

# 친환경 선박 EGR 블로워용 150kW SPMSM 구동 인버터 최적제어기의 실험적 검증

## Experimental verification of inverter's optimal controller for driving 150kW SPMSM of EGR blower of Green-ships

김 세 환<sup>★</sup>, 김 연 우\*, 김 민 재\*, 이 의 형\*, 이 성 원\*

Sehwan Kim<sup>★</sup>, Yeonwoo Kim\*, Minjae Kim\*, Uihyung Yi\*, Sungwon Lee\*

### Abstract

The application of the EGR system is increasing according to the recent trend of conversion to green-ships. EGR blower, one of the core parts of the EGR, consists of aerodynamic system and e-motor and inverter and etc. For the e-motor, a permanent magnet type synchronous motor with high energy density and excellent efficiency is applied recently. Small and medium-sized enterprises trying to develop the e-motors, however, for marine inverters mostly developed by global advanced companies due to the rigid classification certification and technical difficulties. One of disadvantage of universal inverters is that when optimal control fails, it is difficult to find the cause from user's point of view. Therefore, in this study, optimal controllers(Current vector control and Tracking observer) for SPMSM for EGR blower was designed and verified to analyze the causes of failure of optimal control of universal inverter.

### 요 약

최근 친환경 선박 전환 추세에 따라 EGR 시스템 적용이 증가되고 있다. EGR 시스템의 주요 부품 중 하나인 EGR 블로워는 공력 시스템과 이를 구동하는 e-모터 및 인버터 등으로 구성되며, 에너지밀도가 높고 효율 특성이 우수한 영구자석형 동기전동기가 적용되고 있다. 한편, EGR 블로워용 모터의 경우 국내 중소조선기자재 기업들의 개발이 활발하지만, 선박에 탑재되는 인버터는 까다로운 선급인증을 획득해야 되므로 주로 글로벌 선진기업에서 개발한 범용 인버터가 사용되고 있다. 범용 인버터는 자가 튜닝 등 편리한 구동 기능을 갖고 있지만, 최적 제어 실패 시, 사용자 입장에서 원인을 분석하기 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 EGR 블로워용 SPMSM의 최적제어를 위한 전류 벡터 제어 및 Tracking observer를 설계 및 검증하여 범용 인버터의 최적제어 실패원인을 분석하고자 한다.

*Key words : Green-ships, EGR Blower, SPMSM, Universal inverter, Tracking observer*

\* Korea Institute of Machinery & Materials

★ Corresponding author

E-mail : sehwan@kimm.re.kr, Tel : +82-51-310-8145

※ Acknowledgment

This research was supported by a grant of the Basic Research Program funded by the Korea Institute of Machinery and Materials (grant number: NK240A).

Manuscript received Nov. 24, 2022; revised Dec. 12, 2022; accepted Dec. 13, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### I. 서론

선박용 EGR 시스템(그림 1)은 주로 선박용 디젤 엔진의 NO<sub>x</sub> 생성을 크게 줄일 수 있는 방법 중 하나로 친환경 선박 전환 이슈와 관련하여 최근 주목받고 있는 LNG 추진엔진에서도 NO<sub>x</sub>감소, 메탄슬립감소, 연료소모율 저감 등을 목적으로 활용되는 등 지속적인 수요가 예상되며, 일본의 Mitsubishi 중공업, SIEMENS, MAN-ES 등 주로 해외 기업들에 의해 해당 기술이 선도되고 있다. 선박용 EGR의 주요 구성품 중 하나인 EGR 블로워는 EGR에서 온도가 낮아진 배기가스를 수분처리 한 후 소기 탱크로 공급하는 역할을 하며, 공력시스템 및 이를 구동하는 e-모터 및 인버터 시스템, 유힬을 위해 오일을 순환시키는 보조시스템 등으로 구성된다. 이 중, e-모터와 인버터는 EGR 블로워 시스템 전체에 영향을 미칠 만큼 중요한 구성요소로 e-모터의 경우, 최근 유도전동기를 대신하여 에너지밀도 및 효율 특성이 우수한 표면부착형 영구자석형 동기모터(SPMSM)가 적용되는 추세이다[1].

