

전기 추진 시스템의 냉각시스템에 관한 분석 및 설계

오진석† · 조관준* · 곽준호* · 이지영**

(원고접수일 : 2007년 12월 17일, 심사완료일 : 2008년 5월 1일)

Analysis & Design of Cooling System for Electric Propulsion System

Jin-Seok Oh† · Kwan-Jun Jo* · Jun-Ho Kwak* · Ji-young Lee**

Abstract : The cooling system is one of the most concerning factor for the reliability of the electric propulsion ship. Generally, a drive system operation in higher temperature decreases the device's reliability and power efficiency. The management of power loss and temperature of switching devices is indispensable for the reliability of the power electric system. In this paper, the switching devices are molded by IGBT, and the propulsion system is consisted of MIIR(Motor with Inverter Internal to Rotor). The system composition interacts with each other to calculate the loss and temperature of device. The calculation result is used for modeling and designing of the control and monitoring system for the electric propulsion system.

Key words : The electric propulsion system(전기추진), IGBT(절연 게이트 양극성 트랜지스터), Monitoring system(감시 시스템), Inverter cooling system(인버터 냉각 시스템)

1. 서 론

반도체 소자의 발달로 대용량 전력용 반도체 소자가 산업 전반에 많이 활용되고 있다. 특히 순간적인 대전력을 요구하는 분야는 모듈화된 전력용 반도체가 사용된다. 이러한 반도체 모듈을 이용하여 구성된 인버터 및 컨버터 시스템은 발생하는 열을 효과적으로 관리하지 못하면 시스템의 신뢰도에 심각한 영향을 미친다.

본 연구에서는 반도체 모듈에 관련된 발열량을 집중적으로 해석하고, 더불어 전기추진시스템에 활

용되는 추진전동기의 발열열량을 기존의 데이터를 이용하여 분석한다. 이러한 해석 및 분석 결과를 활용하여 전기추진시스템용 냉각체계를 구축하고자 한다.

냉각시스템의 설계에 앞서 추진 전동기의 운전 시 전기추진시스템에 사용되는 인버터 소자의 발열상태 및 스위칭 타임시의 발열량과 추진전동기의 발열상태에 관련된 체계적인 조사 및 분석이 필요하다.

본 연구에서는 인버터가 독립적으로 구성된 MSI (MSI: Motor with Stand-alone Inverter)타

† 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계공학, E-mail: OJS@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4283)

* 수중 운동체 특화 연구센터

** cardiff university the manufacturing engineering

입, 추진전동기의 stator내부에 인버터 모듈이 삽입되는 MIER(MIER: Motro with Inverter External to the Rotor) 타입^[1], 인버터 모듈이 추진전동기 내부에 삽입되어 있는 MIIR(MIIR:Motor with Inverter Internal to Rotor)타입을 비교 분석하고, 그 결과를 근거로 냉각체계에 대한 연구를 병행하고자 한다. MIER 및 MIIR 형태는 과거의 인버터와 추진모터가 분리되어 있는 타입과 비교해 용적 감소 및 효율이 향상되었으며 두 가지 형태에 따라 약간의 차이점은 있는데 본 연구에서는 인버터 모듈이 rotor내부에 삽입되어 있는 MIIR 타입을 중심으로 체계적인 연구를 수행하고자 한다.^[1]

본 연구에서는 디젤발전기, 연료전지, 축전지로 구성된 전력체계를 가지고 있는 잠수함용 전기추진시스템의 핵심 제어시스템인 인버터와 및 추진전동기의 발생열량을 연구 분석하여, 잠수함용 전기추진시스템에 적합한 냉각시스템을 제안하고자 한다.

본 연구의 연구대상인 디젤 발전기를 탑재한 잠수함의 전기 추진 시스템 구성은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 잠수함의 전력체계는 전력을 발생하는 발전기, 발전기 전력을 보관하는 축전지, 비상시 전력시스템인 연료 전지 등으로 구성된다. 이러한 전력을 공급받아 인버터를 이용한 추진전동기의 속도를 제어한다.

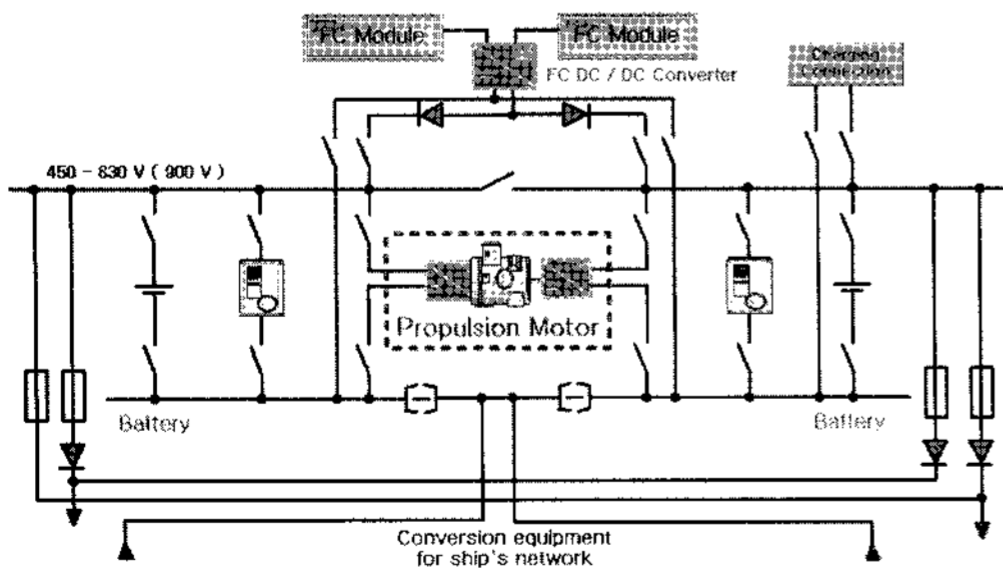


Fig. 1 Configuration of propulsion system

본 연구대상은 Fig.1에 점선으로 도시한 부분에 대한 체계적인 연구 및 분석을 통하여 잠수함에 적합한 냉각체계를 설계하고자 한다.

2. 전기 추진 시스템

2.1 인버터 특성

2.1.1 MSI형 인버터

MSI형 인버터는 Fig. 2와 같이 인버터 모듈이 전동기의 측면에 위치하여 냉각시스템의 측면에서 분리된 형태로 냉각 시스템이 구성된다.

