

# 크루즈선 객실의 공조 쾌적성 평가에 관한 연구

구근회<sup>1,†</sup> · 이호기<sup>1</sup> · 최재웅<sup>1</sup> · 이재근<sup>2</sup>

삼성중공업 조선해양연구소<sup>1</sup>

부산대학교 기계공학부<sup>2</sup>

## The Study for Evaluation of Thermal Comfort in Passenger Cabin on Cruise Ship

Keun-Hae Koo<sup>1,†</sup>, Ho-Ki Lee<sup>1</sup>, Jae-Woong Choi<sup>1</sup>, Jae-Keun Lee<sup>2</sup>

Samsung Heavy Industries, Marine Research Institute<sup>1</sup>

Pusan National University, Mechanical Engineering Department<sup>2</sup>

### Abstract

The present work focuses on the evaluation of thermal comfort in passenger cabin of a cruise ship. A computational fluid dynamics (CFD(Airpak)) is used to calculate air velocity and temperature distribution in the passenger cabin as well as PMV and PPD. The CFD is used to simulate two different cases, room unit system and wardrobe duct system. Both of cases are simulated in summer environment condition. The room unit system and wardrobe duct system are compared and evaluated by ISO 7730 thermal comfort categories. The performance of room unit system is shown to be more effective for this typical case of passenger cabin.

**Keywords :** Cruise Ship(크루즈선), Passenger Cabin(객실), Thermal Comfort(공조 쾌적성), PMV(예상온열감), PPD(예상불만족도)

## 1. 서 론

많은 관광객들이 승선하여 휴식을 취하는 크루즈선의 객실은 일반 상선보다 더 쾌적한 공조성능이 요구되고 있다.

각 선급은 Comfort Class Rating(DNV), Habitability(ABS) 등과 같은 엄격한 수준의 공조성능의 기준을 요구하고 있으며, 이를 만족시키기 위해서 설계과정과 TAB(Testing, Adjusting, Balancing) 단계에서 상당한 노력이 필요하게 된다.

그러나, 이러한 전통적인 평가방법은 공간의 특정한 위치에서의 온도, 습도, 기류속도 등의 단편적인 공조요소만을 평가함으로써, 인체 중심의 열적 쾌적성을 평가하는 데에는 한계를 갖고 있다.

인체중심의 열적 쾌적성을 평가하기 위해서는 온도, 습도, 복사 및 기류속도 등의 기본적인 공조요소 외에 신진대사, 의복, 피부의 대류열전달 등 신체의 온열환경에 영향을 주는 요소를 포함한 주관적인 평가가 필요하다.

Jang, et al. (2005)은 함정의 온열환경을 고려한 병년방 시스템 설계기법을 연구했으며, Lee, et al. (2004)은 자동차운반선 선실의 환기 성능 평가를 수행하였고, Park, et al. (2006)은 열차내 온열 쾌적성 평가에 관한 연구를 수행하였으나, 다수의 사람이 관광과 휴식의 목적으로 승선하게 되는 여객선과 크루즈선 객실의 열적 쾌적성에 관한 연구는 많이 부족한 상황이다.

본 연구는 다수의 객실로 구성되어 있는 크루즈선에서 덱트시스템에 따른 공조 쾌적성을 평가함으로써 다량의 객실을 건조해

야 하고 또한, 공조 쾌적성을 확보해야 하는 초기 설계과정을 결정하기 위한 목적으로 수행되었다.

본 연구에서는 크루즈선 일반객실의 대표적인 공조용 급기 방법인 room unit방식과 wardrobe duct방식의 객실을 모델링하여 열유동 특성을 수치적으로 계산하고, 대표적인 공조 쾌적성의 평가기준으로 사용되고 있는 PMV(Predicted Mean Vote, 예상 온열감)와 PPD(Predicted Percentage Dissatisfied, 예상불만족도)를 활용하여 두 방식간의 공조 쾌적성을 비교하고자 한다.