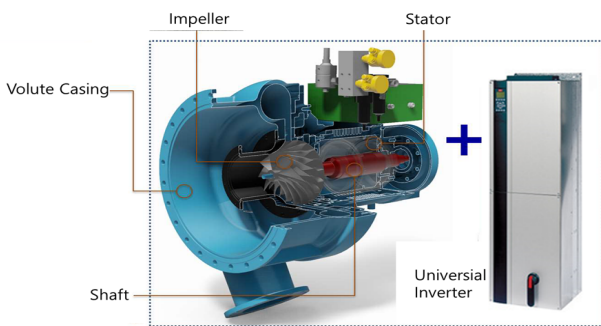


Fig. 1. System configuration of EGR blower for ships.  
그림 1. 선박용 EGR 블로워 시스템 구성

선박 EGR 블로워용 e-모터는 최근 모터 설계 기술의 발달로 인해 관련 중소 조선 기자재 기업에서 활발한 사업화가 시도되고 있는 반면, 이를 구동하기 위한 인버터는 선급인증 획득이 까다롭고 기술진입 장벽이 높은 이유로 Danfoss group 등 글로벌 선진기업의 범용 인버터가 시장을 거의 독점하고 있다. 이러한 범용 인버터는 일반적으로 제어변수의 자가 튜닝(Self-tuning) 기능 등 장점을 갖추고 있지만, 제어 대상 모터의 비선형적인 모터 제어 특성까지 모두 반영하기 어렵기 때문에 최적 제어 실패로 이어질 수 있다. 이 경우, 인버터 제작사의 도움 없이는 제어기 알고리즘 수정이 불가능하며, 제어기를 개선하더라도 큰 비용과 노력이 요구될 수 있기 때

문에 정확한 원인 분석이 선행될 필요가 있다.

이에 본 논문에서는 선박용 EGR 블로워에 탑재된 150kW급 SPMSM을 구동하는 범용 인버터 및 제어기의 제어 실패 현상 및 이에 대한 원인 분석을 수행하였으며, 벡터제어 이론에 기반한 최적 제어기 구현 및 시뮬레이션 검증을 수행하였다. 또한 실제 선박 EGR 블로워용 150kW 영구자석 동기전동기를 이용해 구현된 제어기의 타당성을 검증하기 위해 다이나모시험장비, 인버터 등으로 구성된 테스트 베드를 구축하여 실험을 수행하였으며, 검증된 결과를 토대로 범용 인버터의 제어기를 개선하기 위한 방향성을 도출하였다.

### II. 본론

#### 2.1 범용 인버터의 시험데이터 분석

본 연구의 시험대상인 EGR 블로워용 SPMSM의 제원은 아래 표와 같다.

Table 1. Specification of SPMSM for EGR blower  
표 1. EGR 블로워용 SPMSM 제원

Motor type		SPMSM	
Number of phases	3	Insulation class	H
Number of poles	4	Thermal class	180°C
Power	150kW	Supply freq.	300Hz
Torque	159.2Nm	Terminal voltage	380V
Rated speed	9000rpm	Min. Speed	4500rpm

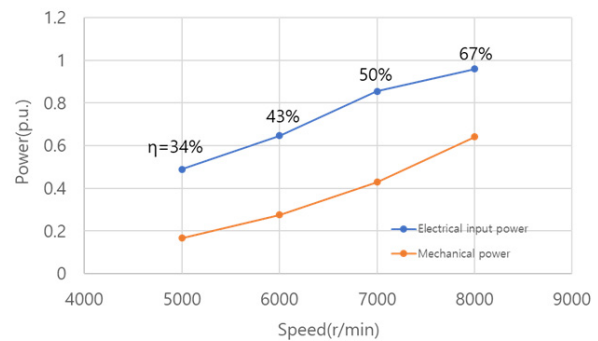


Fig. 2. Test result of SPMSM and universal inverter.  
그림 2. 범용 인버터를 이용한 SPMSM 시험 결과

그림 2는 선박 EGR 블로워용 e-모터를 Danfoss社의 범용인버터인 VACON Inverter를 이용해 테스트한 결과를 나타내고 있다. 시험 데이터를 살펴보면, 5000~8000[r/min]구간에서의 모터 입력전력 대비 기계적 출력이 34~67%로 모터 효율이 상당히 낮음을 알 수 있