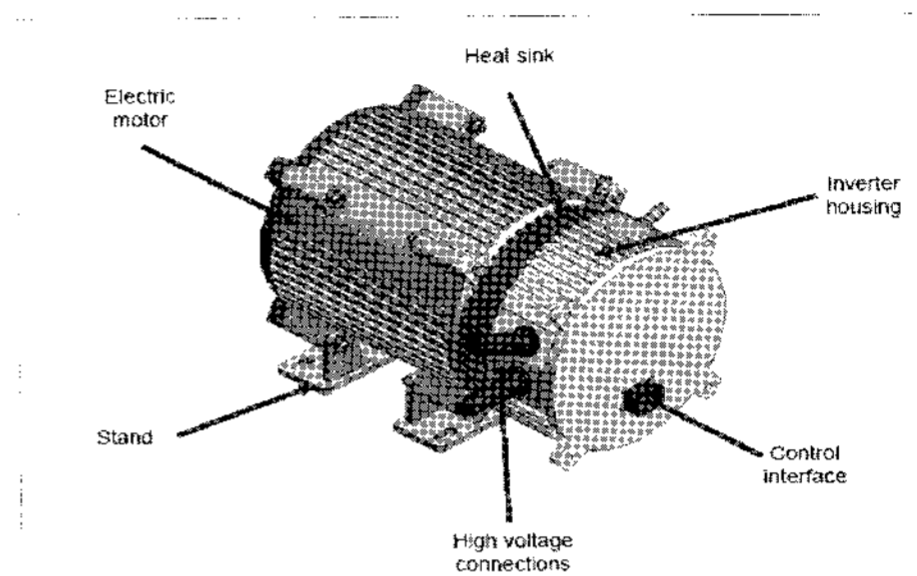


Fig. 2 Motor with stand-alone inverter

2.1.2 MIER형 인버터

Fig. 3과 같이 인버터 모듈이 전동기의 Stator 내부에 삽입되어 있는 형태이다.

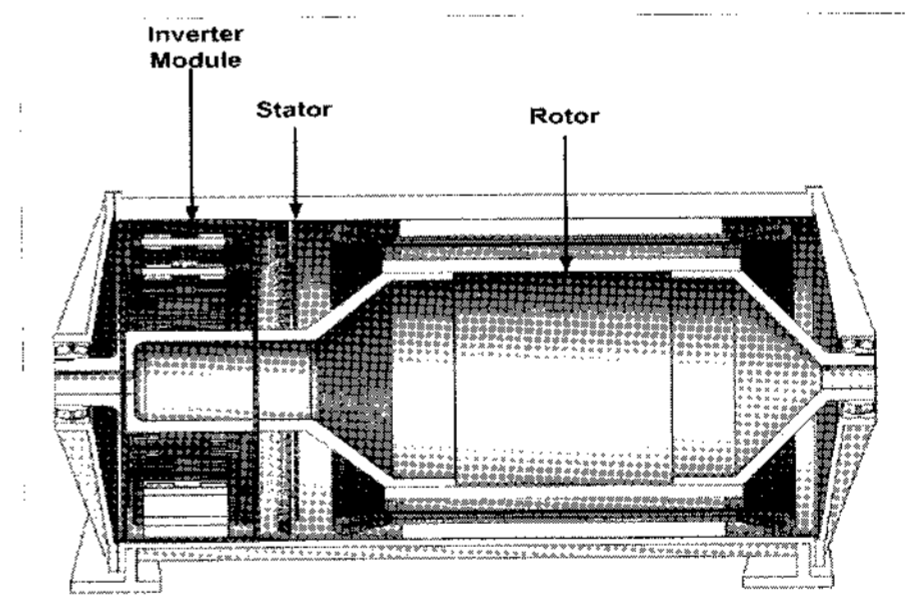


Fig. 3 Motor with inverter external to the rotor

2.1.3 MIIR형 인버터

Fig. 4와 같이 인버터 모듈이 Rotor내부에 삽입, 고정되어 있어 모터의 한쪽 끝단의 냉각수 manifold에서 냉각수가 유입되면 Rotor내부를 지나 인버터 모듈의 각 Segments를 통과하면서 냉각을 하게 된다. segments를 통과한 냉각수는 모터의 반대쪽 끝단 manifold를 지나 빠져나가게 된다.

