

극한 환경 성능시험을 위한 환경챔버 내 시스템 구축에 관한 연구

A Study on the Establishment of a System in the Environmental Chamber for Extreme Environment Performance Test

성기영¹, 한성종¹, 이정원¹, 이정희^{1*}

Ki-Young Sung¹, Seong-Jong Han¹, Jung-Won Lee¹, Jung Hee Lee^{1*}

〈Abstract〉

This paper is a basic test study for the performance verification of equipment and facilities used in extreme environmental conditions, and includes research using a chamber that can artificially create a low-temperature environment. The facility can create a temperature environment from room temperature to -65°C and is constructed to create special environments such as wind speed, artificial snow removal, and artificial ice removal. By artificially creating a polar environment below -40°C and verifying it through installation and preliminary performance tests of the equipment, it is possible to identify potential risk factors that may occur at the work site in advance and prepare for safety accidents. The temperature distribution was observed when descending to a low temperature in a limited space in the chamber, and how the flow changes when the wind speed is applied. Based on this study, we plan to analyze the effects of implementing special environments such as artificial snow removal and artificial ice removal in the future.

*Keywords : Polar environment system, Wind generator, Fluid analysis,
Temperature distribution characteristic*

¹ 주저자, 선박해양플랜트연구소, 해양플랜트산업지원센터
선입기술원

^{1*} 교신저자, 선박해양플랜트연구소, 해양플랜트산업지원센터
책임연구원

E-mail: jhlee@kriso.re.kr

¹ Junior Engineer, Offshore Industries R&BD Center, Korea
Research Institute of Ship & Ocean Engineering

^{1*} Corresponding Author, Offshore Industries R&BD Center,
Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering

E-mail: jhlee@kriso.re.kr

1. 서론

이산화탄소의 과다 배출로 인한 기후변화는 전 세계적으로 관심을 가지고 해결해야 할 큰 문제로 제기되고 있다. IMO(국제해사기구)에서도 온실가스를 줄이기 위해 탄소제로(Net-Zero)를 선언하고 다양한 측면에서 저감 방안을 강구하고 있다. 최근 남극과 북극의 빙하가 빠른 속도로 해빙되면서 극지방 진출을 위한 연구가 다양한 분야에서 진행되고 있다. 인류의 생존에 필요한 기후, 환경, 자원 등의 지속가능성 여부는 미답지인 극지에 달려 있다[1]. 극지는 기후변화에 민감하고 빠르게 반응하기 때문에 여러 환경변화 및 인류에 닥칠 위기를 감지하거나 예측할 수 있는 곳이다.

극지는 평균 -40°C 이하의 극한 환경에서 바람, 눈, 비에 의한 영향을 많이 받기 때문에 선박이나 장비를 운용하는 작업 영역에서 발생할 수 있는 각종 안전사고에 대비해야 한다. 극지를 운항하는 선박의 경우, 고하중의 장비나 물품 운반, 시설 유지보수, 기타 작업 등 작업자가 외부에 노출된 경우 결빙에 의해 낙상하거나 추락하는 상황들이 발생할 수 있기 때문에 작업 환경조성을 고려한 안전교육이 필요하다. 최근 정부에서도 안전 강화를 위해 중대재해처벌법을 발효하여 실행중이므로

안전의식과 더불어 안전사고 예방에 각별히 주의해야 한다. 본 기관에서는 극한 환경조건에 활용되는 설비 성능시험을 수행하기 위해 Fig. 1, Fig. 2와 같이 극지환경성능시험설비(Cold Room)를 구축하였다. 본 설비의 특징은 상온 $\sim 65^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위 내에서 저온 환경을 인위적으로 조성할 수 있도록 설계 및 제작된 중대형 저온 인공환경 챔버이며, 해양플랜트 기자재의 저온 성능 시험평가, 재료 특성 시험, 저온 내구성 및 신뢰도 시험평가, 내빙 설계 시험평가 등을 수행할 수 있는 기능을 포함하고 있다. 그 외 노점온도 -70°C 의 환경조성이 가능한 공압설비를 활용하여 인공제설, 인공제빙, 풍속 등의 극한 환경을 모사할 수 있는 장치들이 구축되어 있어 다양한 조건에서의 성능시험을 수행할 수 있다[2]. 그 외 시스템 구축을 위해 다양한 연구사례를 바탕으로 본 설비에 접목하여 활용할 계획이다[3-8].

