

밀폐 공간에서 용접작업을 위한 단열 복합재 프레임의 설계 적용 연구

이재열*,** . 전광우** . 홍성호** . 신광복*†

A Study on the Application of Thermal Insulation Composite Frame for Welding in Enclosed Space

Jae-Youl Lee*,**, Kwang-Woo Jeong**, Sung-Ho Hong**, Kwang-Bok Shin*†

ABSTRACT: In this paper, the design application for the lightweight and insulation of the manipulator of the mobile welding robot for the closed/narrow space is presented. A variety of robotic platforms have been developed for weld-worker using a welding robot outside a workpiece for welding work in a complex and narrow space such as a ship or an offshore plant. Normally, The development process of robots consists of machine development, electronic device development, control algorithm development and integration verification considering application environment and requirements. In order to develop the robustness of the welding robot, the lightweight design of the robot manipulator considering the environmental conditions was performed in the basic design of the robot platform. Also, The results of the robot selection and validation, analysis and testing for the insulation performance and cooling performance and the results of the research are shown.

초 록: 본 논문에서는 밀폐/협소의 공간에 적용을 위한 이동형 용접 로봇의 매니퓰레이터의 경량화 및 단열 성능 확보를 위한 설계 적용 연구 내용을 나타내었다. 선박 및 해양플랜트와 같이 구조가 복잡하고 협소한 공간에 대한 용접 작업을 위하여 용접사를 작업 대상물 외부에서 용접로봇을 이용한 용접작업을 위하여 다양한 로봇 플랫폼이 개발되고 있다. 일반적인 로봇의 개발 과정은 적용 환경과 요구조건을 고려하여 기계 개발, 전자 장치 개발, 제어 알고리즘 개발 및 통합 검증으로 이루어 진다. 용접로봇의 완성도 높은 개발을 위하여 로봇 플랫폼의 기본 설계에서 환경 조건을 고려한 로봇 매니퓰레이터의 경량 설계를 수행하였다. 또한, 단열성능 및 냉각 성능 확보를 위한 소재 선정과 검증, 해석 및 시험의 과정을 거쳐 개발된 로봇과 연구 결과를 나타내었다.

Key Words: 이동형 용접로봇(Mobile welding robot), 복합재료(Composite materials), 경량화(Lightweight), 단열(Thermal insulation), 열유동해석(Thermal fluid analysis)

1. 서 론

해양 자원에 대한 지속적인 개발 경쟁으로 인하여 전 세계적으로 해양 플랜트에 대한 개발이 활발히 이루어 지고 있으며, 국내의 해양 플랜트 납품 수주도 지속적으로 증가

하는 추세이다. 해양 플랜트는 해상에 설치된 이후 최소 30년 이상 수명이 확보되어야 함으로 까다로운 제작 조건이 요구된다. 해양 플랜트 용접의 경우 예열 및 용접열 등에 의한 약 80~120°C 이상의 고온 환경에서 작업이 이루어지고 형태가 협소하고 대부분 밀폐된 공간에서 용접사가 매우 불편한 용접 자세를 유지하면서 작업을 수행하여야 하는

Received 21 August 2018, received in revised form 10 October 2018, accepted 13 October 2018

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanbat National University

*†Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Corresponding author (E-mail: Shin955@hanbat.ac.kr)

**ICT Robotics Convergence Research Center, Manufacturing Robotics R&D Division, Korea Institute of Robot and Convergence

어려움이 있다.

협소 및 밀폐 공간에서 수행되는 용접 작업은 용접 흠(welding fume), 분진(dust), 용접 열(welding heat) 등에 의한 온도 및 분진 발생 등의 열악한 작업환경을 수반하여 작업자의 작업 조건을 어렵게 하고 있다. 또한, 다중 용접 작업과 같이 난이도가 높은 용접 작업에 대하여 용접사의 기술 능력도에 의존한 품질 관리가 이루어지고 있는 현실로 용접 로봇을 통한 작업 인력 대체가 절실히 요구되는 실정이다[1-4].

밀폐 및 협소 공간에서의 용접 작업을 위한 로봇의 개발 시 고려되어야 하는 요소는 작업자가 복잡하고 협소한 공간에서 로봇의 이동 및 설치를 손쉽게 할 수 있는 경량성과 밀폐된 공간에서 고온의 용접열에 노출되어 있는 로봇의 성능을 확보할 수 있는 단열성이 고려되어야 한다. 하지만 현재 개발된 대부분의 산업용 용접 로봇은 고려되는 현장에서 적용이 불가능한 제품이 대부분이다. 본 논문에서는 밀폐 및 협소 공간에서 용접이 가능한 이동형 용접로봇 암에 대한 설계와 단열성능을 고려한 복합소재의 적용 및 프레임 내부에서 구동기의 냉각을 위한 성능에 대한 연구 내용을 기술하였고, 제 2장에서는 이동형 경량 및 단열 용접 로봇 암과 이동체에 대한 설계와 제어시스템을 소개하고, 제 3장에서는 경량 및 단열 용접로봇 프레임의 개발을 위한 소재 선정 및 단열 성능 시험에 대하여 언급하고 제 4장에서는 선정된 조건을 고려한 시제품 성능 시험을 통한 검증 결과를 나타내었다.

2. 경량 및 단열 이동형 용접 로봇의 설계

2.1 적용 대상 및 기본 설계

이동 및 소형 용접로봇 시스템의 적용 대상의 선정은 다수의 격벽으로 내부 공간이 나누어진 해양플랜트의 Box girder 형태로 $1.0 \times 1.0 \times 1.0(m)$ 의 대표 치수를 가지고 격벽 판재 중앙에 작업자의 이동을 위한 내부 공간 접근 구멍(Access hole)이 가로 및 세로 각 0.6m의 크기를 가지고 있다. 이동형 용접 로봇의 개발을 위한 현장 대상물 및 대표 환경 정의는 Fig. 1과 같으며 격벽으로 이루어진 협소 공간들로 구성된 구조물을 선정하였다.

선정된 현장 대상물에 용접 작업을 위하여 이동형 용접 로봇의 기본 설계 개념은 서론에서 기술한 작업환경, 용접 공정, 작업자의 수 및 숙련도 등을 추가 고려하여 용접 자세 유지 및 공정을 위한 6-자유도 용접 암과 협소 공간에서 이동이 가능한 이동체를 조합하는 구성으로 설계를 수행하였고 Fig. 2에 나타내었다. 설계된 이동형 용접 로봇의 크기는 작업 대상물 바닥에서 용접 토치 끝 단까지의 거리 약 1.5m이고, 모바일 플랫폼은 가로 0.6m, 폭 0.38m, 높이 0.15m의 크기로 설계되어 협소 공간으로 정의된 $1m^3$ 체적 공간에서 용접 작업이 가능하도록 구성 하였다.