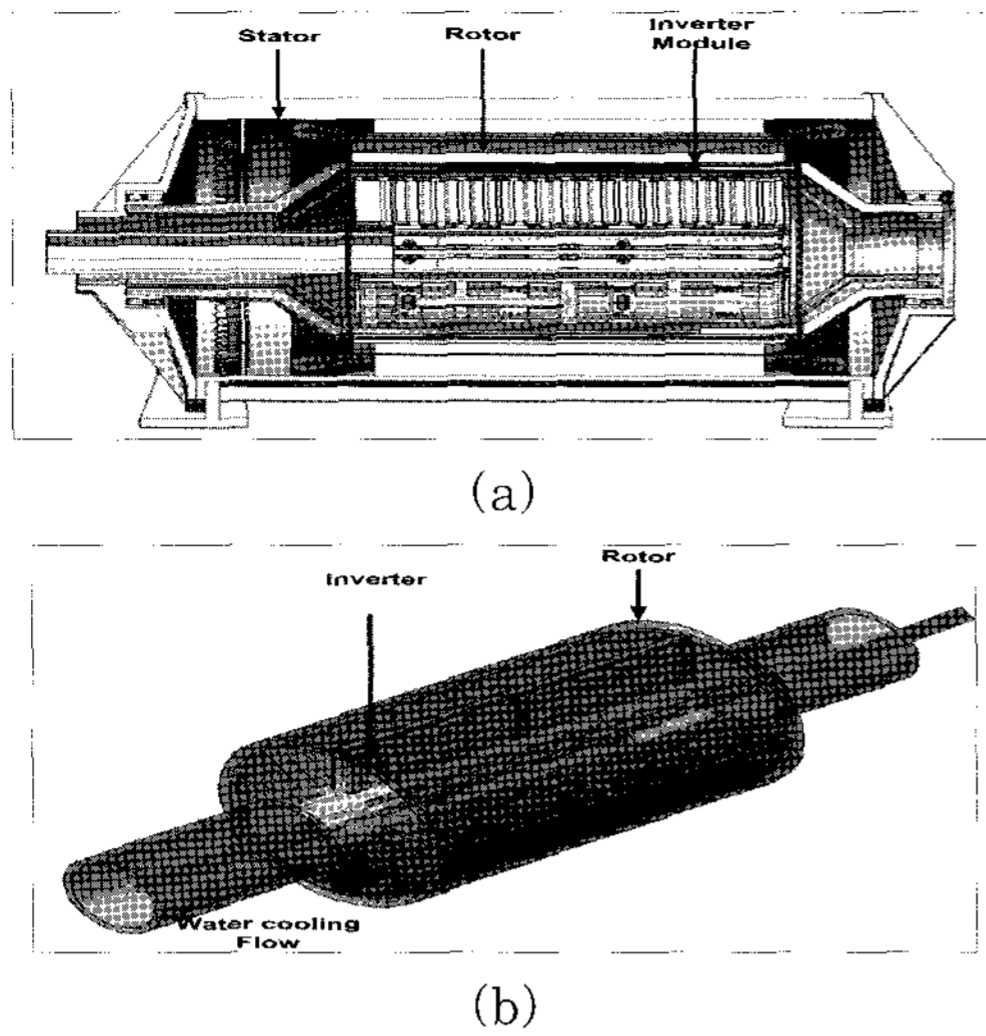


Fig. 4 Motor with inverter internal to rotor

Table 1 The mass and volume table when the inverter model changed

	MSI Type	MIER Type	MIIR Type
Mass	118,000 Kg	110,000 Kg	113,000Kg
Gravimetric Power Density	0.169kW/kg	0.182kW/kg	0.177kW/kg
Volume	68m ³	60m ³	53m ³
Volumetric Power Density	294kW/m ³	333kW/m ³	377kW/m ³

Table 1과 같이 모터와 인버터 모듈이 각각 독립적으로 분리된 MSI형 인버터와 인버터 모듈이 모터 내부에 삽입되어 있는 일체형 타입을 비교했을 때 일체형 타입이 모터의 무게 및 부피, 면적이 감소한 것을 볼 수 있고, 전력의 측면에서 보았을 때는 그 효율이 향상된 것을 볼 수 있다.^[2]

2.2 인버터 특성

전기 추진시스템의 전력제어장치인 인버터는 Fig. 5와 같다. 본 연구대상은 15상 추진전동기를 대상으로 인버터를 구성하고자 한다. 본 연구대상의 추진시스템용 인버터에 활용되는 전력용 반도체 모듈 IGBT(Model No. FZ 1200 R 33 KF2)의 총수량은 60개이다.

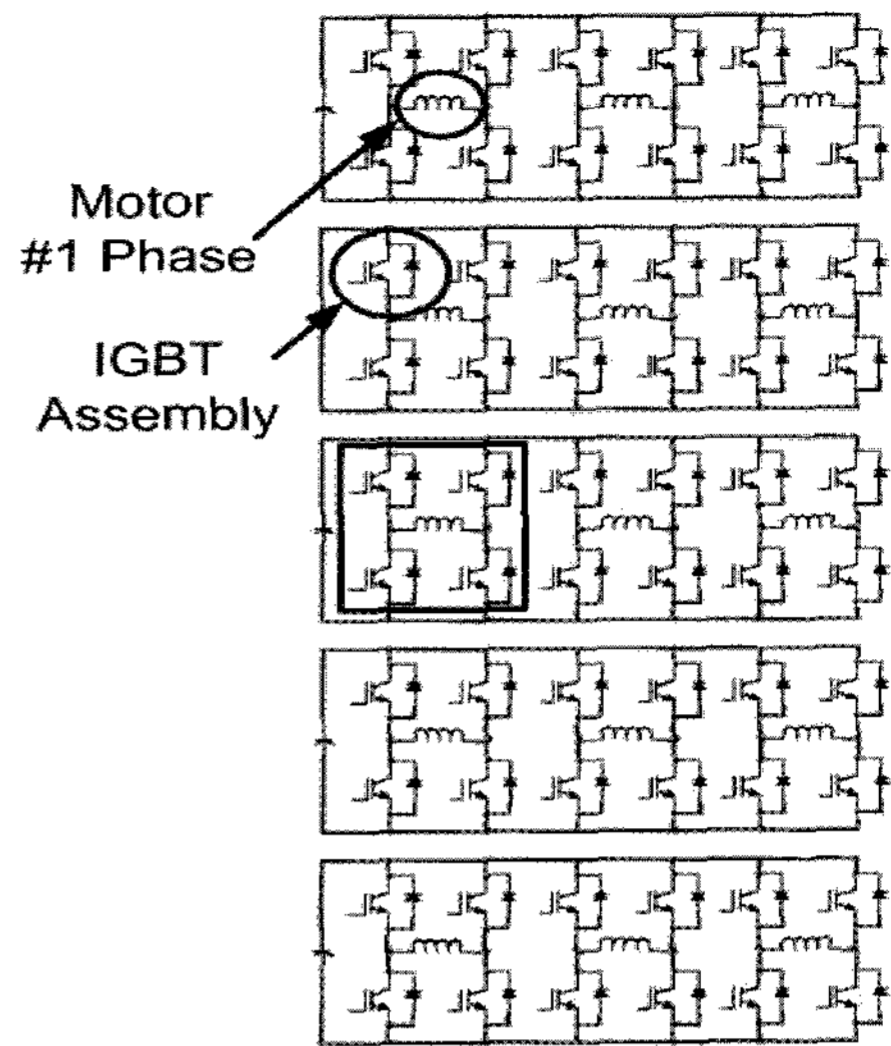


Fig. 5 Schematic diagram of electric propulsion inverter

3. 열량해석

3.1 전력모듈 사양

본 연구에서는 12극 15상의 20MW급 전동기를 모델로 소자의 도통시(On State) 전력손실과 스위칭시 전력손실의 합을 통해 총 전력손실량을 구하게 된다. 인버터 구성에 활용한 IGBT 모듈의 구조는 Fig.6과 같고, Fig.7에서 열량이 가장 많이 발생하는 부위는 IGBT Chip가 있는 중앙부이다.