며, 이를 통해 외부 공력 부하를 만족하기 위해 모터가 발생하는 기계적 출력에 비해 과도한 입력 전력이 인가되고 있음을 예측할 수 있다. 이러한 범용 인버터 최적 제어 실패의 원인을 분석하기 위해서는 SPMSM의 최적제어기법으로 잘 알려진 단위전류당 최대토크제어(MTPA)에 대해 고려할 필요가 있다. SPMSM의 순시토크( $T_e$ )는 식(1)과 같으며(여기서, P는 모터의 극수), 회전자 자속( $\lambda_{pm}$ )이 영구자석에 의해 일정하기 때문에 동기좌표계 q축 전류( $i_q$ )의 크기를 제어하면 모터의 순시토크를 제어할 수 있다. SPMSM의 최적제어는 d축 전류( $i_d$ )지령은 0으로 설정함으로 단위전류당 최대토크를 발생시킬 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{pm} i_q^r \quad (1)$$

이러한 관점에서 그림 2의 범용인버터의 최적제어 실패 원인을 예상한다면, SPMSM의 회전자 위치를 정확하게 판별하지 못하여 토크 발생에 관여하지 않는 d축 전류가 과도하게 흐르고 있을 것을 예상할 수 있다. 그 결과, 외부 공력부하를 만족하기 위해 속도제어기는 더 큰 토크지령을 출력하여 고정자 전류크기를 증가시키고 결과적으로 과도한 전류가 권선에 흐르게 되어 모터에는 기준 이상의 발열이 생기게 된다. 그러나 앞서 밝힌 바와 같이 범용 인버터의 사용자는 시험 간 내부 제어 변수의 직접적인 확인 및 변경이 불가능하기에 본 연구에서는 직접 최적제어기를 구성하여 범용 인버터와의 성능을 비교하고자 하였다.

## 2.2 시뮬레이션을 활용한 최적제어기 구현

본 연구의 EGR 블로워용 150kW급 SPMSM은 유체 베어링(Fluid bearing)이 적용되어 있기 때문에 모터 후면부에 회전자 위치정보를 얻기 위해 필수적으로 요구되는 위치 센서(엔코더 또는 레졸버)를 부착할 수 없으므로 회전자 위치 센서리스 제어기법의 적용을 필요로 한다. 본 실험에서는 SPMSM의 최적 제어 시스템을 구현하기 위해 동기좌표계 전류 벡터 제어기와 더불어 회전자 위치 센서리스 제어기법의 하나인 역기전력 추정 기반의 Tracking observer를 적용하였으며, 개발 기간 단축을 위해 설계 과정에서 시뮬레이션을 이용한 모델 기반 설계 방법을 이용하였다.

SPMSM의 동기좌표계 전류 벡터 제어기와 센서리스 제어기를 설계하기 위해서는 전압방정식을 살펴볼 필요가 있으며, 이는 동기좌표계 및 고정자 좌표계상에서 각

각 식 (2), (3)과 같이 표현된다..

$$v_{dq}^r = r_s i_{dq}^r + L_s \frac{d}{dt} i_{dq}^r + e_{dq}^r \quad (2)$$

(여기서, 역기전력  $e_{dq}^r = \omega_r \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} i_{dq}^r + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_{pm} \end{bmatrix}$ ),  $\omega_r$ 는 동기각속도, 첨자 r은 동기좌표계를 의미)

$$v_{dq}^s = r_s i_{dq}^s + L_s \frac{d}{dt} i_{dq}^s + e_{dq}^s \quad (3)$$

(여기서, 역기전력  $e_{dq}^s = |e_{dq}^r| \begin{bmatrix} -\sin \theta_r \\ \cos \theta_r \end{bmatrix}$ ,  $\theta_r$ 는 동기회전각, 첨자 s는 고정자좌표계를 의미)

그러므로, 모터 회전자 위치를 판별하기 위해서는 고정자 좌표계 역기전력( $e_{dq}^s$ )의 추정 알고리즘의 적용이 필요한데, 그림 3에서 보듯 고정자 전류를 추종하는 가상의 전류 제어기와 정상상태 모터 고정자 전압( $v_{dq}^s \approx v_{dq}^{s*}$ )을 feed-forward 하면, PI제어기 출력값으로부터 식(2)의 첫 번째, 두 번째 항은 상쇄 되고, 고정자 좌표계 역기전력 값을 추정할 수 있음을 알 수 있다.

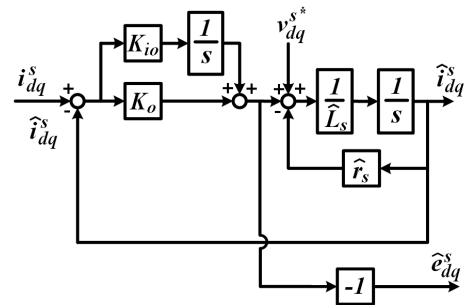


Fig. 3. Back emf estimation algorithm.