Fig. 1. Definition of object for development robot application

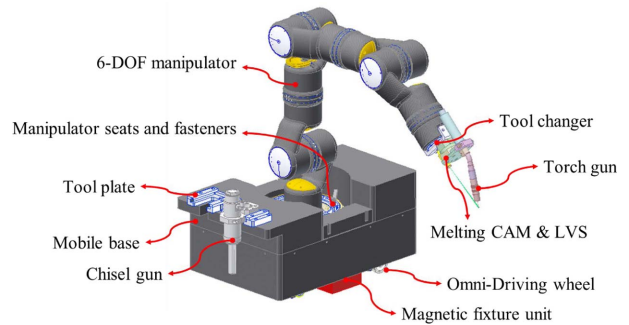


Fig. 2. Components of mobile weld robots

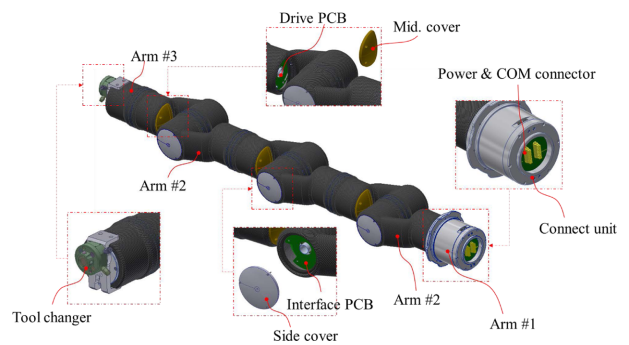


Fig. 3. External parts configuration of weld manipulator (6DOF)

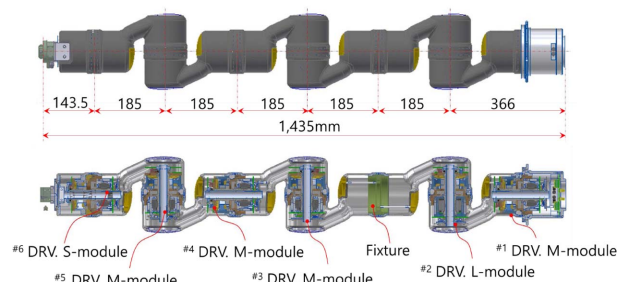


Fig. 4. Internal parts configuration of weld manipulator (6DOF)

협소 공간에 용접을 위한 로봇은 주변 온도 상승에 따른 단열, 냉각 조건을 고려하여야 하고, 경량화를 통한 로봇의 이동 설치가 용이하게 개발되어야 한다. 환경 및 경량화 등의 요구조건과 함께 로봇 외부 온도 $120^{\circ}C$ 온도 조건, 6자유도 로봇 암의 자체 중량 15kg 이내 그리고 기반 하중 5kg을 설계 목표를 선정하였다. 경량성과 단열 성능을 위하여 용접 로봇 암의 프레임 구조에 대해 CFRP(Carbon Fiber

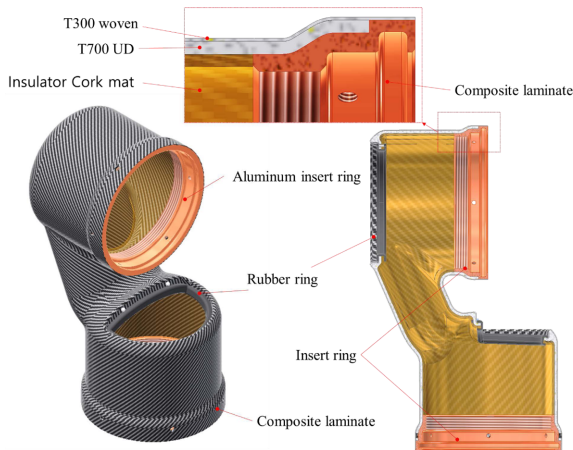


Fig. 5. Composition of composite insulation frame module

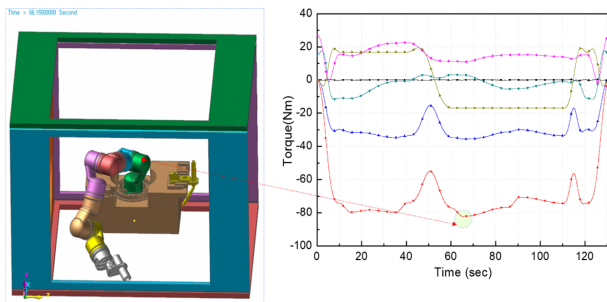


Fig. 6. Max. drive torque calculation using multibody dynamics

Reinforced Plastic)와 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) 및 단열재를 이용한 적층 복합 구조를 고려하였다[5-10]. Fig. 3, 4는 설계된 경량 및 단열 용접 로봇 암의 외부 구성과 내부 구성에 대해 나타내었고 각 관절을 기준으로 치수 정보를 나타내었다.

복합소재를 이용한 프레임 개발하기 위하여 로봇 암 중심축을 기준으로 대칭형 구조를 선정하고 관절을 기준으로 모듈화 설계를 수행하였다. 또한, 경량 및 단열 성능 확보를 위하여 고려된 복합재료를 모듈화가 가능한 프레임의 형태로 설계를 수행하였고 Fig. 5에 나타내었다. 모듈 형태의 복합재 프레임은 금속재로 구성된 구동 모듈과의 견고한 조립을 위해 알루미늄 삽입 고정 프레임을 포함하고 있으며 CFRP와 GFRP를 단방향 섬유구조와 직조 형태의 섬유구조의 프리프레그를 고려하였다.

기본 설계된 경량 및 단열 프레임 모듈에 대하여 적층 설계 정의를 위하여 유한요소해석을 이용한 설계를 수행하였다. 다물체 동역학을 통해 Fig. 6과 같이 2번 구동축 기준 최대 토크를 산출하였으며 이를 적용하여 Fig. 7과 같은 조건으로 구조해석을 수행하였다. Fig. 8은 프레임에 대해 계산된 최대 토크에 안전율 1.5 하중을 적용하여 구조 해석을 수행하고 적층 복합재 영역에 대하여 파손 지수 평가를 수행한 결과를 나타내었으며 파손기준은 Tsai-Wu 및 Hoffman



Fig. 7. Boundary and load condition

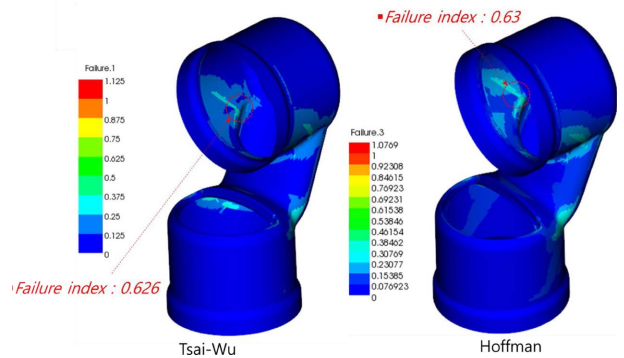
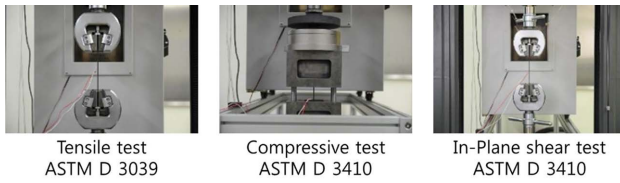


Fig. 8. Result of composite damage index after structural analysis (Tsai-Wu and Hoffman)

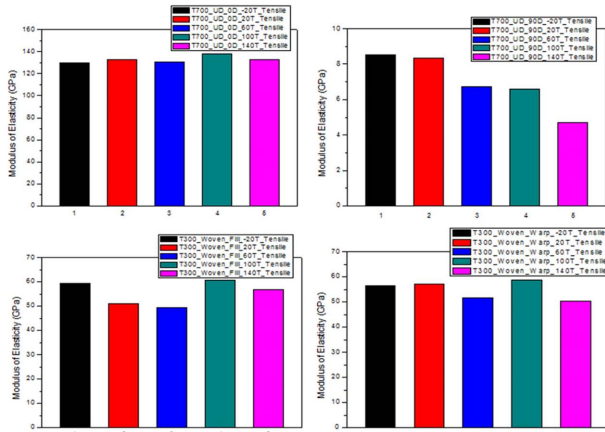
Table 1. Stacking sequence of composite frame - design level