본 연구에서는 저온 인공환경챔버 내의 효율적인 온도 제어를 위해 제한된 조건에서 사이드 영역에 다수의 유닛트쿨러(송풍기)를 설치하여 시험설비 내의 강제대류 효과를 증가시켜 주요 센서의 국소적인 온도편차를 ± 2 도 이하로 균일하게 유지할 수 있는지를 검토하고자 한다. 이를 분석하기 위하여 난류 특성을 고려한 유동해석을 수행하여



Fig. 1 Inside the Cold Room



Fig. 2 Cold Room outside outdoor unit

챔버 내 유동분포를 분석하고자 한다. 또한, 저온 인공환경 챔버 내 실험장비에 영향을 줄 수 있는 센터에 설치한 바람발생장치의 속도에 따른 실험 장치 주위의 유동특성을 수치해석을 이용하여 분석하고 챔버 내 다양한 평균온도 영역에서 바람발생장치의 속도에 따라 시험대상체의 국소적 온도 분포 변화를 실험적 연구를 수행하여 분석하고자 한다.

표기된 “A”구역은 실내 냉각을 위한 유니트쿨러와 풍속제어를 위한 바람발생장치가 챔버 내에 설치되어 있다. 유니트쿨러는 “a”부분의 40HP(4기)와 “b”부분 15HP(2기)로 나뉘어져 있다. 40HP의 경우 380V 60Hz 0.75kW 6P로 한기에 Ø550의 팬 4SET가 장착되어 있으며, 전열면적은 각

2. 극지환경성능시험설비의 시스템 구성

이원냉동사이클방식이 적용된 극지환경시험설비는 고온측에 R-22냉매와 저온측에 R-23냉매를 혼합하여 사용하고 있다. Fig. 3에 나타난 것처럼 챔버 내부의 크기(“A”)는 15m(L) × 10m(폭) × 5m(H)로 설계 및 제작되었다. 빨간색 점선으로

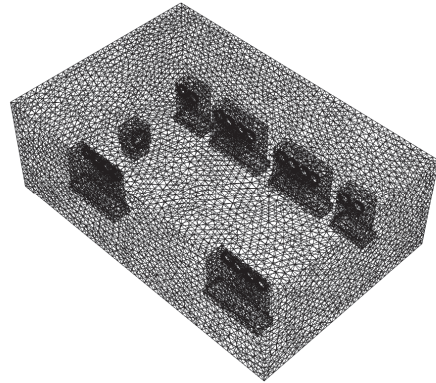


Fig. 4 Mesh generation in cold room

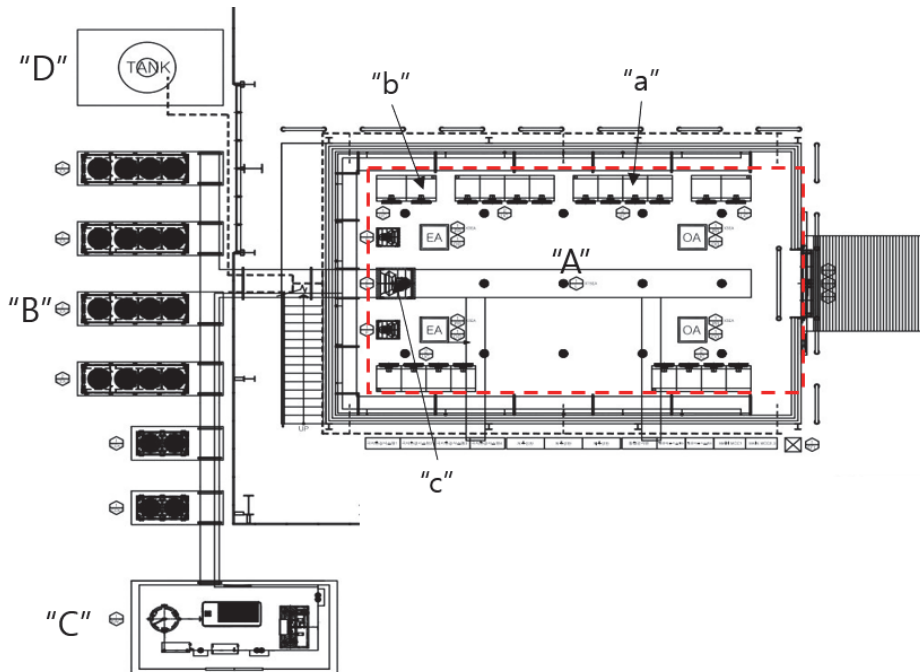


Fig. 3 Polar Environmental Performance Test Facility Layout

161.5m²이다. 15HP의 경우 380V 60Hz 0.4kW 6P로 한기에 Ø550의 팬이 2SET가 장착되어 있고 전열면적은 각 83.8m²이다. 바람발생장치는 “c”의 위치에 고정식으로 되어있으며, 인버터 제어방식으로 3~20m/s의 풍속제어가 가능하다.