그림 3. 역기전력 추정 알고리즘

식(3)을 이용해 그림 3의 전달 방정식을 정리하면 식 (4)와 같으며, Feed-forward항 우측의 저항-인덕턴스 모델이 모터 고정자 저항-인덕턴스와 동일할 경우, 설정된 대역폭 내에서 역기전력을 추정할 수 있으며, 이는 식 (5)와 같이 구성된다.

$$\hat{e}_{dq}^s = \frac{K_o s + K_{io}}{\hat{L}_s s^2 + (\hat{r}_s + K_o) s + K_{io}} e_{dq}^s + \frac{K_o s + K_{io}}{\hat{L}_s s^2 + (\hat{r}_s + K_o) s + K_{io}} \{ (r_s - \hat{r}_s) + s(L_s - \hat{L}_s) \} i_{dq}^s \quad (4)$$

$$\hat{e}_{dq}^s = |e_{dq}^r| \begin{bmatrix} -\sin \theta_r \\ \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\hat{\theta}_r = \tan^{-1} \left( -\frac{\hat{e}_{ds}^s}{\hat{e}_{qs}^s} \right) \quad (6)$$

추정된 역기전력은 식(6)과 같이 역 탄젠트(arc tangent) 계산을 이용해 회전자의 위치정보를 추정할 수 있으나, 이는 신호의 노이즈 성분에 의해 계산 오차를 유발할 수 있으므로[2], 본 연구에서는 그림 4와 같이 상대적으로 노이즈에 강인하고 구현이 간단한 PI 제어기 기반 Tracking observer[3]를 적용하였다. 이를 종합하면 본 연구에 적용된 EGR 블로워용 150kW급 최적 제어기의 전체 블록도는 그림 5와 같이 표현된다.

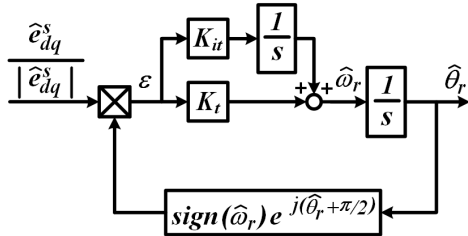


Fig. 4. PI type Tracking observer.  
그림 4. PI 제어기 기반 Tracking observer

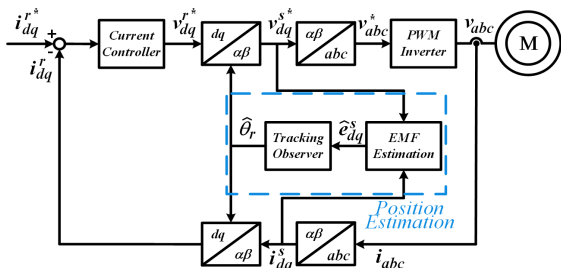


Fig. 5. Block diagram of SPMSM controller.  
그림 5. SPMSM 제어기의 블록도

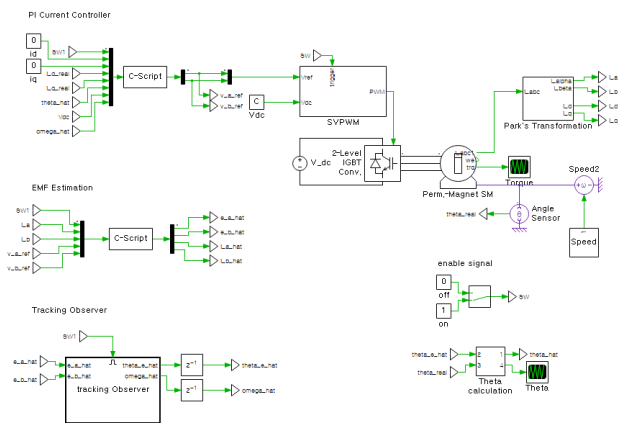


Fig. 6. A simulation model for EGR blower motor system.  
그림 6. EGR 블로워 모터시스템의 시뮬레이션 모델