## 2. 수치해석

### 2.1 지배방정식

크루즈선 객실 내부의 열유동 해석은 3차원 정상상태 비압축성으로 가정하여 계산하였다. 난류모델은 표준  $\kappa - \epsilon$  모델을 사용하였다. 압력-속도 coupling 은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 운동량과 에너지 방정식은 2차 상류차분 scheme을 사용하였다. 격자생성 및 계산은 상용프로그램인 Airpak(2007)을 이용하여 계산을 수행하였다. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u_i} \bar{u_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j (\tau_{ij})_{eff}) + S_h \quad (3)$$

## 2.2 객실 계산조건

크루즈선의 일반객실은 일반적으로 1개의 FCU(Fan Coil Unit)로 공조를 담당한다. 본 일반객실은 3명 재실이 기준이며 발코니 창이 있다. Fig.1은 본 일반객실의 평면도를 보여 준다. 하절기에 외기온도의 설계기준은 35°C이며 객실내부 온도는 24°C를 목표로 하고 있다. 이 조건에서 본 객실의 냉방부하는 Table 1에 정리 하였다. 현열부하는 503W이며, 잠열부하는 120W이다. 이 현열부하와 잠열부하를 냉각하기 위해서 FCU에서 14°C의 공기를 200m<sup>3</sup>/h 공급해야 한다.

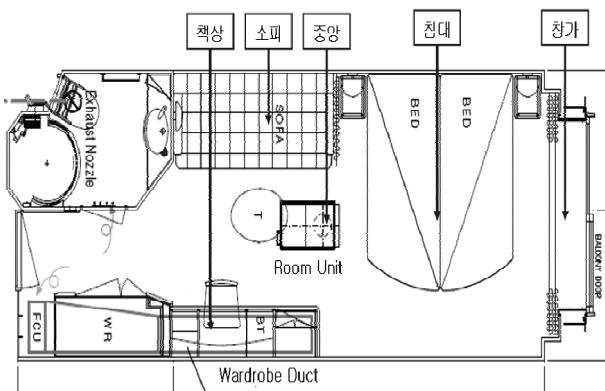


Fig. 1 Plan of typical passenger cabin

Table 1 Summary of cooling loads

항 목		부 하
현열	창(태양복사)	145 W
	선실벽 열전달	53 W
	전자제품	80 W
	인체의 현열	225 W
잠열	인체의 잠열	120 W

Fig.2는 일반객실의 모델이다. Room unit 방식은 덕트가 객실의 중앙 상부에 위치한 room unit에 연결되어 유닛의 전후 좌우 4방향으로 균일한 유속으로 급기 한다. Wardrobe duct방식은 객실벽에 있는 옷장의 상부에서 객실의 중앙방향과 창가 방향으로 급기 된다. 급기된 공기의 일부는 FCU으로 들어가 재순환되고, 나머지 공기는 화장실의 배기구로 배출된다. 두 방식은 에너지 소

모량에서 거의 차이가 없으며, 취출구의 위치와 취출기류의 방향이 다르다.

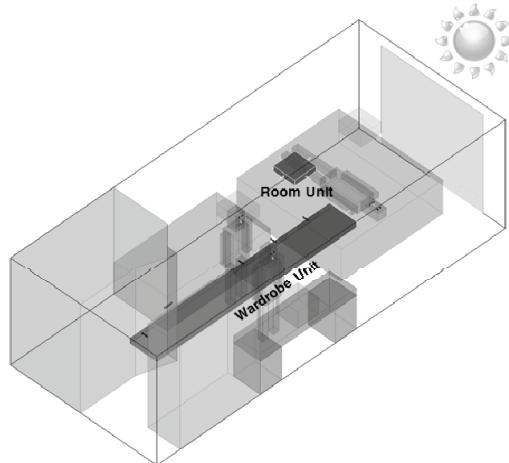


Fig. 2 Model of typical passenger cabin

## 3. 공조 쾌적성 평가

### 3.1 PMV 정의

PMV는 덴마크의 Fanger (1970)가 제안하였다. 인체의 온열 환경에 영향을 미치는 온도, 습도, 기류, 복사, 착의량, 활동량에 대한 인체의 느낌을 정량적으로 수치화하여 나타낸다.