“B”구역은 실외기 부분인 콘덴싱유니트로 유니트쿨러와 동일한 용량과 수량으로 외부에 설치되어 있다. “C”구역은 공압설비로 노점온도 -70℃에서 수분이 전혀 없는 건조공기를 공급할 수 있다. 인공제설과 인공제빙을 위해 필요한 특수 설비로 볼 수 있다. “D”구역은 오수탱크로 챔버 내부에서 다양한 환경실험 진행 시 발생하는 해수, 기름, 이물질 등을 탱크에 보관하여 환경오염을 방지하기 위한 용도로 사용되고 있다.

2.1 극지환경성능시험설비의 유동해석

본 연구에서는 일반적인 정상상태의 유체유동해석을 하기 위하여 Full-Navier-Stokes 방정식을 이용하여 해석하였으며, 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = s_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (2)$$

여기서, u_i , p , ρ 는 각각 i 방향의 속도성분, 압력, 밀도를 나타내며, τ_{ij} 는 스트레스 텐서 성분, s_m 는 질량 생성항 성분, s_i 는 운동량 생성

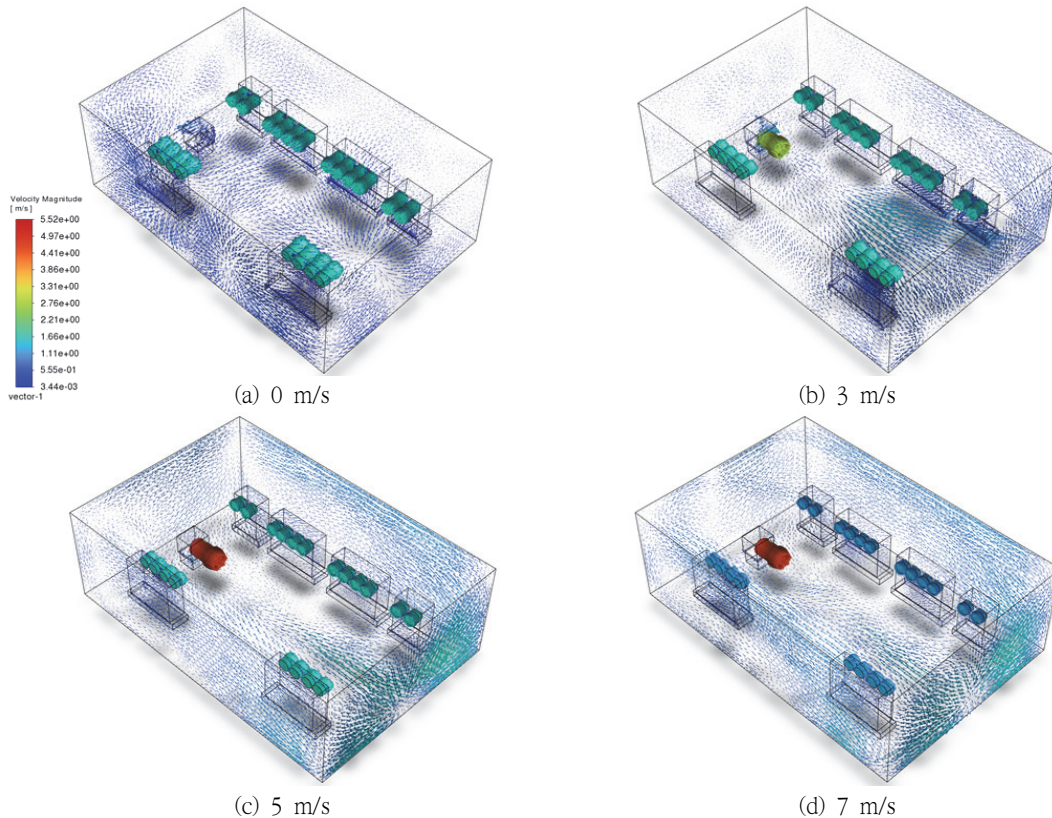


Fig. 5 Velocity distributions in cold room with inlet velocity(3D view)

항 성분을 의미한다. 난류 유동은 일반적으로 시간 평균된 평균적인 물리량으로 표시하고 있다. 이 때 레이놀즈 응력(Reynolds stress)이 나타나게 된다. 이 레이놀즈 응력은 요동(fluctuation)하는 속도성분으로부터 발생하며 해석을 위하여 모델링이 필요하게 된다. 본 연구에서는 일반적인 SST $k-\omega$ 모델[1]을 적용하였다. 난류점성계수는 층류점성계수(μ_l)에 난류점성계수(μ_t)를 더한 유효 점성계수를 이용하여 층류 방정식과 같은 형태의 방정식으로 해석한다.

