

선실의 온열환경을 고려한 선박의 냉난방 시스템 설계 기법

장미숙^{†*}, 고창두^{*}, 문일성^{*}, 이춘주^{*}, 김상현^{**}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*}
인하대학교 기계공학부 선박해양공학과^{**}

Thermal Environment-based HVAC Operating Design in Cabins on Naval Ships

Mi-Suk Jang^{†*}, Chang-Du Koh^{*}, Il-Sung Moon^{*}, Chun-Ju Lee^{*} and Sang-Hyun Kim^{**}

Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI^{*}
Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University^{**}

Abstract

This paper focused on the analysis of the thermal comfort conditions in 1,000 ton class patrol ship's cabins through the evaluation of PMV(predicted mean vote) and PPD(predicted percentage of dissatisfied). Different areas have different clothing and activity in the ship. Therefore, any area may be thermally uncomfortable in case of air conditioning with equal temperature, relative humidity and relative air velocity. PMV or PPD-DCAC (demand controlled air conditioning) system is a new design that the whole cabins are maintainable with the ideal thermal comfort condition.

※Keywords: Predicted mean vote(예상평균온열감), Predicted percentage of dissatisfied(예상불만족도), Demand controlled air-conditioning(요구-조정공조), Thermal comfort design(온열쾌적설계)

1. 서언

열적으로 쾌적한 상태를 유지하려는 인체의 열평형 개념은 과거 건축 환경의 기본 바탕이 되었고, 현재에도 실내 환경의 평가에서 가장 중요한 인자 중의 하나로 활발한 연구가 진행 중이다.

그러나, 선박의 경우 건축의 실내와 비슷한 조건으로 공조되며 일반 건축물에 비해 폐쇄성이 강함에도 불구하고 선내 환경의 온열 쾌적성 및 선내 공기 오염에 대하여 심도 있는 연구가 아직은 미흡한 형편이다. 다만, 김윤신(1997)과 한국해양연구원(2002)에 의해 함정내의 단편적인 평가가 이루어져 왔다. 현재 본 저자 등은 함정 내의 온열 및 공기환경에 대한 계절별 계속자료를 바탕으로 선박 설계에 대한 종합적인 평가를 수행 중에

접수일: 2005년 1월 16일, 승인일: 2005년 5월 3일

+ 주저자, E-mail: jmsrose@kriso.re.kr

Tel: 042-868-7207

있다(김학선 등 2005, 장미숙 등 2005a).

본 논문에서는 온도와 상대습도에 대한 기존의 연구 결과(해양연구원 2002)와 설문조사를 통한 승조원의 주관적 온열요소를 바탕으로 함정내 조타실과 침실에 대하여 온열 근무환경을 평가하였다. 또한, 평가된 자료를 바탕으로 경제적이고 최적화된 PMV/PPD-DCAV (demand controlled air conditioning, 요구-조정 냉난방)를 설계할 수 있는 기법을 제공하고자 한다.

2. 예상평균온열감과 예상불만족도

예상 평균 온열감 (predicted mean vote, PMV)은 인체 열 조절 시스템의 생리적 반응을 1,300명을 대상으로 한 실험결과인 사람들의 온열감 의사 표시와 통계학적으로 연관시켜 개발된 것으로 (ISO 1994), 식 (1)에 의해 계산되어 다음의 7 단계로 평가된다.

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
cold	cool	slightly cool	neutral	slightly warm	warm	hot

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times \left\{ \begin{array}{l} (M - W) \\ -3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - p_a] \\ -0.42 \times [(M - W) - 58.15] \\ -1.7 \times 10^{-5} M (5867 - p_a) \\ -0.0014M (34 - t_a) \\ -3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \\ -f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad (1)$$

t_{cl} , f_{cl} , h_c 는 다음 식으로 계산된다.