Table 2 Seven point thermal sensation scale

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Cold	Cool	Slightly cool	Neutral	Slightly warm	warm	Hot

Table 2는 인체의 열평형을 기초로 하여 많은 사람들이 표기한 평균값을 7단계로 평가한 지수이다. 1984년에 국제 규격화 되었다(ISO, 2005). PMV는 다음 식으로 계산할 수 있다.

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

여기서,

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \times (M - W) - I_{cl} \times \{3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)\} \quad (5)$$

$$h_c = 2.38 \times |t_{cl} - t_a|^{0.25} \text{ for } 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \times \sqrt{v_{ar}}$$

$$h_c = 12.1 \times \sqrt{v_{ar}} \quad \text{for} \quad 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \times \sqrt{v_{ar}} \quad (6)$$

여기서,  $M$  : 신진대사량( $W/m^2$ ),  $W$  : 외부일( $W/m^2$ ),  $P_a$  : 부분증기압(pa),  $t_a$  : 기온(°C),  $\bar{t}_r$  : 평균복사온도(°C),  $t_d$  : 착의 복의 표면온도(°C),  $f_d$  : 인체에 대한 착의량의 표면적비,  $h_C$  : 대류 열전달 계수( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),  $v_{ar}$  : 상대기류속도(m/s),  $l_d$  : 의복의 저항값( $m^2 \cdot ^\circ C / W$ )이다. 본 계산에서는 속옷과 가벼운 실내복을 적용하고 앓거나 휴식을 취하는 인체의 활동을 기준으로 고려하였다.

### 3.2 PPD 정의

PPD는 어떤 동일한 환경에서 덥거나 춥다고 느끼는 열적 불만족자들을 전체 인원수에 대한 백분율로 나타낸다. 특정 지점의 열환경에 대한 사람들의 예상 불만족도를 알 수 있으며 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$PPD = 100 - 95 \times e^{(-0.03353 \times PMV^4 - 0.2179 \times PMV^2)} \quad (7)$$

### 3.3 공조 쾌적성 등급

ISO 7730에서는 다음과 같이 공조 쾌적성을 A, B, C 등급으로 구분하고 있다.

Table 3 Categories of thermal comfort index

Category	Thermal state	
	PPD %	PMV
A	< 6	-0.2 < PMV < +0.2
B	< 10	-0.5 < PMV < +0.5
C	< 15	-0.7 < PMV < +0.7

객실의 공조 쾌적성을 평가하기 위해서 승객들이 오랫동안 머무르게 되는 침대, 소파, 책상 그리고 객실의 중앙과 창가에서 기류속도, 온도, PMV, PPD 값을 계산하여 room unit 방식과 wardrobe duct 방식의 열적 쾌적성을 평가하여 비교하였다.

## 4. 계산결과 및 고찰

### 4.1 계산결과

현재까지 크루즈선 객실내의 인체를 고려하여 공조 쾌적성 평가를 수행한 연구는 찾기 어렵다. 크루즈선 객실내의 열유동 특성과 쾌적성 평가는 외기의 조건과 승객의 활동에 따라 그 결과가 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 하절기 최고 외기 온도 조건

과 최대부하 조건에서 room unit 방식과 wardrobe duct 방식의 공조 쾌적성을 비교하여 고찰하고자 한다.

Fig.3은 room unit 방식의 객실 중앙 종단면에서 PMV 값을 보여준다. 창가와 유닛 출구를 제외하고 나머지 대부분 영역에서 ±0.5이내의 높은 쾌적성을 보여준다. 이것은 중앙상부의 room unit에서 공급하는 급기가 공간 전체에 고르게 분포됨으로써 환기의 효과가 높은 것으로 판단된다.