$$\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t \quad (3)$$

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (4)$$

난류 운동에너지와 소멸율 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (6)$$

여기서 각 변수의 정의는 다음과 같다.

$$F_2 = \tanh \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right) \quad (8)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_\omega k}{CD_{kw} y^2} \right] \right]^4 \right\} \quad (9)$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1) \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \alpha_2 = 0.44 \quad (11)$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0.0828 \quad (12)$$

$$\beta^* = \frac{9}{100} \quad (13)$$

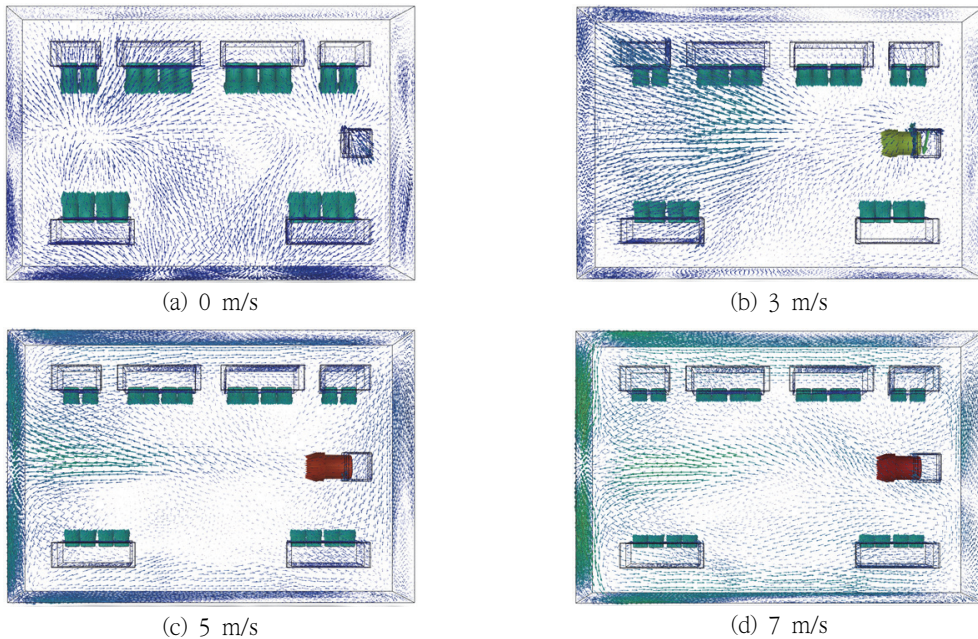


Fig. 6 Velocity distributions in cold room with inlet velocity(Bottom view)

$$\sigma_{k1}0.85, \sigma_{k2} = 1 \quad (14)$$

$$\sigma_{\omega 1}, \sigma_{\omega 2} = 0.856 \quad (15)$$

Fig. 4는 극지환경시험설비의 유동해석을 위한 격자계를 나타낸다. 총 414,899개의 Tetrahedral 격자계를 사용하였다. 팬의 유동해석을 위하여 사이드 송풍기의 입구속도는 1.8 m/s, 바람발생장치의 입구속도는 0, 3, 5, 7 m/s로 각각 적용하고, 입구 난류강도와 난류스케일은 모두 0.5%, 0.01로 설정하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 송풍기의 입구속도 1.8 m/s로 주었을 때 센터 입구속도에 따른 극지환경시험설비 내 3차원 유동분포와 하단 면에서 바라본 유동분포를 나타낸다. 센터 입구속도가 0인 Fig. 5(a)와 Fig. 6(a)에서 사이드 송풍기에 의한 유동은 센터 부분에서 부딪힌 후 위쪽방향으로 이동하여 상하로 이동하고, 중앙부의 한쪽에만 송풍기가 설치된 경우에는 바로 반대편 벽면으로 이동하여 외곽 벽면을 따라 좌우·상하로 퍼져나가 설비 내 모든 영역으로 퍼져 나가는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)~(d)와 Fig. 6(b)~(d)에서 센터의 바람발생장치의 속도가 3, 5, 7 m/s로 증가함에 따라 센터라인 방향의 모멘텀이 증가되어 주변속도보다 센터라인 속도크기가 현저히 증가됨을 볼 수 있다. 또한 센터라인 속도가 증가함에 따라 센터라인 하류지점까지 운동량이 영향을 미쳐 하류에서 속도의 크기가 증가됨을 알 수 있다. 이러한 유동특성은 인공제설의 특성분포에도 영향이 있을 것으로 사료된다.

