

# 전기추진시스템의 냉각시스템에 관한 분석 및 설계

유병랑<sup>+</sup> · 오진석<sup>++</sup> · 진선호<sup>++</sup> · 임명규<sup>++</sup> · 곽준호<sup>++</sup> · 조관준<sup>++</sup> · 김장목<sup>+++</sup>

## Analysis & Design of Cooling System for Electric Propulsion System

Byong Rang Yu, Jin Seok Oh, Sun-Ho Jin, Myoung-Kyu Lim, Jun-Ho Kwak, Kwan-Jun Jo, Jang Mok Kim

**Abstract** : The power electric system is one of the most concerning factor for the reliability of the electric propulsion ship. 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 fo the power electric system. In this paper, IGBT chip of the switching devices is modeled and MIIR(Motor with Inverter Internal to Rotor)type of the propulsion motors is used. these parts interact with each other to calculate the loss and temperature of device. calculated Results is modeled and designed of the control and monitoring system for the electric propulsion system.

**Key words** : The power electric system, IGBT, monitoring system

### 1. 서 론

반도체 소자의 발달로 대용량 전력용 반도체 소자가 산업 전반에 많이 활용되고 있다. 특히 순간적인 대 전력을 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 활용되는 추진전동기의 발생열량을 기존의 데이터를 이용하여 분석한다. 이러한 해석 및 분석 결과를 활용하여 전기추진시스템용 냉각체계를 구축하고자 한다.

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

본 연구에서는 인버터가 독립적으로 구성된(MSI: Motor with Stand-alone Inverter) MSI 타입, 추진 전동기의 stator내부에 인버터 모듈이 삽입되는 (MIER: Motro with Inverter External to the Rotor) MIER 타입<sup>[1]</sup>, 인버터 모듈이 추진전동기 내부에 삽입되어 있는 (MIIR:Motor with Inverter Internal to Rotor) 형 MIIR 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.<sup>[1]</sup>

### 2. 전기 추진시스템

#### 2.1 추진시스템 구성

<sup>+</sup> 유병랑(한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과), E-mail:greenman77@nate.com, Tel: 051)410-4866  
<sup>++</sup> 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과  
<sup>+++</sup> 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부

전기추진시스템은 다양한 선박에 활용되고 있다. 특히, 여객선, 특수군함, 잠수함 등에는 진동 및 소음 측면에서 기존의 디젤 선박에 비하여 매우 유리한 전기추진시스템을 탑재하는 경향이 많다.

본 연구에서는 디젤발전기, 연료전지, 배터리로 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 배터리, 비상시 전력시스템인 연료 전지 등으로 구성된다. 이러한 전력을 공급받아 인버터를 이용한 추진전동기의 속도를 제어한다.

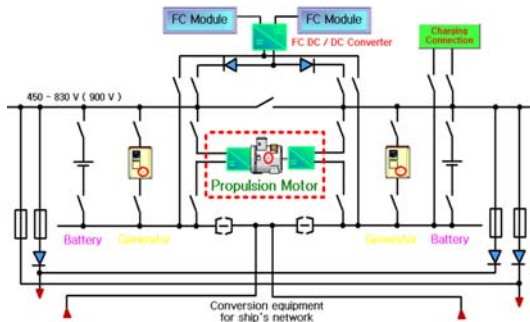


Fig.1 추진시스템 구성도

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

## 2.2 인버터 특성

### 2.2.1 MSI형 인버터

Fig. 2와 같이 인버터 모듈이 전동기의 측면에 위치하여 냉각시스템의 측면에서 같은 냉각방식을 사용하지 않고 분리되어 시스템이 설계되어진다.<sup>[2]</sup>

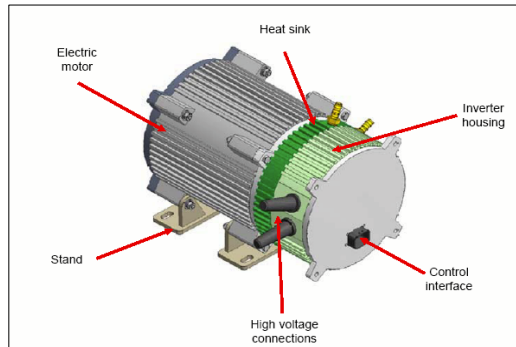


Fig.2 MSI형 인버터

### 2.2.2 MIER형 인버터

Fig. 3과 같이 인버터 모듈이 전동기의 Stator내부에 삽입되어 있는 형태이다.