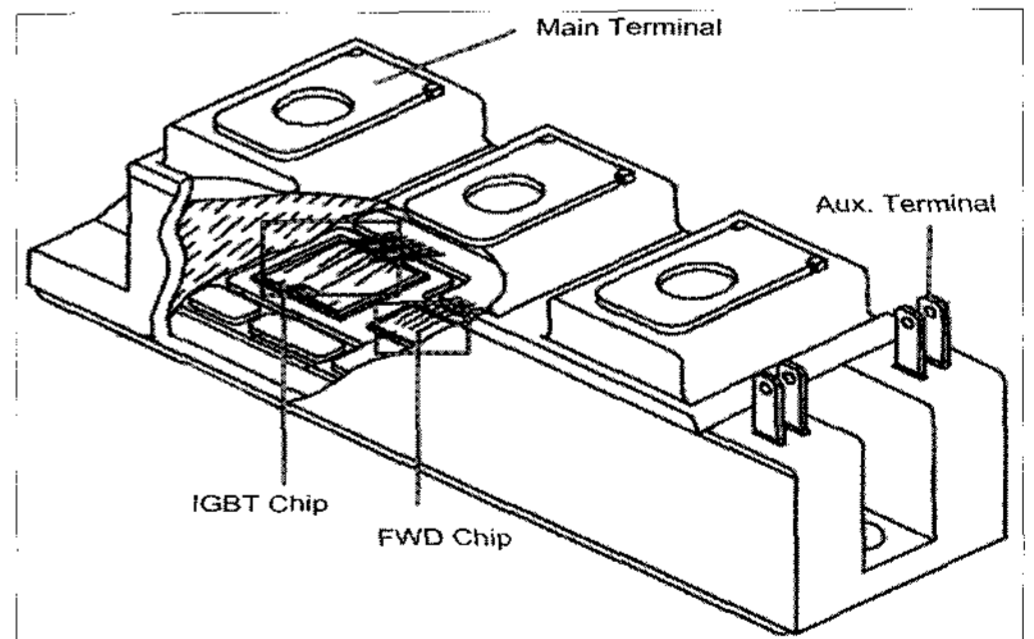
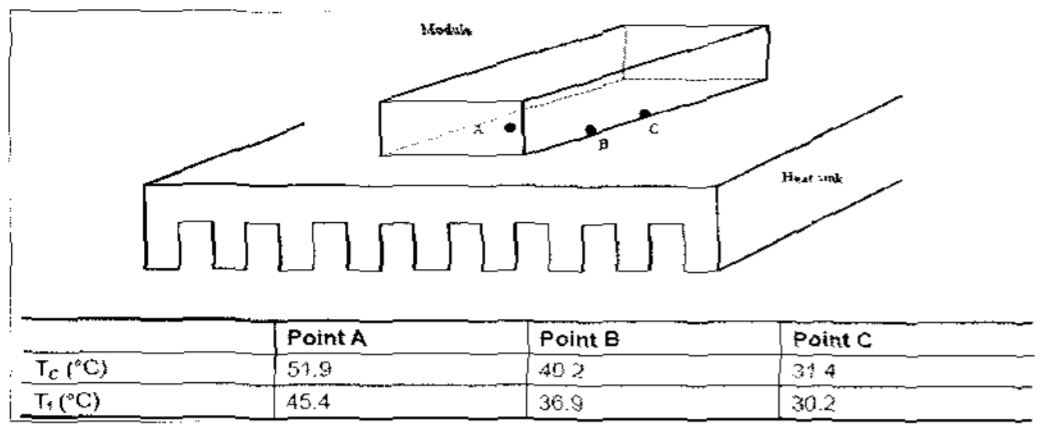
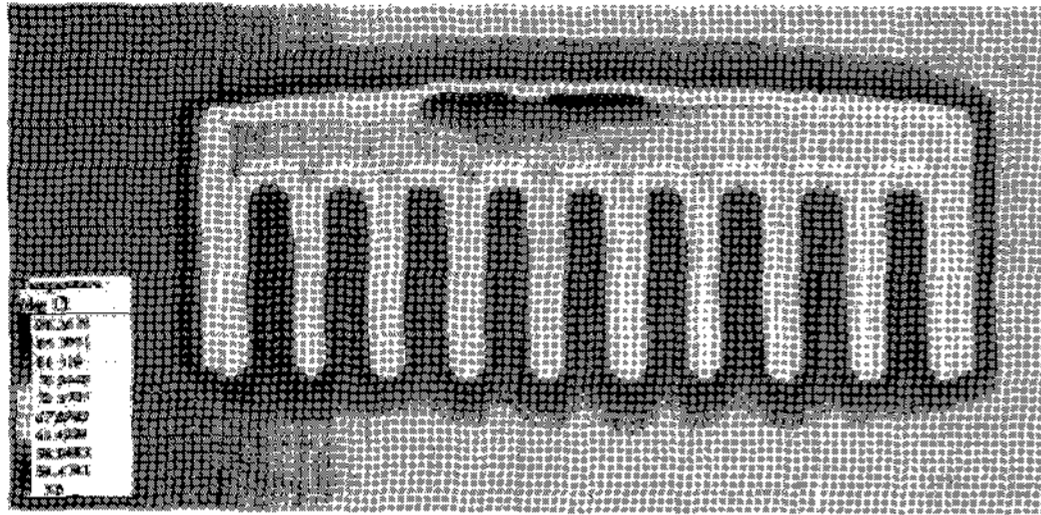


Fig. 6 Configuration of IGBT

Fig. 7의 (a)는 IGBT 모듈의 열량분포를 도시한 것으로 A부분이 가장 많은 열량이 발생하는 IGBT Chip 부분이다.



(a)



(b)

Fig. 7 Thermal distribution of IGBT module

Fig. 7의 b는 열량 분포도 시뮬레이션 결과이다. 칩의 발열량 200W에서 공기중의 온도를 30도로 하였을 때의 칩의 온도가 더 이상 변화하지 않을 때의 열 분포를 나타낸 것이다.^[3] 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모듈 전체의 외각 열량분포는 균일하지만 내부적으로는 Chip 부분이 가장 많은 열량을 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 IGBT module의 V_{CE} , V_F (V)와 I_C [A]의 관계를 나타낸 것으로 module의 동작온도를 25°C일때와 최대허용온도인 125°C일때의 출력 특성을 도시하였다.