2.2 극지환경성능시험설비의 온도변화 곡선

온도제어 범위는 상온 조건에서 구동을 시작하여 최소 온도범위인 -65℃까지 구현이 가능하다. 단, 최소 온도범위의 조성은 계절에 따라 소요되는

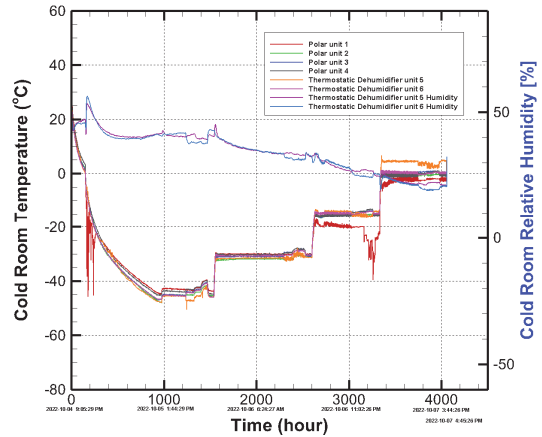


Fig. 7 Cold room temperature change in low temperature conditions



Fig. 8 Temperature deviation at -45 degree setting

시간과 전력소모량의 손실이 크기 때문에 6월~9월 사이 여름을 피하고, 되도록 10월 이후 습도 (70%이하)가 비교적 낮고 상온 온도가 25℃이하일 때 구동하는 것이 효율적이다. Fig. 7에 나타난 그래프는 상온 20℃일 때 구동을 시작하여 -45℃까지 내린 후 다시 온도를 상승시켜 0℃까지 상승되는 과정의 온도와 습도 곡선을 나타낸다. Fig. 8은 -45℃의 온도에 도달한 후 안정화를 위해 6~8시간 유지한 상태의 온도를 모니터링한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 각 설비의 센서별 온도편차가 ±2도 이내로 조성됨을 알 수 있

다. 이것은 Fig. 5(a)와 Fig. 6(a)에서 보는바와 같이 모든 영역에 유동이 골고루 퍼져나가 효율적으로 대류열전달이 이루어짐으로 인한 결과라고 사료된다.

2.3 바람발생장치의 제어조건

바람발생장치는 Fig. 9와 같이 인버터 제어방식으로 조절되는 덕트형인라인팬(DR-FIL900TH)이 사

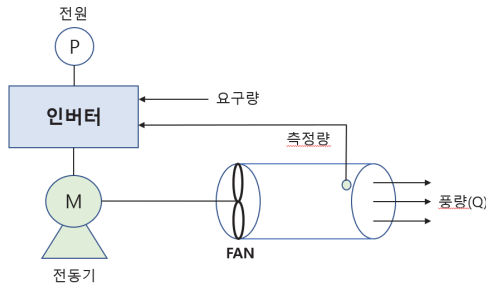


Fig. 9 Inverter Air Volume Control

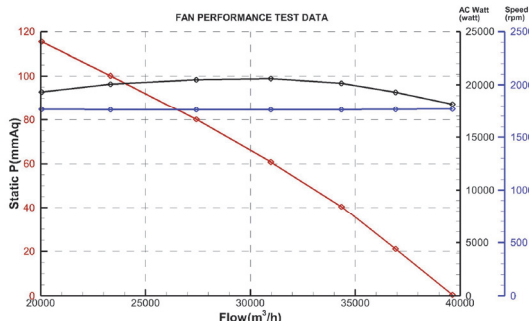


Fig. 10 Performance Curve

Table 1. Wind generator driving conditions

풍속 측정: 팬과 시료와의 거리 5m 기준			
No.	인버터 설정[Hz]	설정풍속[m/s]	측정풍속[m/s]
1	32.65	3	3.05
2	47.25	5	5.05
3	57.45	7	7.01
4	0	0	0

용되었고, 모터는 380V 60Hz 20HP 4P 1기를 사용한다. 인라인팬은 팬에서 바람을 흡입하여 날개 끝부분에서 바람이 나와 송풍기 외벽을 타고 바람이 흘러나가는 방식으로 정압에 비해 풍량이 높고 압력도 동반상승하도록 되어 있다[Fig. 10 참조].

풍속조절은 인버터 제어방식의 특성상 주파수가 가변 될 때 전압도 함께 가변되어 출력되는 방식이기 때문에 0~3m/s이내의 범위는 풍속제어가 불가능하며, 3~20m/s 범위 내에서 제어가 가능하다. Table 1에 팬과 시료와의 일정한 거리에서 풍속제어 확인을 위해 이동식 측정장치(Testo480)로 측정된 결과값을 나타낸다.