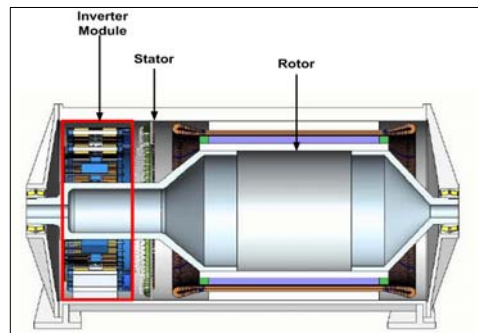
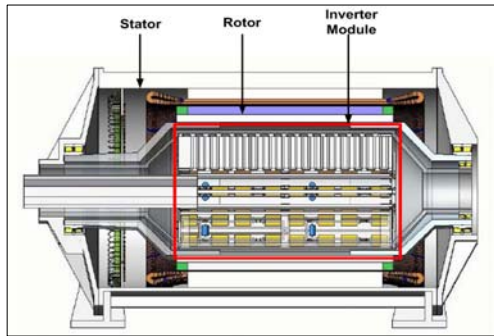


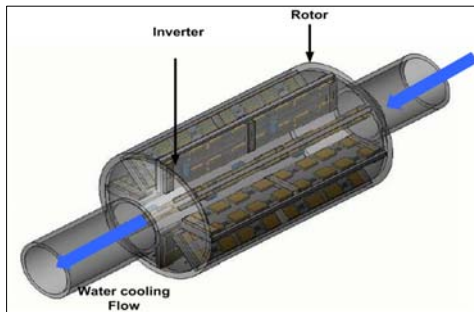
Fig.3 MIER형 인버터

### 2.2.3 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.



(a)



(b)

Fig.4 MIIR형 인버터

Table. 1과 같이 모터와 인버터 모듈이 각각 독립적으로 분리된 MSI형 인버터와 인버터 모듈이 모터 내부에 삽입되어 있는 일체형 타입을 비교했을때 일체형 타입이 모터의 무게 및 부피, 면적이 감소한 것을 볼 수 있고, 전력의 측면에서 보았을때는 그 효율이 향상된 것을 볼 수 있다.

Table. 1

	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 <sup>3</sup>	60m <sup>3</sup>	53m <sup>3</sup>
Volumetric Power Density	294kW/m <sup>3</sup>	333kW/m <sup>3</sup>	377kW/m <sup>3</sup>

## 2.3 인버터 구성

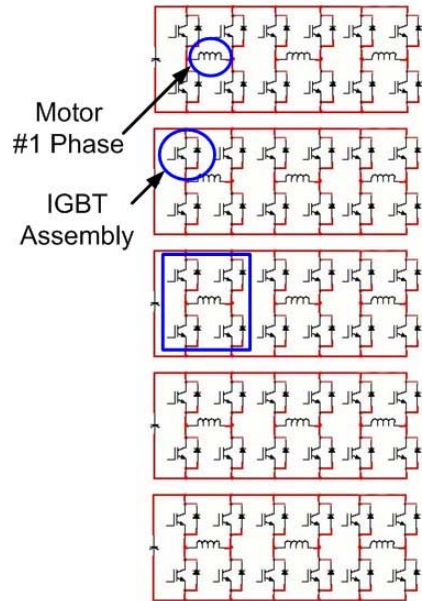


Fig. 5 Inverter Module

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.