여기서, M : 신진대사량 (W/m^2), W : 외부 일(W/m^2), p_a : 부분증기압 (pa), t_a : 기온 ($^{\circ}C$), \bar{t}_r : 평균 복사 온도 ($^{\circ}C$), t_{cl} : 착의복의 표면온도 ($^{\circ}C$), f_{cl} : 인체에 대한 착의량의 표면적비, h_c : 대류 열전달 계수 ($W/m^2^{\circ}C$), v_{ar} : 상대기류속도 (m/s), I_{cl} : 의복의 열

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \left\{ \begin{array}{l} 3.96 \times 10^{-8} \\ \times f_{cl} \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] \\ + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v_{ar}} \\ 12.1\sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl} & \text{for } I_{cl} < 0.078 \text{ m}^2^{\circ}C/W \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2^{\circ}C/W \end{cases} \quad (4)$$

저항값 ($m^2^{\circ}C/W$) 이다. 신진대사량과 의복의 열저항 값은 각각 met, clo 라는 단위를 사용하기도 하며, 1met = 58.2 W/ m^2 , 1clo = 0.155 $m^2^{\circ}C/W$ 로 환산된다.

ISO는 PMV 지표와 6개의 주요 온열요소가 다음의 범위 안에 있을 경우에만 사용을 권한다(ISO, 1994).

- $M = 46 \sim 232 \text{ W/m}^2$ (0.8 ~ 4 met)
- $I_{cl} = 0 \sim 0.310 \text{ m}^2^{\circ}C/W$ (0 ~ 2 clo)
- $t_a = 10 \sim 30 \text{ }^{\circ}C$
- $\bar{t}_r = 10 \sim 40 \text{ }^{\circ}C$
- $P_a = 0 \sim 2700 \text{ pa}$
- $V_{ar} = 0 \sim 1 \text{ m/s}$ (주로, 착석한 상태의 경작업시 0.15 m/s 이상의 평균 기류속도는 드래프트로 느껴질 수도 있다.)

예상불만족도(predicted percentage of dissatisfied, PPD)는 열적으로 불만족인 사람들의 숫자를 정량적으로 제공해 준다. 보통 동일 환경에 노출된 사람들의 PMV는 흠어져 있기 때문에 PPD에 의한 평가가 타당하다고 할 수 있다. PPD는 PMV가 결정되면 다음과 같이 계산된다.

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2)} \quad (5)$$

Table 1은 PMV별 예상되는 개별적인 의사표시의 분포를 보여준다(ISO 1994).

Table 1 Percentage of persons predicted to vote

PMV	PPD (%)	Percentage (%)		
		0	-1 or +1	-2, -1 or +1, +2
+2	75	5	25	70
+1	25	27	75	95
0	5	55	95	100
-1	25	27	75	95
-2	75	5	25	70

3. 온열요소의 측정

물리적 온열요소(environmental factor)인 건구온도와 상대습도는 해양연구원(2002)에서 수행한 함정 선내의 측정결과를 이용하였다. 대상선박은 1000 ton 함정으로 조타실과 침실에 대해 부산 근해에서 측정되었다. 측정기기는 온-습도계 (SATO SK-L200TH)를 이용하였다.

Table 2는 1000 ton 함정의 조타실과 침실에 대한 건구온도 및 상대습도 측정 결과이다 (해양연구원 2002). 물리적 온열요소 중 실측되지 않은 평균복사온도는 건구온도와 동일하다고 가정하였으며, 상대기류속도는 0.0~1.0 m/s에서 0.05 m/s 증가하면서 영향을 살펴보았다.

주관적 온열요소(human factor)인 착의상태에 대한 의복 열저항값과 활동상태에 따른 신진 대사량을

Table 2 Room air temperature and relative humidity in 1000 ton ship

Space	DBT (°C)	RH (%)
Wheel house	23.8	54.6
Cabin	29.0	46.1

Table 3 Human factors in cabins

(a) Thermal resistance (m² °C/W)

Season	Space	N	Ave	Stdev	Min	Max
spring	1	23	0.097	0.026	0.066	0.148
	2	40	0.067	0.020	0.027	0.107
summer	1	22	0.079	0.028	0.060	0.144
	2	39	0.059	0.010	0.027	0.086
fall	1	22	0.096	0.025	0.060	0.144
	2	39	0.084	0.031	0.031	0.147
winter	1	22	0.130	0.033	0.057	0.171
	2	39	0.101	0.026	0.031	0.162

(b) Metabolic rate (W/m²)

Space	N	Ave	Stdev	Min	Max
1	21	78.14	6.02	58.50	88.00
2	38	44.45	3.17	40.00	54.00