3. 시험 수행 절차

시험 수행은 극지운항 선박의 데크 또는 극한 환경에서 장비를 유지보수 하는 바닥판으로 작업자 안전을 위해 사용되는 발열체를 시험 대상체로 사용하였다. 실험은 상온 실험과 저온 실험으로 나누어 진행되었다. 상온 실험은 저온 실험을 진행하기에 앞서 기본성능과 전원 차단 등의 문제가 없는지 사전 점검을 위한 예비확인 단계로 볼 수 있다. 극지환경성능시험설비의 저온 시험 운용조건은 상온에서 -45℃까지 온도를 내린 후부터 시험이 진행되었다. 4가지 경우의 온도 조건(-45℃, -30℃, -15℃, 0℃)과 각 온도 조건마다 챔버 내 안정화를 위해 6~8시간의 유지 시간을 두었고, 바람발생장치는 제어 컨트롤러 전원 인가 후 10분이 지난 후부터 조건별로 구동시켰으며, 구동은 앞에서 설명한 Table 1과 같은 조건으로 설정하였고, 시험은 아래의 순서대로 진행하였다.

- ① 콜드룸 내부온도를 상온에서 -45℃(±1℃)로 설정 후 온도를 내린다.
- ② -45℃의 온도에 도달한 후 안정화를 위해 6

~8시간 온도를 유지한다.

- ③ 온도 유지 후 인버터 제어를 통해 바람발생 장치(풍속)를 3m/s로 구동 시작 및 제어 컨트롤러 전원을 60℃로 인가한다.
- ④ 풍속이 시작되고 10분간 유지, 10분 후 안정화가 되었을 때 60분간 온도 데이터를 기록 및 저장한다.
- ⑤ 전원 인가 후부터 컨트롤러의 전원은 온도설정이 바뀌기 전까지 계속 on 상태로 유지한다.
- ⑥ 풍속 조건을 5m/s로 조정 후 10분간 유지 후 위의 순서대로 진행한다(나머지 풍속 조건도 동일).
- ⑦ 온도설정이 바뀌는 각 지점(-45℃, -30℃, -15℃, 0℃)에서만 컨트롤러의 전원을 off 한다.

3.1 온도변화 및 풍속의 영향

시험대상체를 Fig. 11과 같이 인공환경챔버 내에 설치하고 저온 환경 실험을 수행하였다. 시험대상체의 내부에 설치된 발열필름의 발열성능 및 발열 분포를 확인하기 위해 Fig. 12와 같은 순서로 온도 센서 18개를 부착하였다. 설치 위치는 시험대상체 표면 좌우 동일한 간격으로 일정하게 설치하였다.

표면온도데이터는 데이터 로거(GL840)를 통해 기록되며, 온도 데이터는 GBD 파일로 저장되고 프로그램에서 Excel 파일로 일괄 변환하면 된다.

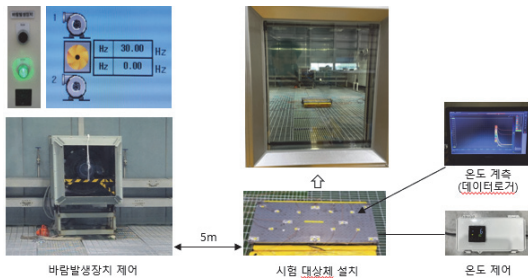


Fig. 11 Test subject installation

데이터로거는 DC전압, 전류, 온도, 습도 및 기타 센서를 통한 데이터를 측정 및 저장하는 기능을 가지고 있으며, 시험에 사용된 데이터로거는 본체 한대에 최대 20채널의 온도센서를 부착하여 데이터를 취득할 수 있다.

Fig. 13은 상온 상태에서 진행된 챔버 내부의 온도변화를 나타낸다. 제어 컨트롤러를 통해 시험 대상체에 +60℃로 온도를 인가하여 진행된 시험으로 시험 초기 챔버 내부 온도는 상온 24℃였으며, 풍속을 조건별로 상승했을 때 챔버 내부 온도가 점차 상승하면서 최대 35℃까지 상승하는 것을 확인하였다. Fig. 14의 그래프는 상온 조건일 때, 풍속 조건이 변하더라도 설정된 60℃의 온도 범위(±5℃)에서 고르게 발열되는 것을 알 수 있었다.