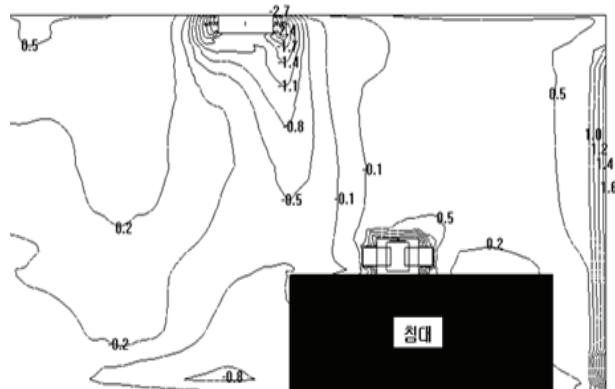


Fig. 3 PMV Contour of Pax. cabin with room unit system

Fig.4는 wardrobe duct 방식의 객실 중앙 종단면에서 PMV 값을 보여준다. duct에서 직접적으로 급기되는 공간의 중앙 영역은 0 ~ -0.5 값으로 약간 추위를 느낄 수 있는 상태이고 창 주변 공간과 창과 인접한 침대에서는 0.5~1.5정도의 값으로 쾌적성이 낮은 것으로 나타났다. 이것은 옷장의 상부에서 중앙방향으로 공급된 급기가 창으로 유입되는 복사에너지를 적정하게 냉각시키지 못하는 것으로 판단된다.

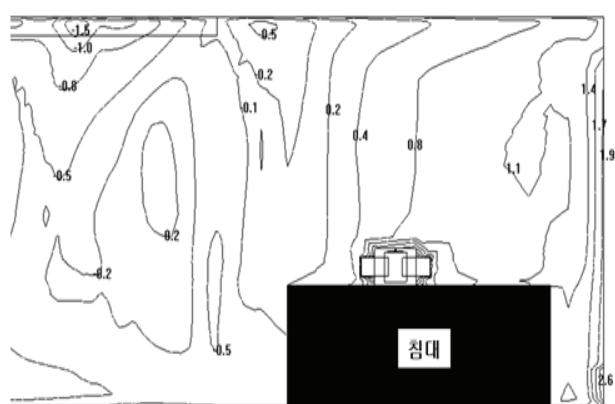


Fig. 4 PMV Contour of Pax. cabin with wardrobe duct system

Fig. 5는 객실의 책상, 소파, 중앙, 침대, 창가에서 기류속도, 온도, PMV, PPD의 계산 값을 room unit 방식과 wardrobe duct 방식을 비교하여 보여준다.

기류속도는 room unit 방식에서 모든 위치에서 ISO 7730 기류속도 A 등급 기준인 0.12 m/s 이하를 만족한다. 그러나, wardrobe duct 방식에서는 소파, 책상, 창가에서 0.2 m/s 이상의

값으로 ISO 7730 기류속도 A 등급 기준을 만족하지 못한다. 특히, 창가에서는 태양복사의 부력에 의한 영향으로 0.5 m/s 정도의 기류속도가 나타났다.

