4) 최근의 일반적인 설계기준은 MEAT/FISH RM은 -18°C, VEG RM은 4°C, LOBBY는 5°C로 설정한다.

식료저장고내 유지온도 기준은 표 4와 같다.

3-2-2 냉장고 용적의 결정

육류 저장실, 생선 저장실, 야채 저장실의 용적 V_G [m³]는 식료의 소요량, 항해구역 기항지에서 선적량 등을 고려하여 다음 식에 의해 선정된다.

$$V_G = K \times V_N \times \Delta V$$

여기서, K 는 Net 용적과 Gross 용적의 비율(표 5), ΔV 는 Unit Cooler 및 기기의 용적(unit cooler 1대당 1m³를 공제함)을 나타내며, V_N 은 다음과 같이 계산된다.

$$V_N = g \times r \times N \times D$$

여기서, g 는 1인당 식료 필요량(kg/인·일)(표 6), r 는 식료품의 적재계수(m³/kg)(표 7), D 는 항해 일수(일), N 은 승무원수(명)를 나타낸다.

3-2-3 LOBBY의 용적

Lobby의 용적 V_L [m³]은 다음 식으로 계산된다.

$$V_L = A \times H$$

여기서, A 는 Lobby 측에서 열리는 문의 수에 대한 바닥면적(m²)(표 8), H 는 Lobby의 실 높이(m)를 나타낸다.

<표 5> Net 용적과 Gross 용적의 비율 K

구분	기준값
MEAT RM	1.2
FISH RM	1.2
VEG RM	1.1
LOBBY	1.05

<표 6> 1인 1일당 식료필요량 g [kg/인/일]

구분	기준값	
	국내선	외국선
MEAT RM	0.21	0.41
FISH RM	0.30	0.10
VEG RM	0.75	0.75

<표 7> 식료품의 적재계수 r [m³/kg]

구분	기준값	
	대형	기타선
MEAT RM	0.049	0.014
FISH RM	0.033	0.008
VEG RM	0.031	0.013

<표 8> Lobby 측에서 열리는 문의 수에 대한 바닥면적 A [m²]

문 수	바닥면적
1	4.0
2	5.5
3	7.0
4	8.5

3-3 어획물의 동결 표준

3-3-1 어류의 초온(初溫)과 종온(終溫)

어선의 경우 어획물의 초온은 어류가 경직되기 전에는 조업해역의 수온으로 정하고 경직 후에는 약 10°C 상승되는 것으로 하며, 어획부터 처리까지의 시간이 일정하지 않은 경우에는 어류의 초온은 수온+5°C로 한다.

종온은 해당 어획물의 용도와 냉각방식, 동결방식에 따라 10°C에서부터 -60°C로 한다.

<표 9> 어종별 물성값

물 성 값		TUNA	SHRIMP	SQUID	POLLACK
수분 (X)		71.5	81.4	80.3	81.0
유분 (Y)		2.4	0.3	1.0	0.6
비중 [kg/m ³]	동결전 (P1)	1,080	1,050	1,060	1,055
	동결후 (P2)	1,202	990	990	990
비열 [kcal/kg℃]	동결전 (C1)	0.82	0.88	0.87	0.88
	동결후 (C2)	0.46	0.47	0.47	0.47
동결전 [℃]		-1.25	-2.5	-2.25	-1.0
동결잠열 [kcal/kg]		57.20	65.12	64.24	64.8
열전도율 [kcal/mh℃]	동결전 (X1)	0.76	0.76	0.73	0.76
	동결후 (X2)	1.37	1.89	1.68	1.86

3-3-2 어종별 물성값

어획물의 열량계산에 필요한 비열(Specific Heat)과 잠열(Latent Heat) 등은 표 9에 준해 계산된다.

3-3-3 어창의 침입열

어창 및 동결실 등에서 외부로부터 침입하는 열의 통과율은 방열의 두께, 방열재 및 시공상태에 따라 다르지만 설계 표준치는 표 10을 참조하여 적용할 수 있다.