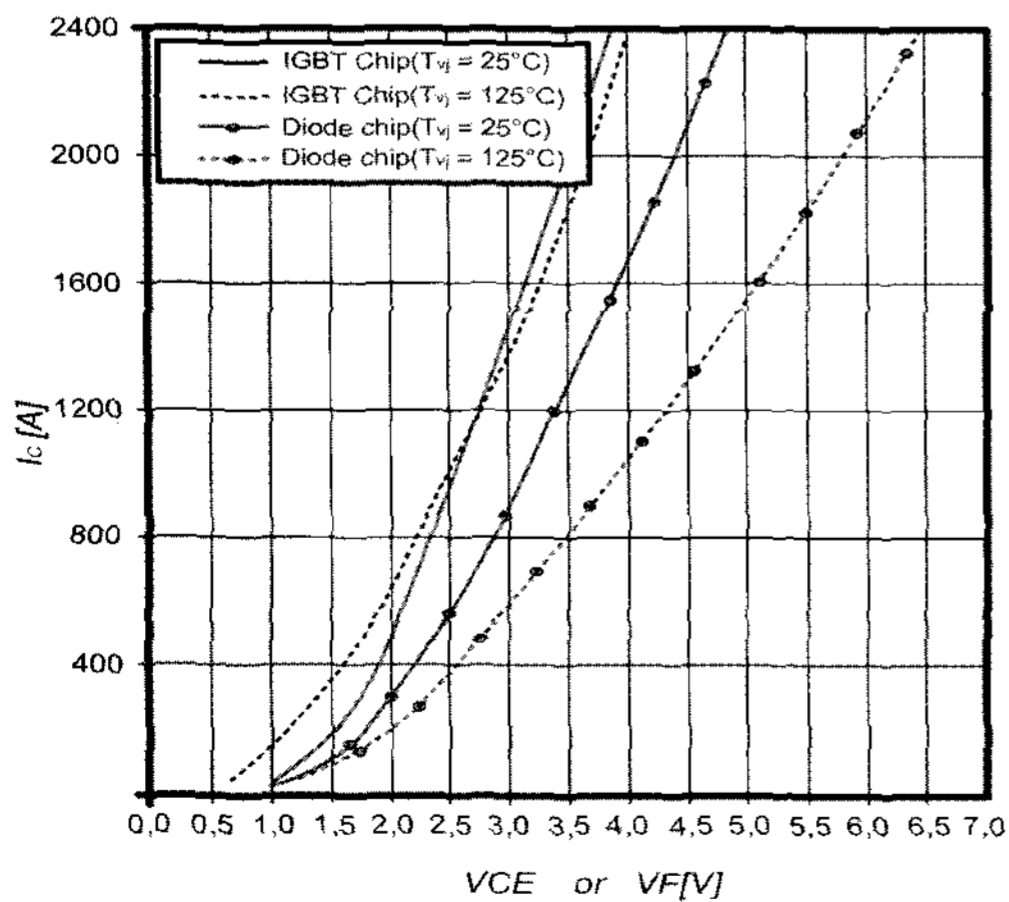


Fig. 8 Characteristic of IGBT Inverter

Fig. 9는 IGBT module과 전도율의 관계를 나타낸 그림이다.^[5]

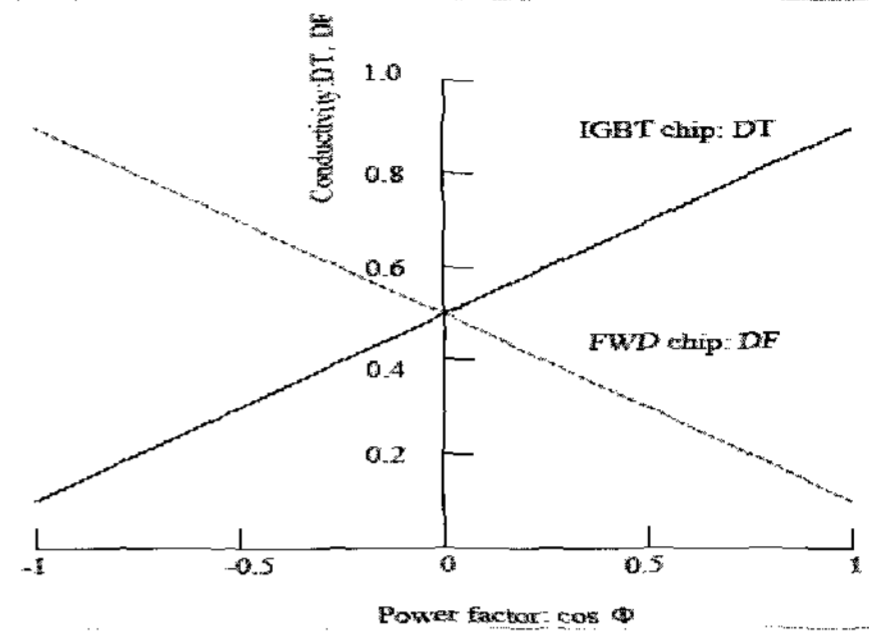


Fig. 9 Conductivity of IGBT module

Fig. 10은 IGBT module의 switching time 시의 I_C (A)와 전력손실(mJ)의 관계를 도시한 것으로 I_C 가 증가함에 따라 전력손실량이 증가하는 것을 알 수 있다.