## 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.

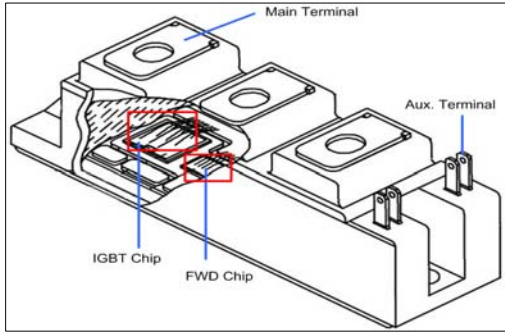
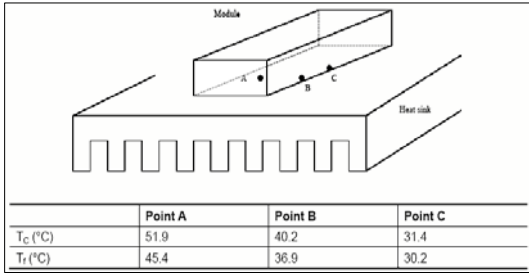
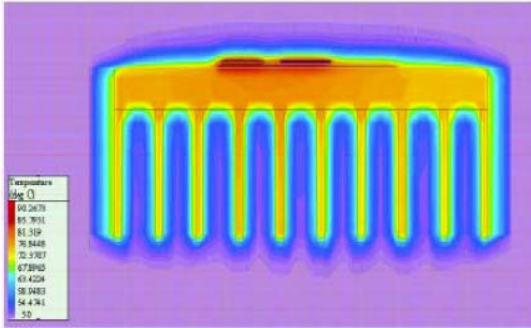


Fig. 6 인버터 내부 구조

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.<sup>[3]</sup> 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 나타낸 것으로 module의 동작온도를 25°C일때와 최대허용온도인 125°C일때의 출력 특성을 도시하였다.

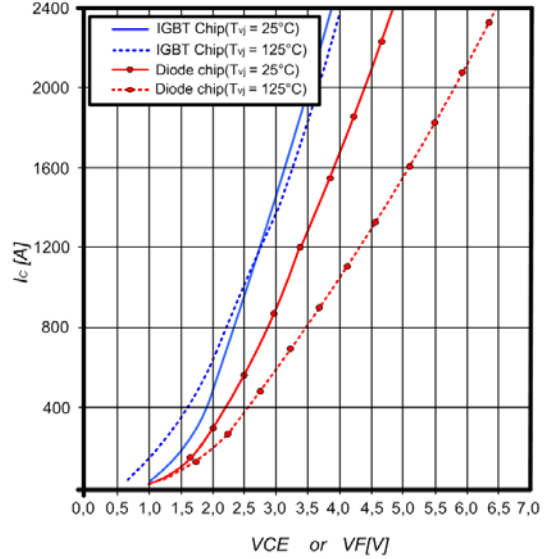


Fig. 8 Characteristic of IGBT Inverter

Fig. 9는 IGBT module과 전도율의 관계를 나타낸 그림이다.

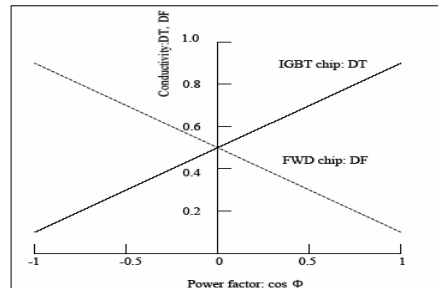


Fig. 9 Conductivity of IGBT module

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

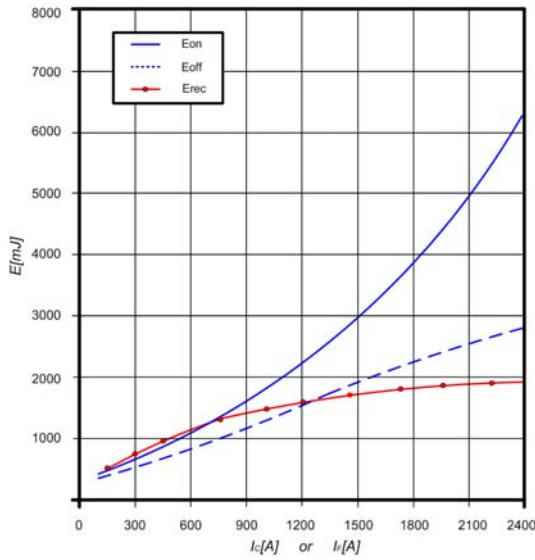


Fig. 10 Power Loss of switching time

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.