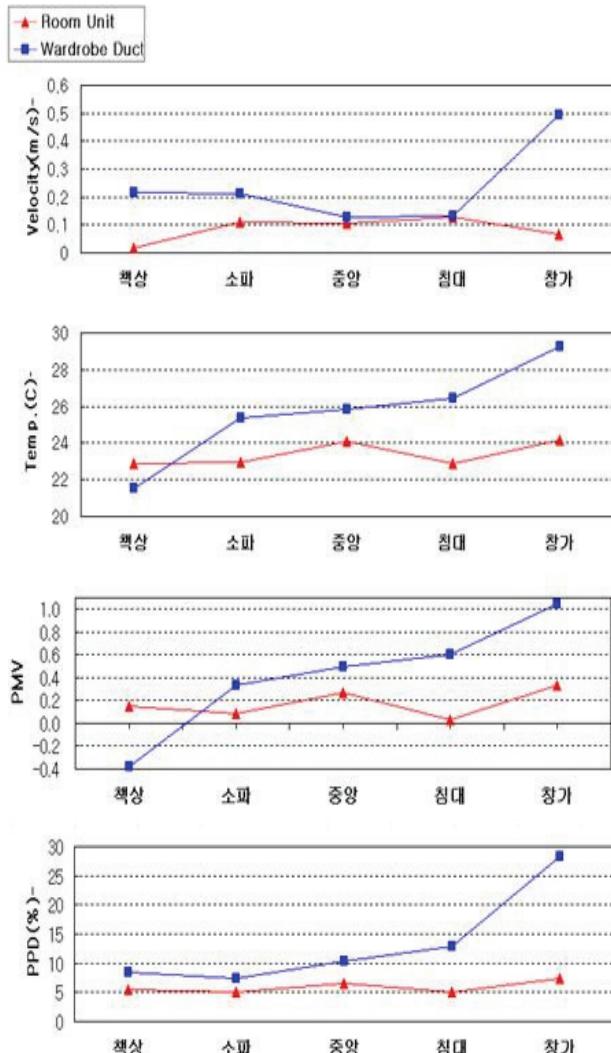


Fig. 5 Calculation Results for Pax. Cabin

온도는 room unit 방식에서의 모든 위치에서 22.9~24.2°C로 목표온도인 24°C를 잘 만족시키다. 이것으로부터 객실의 중앙 상부에 있는 room unit에서 급기된 공기가 공간 전체에 균일하게 분포됨을 알 수 있다. 그러나, wardrobe duct 방식은 급기구 근처인 책상에서 21.6°C로 낮아 추위를 느낄 수 있으며, 객실 안쪽에서 창가 쪽으로 갈수록 온도가 점차 상승하여 창가는 29.3°C로 상당히 높았다. 이것은 객실 벽중앙의 상부에서 급기된 공기가 공간 전체에 균일하게 전파되지 못하여 급기구에서 멀수록 온도가 상승하기 때문이다. 창가에서는 태양의 복사로 인해 상당히 높은 온도까지 상승하게 된다.

PMV는 room unit 방식에서 침대, 소파, 책상 등 승객의 체류 시간이 긴 위치에서는 0.20이하로 A등급을 만족하여 열적 쾌적성

이 높은 것으로 나타났다. 비교적 체류시간이 짧은 공간의 중앙과 창가에서는 B 등급을 만족한다. wardrobe duct 방식에서는 안쪽에서 창 쪽으로 갈수록 값이 상승하여 열적 쾌적성이 낮아진다. 소파와 책상에서 B 등급을 만족하며, 공간 중앙과 침대에서는 C 등급을 만족하고, 창가는 1.05로 어느 등급도 만족하지 못할 정도로 공조 쾌적성이 불량한 것으로 나타났다. 특히, 책상에서는 음의 값으로 추운 상태를 나타내고 있다.

PPD는 room unit 방식에서의 침대, 소파, 책상에서 6% 이하로 A등급을 만족하여 공조 쾌적성이 높은 것으로 나타났다. 공간의 중앙과 창가에서는 B 등급을 만족한다. wardrobe duct 방식에서는 소파와 책상에서 B 등급을 만족하며, 공간 중앙과 침대에서는 C 등급을 만족하고, 창가는 28.3%로 어느 등급도 만족하지 못할 정도로 공조 쾌적성이 불량한 것으로 나타났다.