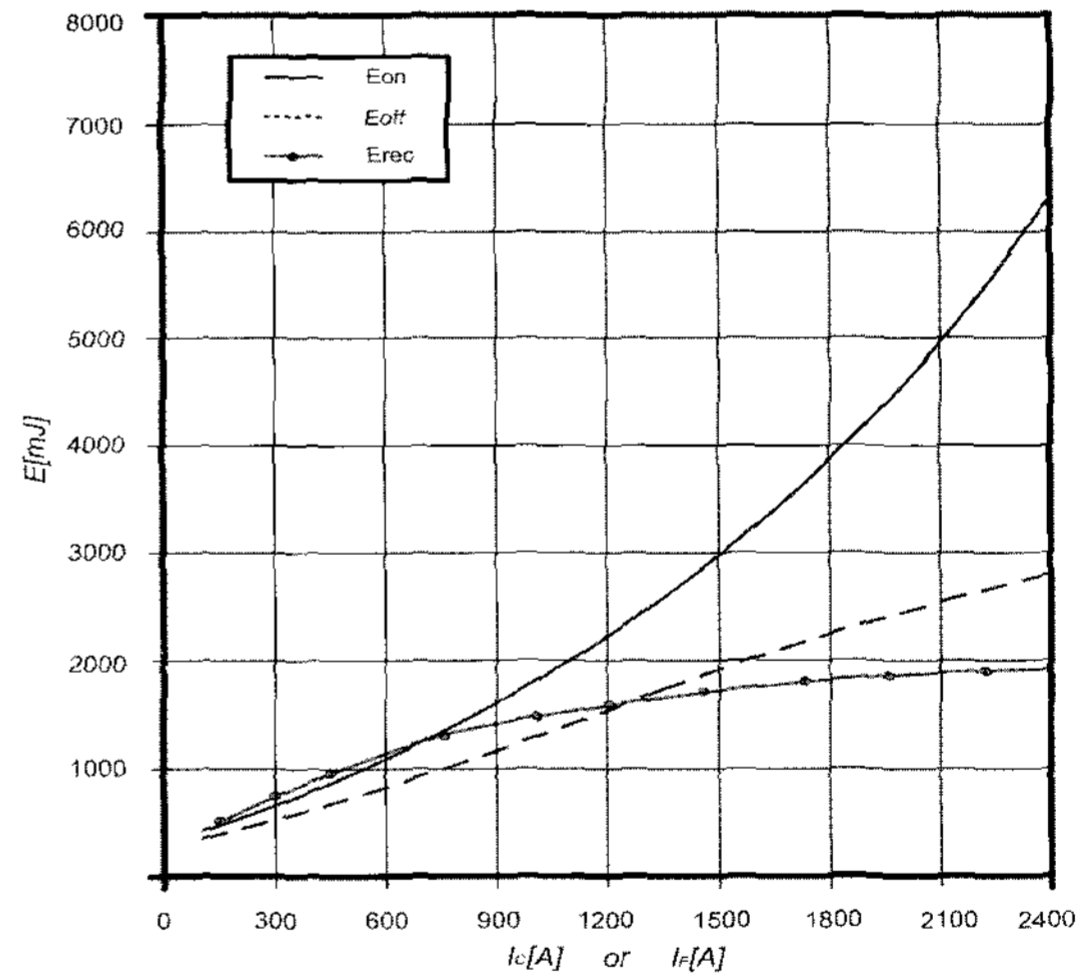


Fig. 10 Power Loss of switching time

IGBT 모듈의 총전력손실은 switching chip 손실과 FWD(Free wheel Diode)손실의 합이다. 대부분의 추진전동기용 인버터는 PWM파형으로 출력을 제어한다. PWM 인버터의 경우 전력계산이 매우 복잡하다. 그러므로 계산을 간략히 하기 위해서 출력 파형은 정현파(sine-wave)로 가정하면 IGBT 모듈의 전체 전력 손실 $IGBT_{SUM}$ 은

IGBT chip 전력손실 P_{Tr} 과 FWD chip 전력손실 P_{FWD} 의 합으로 나타낼 수 있다.^[67]

$$IGBT_{SUM} = P_{Tr} + P_{FWD} \quad (1)$$

식 (1)에서 P_{Tr} 은 식 (2)와 같고, P_{FWD} 는 식 (3)과 같다.

$$P_{Tr} (W) = \frac{1}{2} DT \left[\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_M V_0 + I_M^2 R \right] + \frac{1}{2} f_c [E_{on} \cdot (I_M) + E_{off} \cdot (I_M)] \quad (2)$$

여기서, f_c 는 스위칭 주파수, I_M 은 스위칭 순간의 컬렉터 전류, E_{on} 및 E_{off} 는 스위칭시의 에너지이다.

$$P_{Tr} (W) = \frac{1}{2} DF \left[\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_M V_0 + I_M^2 R \right] + \frac{1}{2} f_c E_{rr} (I_M) \quad (3)$$

여기서, E_{rr} 은 역회복(Reverse recovery)에너지이다. 구해진 총 전력 손실량(W)과 IGBT module의 Thermal resistance를 통해 열발생률을 구할 수 있다. Fig. 11은 module에서 발생한 전력 손실량이 Heat sink로 전도되어 열이 발생되는 것을 나타낸 것이고^[4], Table. 2는 Thermal resistance의 기호를 나타낸 것이다.

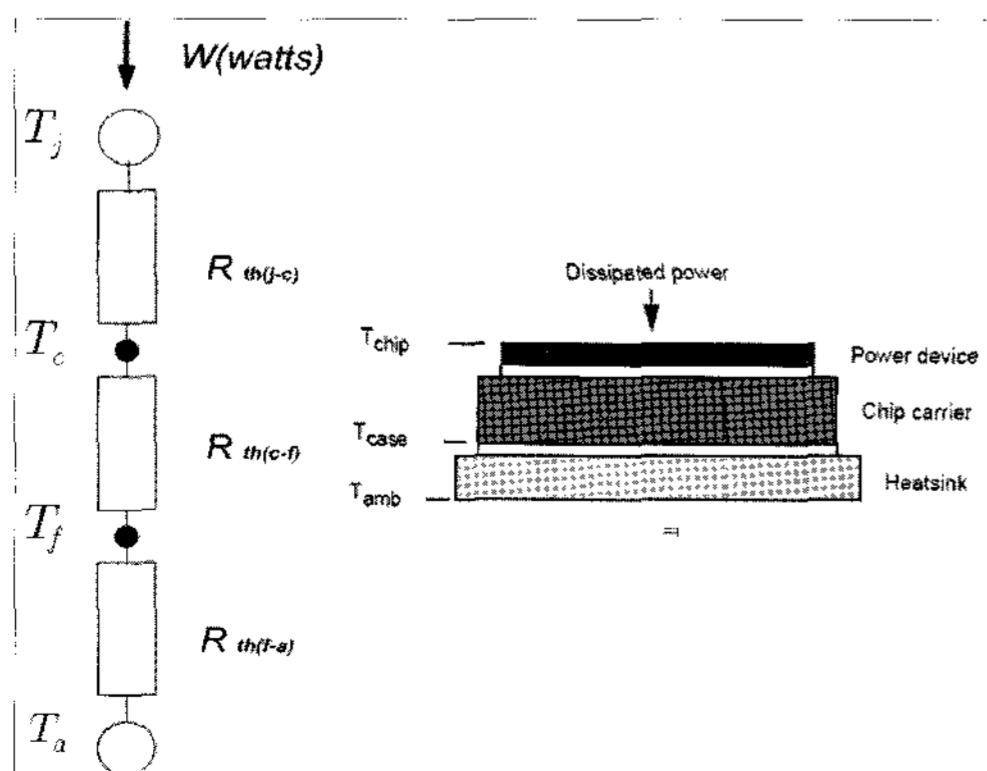


Fig. 11 Thermal resistance equivalent circuit

Table 2 Symbol of thermal resistance

W(watts)	Module power loss
T_j	Junction temperature if IGBT chip
T_c	module case temperature
T_f	Temperature of heat sink
T_a	Ambient temperature
$R_{th(j-c)}$	Thermal resistance between case and heat sink
$R_{th(c-f)}$	Contact thermal resistance between case and heat sink
$R_{th(f-a)}$	Thermal resistance between heat sink and ambient air