Stacking sequence					
T300 woven [WSN 3KY]			T700 UD [USN 200B]		
Count	Direction	Thickness	Count	Direction	Thickness
Ply 1	Fill	0.23mm	Ply 1	0	0.195 mm
Ply 2	Warp	0.23 mm	Ply 2	90	
Total ply		0.46 mm	Ply 3	0	
Cork mat			Ply 4	45	
			Ply 5	-45	
Count	Direction	Thickness	Ply 6	90	
1	None	2 mm	Ply 7	90	
Total ply		2 mm	Ply 8	-45	
			Ply 9	45	
			Ply 10	0	
			Total ply		2 mm

파손기준식을 적용하였다[11]. 해석 연구를 기반으로 설계 과정을 통해 Table 1과 같은 적층 정의 및 소재의 선정을 수



(a) Tests for material properties



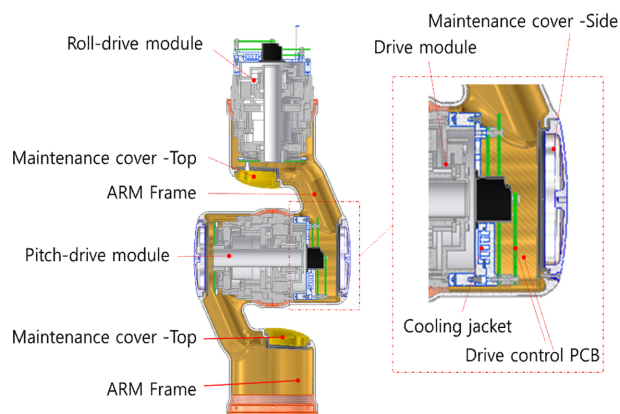
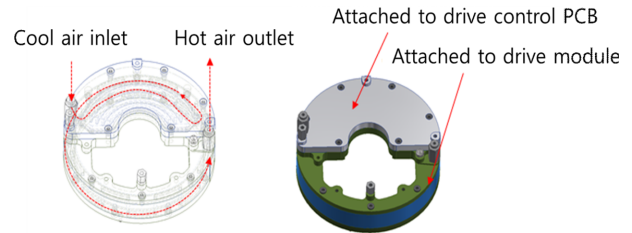
(b) Mechanical properties of composite materials

Fig. 9. Mechanical properties test considering temperature

행하였고, 해석 시 적용 소재에 반영된 복합재 소재에 대한 물성 정보는 로봇의 운영 온도 조건($-20^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$)을 고려한 기계적 물성 시험을 수행하여 획득하였다. 기계적 물성 시험은 인장, 압축, 면내 전단 시험을 수행하였으며 각각의 시험은 ASTM 규정에 의거하여 수행하였다[12-14]. Fig. 9는 소재 물성평가와 온도 환경에 따른 기계적 물성을 보여준다.

2.2 냉각 및 단열 성능 확보를 위한 설계

경량 및 단열 복합재 프레임의 성능 극대화를 위하여 Fig. 10과 같이 단열 프레임 내부에 구동 모듈이 밀폐된 형태로 장착 될 수 있는 구조로 기본 설계를 적용하고 구동 모듈의

**Fig. 10.** Design of lightweight and thermal insulated composite frames and drive modules**Fig. 11.** Design of cooling unit for direct cooling of drive module and drive control PCB

냉각을 위한 냉각 자켓은 Fig. 11과 같이 설계에 반영하였다.

냉각 자켓은 압축 공기를 냉각 자켓 내부로 투입 할 수 있는 구조로서 냉각 자켓의 내부에 위치하고 있는 덮개 하부에 설계 반영된 방열 핀(thermal pin)에 외부의 낮은 온도를 가지는 압축 공기를 순환시켜 방열 핀으로부터 흡열된 공기를 외부로 연결된 순환 호스를 통해 배출하는 형태로 구성하였다. 냉각 자켓은 관절 구동기의 최대 발열체인 모터와 구동기 제어 전자 보드의 발열 소자에 접촉된 구조로 설치되어 전도된 열을 냉각할 수 있는 구조로 설계되었다.

3. 단열을 위한 복합재 프레임 연구

3.1 적용 소재의 단열성능 평가

경량 및 단열 복합재 프레임의 적용 소재에 대한 단열 성능을 확보하기 위하여 제작 용이성을 고려한 소재 선정을 수행하였다. 개념 설계 단계에서 선정된 소재는 Table 2에 나타내었으며 수지의 경화온도, 강도/강성 그리고 열특성을 고려하였다. 소재의 조합에 대한 단열 특성을 평가하기 위하여 단위 시험 프레임을 제작하고 내열 특성 시험을 위한 환경을 구성하여 시험 평가를 진행하였다. 시험 프레임의 구분은 단열재의 유무와 프레임 구성 재료에 따라 Table 3과 같이 고려하였으며 시험 프레임의 제작은 경량 및 단열 로봇 프레임과 동일한 제작 공정을 가질 수 있도록 구성하였다.

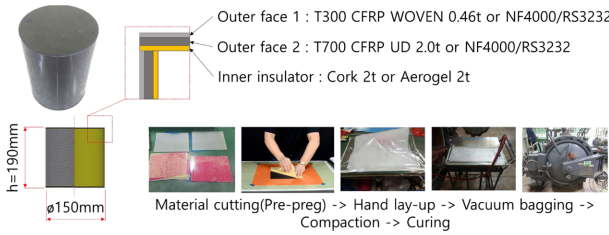
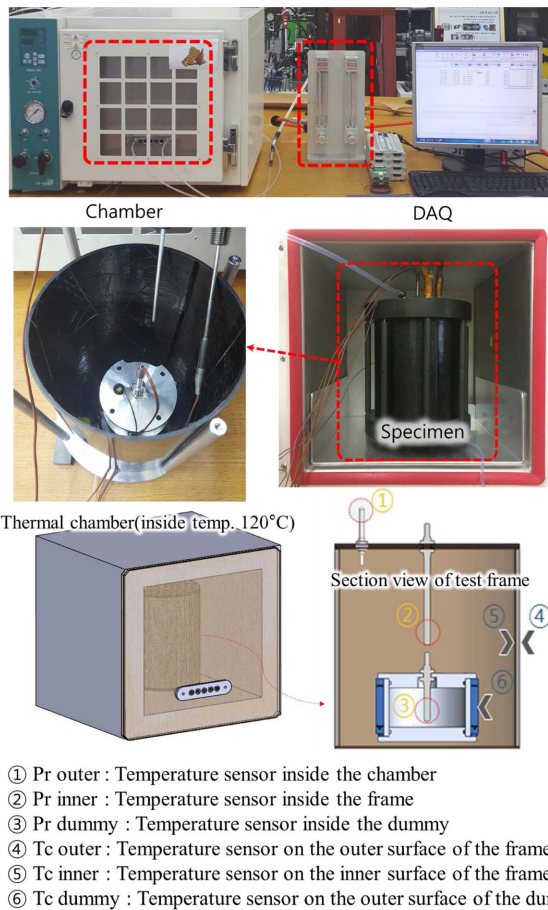
Fig. 12, 13은 시험편 제작 형상과 제작 과정 및 단열 성능 평가를 위한 시험 장치의 구성을 나타내었으며 시험 환경 구성은 단열 프레임 외부의 분위기 온도를 조성하는 온도