열관류율 K [kcal/m²·h·℃]는 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_o} + \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{mL}}{\mu}$$

<표 10> 방열두께에 따른 열관류율 [kcal/m²·h·℃]

방열두께 [mm]	A	B	C
100	0.6	0.72	0.9
150	0.4	0.48	0.6
200	0.3	0.36	0.45
250	0.25	0.3	0.36
300	0.2	0.24	0.3

주) A는 방열시공이 양호할 경우
 B는 방열시공이 A보다 약할 경우
 C는 방열시공이 열악할 경우

여기서, α_o 는 외면 열전달율(kcal/m²·h·℃), α_i

는 내면 열전달율(kcal/m²·h·℃), δ 는 방열재의 두께(m), λ 는 방열재의 열전도율(kcal/m·h·℃), mL 은 공기층계수(=5.4), μ 는 Beam stiffner의 크기 및 구조물의 보정값을 나타낸다.

위 계산식에서 α_o 는 통상적으로 폭로부일 경우에는 30, 엔진 케이싱 부위는 12로 선정할 수 있고, α_i 는 8로 선정할 수 있다.

3-3-4 전동기 등의 열손실

동결실이나 냉장실 내부에 설치된 모든 전동기와 조명 등의 열손실은 다음 식에서 산출한다.

(1) 전동기 열량 Q_m [kcal/h]산출

$$Q_m = (\sqrt{3}IV) \times \text{역률} \times \frac{1}{1000} \times 860 \times \frac{t}{24}$$

여기서, I 는 전류, V 는 전압, t 는 사용시간을 나타낸다.

(2) 실내조명등의 열량 Q_l [kcal/h]산출

$$Q_l = W \times 860 \times \frac{1}{1000} \times \frac{t}{24}$$

여기서, W 는 조명등의 용량(W), t 는 사용시간을 나타낸다.

3-3-5 환기에 의한 열손실

어창이나 동결실 등에 출입하는 횟수에 따라 환기에 의한 손실 일부하 Q_a [kcal/h]는 다음 식에 의해 산출한다.

$$Q_a = N_r \times V_r \times \frac{i_o - i_r}{V_o}$$

여기서, N_r 은 환기횟수(R/h), V_r 은 창 내용적(m^3), i_o 와 i_r 은 각각 외기 및 실내공기의 엔탈피(kcal/kg), V_o 는 외기의 비체적(m^3/kg)을 나타낸다.

3-3-6 작업원 등의 열손실

실내에서 작업하는 작업원에 의한 열손실 Q_w [kcal/h]은 다음과 같이 계산한다.

$$Q_w = N_m \times q_b \times F_t$$

여기서, N_m 은 작업원수(명)(표 11), q_b 는 작업원 1인당의 발생열(kcal/h·인)(표 12), F_t 는 작업시간 계수(표 11)를 나타낸다.

3-3-7 부하의 합계

(1) 어창 및 냉각실의 부하 Q_r [kcal/h]

어창 및 냉각실의 부하는 다음과 같이 각종 열량의 합으로 계산된다.

$$Q_r = Q_i + Q_c + Q_m + Q_l + Q_a + Q_w$$

여기서, Q_i 는 어창의 침입열(kcal/h), Q_c 는 어획

<표 11> N_m 과 F_t 의 값

어선종류	실명	N_m [명]	F_t
TUNA	동결실	2	0.1
	준비실	1	0.17
	어창	4	0.06
TRAWLER	준비실	2	0.15
	어창	3	0.08
SHRIMP TRAWLER	준비실	2	0.08
	어창	2	0.04

<표 12> 작업원 1인당의 발생열 [kcal/h·인]

실온 [°C]	0	-5	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
1인당의 발생열	240	260	335	360	385	410	435	460	455

물의 어창온도의 냉각열(kcal/h), Q_m 은 전등기

등의 열손실(kcal/h), Q_l 은 실내조명등의 열손실

(kcal/h), Q_a 는 환기에 의한 열손실(kcal/h),

Q_w 는 작업원 등에 의한 열손실(kcal/h)을 나타

내고, Q_c 는 다음과 같다.

$$Q_c = G_c \times C_1 \times (T_1 - T_2) \times \frac{1}{24}$$

여기서, G_c 는 1일의 어획량(입고량)(kg), C_1 은 비열(kcal/kg·°C), T_1 은 어(魚)의 초온(°C), T_2 는 어창 온도(°C)를 나타낸다.