Fig. 12는 손실된 전력이 Heat sink로 전도되는 과정을 나타낸 것으로 이를 통해 IGBT에서 발생하는 열량을 구하는 식을 표현하면 수식 (4)와 같다.

$$T_j = W \times [R_{th}(j-c) + R_{th}(c-f) + R_{th}(f-a)] + T_a \quad (4)$$

총 발열량의 계산은 수식 1~4까지의 식을 다시 정리하면 수식 (5)와 같다.

$$T_j = (P_{Tr} + P_{FWD}) \times [R_{th}(j-c) + R_{th}(c-f) + R_{th}(f-a)] + T_a \quad (5)$$

본 연구에서 분석한 20MW급 추진전동기 인버터 모듈의 총 발열량은 식 (1)~(3)을 이용하여 산출한 결과 500KW 정도로 추정 할 수 있고, 이에 따라 냉각시스템의 cooling Pump의 Feed rate(l/s)는 냉각시스템의 입구온도를 40°C 정도로 제어할 때 5.7 l/s 정도의 유량을 필요로 하게 된다.

Fig. 12는 전력 손실과 발열량과의 관계를 나타낸 그래프로 전력손실과 발열량의 비례관계를 보여주고 있으며 대기온도가 25°C일때와 50°C일때의 발열량을 나타내고 있다.