* N : Number of data,

Ave : Average, Stdev : Standard deviation,

Min : Minimum, Max : Maximum

* 1 : Wheel house, 2 : Cabin

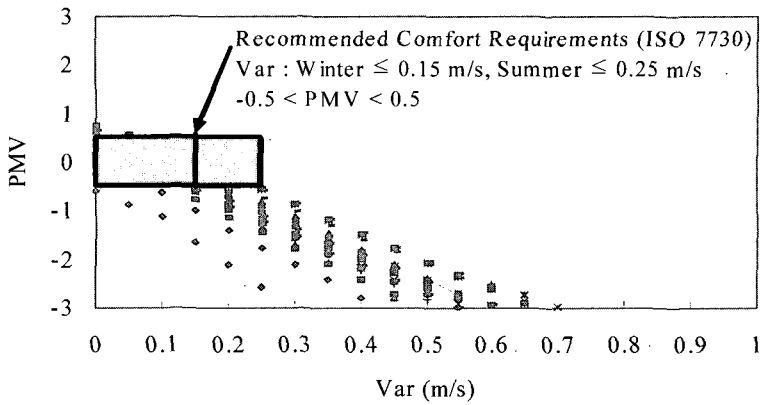
승조원에 대한 설문조사를 실시하여 평가하였다. 착의상태 및 신진대사량의 종류와 기준값은 육상 실내건축의 착의상태와 신진대사량(ISO 1994)을 선상 근무에 맞게 수정하여 이용하였다(장미숙 등 2005b).

한편 침실의 경우 취침시 모포의 열저항값이 큰 영향을 미치지만 열저항값에 대한 자료를 얻을 수 없어 이 논문에서는 고려하지 않았다. 따라서, 이 논문에서 평가되는 침실 온도는 취침시에는 적당하지 않을지도 모른다.

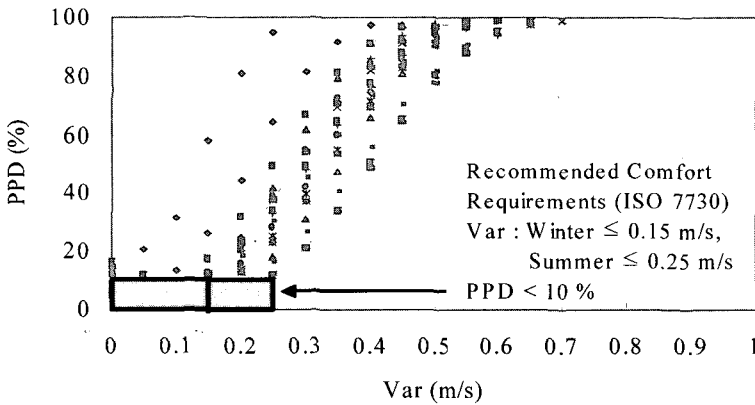
Table 3은 조타실과 침실에서의 의복 열저항값과 신진대사량을 보여준다. 계절의 영향을 많이 받을 것으로 예상되는 의복 열저항값에 비해 신진대사량은 계절에 관계없이 일정하다고 가정하고 조사하였다.

4. 결과 및 고찰

조타실과 침실에서 각각 조사된 물리적 및 주관



(a) Relation between PMV and v_{ar}



(b) Relation between PPD and v_{ar}

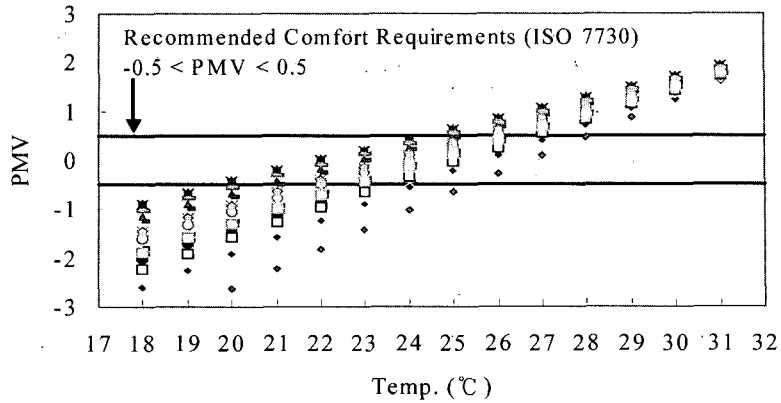
Fig. 1 Effects of the relative air velocity on PMV/PPD in wheel house

적 온열요소를 바탕으로 열적 쾌적을 알아보기 위해 기류속도를 0.0 ~ 1.0 m/s 범위에서 0.05 m/s 씩 변화시키면서 PMV와 PPD의 변화를 살펴 보았다. 기류속도가 증가하면 온습에도 변화가 있을 수 있으나 본 평가에서는 온습 변화 없이 기류속도만 변화한 걸로 간주 하였다. 또한 최적의 기류속도 조건을 바탕으로 실측된 온도와 상대습도를 포함하여 서로 다른 온도와 상대습도 상태에서 PMV와 PPD를 평가하였다.