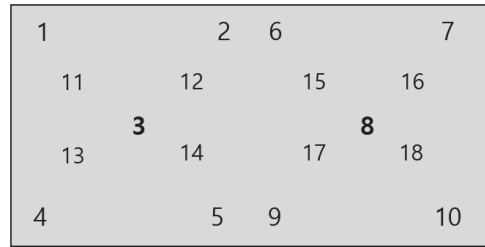


Fig. 12 Temperature sensor attachment location

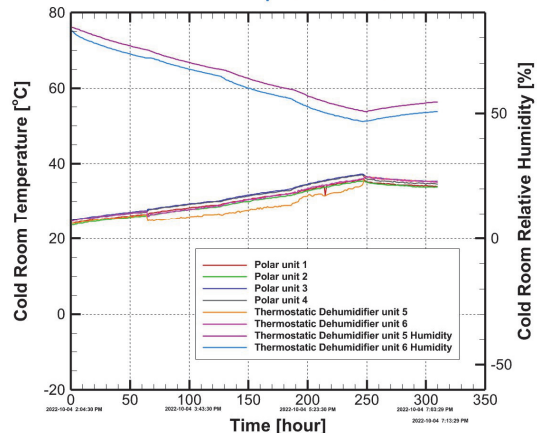


Fig. 13 Cold room temperature change under room temperature conditions

저온 실험은 챔버 내부 온도를 -45°C로 내린 후부터 4단계로 온도를 올리면서 풍속을 인가하는 방식으로 진행되었다. 저온 실험과 관련된 챔버 내부의 온도변화 그래프를 Fig. 15에 나타내었다. -45°C의 조건에서 시험 후 온도조건을 -30°C로 상승하면 도달하는데 약 20분 정도가 소요되었으며, 극지 1~4호기에는 각 시스템마다 히터가 5개가 설치되어 있어 온도를 상승시키는 시간은 온도

를 하강시키는 시간에 비해 비교적 짧게 소요된다. 상온 실험과 달리 저온 실험에서 풍속을 조건에 따라 인가하면 챔버 내부의 온도가 -45°C기준일 때 풍속 3m/s에서는 시험대상체 중앙에 부착된 센서 3번과 8번에서 표면온도가 약32~44°C. 가장 자리에 부착된 센서 2번과 10번은 약 12~14°C로 측정되었다. 풍속 5m/s에서는 3번과 8번의 표면온도가 18~19°C, 2번과 10번은 1~5°C로 측정되었다. 풍속이 가장 높은 7m/s에서는 3번과 8번의 표면온도가 7~18°C로 편차가 크게 나타났으며, 2번과 10번은 -6~-2°C로 발열 성능이 현저히 저하되는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 풍속이 0m/s인 경우는 3번과 8번이 41~51°C, 2번과 10번이 30~34°C로 측정되었다. 위와 같은 방법으로 온도조건을 -30°C, -15°C, 0°C로 각각 설정 후 풍속을 조건별로 인가했을 때 저온으로 내려갈수록 표면 온도분포가 불규칙하게 나타나면서 발열 효율이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 극지환경에 노출되었을 때 온도와 풍속에 대비한 안전한 작업환경을 유지하기 위해서는 풍속에 따라 제어기의 온도를 자동 조절하여 시험대상체의 표면 온도를 일정하게 유지할 수 기술개발이 요구된다. 최근 탄소소재를 활용한 연구들이 진행되면서 열효율이 높고 전기전도가 우수한 제품들이 개발되고 있어 이러한 문제는 해결될 것으로 사료된다.