Table 2. Heat transfer coefficient of applied materials

Materials[Product name]	Thermal conductivity (W/mk)
CFRP [Hexel/SK Chemical - USN 150/WSN 3K]	2.0~3.5
GFRP [HFG/GOOKDO- NF/RS]	2.3~3.5
CORK [KIRUNG - Cork roll 2t]	0.045
AEROGEL pad [Aerogel - pyrogel XT]	0.02
ALUMINUM	205

Table 3. Specimens of thermal insulation test

Specimens	Considered materials	Thickness (mm)
1	CFRP	2.5
2	GFRP	
3	CFRP + Cork	2.5+2
4	GFRP + Cork	
5	CFRP + Aerogel pad	

**Fig. 12.** Specimen fabrication and fabrication process**Fig. 13.** Test equipment for insulation performance test and preparation of test object

챔버와 단열 프레임 내부의 냉각을 위한 외부 압축 공기 투입 장치(투입 공기의 압력과 유량을 측정) 및 온도 측정(내부 분위기 온도 프레임 표면 온도 및 프레임 내부 온도)을

Table 4. Combination of test conditions for test materials and conditions for insulation performance

Case	Specimens	Temperature (chamber)	Frame Cooling
Case 1	CFRP 2.5T	120°C	None
	GFRP 2.5T		
	CFRP 2.5T + CORK 2T		
	GFRP 2.5T + CORK 2T		
	CFRP 2.5T + Aerogel 2T		
Case 2	CFRP 2.5T	120°C	100 LPM, 21°C
	GFRP 2.5T		
	CFRP 2.5T + CORK 2T		
	GFRP 2.5T + CORK 2T		
	CFRP 2.5T + Aerogel 2T		
Case 3	CFRP 2.5T	100°C	100 LPM, 21°C
	GFRP 2.5T		
	CFRP 2.5T + CORK 2T		
	GFRP 2.5T + CORK 2T		
	GFRP 2.5T + CORK 2T		

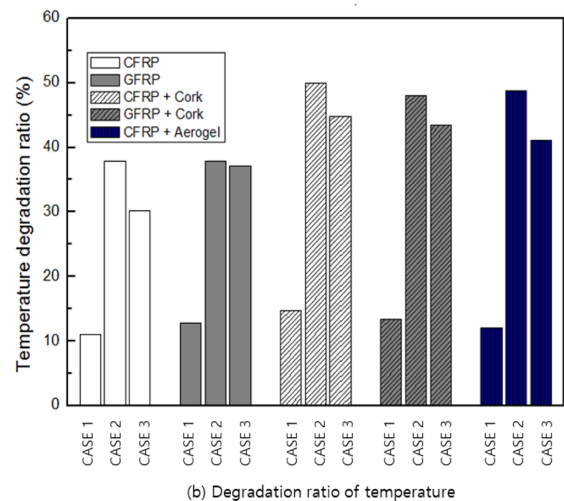
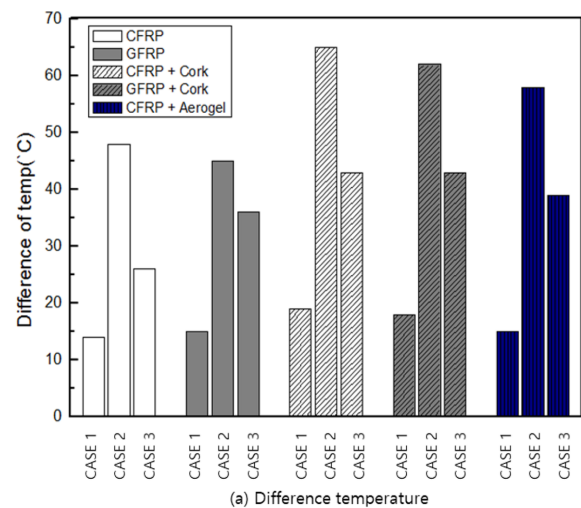
**Fig. 14.** Results of insulation performance test (a) Difference temperature, (b) Degradation ratio of temperature

Table 5. Define analytical conditions for case studies

Boundary condition	Case 1	Case 2	Case 3
Cooling jacket [l/min]	20	50	20
Cooling jacket mat.	Al7075	Copper	Copper
Cooling jacket working fluid	Air	Air	Water
Out temp. [°C]	100		
IC Chip temp. [°C]	70		
Motor temp. [°C]	95		
Cooling pipe flow rate [l/min]	100		
Cooling jacket [l/min]	20		
Analysis type	Steady state		
Domain type	Fluid & Solid		
Turbulent model	k-ε		

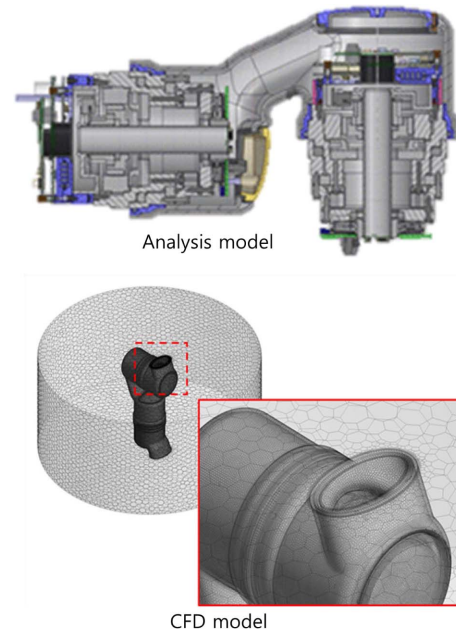
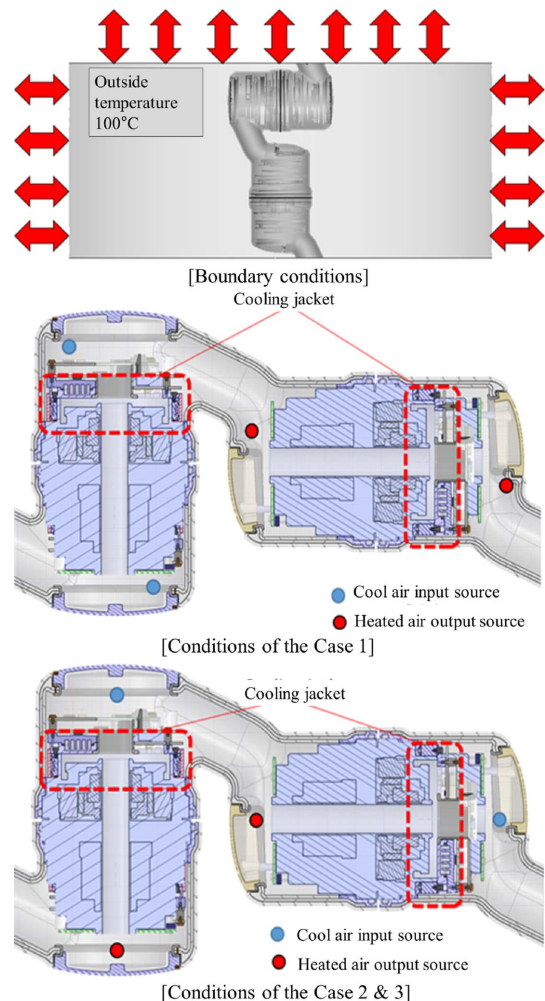
위한 센서 측정 장치를 구성하였다.