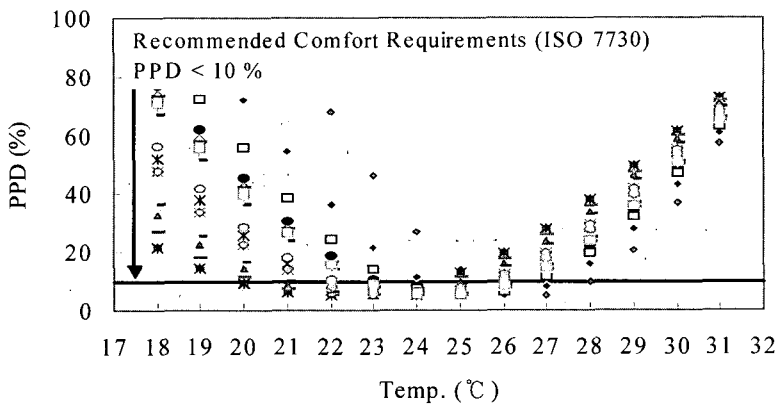
(1) 조타실

Fig. 1은 조타실에서 승조원 20명에 대하여 평가된 기류속도와 PMV/PPD의 관계이다. 그림에 표시된 직사각형은 ISO 7730 에서 권장하는 기류속도 및 PMV/PPD 영역을 나타낸다. 각 연결선들은 평가 대상 승조원 개개인의 기류속도에 대한 PMV 변화를 보여준다.

Fig. 1(a)를 살펴보면, ISO 7730의 여름철 권장 기준인 기류속도 0.25 m/s이내에서 PMV 값이 ISO 권



(a) Relation between PMV and T_a



(b) Relation between PPD and T_a

Fig. 2 Effects of the room air temperature on PMV/PPD in Wheel house

기준인 ± 0.5 에서 대부분 음(-)의 방향으로 벗어난 것을 알 수 있다. 이는 온열평가가 측면에서 볼 때 쾌적 기준보다 약간 출다는 것을 나타낸다. Fig. 1(b)의 PPD를 살펴보면 이 영역에서 대부분 불만족율이 10%를 넘는 것을 볼 수 있다. 평가 결과, 해양연구원(2002)에서 실측한 온습 조건에서 가장 높은 쾌적 조건 만족율을 보인 기류속도는 0.1 m/s로 ISO 권장 기준을 벗어나는 자료의 수가 2명으로 가장 적었다. m/s에서는 약간 더움 2명, 약간 추움 1명으로 나타나

최적 기류속도는 0.05 ~ 0.1 m/s 사이로 나타났다. 그러나 2명 모두 약간 추운 것으로 평가되었고, 0.05 한편, ISO에서는 PMV값이 +2 ~ -2 사이의 값을 사용하도록 권장하므로(ISO 1994) 실제로 조타실의 기류속도는 0.2 m/s 이상이 되어서는 안 되는 것으로 나타났다. 이 이상을 넘어설 경우 PPD는 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

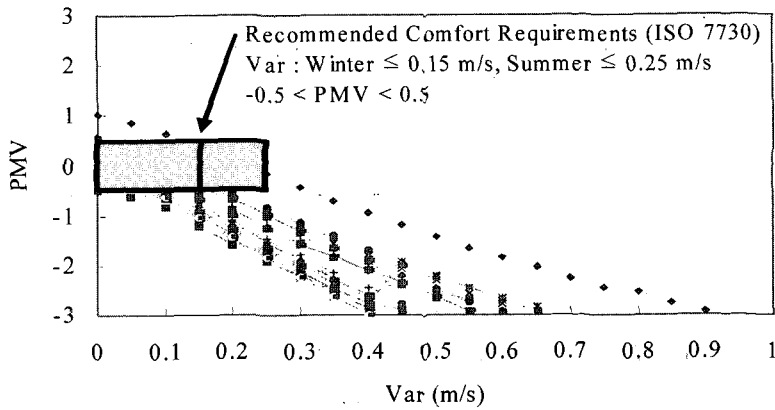
Fig. 2는 ISO 권장 기준을 벗어나는 자료의 수가 가장 적은 것으로 평가된 $v_{ar} = 0.1$ m/s의 기류속도