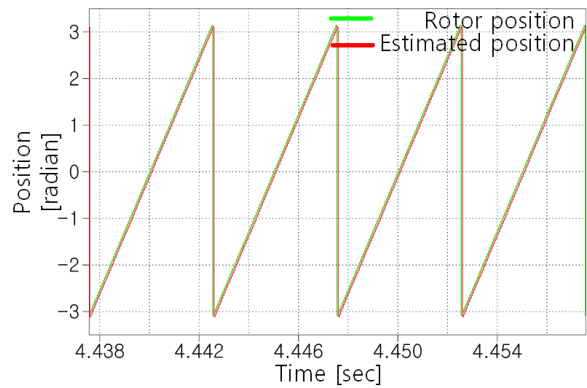


Fig. 7. Simulation result of Tracking Observer.  
그림 7. 회전자위치 추정기 시뮬레이션 결과

SPMSM의 최적 제어 및 위치 추정 제어알고리즘의 구현은 그림 6과 같이 Plexim社의 PLECS를 이용해 모델 기반 설계 시뮬레이션을 통해 설계 되었으며, 6000 [r/min]에서의 실제 회전자 위치를 정확하게 추정함을 알 수 있다(그림 7).

### 2.3 테스트 베드 구현 및 최적 제어 검증

상기에서 설계된 최적제어기의 실험적 검증을 위해 그림 8과 같이 SPMSM 및 Oil pump unit 등으로 구성된 테스트베드를 구축하였다. 테스트 베드 구축을 위해 200kW 모터 다이내모 장비 및 배터리 시뮬레이터, 200kW급 개발용 인버터 등으로 구성되었다. 2.2절에서 구현된 시뮬레이션 모델 알고리즘을 실제 시스템과 연동하기 위해 그림 9와 같이 Plexim社의 RT-box를 설치하고 시스템과의 통신 및 real-time control을 위한 interface(I/F) board를 설계 및 제작하였다.

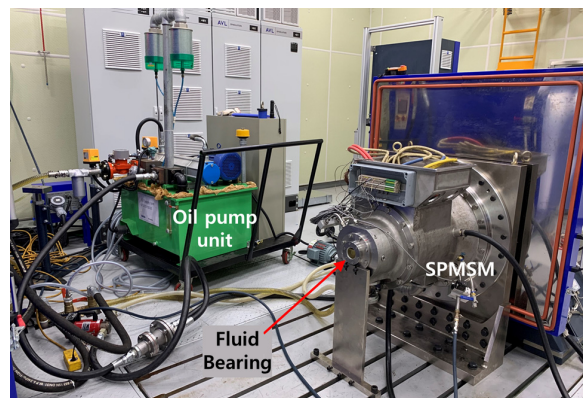


Fig. 8. SPMSM Test bed set-up.  
그림 8. SPMSM 테스트베드 셋업

본격적인 시험에 먼저 범용 인버터의 제어 실패 현상을 재현하였다. 표 2와 같이 회전자 위치 추정기의 위치

추정값에 임의의 오차(Phase offset)를 발생하였을 때, 외부 부하에 대해 동일한 모터 토크가 발생함에도 불구하고 모터 권선에는 약 40%의 전류가 더 많이 흐르는 것을 알 수 있다. 이런 경우, 모터에 과도한 고정자 동손(Copper loss)을 야기하여 설계치 이상의 열손실을 발생하게 된다.



Fig. 9. Controller set consisting of RT-box and I/F board.  
그림 9. RT-box 및 I/F보드로 구성된 제어기 세트

Table 2. Comparison of voltage and current according to rotor position estimation error.

표 2. 회전자위치 추정 오차에 따른 전압 및 전류크기비교

Phase error[degree]	0	45
Torque[Nm]	63	65
Current[A]	120	172
Speed[r/min]	6000	6000

그림 10에서는 EGR 블로워용 모터의 최적 제어 알고리즘 시험 결과를 나타내었다. 시험검증은 EGR 블로워용 모터의 공력부하 발생 상황을 재현하기 위하여 시험용 SPMSM을 속도제어모드로 운전하는 한편, 속도 정상 상태에서 다이내모 모터를 이용하여 토크를 인가하는 방식으로 진행하였다. 그림 2의 범용인버터 시험결과와 마찬가지로 EGR 블로워용 SPMSM의 축에서 발생하는 출력(Mechanical power)은 RPM별 인가되는 외부공력부하 프로파일에 의해 결정되기 때문에 두 시험 모두 동일한 기계적 출력이 나타나고 있다. 그러나, 기존 시험결과와 비교해 볼 때 인버터로부터 모터에 전달되는 전력이 감소하여 효율이 대폭 향상된 것을 확인 할 수 있는데, 이는 범용인버터의 자가튜닝을 이용한 SPMSM운전보다 최적제어기를 적용한 인버터가 모터 회전자 위치를 정확하게 추정하여 고정자에서 더 적은 전류를 사용하도록 하여 단위 전류당 최대 토크 운전을 수행한 결과임을 알 수 있다.