시험 데이터 측정을 위하여 센서는 온도 챔버 내부에 분위기 온도 측정과 단열 프레임 내부의 온도 측정, 프레임 외부 표면과 내부 표면의 온도 측정을 위한 센서를 부착하였고 단열 프레임 내부에 냉각 자켓 모사 장치를 구성하여 장치 내부에 냉각 공기를 적용한 경우에 내부 온도 및 냉각 자켓 모사 장치 표면의 온도를 측정할 수 있도록 시험 환경을 추가 구성하였다. 단열 소재의 성능평가를 위하여 Table 4의 각 소재 조합을 기준으로 시험 경우를 선정하였으며 온도 챔버 내부의 분위기 온도를 Case 3의 경우 100°C로 정의, Case 1, 2는 120°C로 정의하였다. Case 1의 경우에는 프레임 내부의 냉각을 고려하지 않는 조건을 고려하여 낮은 분위기 온도에서 내부 냉각을 고려하지 않는 경우에 시험을 수행하였다.

경량 및 단열 프레임 시험편에 대한 시험을 진행한 결과 Fig. 14와 같은 결과를 나타내었으며, Table 5에 시험결과를 요약 정리하여 나타내었다. 소재 및 온도 조건 별 시험 평가 결과 CFRP + Cork와 GFRP + Cork에서 우수한 단열 성능을 나타냄을 확인하였으며 단열재를 사용하는 것을 고려하고 제작성을 고려하여 Cork 단열재를 적용하는 것을 확정하였다.

3.2 열유동해석을 통한 냉각 성능 분석

본 절에서는 열유동해석을 통하여 단열 성능시험을 통해 확정된 소재의 구성과 냉각 자켓의 조합에 대하여 열특성 해석을 수행하였다. 열유동해석의 경우 3차원 형상으로 설계된 복합재 단열 프레임과 모터와 감속기가 포함된 관절 구동부를 기반으로 모델을 구성하여 상용 유동 해석 소프트웨어인 ANSYS Fleunt v17.0을 이용하여 해석을 수행하였다. 생성된 유동해석 격자계는 Fig. 15에 나타내었으며 격자는 사면체 격자 형태로 생성 한 후 해석 벽면의 열전달 및 벽면 근처의 속도를 정확하게 계산하기 위해 프리즘 격자

**Fig. 15.** Analysis and CFD model for CFD analysis**Fig. 16.** Define of boundary conditions and case studies model

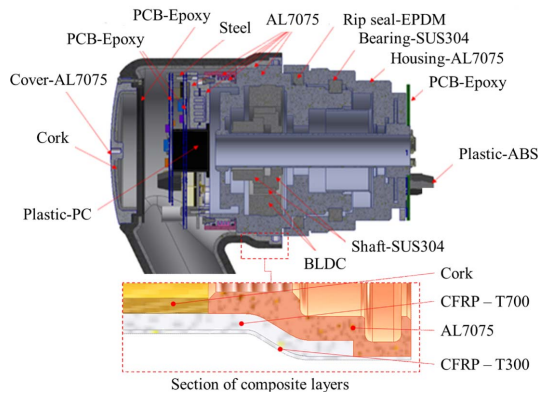


Fig. 17. Composition of material components of analysis model

Table 7. Thermal properties of analysis model

Materials	Specific heat capacity [J/kg·K]	Thermal conductivity [W/m·K]
CFRP T300	795.492	3.5
CFRP T700	753.624	3.5
AL7075-T6	960	205
EPDM	2,200	0.36
ABS	1,590.98	0.17445
PC	1,256.04	0.19771
SUS304	502	16.3
Cork	1,900	0.043
Epoxy	700	0.04
GFRP	1,310	3.5

를 이용하여 벽면 격자를 매우 조밀하게 생성하고 격자 품질을 높이기 위해 Fluent의 Polyhedral convert 기능을 이용하여 Polyhedral 격자로 변환 하였다. 해석을 위해 생성된 격자 모델은 총 24,956,123개의 절점과 8,343,853개의 요소를 갖도록 구성되었다.

열유동 해석 모델에 대한 경계 조건의 설정은 Fig. 16에 나타내었으며 외부 온도 조건은 100°C의 유체가 출입이 가능한 상태를 적용하였다. 해석 조건에 대한 정의는 Table 5에 나타내었으며 냉각 자켓에 고려되는 냉각 매체에 대해 공기 또는 물을 사용한 경우와 냉각 자켓의 방열을 위한 소재에 대한 변수를 고려하여 해석 조건에 반영하였다. 또한, Case 2와 Case 3는 프레임 냉각을 위한 냉각 매체 유입 및 배출의 조건인 Inlet, Outlet을 포함하여 해석 경우를 선정하고 해석을 수행하였다. 해석 적용 재질에 대한 열특성은 복합재 및 금속재와 각 구성품의 재질을 고려하여 비열과 열전달 계수를 시험 및 문헌을 통해 Table 6과 같이 선정하였다. Fig. 17과 Table 7은 해석 대상 모델에 대한 재질을 구분한 정보와 적용 재질의 열특성을 각각 나타내었으며 기술된 정보를 기반으로 열유동해석을 진행하였다.

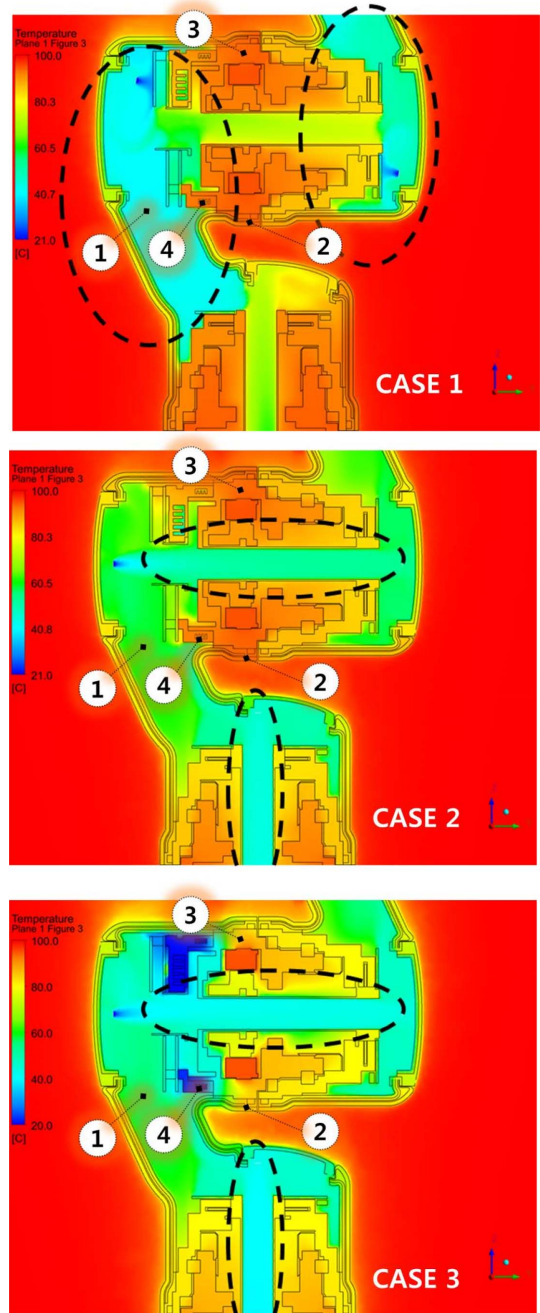


Fig. 18. Analysis of the temperature distribution of the flow field for the case studies

Fig. 18은 해석 대상 모델에 대하여 주어진 조건 및 해석 경우를 고려한 유동 해석을 통해 경량 및 단열 프레임 내부 유동장에 대한 온도 분포를 각 해석 case 1, 2 그리고 3에 대해 나타내었다.