에서 쾌적한 온습도를 알아보기 위해 온도와 상대습도를 변화시키면서 PMV와 PPD를 평가한 결과이다. 그래프에서 각 점들은 평가 대상 승조원 개개인의 온도 변화에 대한 PMV/PPD 결과를 나타낸다.

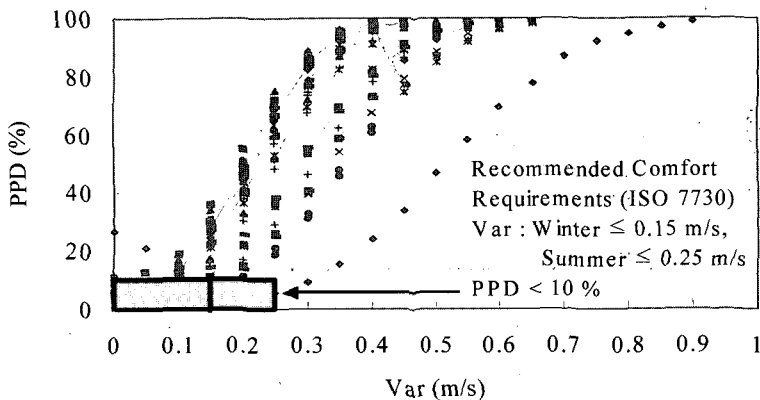
온도에 따른 습도 변화는 1000톤 함정에서 측정된 모든 온습을 기준으로 부분증기압을 계산하고 계산된 부분증기압의 평균을 이용하여 예측되었다. (ASHRAE 1989)

평가 결과, 조타실의 적정 온도는 24~25 °C로 나타났다. 이때, 상대습도는 56.2~52.1 %로 예측되어

입력되었다. 조타실이 이 조건으로 유지될 경우, 24 °C에서는 20명의 조사인원 중 PMV/PPD의 권장기준을 벗어나는 인원은 2명으로 모두 약간 춥다는 평가가 나왔다. 25 °C의 경우는 약간 더움에 3명 약간 추움에 1명으로 4명이 권장기준을 벗어났지만 PMV와 PPD의 권장기준에 근접하여 있고 승조원간 온열감 편차가 작게 나타나 더 좋은 조건으로 평가되었다. 따라서 조타실의 적정 온도는 24~25 °C 사이의 온도로 유지되어야 할 것이며, 실측된 조타실의 온도는 약간 추운 것으로 나타났다.



(a) Relation between PMV and v_{ar}



(b) Relation between PPD and v_{ar}

Fig. 3 Effects of the relative air velocity on PMV/PPD in Cabin

한편, ISO의 PMV 사용 권장값 영역을 벗어나는 22 °C이하, 31 °C 이상은 조타실의 온도로 절대 부적합하였다.

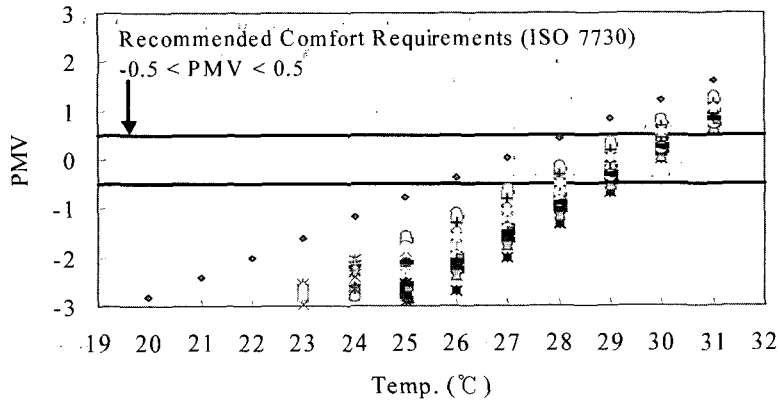
(2) 침실

Fig. 3은 침실에서 37명의 승조원에 대하여 선내 기류속도를 달리하면서 PMV와 PPD를 평가한 결과이다.