(2) 동결부하 Q_f [kcal/h]

$$Q_f = \frac{G_f}{t_f} \times \{C_1 \times (T_1 - T_0) + L_f + C_2 \times (T_0 - T_3)\}$$

여기서, G_f 는 동결량(kg/회), t_f 는 동결시간(h), C_1 은 비열 동결점 이상의 값(kcal/kg·°C), C_2 는 비열 동결점 이하의 값(kcal/kg·°C), T_1 은 어(魚)의 초온(°C), T_3 는 어(魚)의 종온(°C), T_0 는 어(魚)의 동결점(°C), L_f 는 동결 잠열(kcal/kg)을 나타낸다.

(3) 동결실의 전부하 Q_F [kcal/kg]

$$Q_F = Q_f + Q_{e2} + Q_m + Q_l + Q_a + Q_w$$

여기서, Q_f , Q_m , Q_l , Q_a , Q_w 는 앞의 (1)에서와 같고, Q_{e2} 는 동결실의 침입열(kcal/kg)을 나타낸다.

(4) 예냉부하 Q_p [kcal/h]

$$Q_p = \left\{ \frac{G_p}{t_p} \times C_1 \times (T_1 - T_p) \right\} + Q_m$$

여기서, G_p 는 예냉량(kcal/회), t_p 는 예냉시간

(h). Q_m 은 펌프, 교반기 등의 열손실(kcal/h)을 나타낸다.

4. 결 론

냉동장치를 사용하는 선박의 종류는 여러 가지로 구분할 수 있지만, 여기서는 다른 선박보다 냉동장치의 조건이 비교적 까다롭다고 판단되는 어선을 중심으로 한 냉동장치의 설계기준으로 가장 기본이 되는 부하계산을 중심으로 살펴보았다.

이를 다른 종류의 선박에 적용하고자 할 때에는 선박냉동장치를 설계하고자 하는 설계자가 판단하여 그 선박에 필요한 항목만을 간추려 이용하면 될 것이다.

그러나 여기에 수록된 내용을 설계기준이라 하였지만, 국내의 설계기준은 정확하게 서술된 것이 없어 주로 일본어선협회나 일본박용공학회 등에서 제시하고 있는 자료들을 바탕으로 정리한 것이므로 설계기준이라고 하기 보다는 설계시 참고할 수 있는 설계지침 정도라고 하여야 할 것이다.

3-3-8 열량계산의 안전율

(1) 어창부하

창구가 많은 소형어선에서는 1.2~1.3, 창구수는 적는데 갑판면적에 비해 창구면적이 큰 경우에는 1.2~1.3, 선체구조상 Web-Beam, Web Frame 등이 돌출되어 있는 경우에는 1.2~1.3, 어창용적이 50m³ 미만일 경우에는 1.15~1.2, 어창용적이 50~200m³일 경우에는 1.1~1.15, 어창용적이 200m³ 이상일 경우에는 1.1을 각각 적용한다.

(2) 동결실 부하

동결실의 구역이 클 경우에는 1.05, 동결실이 어창가운데 있을 경우에는 1.05, 동결실 상부 및 주위가 직접 일사광을 받을 경우에는 1.1~1.15, 동결실의 주위가 선실, 창고등과 인접해 있을 경우에는 1.1을 적용한다.

(3) 예냉부하

예냉조가 선체구조에 직접 설치된 경우에는 1.1~1.15, 예냉조가 독립되어 있고 직접 일사광을 받을 경우에는 1.1을 적용한다.

3-3-9 운전시간

압축기의 운전시간은 원칙적으로 동결장치(예냉포함)는 연속운전으로 하고 어창냉각은 어업의 종류에 따라 다음 표 13에 기준한다.

<표 13> 운전시간 [h]

	일반어선	근해	저인망	운반선
		TUNA선	어선	
		빙장	빙장	
초기 냉각	24	24	24	24~96
보냉	20~24	수동 4~6	수동 8~12	20~24
		자동 12~18	자동 12~18	