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

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.

여기서 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<sup>[4]</sup>, Table. 2는 Thermal resistance의 기호를 나타낸 것이다.

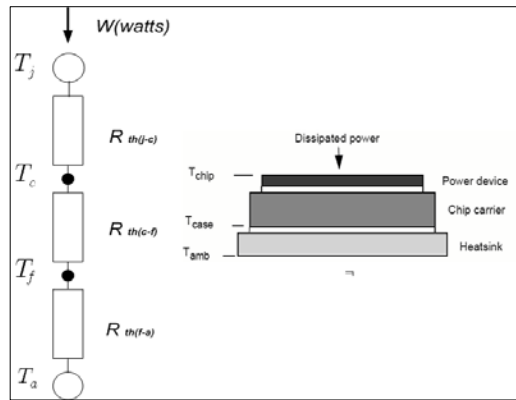


Fig. 11 Thermal resistance equivalent circuit

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(1/s)는 냉각시스템의 입구온도를 40℃ 정도로 제어할 때 5.7 1/s 정도의 유량을 필요로 하게 된다.

Fig.12는 전력 손실과 발열량과의 관계를 나타낸 그래프로 전력손실과 발열량의 비례관계를 보여주고 있으며 대기온도가 25℃일때와 50℃일때의 발열량을 나타내고 있다.

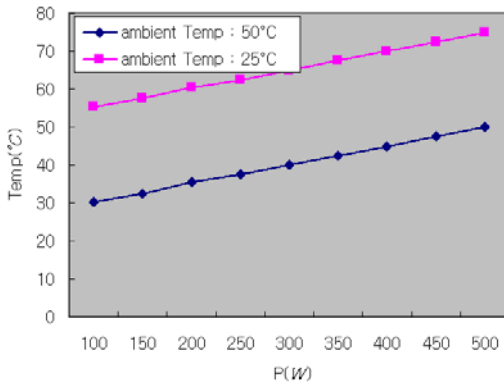


Fig.12 Power Loss와 발열량과의 관계

## 5. 냉각시스템 구성 및 고찰

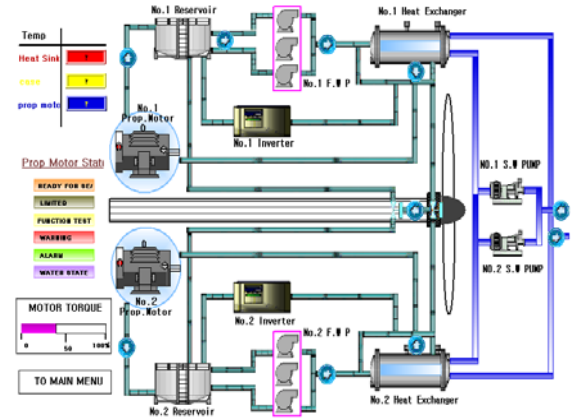


Fig. 13 전기추진시스템의 냉각시스템 제어 화면

Fig. 13은 전기추진시스템의 냉각시스템 제어화면을 나타낸 것으로 water cooling pump 3대를 인버터에 의해 병렬운전하게 된다. 추진전동기의 torque에 따라 인버터의 스위칭시 발열량이 변화하게 되므로 펌프 3대의 병렬운전으로 부하를 50%씩 분담하여 에너지 효율을 증가시킬 수 있을 것이다.

## 7. 결 론

MIIR 타입의 추진전동기용 인버터 모듈의 냉각시스템 설계를 위한 기초적인 전력 손실과 발열량에 대해 분석하였는데 앞으로 좀 더 구체적이고 정확한 전력 손실 해석과 추진 전동기의 발열량 분석을 통해 효율적인 냉각시스템 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 위한 에너지 절약형 제어시스템에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

## 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, "ELECTRO-THERMAL 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