외부 온도와 프레임 내부에 구성된 모터 및 소자의 발열에 의해 구조물은 가열되지만, 냉각 튜브 및 냉각 자켓에 공급된 냉각 유체의 열 교환으로 인해 구동장치의 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. Case 1과 Case 2의 경우 Fig. 18에 표시된 영역과 같이 상대적으로 냉각 튜브의 냉각 공기 유

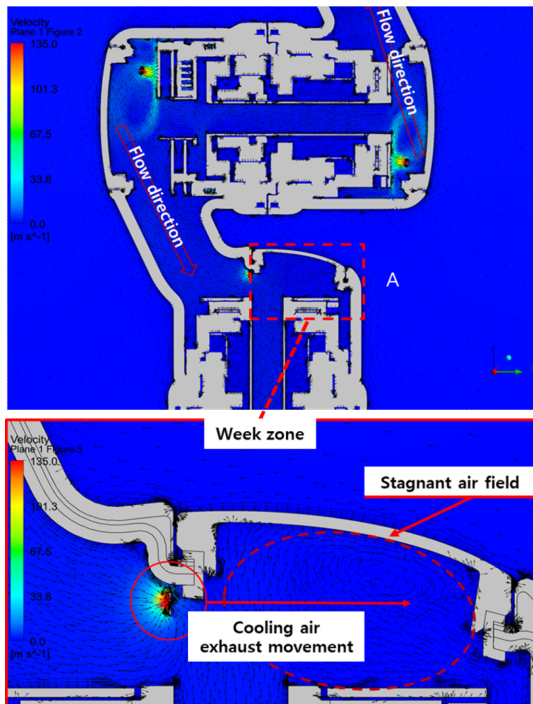


Fig. 19. The velocity distribution analysis result - case 1

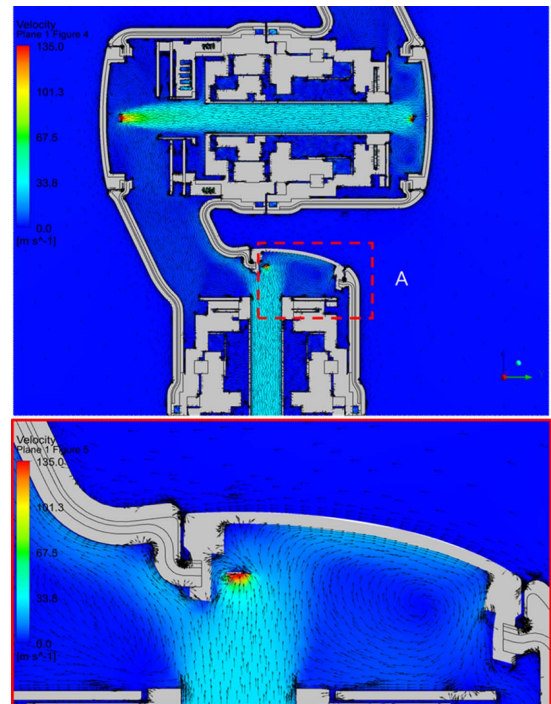


Fig. 20. The velocity distribution analysis result - case 2

입구와 배출구의 공간사이에서 열 교환이 활발하게 이루어지며, 냉각효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 냉각 유체의 유입 및 배출의 위치에 따라 Case 2, 3과 같이 냉각 효과 및 온도 분포가 변화되는 것을 확인하였다. Case 3은 Case 2와는 달리 냉각 자켓의 냉각 유체를 물로 선정한 경우의 해석 결과를 나타내었으며 Case 2와 비교하여 상대적으로 큰 냉각효과를 보임을 확인하였다.

Fig. 19는 Case 1에 대하여 냉각 튜브의 유입 및 배출 위치에 따른 프레임 내부의 속도분포를 나타내었으며, Case 1의 경우 냉각 튜브의 유입 방향에서 배출 방향으로 전체적인 유동의 흐름이 진행되는 것을 확인하였다. 냉각 튜브의 배기 위치는 IC칩 및 발열 전자 소자가 위치한 구동기 드라이브 보드에 배치하여 해당 영역에 대한 유속이 빨라 냉각에는 유리하지만, 구동부의 중공축 내부에서는 상대적으로 유동의 흐름이 크지 않는 것을 확인하였다. 표시된 Fig. 19의 표시된 'A' 영역은 속도가 다른 영역에 비해 상대적으로 작으며 유체의 이동 정체 영역이 발생하며 이로 인해 해당 위치의 냉각 효과가 상대적으로 낮아 질 것으로 예측하였다. 해석 결과를 바탕으로 냉각 튜브의 배출 위치를 Fig. 19에 표시된 영역으로 변경하여 재순환 영역을 감소시킨 냉각 성능이 상대적으로 높아질 것으로 판단하였다.

Fig. 20은 Case 2에 대한 유동장 속도 결과를 나타내었으며 냉각 튜브 배출에서 유입 방향으로 유동 흐름의 결과가 도출되었다. 구동기의 중공축 내부의 빠른 유속으로 인해 열 교환에는 유리하지만 통합 조립 시에 고려되어야 하는 전원 및 통신 케이블과 냉각 튜브의 영역에 의한 공기장 체

Table 8. Temperature results according to position of CFD

Mark No.	Domain	Case 1 [°C]	Case 2 [°C]	Case 3 [°C]
1	Internal fluid	55.9	59.05	47.35
	Cork	69.8	76.35	65.55
2	GFRP UD	84.4	83.75	75.45
	GFRP Wove	86.0	85.15	76.65
3	Motor housing	84.5	83.85	62.05
4	Cooling jacket	91.3	89.15	27.75

적 감소와 유체 저항을 고려하고 구동기 드라이브 제어 보드의 근처 영역은 주위의 유속이 낮아 열 교환이 상대적으로 낮아질 것으로 예상되었다. 'A' 영역은 빠른 유속으로 순환되고 있으므로 열 교환이 원활하다고 판단되며 Case 3의 경우 Case 2와 경계조건이 동일하여 유동 흐름에 대해서는 매우 유사한 결과가 도출되었다.

열유동 해석결과 고려된 해석 경우에서 냉각 튜브를 통해 공급된 공기의 열 교환으로 인해 단열 프레임 및 구동기 모듈의 온도가 낮아지는 것을 확인하였다. 냉각 튜브의 유입구 및 배출구 공간사이에서 열 교환이 활발하게 이루어지며, 냉각효과가 원활히 구현되는 것을 유동해석을 통해 확인하였다. Case 3에서는 냉각 자켓에 냉각 요소를 물로 적용한 결과 공기와 비교하여 상대적으로 큰 냉각효과를 보이는 것을 확인하였다. Table 8에는 유체 및 구조물의 정량적인 평균 온도를 정리하였다.