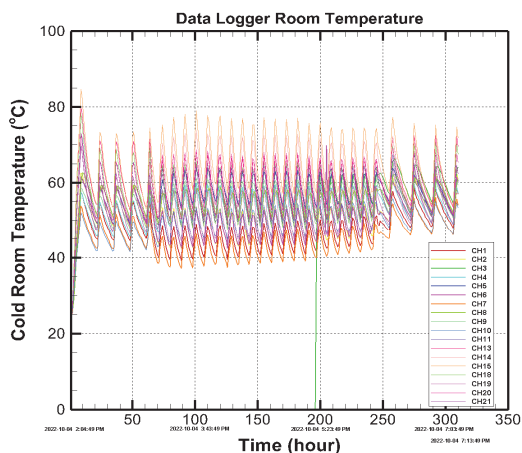


Fig. 14 temperature distribution of test subject at room temperature

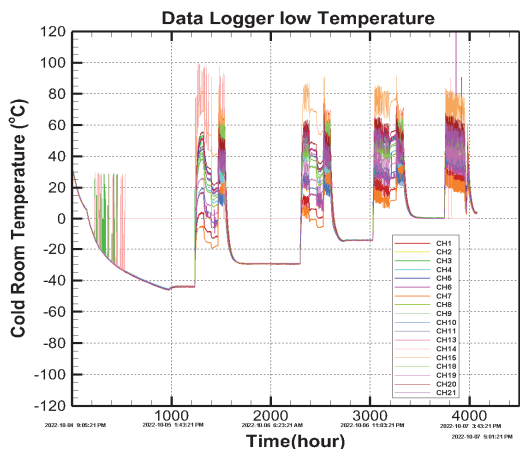


Fig. 15 data logger temperature change in low temperature conditions

4. 결론

본 연구에서는 기관에 보유한 상온 ~ -65°C의 저온 환경을 인위적으로 조성할 수 있는 극지환경 성능시험설비(Cold Room)를 활용하여 챔버 내부의 흐름을 유동해석을 수행하였고, 실험을 통해 온도변화와 풍속의 영향을 관찰하였다.

첫째, 난류 특성을 고려한 정상상태의 유동해석

을 통해 극지환경성능시험설비 챔버 내 유동흐름은 모든 영역에서 골고루 퍼짐으로 효율적인 대류 열 전달이 이루어지는 것을 확인하였고 센서별 온도편차가 ± 2 도 이내로 구성되어 저온 챔버 내 시험시스템이 환경 제어에 적절함을 확인할 수 있었다.

둘째, 제한된 공간 내에서 온도를 -45°C 로 조성한 상태에서 풍속을 인가하면 유동해석을 통해 분석한 결과와 같이 풍속이 증가함에 따라 유동은 점점 더 하단 바닥면에서 위쪽으로 상승하여 센터라인 하단에서 풍속의 크기가 커져 시험대상체에 영향을 미치는 것을 알 수 있었고 향후 인공제설 및 인공제빙의 영향을 고려할 때 환경을 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

셋째, 극한 환경의 작업조건은 보통 -45°C 의 열악한 기온 조건에서 운용되기 때문에 선박에 탑재된 각종 기자재의 국소적인 온도변화에 따라 구동 성능에 영향을 주고 있다. 각 기자재의 국소적인 센서별 온도 측정이 가능한지 분석하기 위해 발열 필름이 적용된 시험대상체를 이용하여 온도분포를 확인할 수 있었다. 내한 성능 최적화를 위한 기술 개발의 필요성과 극지와 유사한 환경을 다양하게 조성하여 안전에 대비한 시험연구에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구를 기반으로 향후 연구에서는 온도변화에 따른 풍속의 영향을 세밀하게 분석하여 풍속이 인가된 상태에서 인공제설 및 인공제빙에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고 인공환경챔버의 활용 범위를 파악할 계획이다.

후 기

본 논문은 해양수산부 공공수탁사업인 “2024년 해양플랜트 서비스산업 장비 공동 활용 및 인력양성 사업”에 의해 수행되었습니다(PGS5141).

참고문헌

- [1] Ryoo, Dong-Keun.: The Analysis of Future Promising Industries of Busan and Marine Policy in the Era of the Northern Sea Route. Journal of the Korea Port Economic Association, pp.175-194, (2014)
- [2] Sung, Ki-Young.: Establishment of low temperature environment system using polar environment performance test construction. Journal of the Korean Society of Industry Convergence, pp.845-851, (2022)
- [3] Ko, Yeong-Ung. : Study on the Heat Performance of CNT/carbon Fiber Plane Heater. Textile coloration and finishing, pp. 65-71, (2020)
- [4] Yul-Ho Kang. : A Study on the CFD Analysis and Estimation of the Energy Efficiency of Cryogenic Chamber for Extreme Climate Test. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering,
- [5] M.K. Kim. : Study on the Thermal-Fluid Analysis of Cryogenic Chamber for Cold Climate Test of Large Wind Turbine Parts. Journal of Computational Fluids Engineering, pp.8-14, (2015)
- [6] Yoon, Jung-In.: Performance Analysis of Cascade Refrigeration System with Respect to Refrigerants Applying to High Temperature Cycle. Journal of the Korean Society for System Engineering, pp.45-50, (2017)
- [7] Kim, Jong-Ryeol.: Prediction on Performance of Cascade Refrigeration System Using Alternative Freon and Natural Refrigerants. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, pp.1427-1433, (2012)
- [8] Cho, Young-min.: Study on the Temperature Distribution of Cabin under Various Car Heating Modes. Journal of the Korean Society for Railway, pp.558-565, (2012)
- [9] Menter, F.R. : Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows, pp. AIAA 93-2906, (1993)

(접수: 2024.09.25. 수정: 2024.10.08. 게재확정: 2024.10.10.)