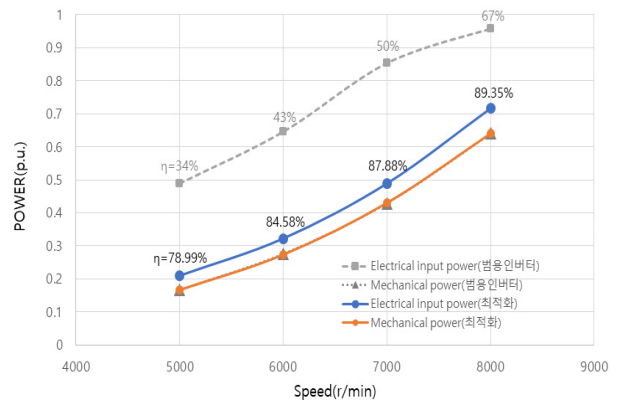


Fig. 10. The SPMSM and optimal control implemented inverter power curve.

그림 10. SPMSM 및 최적제어기가 적용된 인버터의 운전속도별 출력 곡선

### III. 결론

본 연구에서는 EGR 블로워용 150kW SPMSM의 최적제어기 설계 및 검증을 통해 실제 친환경 선박에 일괄적으로 적용되고 있는 범용 인버터의 최적 제어 실패 현상과 원인을 분석하고자 하였다. 이를 위해 Tracking observer 및 전류 벡터 제어기로 구성된 최적제어기를 구현하였으며, 시뮬레이션 모사 및 테스트베드 구현을 통해 최적제어기의 효용성을 입증하였다. 그 결과, 자가튜닝기능이 포함된 범용인버터와 비교해 설계된 최적 제어기가 동일 토크를 발생할 때 더 낮은 전류를 흐르게 하여 단위 전류당 최대토크 제어가 수행 가능함을 보였으며, 효율이 대폭 개선될 수 있음을 검증하였다.

### References

- [1] Jun-young Park, "Research of Exhaust Gas Recirculation Blower," *Korea Institute of Machinery and Materials*, 2017.
- [2] Hyunbae Kim, M. C. Harke and R. D. Lorenz, "Sensorless control of interior permanent-magnet machine drives with zero-phase lag position estimation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.39, no.6, pp.1726-1733, 2003. DOI: 10.1109/TIA.2003.818966
- [3] Jul-Ki Seok, Jong-Kun Lee and Dong-Choon Lee, "Sensorless Speed Control of Nonsalient Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Rotor-

Position-Tracking PI Controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.53, No.2, pp.399-405, 2006. DOI: 10.1109/TIE.2006.870728

## BIOGRAPHY

### Sehwan Kim (Member)



2011 : BS degree in Electrical Engineering, Yeungnam University.  
2016 : PhD. degree in Electrical Engineering, Yeungnam University.  
2016~2018 : Research Engineer, POSCO group.

2018~2019 : Research Engineer, DoosanInfracore.  
2019~Present : Senior Researcher, Korea Institute of Machinery and Materials.

### Yeonwoo Kim (Member)



2015 : BS degree in Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science & Technology.  
2017 : MS degree in Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science & Technology.

2018~2020 : Research Engineer, LG Ensol group  
2020~Present : Researcher, Korea Institute of Machinery and Materials.

### Minjae Kim (Member)



2015 : BS degree in Mechanical Engineering, Gacheon University.  
2017 : MS degree in Mechanical Engineering, Gacheon University.  
2017~2018 : Research Engineer, Kapec Valeo.

2018~Present : Engineer, Korea Institute of Machinery and Materials.

### Uihyung Yi (Member)



2013 : BS degree in Mechanical Car Engineering, Gachon University.  
2015 : MS degree in Mechanical Engineering, Gachon University.  
2013~2018 : Researcher, Environmental Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials.

### Sungwon Lee (Member)



2009 : BS degree in Mechanical Engineering, Kongju University.  
2011 : MS degree in Mechanical Engineering, Kongju University  
2011~2016 : Research Engineer, Korea Institute of Machinery and Materials.

2016~2017 : APPL Engineer, AVL

2017~Present : Senior Engineer, Korea Institute of Machinery and Materials.