3.3 단위 모듈 및 통합 모델의 성능 시험

구동기 작동 온도 확보를 위해 설계된 단열 프레임 구조 및 냉각 시스템(냉각 자켓 및 외부 냉각 매체 공급 장치)에 대한 평가를 위해 Fig. 21과 같은 환경을 구성하여 시험적 평가를 수행하였다. 시험적 평가를 위해 용접 로봇이 구동되는 환경을 모사하였고 고온의 온도 효과를 위해 구비된 온도 챔버 내부에 경량 및 단열 복합재 프레임과 프레임 내부에 구동기 및 구동기를 냉각하기 위한 냉각 자켓을 포함하여 시험 장치를 구성하였다. 평가를 위한 방안은 Table 9와 같으며 Case 1은 경량 및 단열 프레임 내부에 공기를 통한 공기장 순환 냉각을 고려하고 냉각 장치는 별도의 강제 냉각을 고려하지 않은 경우이고, Case 2는 경량 및 단열 프레임과 구동기의 냉각 자켓의 공기 냉각을 수행한 경우이다. Case 3는 경량 및 단열 프레임의 공기 냉각과 함께 구동기의 냉각 장치의 내부에 외부에 구축된 매질(공기, 물) 냉각 시스템을 통해 온도가 낮아진 매질을 순환시켜 냉각 자켓을 작동 시킨 경우이다.

Fig. 22는 시험 장치에 구성된 냉각 매질 냉각 시스템과 이를 이용한 성능 시험을 수행한 결과를 나타내었으며 냉각 자켓 표면의 온도를 열화상카메라로 촬영한 결과를 나타내었다. 물을 이용한 냉각 시 냉각 장치의 표면 온도는 약 19.6°C로 측정되는 것을 확인하였다.

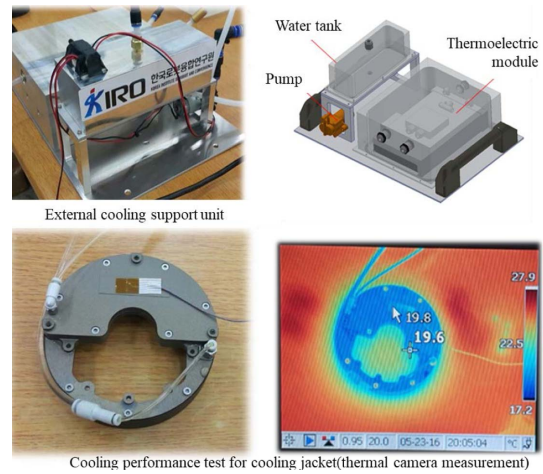


Fig. 22. Configuration of external cooling support unit and thermal imaging of cooling jacket

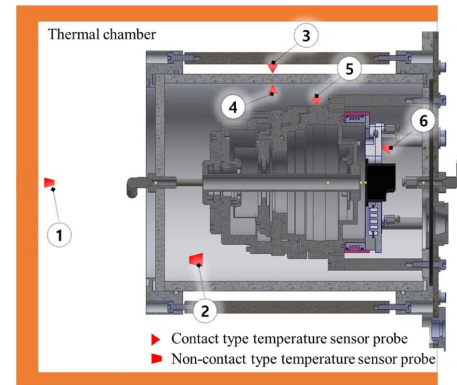


Fig. 23. Temperature measurement position of test object

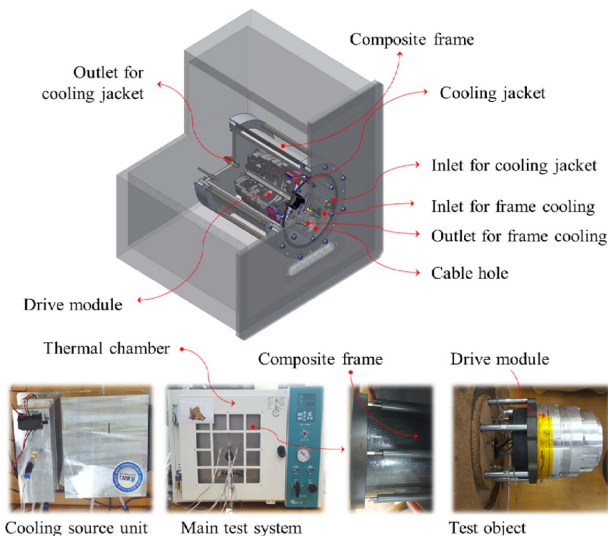


Fig. 21. Test equipment for evaluating insulation performance of unit module

Table 9. Case studies for evaluation of the cooling system

Test	Frame cooling	Cooling jacket	Ext. cooling unit
Case 1	On(Air)	Off	non
Case 2	On(Air)	On(Air)	On
Case 3	On(Air)	On(Water)	On

*Environment chamber temperature is 90°C.

개발된 외부 공기 및 물 냉각 시스템은 냉각 자켓 내부에서 흡열된 냉각 매질에 대해 순환 펌프를 통과하여 외부 냉각 장치로 이송되며 냉각판에 고정된 열전소자를 이용한 온도 교환 원리를 이용하여 흡열과 냉각 효과가 발생할 수 있도록 구성하였다. 또한, 용접로봇 모바일 장치에 장착이 가능하도록 소형화 개발을 진행하였다.

Fig. 23은 단위 모듈의 단열 특성 평가를 위한 복합재 프레임과 구동 모듈의 온도 측정 위치를 나타내었고 Fig. 24는 시험시간 140분 동안 선정된 각 시험 case에 대해 특정된 측정위치에서 추출된 온도 정보 데이터를 나타내었다.

구동기 작동 온도 확보를 위한 시험적 평가 결과 각 시험에서 챔버의 내부 공기온도는 약 81~84°C로 나타는 것을 확인하였다. 이때, 각 시험 경우에 대한 온도 편차는 온도 챔버 자체에서 발생하는 온도 편차 범위 내로 시험 온도가 유사하게 유지됨을 확인하였다. Fig. 25는 시험적 평가 결과 중 온도 챔버 내부의 공기 온도와 구동기 냉각 시스템 표면의 온도를 각 시험 경우에 따라 나타낸 결과이다. Case 1의 경우 외부의 온도와 구동기 냉각 시스템 표면의 온도가 26°C

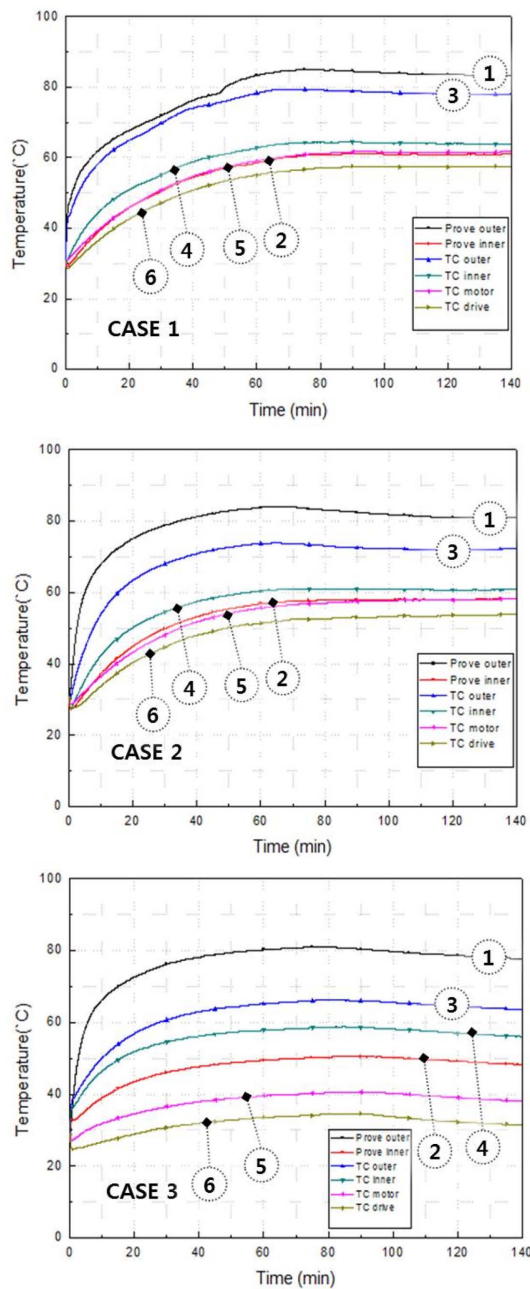


Fig. 24. Thermal insulation test results (hysteresis curves by measurement location) considering test conditions

차이가 발생 하였으며, Case 2의 경우 30°C, Case 3의 경우는 50°C의 결과를 나타내었다.