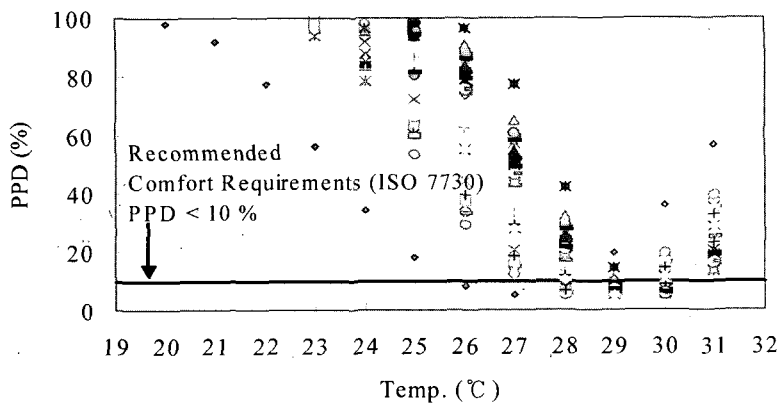
그림을 살펴보면, 0.05 m/s 이하에서 약간 더운 1명, 약간 추움 2명 등 단지 3명의 승조원들이

PMV/PPD 권장기준을 초과하여, 실측된 온습도 및 조사된 착의상태와 활동상태에서 가장 쾌적한 상대기류속도로 평가되었다. 한편, PMV 권장 사용 값 내에서 침실의 기류속도는 0.3 m/s 이상이 되어서는 안 되는 것으로 나타났으며 이를 초과할 경우 조타실에서처럼 PPD는 급격하게 증가하였다.

Fig. 4는 침실에서 가장 쾌적한 상대기류속도로 평가된 0.05 m/s에서 온습도를 변화하면서 PMV와 PPD 값의 추이를 살펴본 것이다.



(a) Relation between PMV and Ta



(b) Relation between PPD and Ta

Fig. 4 Effects of the room air temperature on PMV/PPD in Cabin

평가 결과, 침실의 최적 온도는 선박에서 실측된 29 °C로 나타났다. 이 경우 평가 대상 승조원 37명 중 약간 더움 1명, 약간 추움 3명으로 총 4명이 권장 기준인 PMV/PPD 값을 약간 벗어났다. 한편, PMV 권장 사용 값 내에서 침실의 온도는 27 °C 이하, 31 °C 이상은 부적합한 것으로 나타났으며, 이는 조타실에 비해 최저 온도가 약 4~5 °C 상승한 것이다.

그러나 앞서 설명했듯이 모포의 영향이 고려되지 않았기 때문에 평가된 최적 온도는 승조원에 따라 취침시 온열적으로 불쾌적하다고 느낄 수 있다. 실제로 침실에서 얇은 드레스(0.026 m²C/W) 혹은 두꺼운 드레스(0.098 m²C/W)를 입고 있다고 가정하고 PMV 값을 비교한 결과 0.8 이상의 큰 차이를 보였다. 따라서, 모포 영향이 고려되면 현재의 29 °C의 침실은 덥다는 불만족 의사표시가 발생할 것으로 사료된다.

(3) 선실별 쾌적 온도 비교

1000 ton 함정에 대한 본 연구에서, 활동상태와 착의 상태가 서로 다른 조타실과 침실을 평가한 결과, 조타실 0.1 m/s, 침실 0.05 m/s 로 상대기류속도가 유지된다고 가정할 경우 온열적으로 쾌적함을 느끼는 최적 온도는 조타실 24~25 °C, 침실 29 °C로 4~5 °C의 온도차를 보였다.

또한, 실측 온도와 비교한 결과 조타실은 약간 추움, 침실은 더움의 불만족 의사표시가 발생할 수 있는 것으로 조사되었다. 즉, 조타실은 난방, 침실은 냉방으로 공기조화가 이루어져야 쾌적한 상태의 선실을 유지할 수 있었다.