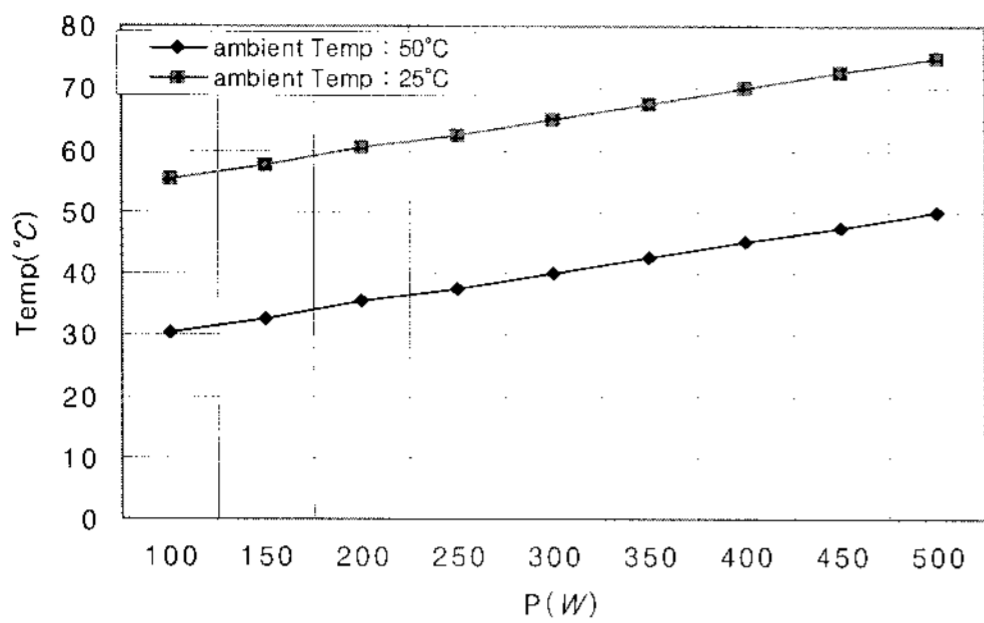


Fig. 12 Temperature variation with power loss

5. 냉각시스템 구성 및 고찰

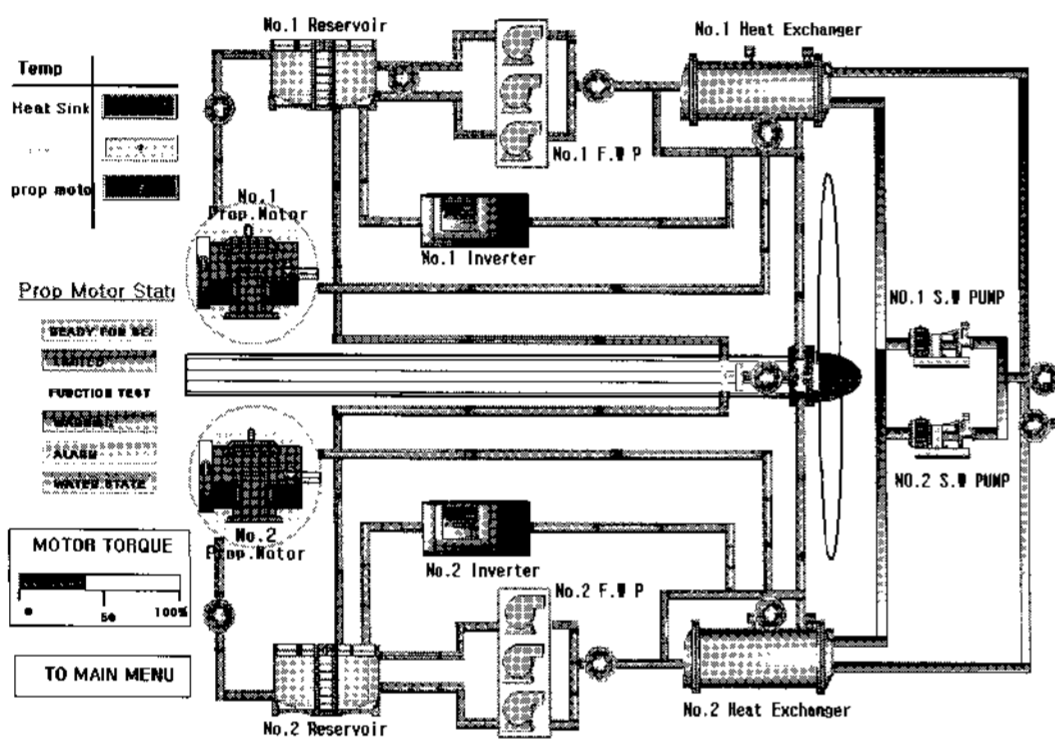


Fig. 13 Schematic diagram of Electric propulsion cooling system

Fig. 13은 전기추진시스템의 냉각시스템을 나타낸 것으로 water cooling pump 3대를 인버터에 의해 병렬운전하게 된다. 현재의 전기 추진 시스템은 대부분은 냉각수의 온도를 일정하게 유지하기 위한 유량 제어를 통하여 냉각 시스템으로 구성된다. 하지만 수중함의 경우 긴급한 상황에서 발생하는 급 추진이 발생하여 순간적인 반도체 소자의 열이 발생하게 된다. 이러한 열이 발생하여 냉각수의 온도가 급격히 상승하더라도 일반적인 냉각 시스템은 냉각수 전체의 온도로 제어함으로 느리게 반응하게 된다. 인버터 소자의 발열량에 따른 온도를 고려 하지 않은 냉각 시스템은 급격한 전력 손실에 의한 발열량 증가에 의한 온도의 증가를 고려 하지 않음으로 반도체 소자의 열 충격을 주어 반도체 소자의 수명을 짧게 한다.

7. 결 론

MIIR 타입의 추진전동기용 인버터 모듈의 냉각 시스템 설계를 위한 기초적인 전력 손실과 발열량에 대해 분석하였다. 본 논문은 수중함의 냉각 시스템에서 냉각수 온도를 일정하게 유지 하는 제어 보다는 냉각하고자 하는 chip의 전력 손실에 따른 발열량을 chip의 온도에 따른 냉각시스템의 냉각량을 고려 하는 효율적인 냉각 시스템 설계가 필요할 것이다.

본 연구에서 시도한 접근 방법은 다른 전력 손실 해석에 비해 좀 더 구체적이고 정확한 추정 방법을 통해 발열량을 추정한 결과이다. 더불어 신뢰성을 갖는 실용화 자료를 확보하기 위해 시뮬레이션 및 소형의 실험 장치를 통해 실용화 데이터를 확보하는 것이 중요하다. 그리고 냉각시스템의 효율을 극대화하고, 소모 전력을 최소화하기 위하여 냉각량에 따라 해수 펌프의 속도를 저감하는 에너지 절약형 제어시스템에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

후 기

수중운동체기술 특화연구센터의 지원으로 수행됨

참고문헌

- [1] "Baseline Prime Power System Used by the University of Texas", UT-CEM report, 2003.
- [2] Dr. Douglas J. Nelson, chair, Dr. Charles F. Reinholtz, member, Dr. Michael W. Ellis, member, "Thermal Overload Capabilities of an Electric Motor and Inverter Unit Through Modeling Validated by Testing", MASTER OF SCIENCE in Mechanical Engineering, page 10, 2004
- [3] Jos Miguel Ortiz-Rodruez, "ELECTROTHERMAL MODELING OF A POWER ELECTRONIC MODULE", degree of

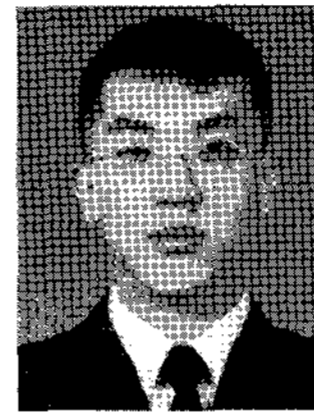
MASTER OF SCIENCE in ELECTRICAL ENGINEERING UNIVERSITY OF PUERTO RICO MAYAGZ CAMPUS, 2004

- [4] J. Sigg, P. Tkes, R. Kraus, "Parameter Extraction Methodology and Validation for an Electro-Thermal Physics-Based NPT IGBT Model", IEEE Industry Applications Society, page 5, 1997
- [5] L. C. Jenkins, "Electronic equipment thermal management", Reliability and Maintainability Symposium, Proceedings. Annual, pp. 17-22, 1984
- [6] H. Vinke and C. J. Clemens, "Compact models for accurate thermal characterization of electronic parts", IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part A, Vol. 20, No. 4, pp. 411-419, Sept 1997
- [7] A. R. Hefner and D. L. Blackburn, "Thermal component models for electrothermal networks simulation", IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 17, pp. 413-424, 1994



조관준(趙琯濬)

1982년생 5월 29일생. 2005년 한국해양대 선박전자기계공학부 선박전기전자전공 졸업. 2007년 한국해양대학원 메카트로닉스석사. 동대학원 박사 과정. 현재 수중운동체 특화 연구센터 연구보조원.



곽준호(郭俊浩)

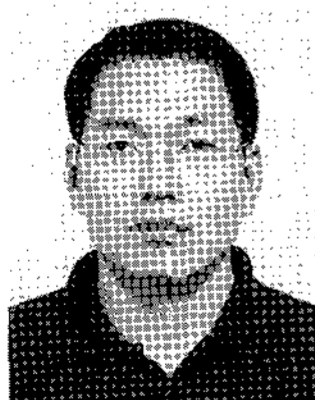
1980년 7월생. 2003년 한국해양대학교 기관시스템공학부 전기전자제어전공 졸업(공학사), 2005년 동대학원 졸업(공학석사), 2005년~현재 수중운동체특화연구센터 연구원.



이지영(李智英)

1977년 5월생. 2002년 한국해양대학교 운항시스템공학부 기관과정 졸업. 2002년~2004년 한국해양대학교 대학원 졸업. 2004년~현재 cardiff university the manufacturing engineering 박사과정

저 자 소 개



오진석(吳珍錫)

1960년 3월 21일생. 한국해양대 졸업.공학박사 영국ZODIAC 선박회사 엔지니어. 1989년~1992년 국방과학연구소 연구원. 1992년~1996년 양산대 전임강사, 조교수, 학과장. 1996년~현재 한국해양대 전임강사, 조교수, 부교수, 교수. 2001년~2002년 영국 CARDIFF대학 교환교수. 2002년~현재 산학연컨소시엄사업단장. 2002년~2004년 한국마린엔지니어링학회 편집위원. 2002년~현재 한국산학연논문집 편집위원. 2003년~2006 영국 K.O.Tech 연구원, 2005년~2006년 부·울 산학연 협의회 회장