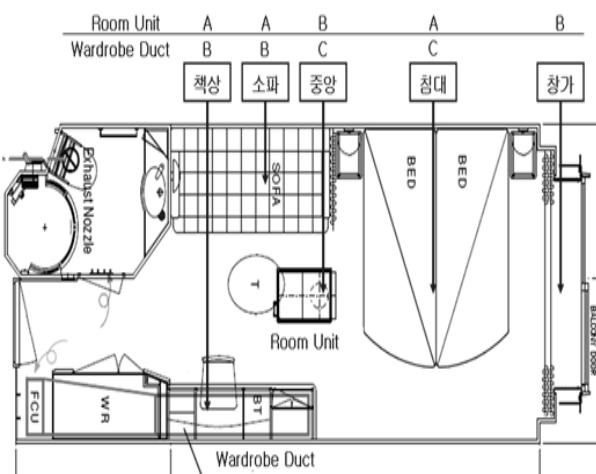


Fig. 6 Result of Categories of thermal environment

## 4.2 고찰

계산 결과를 종합적으로 고찰해보면, room unit 방식에서 침대, 소파, 책상은 A등급을 만족하여 공조 쾌적성이 높은 것으로 나타났다. 이것은 객실 중앙의 상부에서 사방으로 급기되는 공기가 공간 전체적으로 균일하게 전파됨으로써 환기효율을 높이기 때문인 것으로 판단된다. 공간의 중앙은 유닛의 하부로 직접적으로 급기가 되지 못하며, 창가는 태양복사의 영향으로 인해서 B 등급의 열적 쾌적성을 보여준다.

Wardrobe duct 방식에서는 소파와 책상에서 B 등급을 만족하며, 공간 중앙과 침대에서는 C 등급을 만족하고, 창기는 어느 등급도 만족하지 못할 정도로 공조 쾌적성이 불량한 것으로 나타났다. 객실벽 중앙에 위치한 옷장의 상부에서 공급되는 급기는 공간에 전체적으로 균일하게 전파되지 못하여 위치간의 공조 쾌적성의 차이가 크고, 공간 전체의 쾌적성 또한 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 6은 객실의 각 위치에서 room unit 방식과 Wardrobe duct 방식 각각의 열적 쾌적성 등급을 보여주고 있다.

## 5. 결 론

크루즈선 일반객실의 대표적인 공조용 급기 방법인 room unit방식과 wardrobe duct방식에서 기류속도, 온도, PMV, PPD를 계산하여 각 방식의 공조 쾌적성을 비교하고 고찰하여 다음의 결론을 얻었다.

1) Room unit방식에서는 침대와 소파 그리고 책상에서 ISO 7730 쾌적성 기준 A등급을 만족하여 열적 쾌적성이 높은 것으로 나타났다. 이는 객실 중앙의 상부에서 사방으로 급기되는 공기가 공간 전체적으로 균일하게 전파됨으로써 환기효율이 높기 때문이다.

2) Room unit 방식에서는 중앙과 창가는 B 등급의 열적 쾌적성을 보여준다. 이는 공간의 중앙은 유닛의 하부이기 때문에 직접적으로 급기가 되지 못하며, 창가는 태양복사의 영향 때문이다.

3) Wardrobe duct 방식에서는 소파와 책상에서 B 등급을 만족하며, 공간 중앙과 침대에서는 C 등급을 만족하고, 창가는 어느 등급도 만족하지 못할 정도로 공조 쾌적성이 불량하다. 이는 옷장의 상부에서 공급되는 급기가 공간에 전체적으로 균일하게 전파되지 못해 환기효율이 낮기 때문이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 중기거점기술개발사업인 ‘차세대 고부가가치 선박의 기반기술개발’의 일부로 수행되었음을 밝혀둔다.

## 참 고 문 헌

- Park, W.G, Yeon, B.J, Jeong, H.E, & Kim, M.H., 2006, Study on Evaluation of Thermal Comfort in a Passenger Train, *Proceedings of the Society of Air-conditioning and Refrigeration Engineers in Korea*, 24 November 2006, pp.313–318.
- Lee, S.S, Kim, H.S, Lee, C.J, & Jang, M.S., 2004, Assessment of Ventilation Characteristics in a Cabin Onboard, *Proceedings of the Society of Naval Architects of Korea Conference*, 20–22 October 2004, pp.99–104.
- Jang, M.S. et al., 2005, Thermal Environment-based HVAC Operating Design in Cabins on Naval Ships, *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 42(4), pp.402–410.
- Fanger, P.O., 1970, Thermal comfort analysis and application in environmental engineering, *Danish Technical Press*, Copenhagen, Denmark.
- Airpak, 2007, *User’s Guide*, Airpak, pp.31–6, 31–14.
- ISO, 2005, Ergonomics of the Thermal Environment, ISO, 7730



구근회

이호기

최재웅

이재근