Case 1의 경우에는 냉각 시스템의 구동이 없는 경우에 복합재 프레임 내부의 냉각을 고려한 경우로 구동기 표면의 온도가 가장 높은 결과를 나타내었다. Case 2는 구동기 냉각 시스템 내부에 공기를 통한 냉각을 고려한 경우로 Case 1에 비하여 표면 온도 및 외부 온도와 구동기 냉각 시스템 표면의 온도차가 보다 높게 나타났으나 차이가 크게 발생 하지 않았다. Case 3의 경우는 구동기 냉각 시스템의 냉매

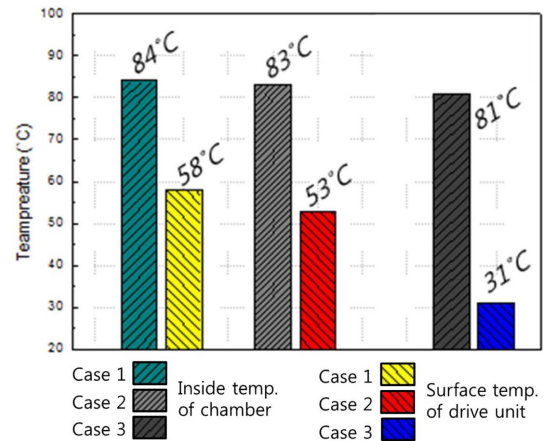


Fig. 25. Result of thermal insulation test considering test condition (temperature of actuator surface relative to chamber internal temperature)



(a) Environment test using thermal chamber



(b) Performance and active test

Fig. 26. Active checking after performance test for thermal environment test

를 물로 변경한 경우이다. Case 3의 경우 구동기 냉각 시스템 표면의 온도가 31°C로 가장 낮게 나타났으며 외부 온도와의 편차도 50°C로 가장 높게 나타났다. Case 3의 경우는 구동기 냉각 시스템의 냉매를 물로 변경한 경우이다.

구동기 작동 온도 확보를 위한 냉각 시스템의 평가 결과

프레임의 공기 냉각과 구동기 냉각 시스템에 냉각 매질로 물을 적용한 Case 3이 가장 높은 냉각 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구를 통해 밀폐 및 협소 공간에서 용접 작업을 위한 이동형 용접 로봇에 대한 용접 로봇 암의 프레임의 경량화와 단열 성능을 기반으로 상세 설계에 대한 기초 연구 및 시스템 구성에 대한 연구를 수행하였다. 선정된 복합재 소재를 구성하여 온도 조건에 따른 기본 기계적 물성 시험을 수행하였고 단열 성능에 대한 검증을 위하여 설계 조건을 고려한 시험 장치를 구성하여 소재의 구성에 대한 단열 성능 시험을 수행하였다. 상세 설계 모델에 대해 열유동해석을 수행하여 내부 프레임 냉각과 냉각 자켓의 구성 검토를 수행하였으며 단위 모듈 프레임과 구동기를 고려한 단열 성능 시험을 수행하였다.

시험결과 CFRP와 단열재 Cork를 적용한 경우 단열 성능이 가장 우수한 것을 확인하였다. 또한, 경량/단열 복합재 프레임에 대한 다물체 동역학 해석과 구조해석을 통해 적층 조건 및 두께 등을 선정하여 구조 설계를 수행하였고 열유동해석을 통해 냉각 튜브의 배기 및 흡기 위치와 냉각 자켓의 열전달 및 흡열에 대한 효과를 검증하였다. 단계별 연구를 통해 단위 모듈에 대한 성능 시험 결과 외부 냉매 냉각장치를 사용하여 냉각 매질을 물로 적용한 경우 가장 높은 냉각 효과를 얻을 수 있는 것을 확인하였고 공기를 사용한 냉각 매질에 대해서도 단열 효과를 동반하여 구동기 작동 온도 60°C를 확보하는 것을 확인하였다. Fig. 26과 같이 로봇 시제품을 구성하여 온도 챔버 내부에서 외부 온도 80°C에서 2시간 작업 성능이 확보되는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “로봇비즈니스벨트조성사업-A012000009”으로 수행된 연구 내용이며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Kim, J.M., Kim, J.Y., Kim, W.J., and Kim, S.H., “Development of Welding Robot for Welding Type Large Block Welding in Shipyard,” *Journal of Control Robotics and Systems*, Vol. 20, No. 7, 2014, pp. 760-766.
- J. Park et al., “Development of a Portable Welding Robot with EtherCAT Interface,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, No. 60, 2011, pp. 733-737.
- Jeong, J.W., Kim, J.J., Kim, Y.B., Kim, T.Y., and Jeong, J.M., “Development of Portable Welding Robot for Block Welding of Ship,” *Special Lectures and Conferences of the Korean Welding Society Contest Summary*, 2013, pp. 54-54.
- Lee, J.H., Kim, C.S., and Hong, K.S., “Off-line Programming in the Shipbuilding Industry: Open Architecture and Semi-automatic Approach,” *International journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 3, No 1, 2005, pp. 32-42.
- Baumeister, E., and Klaeger, S., “Advanced New Lightweight Materials: Hollow-Sphere Composites (HSCs) for Mechanical Engineering Applications,” *Advanced Engineering Materials*, Vol. 5, No. 5, 2003, pp. 673-677.
- Turi, E.A., “Thermal Characterization of Polymeric Materials”, 2nd edition Academic, San Diego, CA, 1997.
- Lee, J.Y., Jeon, K.W., Choi, J.Y., Chung, G.B., Suh, J.H., Choi, I.S., and Shin, K.W., “A Development of the Lightweight Wearable Robot with Carbon Fiber Composite,” *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 28, No. 3, 2015, pp. 81-88.
- Kang, S.G., Im, J.M., Shin, K.B., and Choi, W.S., “Effective Equivalent Finite Element Model for Impact Limiter of Nuclear Spent Fuel Shipping Cask made of Sandwich Composites Panels,” *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 28, No. 2, 2015, pp. 58-64.
- Hwang, T.K., Park, J.B., Lee, S.Y., Kim, H.G., Park, B.Y., and Doh, Y.D., “Evaluation of Thermal Degradation of CFRP Flexural Strength at Elevated Temperature,” *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol 18, No. 2, 2005, pp. 20-29.
- Thompson, B.S., and Sung, C.K., “A Variational Formulation for the Dynamic Viscoelastic Finite Element Analysis of Robotic Manipulators Constructed from Composite Materials,” *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 106, No. 2, 1984, pp. 183-190.
- Liu, K.S., and Tasi, S.W., “A Progressive Quadratic Failure Criterion For A Laminate,” *Journal of Composite Science and Technology*, Vol. 58, No. 7, 1998, pp. 1023-1032.
- ASTM International, “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” ASTM D3039, 2008.
- ASTM International, “Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading,” ASTM D3410, 2003.
- ASTM International, “Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate,” ASTM D3518, 2007.