이러한 결과는 선실별로 서로 다른 냉난방 조절이 필요하다는 것을 반증하는 것이다. 현재 일괄적으로 유지되는 냉난방 시스템의 운영은 불필요한 에너지의 손실을 초래할 수도 있으며, 이를 보완하기 위해 정확한 냉난방 용량의 산정이 필요하다.

한편, 효율적이고 경제적인 냉난방 용량의 산정에 이용될 수 있는 요소는 온도와 습도이지만 동일한 온도와 습도 조건에서 주관적으로 느끼는 쾌적감 혹은 불쾌적감은 서로 다르기 때문에 주관적 온열요소를 포함하고 있는 PMV 혹은 PPD에 의한 평가가 온습에 의한 평가보다 타당하다고 볼 수

있다. 실제로 일본의 열차 내에서 이러한 공기조화 방법을 적용하여 연구한 결과 쾌적하고 경제적인 객실 유지가 가능한 것으로 평가되었다. (Funakoshi and Matsuo 1995)

5. 결론

육상의 경우도 비슷하게 발생할 수 있지만 선박에는 착의상태와 활동상태가 서로 상이한 선실이 공존하므로 하나의 온습 기준으로 환기 및 냉난방이 이루어진다면 불쾌감을 느끼는 승조원의 수가 증가될 것이다. 또한, 본 논문에서는 연구하지 않았지만 함정의 경우 계급에 따른 임무의 차이가 발생하고 이로 인해 활동상태가 달라지므로 어느 선실에 어떤 계급의 승조원이 근무를 하는가에 따라 온열감은 차이를 보였다. 따라서 선박 특수성을 고려한 보정된 온열 상수들을 이용한 온열평가를 통해 얻어진 온습 조건에 맞게, 실제로 냉난방의 조절이 이루어지는 것이 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 해경 함정의 조타실과 침실의 온열요소를 평가한 결과, 쾌적 범위에서 4~5 °C의 온도차를 보였으며, 조타실은 난방이, 침실은 냉방이 필요한 것으로 조사되어 각 선실에서 서로 다른 냉난방시스템 운용이 요구되었다.

물리적 및 주관적 온열요소를 모두 고려한 PMV/PPD-DCAC 시스템은 승조원의 만족감 대비 비용 평가 측면에서 가장 온열적으로 쾌적한 선내를 유지하는데 중요한 냉난방시스템의 설계 기법으로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

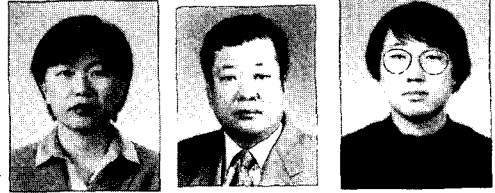
본 논문의 내용은 한국해양연구원에서 수행중인 기관 고유사업 "차세대 친환경 해양운송시스템 기반기술 개발"(PE00950) 사업의 연구 내용 중 일부를 정리한 것이다.

참 고 문 헌

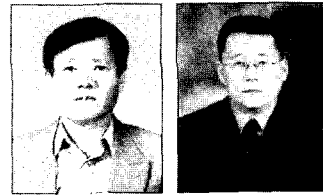
- 김윤신, 1997, "함정실내 대기질 환경조사 연구", 국방부 환경보전학술대회 논문집, pp. 9.1-9.19.

- 김학선, 이승수, 이춘주, 장미숙, 2005, "환기량 변화가 선실내 공기질에 미치는 영향의 전산 해석," 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 432-438.
- 장미숙, 조용진, 김광수, 박병재, 고창두, 2005a, "해양연구원 연구선의 선실 환경 평가," 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 483-487.
- 장미숙, 고창두, 문일성, 이춘주, 김상현, 2005b, "항정 선실내 온열요소에 대한 조사 연구," 해양환경공학회지, 제 8권 제 1호, pp. 31-38.
- 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 2002, 함정근무 피로도 분석 연구, 연구보고서.
- ASHRAE, 1989, ASHRAE 1989 Fundamentals.
- Funakoshi S. and Matsuo K., 1995, "PMV-based train air-conditioning control system," ASHRAE Trans., Vol. 101, No. 1, pp. 423-430.
- ISO, 1994, "Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and

Specification of the Conditions for Thermal Comfort," ISO 7730.



< 장 미 숙 > < 고 창 두 > < 문 일 성 >



< 이 춘 주 > < 김 상 현 >