

자주포용 보조동력장치 엔진룸의 열유동 최적화에 관한 연구

노상원¹, 박영민¹, 김성훈¹, 이재동², 김병현^{1*}
¹국방기술품질원 기동화력센터, ²한화디펜스 체계기술1팀

A Study on the Optimization of Heat Flux in Engine Room of Auxiliary Power Unit for Self-Propelled Artillery

Sang Wan Noh¹, Young Min Park¹, Sung Hoon Kim¹, Jae Dong Lee², Byung Hyun Kim^{1*}

¹Land Systems Center, Defence Agency for Technology and Quality

²System Engineering Team 1, Hanwha Defense

요 약 자주포는 운용 특성상 정차상태에서 구동하기 때문에 엔진을 사용할 만큼 많은 에너지가 필요하지 않다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여 성능개량된 자주포에는 보조동력장치(APU)를 설치하였다. APU를 통하여 엔진의 불필요한 가동을 줄일 수 있고, 이는 엔진의 수명을 늘릴 수 있다. 본 연구에서는 APU 내부 엔진룸의 열 유동을 최적화하기 위하여 Fan과 오일쿨러 적용에 따른 영향을 분석하였다. 열유동 해석을 수행하기 위하여 대기환경과 일사량은 MIL-STD-810을 적용하였다. 흡입구/배출구 Fan을 적용한 경우(Case1), 흡입구 Fan과 오일쿨러를 적용한 경우(Case2), 흡입구/배출구 Fan과 오일쿨러를 적용한 경우(Case3) 3가지에 대하여 열유동을 해석하였다. 해석결과 Case3의 실린더 헤드 온도가 Case1 보다 21.4℃, Case2 보다 8.0℃ 낮은 것을 확인하였다. 해석결과에 대한 타당성을 검토하기 위하여 동일 외기조건에서 실험을 진행하였다. 해석수치와 실험결과가 7%이하의 차이를 나타냈다. 이를 통하여 APU 열유동 최적화 모델이 설계조건을 만족하는 것을 확인하였다. 본 연구결과를 통하여 추후 개발하는 타 군용 APU 열유동 최적화에 대한 기초자료로 사용될 것으로 기대된다.

Abstract In this study, we analyzed the effect of FAN and oil cooler application on APU. MIL-STD-810 was applied to the atmospheric environment and radiation dose in order to perform thermal flow analysis. The heat flow was analyzed for the case in which the inlet / outlet fan was applied (Case 1), the case in which the inlet fan and the oil cooler were applied (Case 2), and the case in which the inlet / outlet fan and the oil cooler were applied (Case 3). As a result, it was confirmed that the cylinder head temperature of Case 3 was 21.4 times lower than that of Case 1 and 8.0 times lower than that of Case 2. Experiments were conducted under the same ambient conditions in order to examine the validity of the results. The numerical values and experimental results showed a difference of less than 7%. Through this, we were able to confirm that the APU heat flow optimization model satisfies the design conditions. The results of this study are expected to be used as basic data for optimizing heat flow of APU.

Keywords : Auxiliary Power Unit, Temperature Distribution, Numerical Analysis, Fan, Oil cooler

1. 서론

자주포(Self propelled artillery)는 스스로 움직여 사격 하도록 무한궤도 등의 차체에 탑재한 야전포를 말하

며, 제2차 세계대전에서 전차와 작전행동을 함께 하면서 대포에 기동력을 부여하기 위해 개발되었다.

자주포는 사격훈련 등 포탑 운용 시 주엔진인 디젤엔진의 동력을 사용함에 따라 운용 중 운용간 소음이 심하

*Corresponding Author : Byung-Hyun Kim(Defence Agency for Technology and Quality)

email: tkdkim16@dtqa.re.kr

Received August 30, 2019

Accepted December 6, 2019

Revised October 1, 2019

Published December 31, 2019

며, 정차상태에서 장시간 사용에 따른 주엔진 내부 부품의 파손 발생가능성이 존재한다. 그리고 자주포 운용 특성상 정차상태에서 포 구동 위주로 하기 때문에 주엔진을 사용해야 할 만큼의 에너지가 필요하지 않다.

이와 같은 운용상의 문제점을 해결하기 위해 성능개량된 자주포에는 보조동력장치(이하, APU)를 설치하였다. APU는 자주포 운용 시 차량 축전지 충전 및 주엔진 미가동에도 포탑을 운용할 수 있도록 자주포 포탑 후방에 설치하여 전원을 공급하는 역할을 한다[1].

과거의 APU는 내부 엔진을 보호하기 위한 하우징이 개방된 구조이므로 엔진의 소음이 외부로 직접 전달되어 운용자가 불편함을 느꼈다. 이러한 문제점을 해결하고자 신형 APU는 밀폐형 하우징으로 설계하였으며, Fig.1과 같이 엔진, 발전기, 연료공급장치 및 기타 부수장치로 구성되어 있다[1].

자주포에 적용된 APU는 밀폐형 구조로 설계되었다. 밀폐형 구조는 소음을 줄일 수 있으나, 공기의 유동이 원활하지 않아 개방형 구조보다 내부온도가 상승하게 된다.

엔진룸 내부의 온도가 상승하게 되면 장착된 각종 고무, 플라스틱 및 전자장치 등이 손상, 효율저하를 야기할 수 있다. 특히, 오일의 온도 상승으로 엔진 내 실린더와 피스톤 간 윤활성능이 떨어지면 엔진의 고장 유발 및 수명 단축이 발생 하여 APU의 신뢰성이 저하 된다. 군용 APU는 신뢰성이 중요한 요소로서, 혹서기 환경에서도 원활한 작동이 가능해야 한다.

기존의 연구에서는 APU의 엔진룸 내부 온도분포의 특성과 배기구 면적변화에 따른 온도분포 등 엔진룸 내부 열유동에 관한 수치해석 연구들이 많이 진행되었다 [2-6].

본 연구에서는 밀폐형 APU의 엔진에서 발생하는 배출가스에 의해 내부 온도상승을 방지하기 위한 냉각장치 유무에 따라 APU 격실 내 온도가 어떻게 변화하는지 연구하였다. 연구방향은 APU 내부의 온도해석을 통해 이론적인 효과를 먼저 검증하고, 효과가 가장 좋은 Case를 실제로 제작 해석과 동일한 조건에서 실험을 하여 설계에 대한 타당성을 검토하였다.

2. APU 내부 온도 해석

2.1 해석 조건

APU 열유동 해석을 수행하기 위하여 대기환경과 일사량은 Table 1과 같이 MIL-STD-810의 기후분류에

따른 열대 Hot Dry 조건을 사용하였다[7]. 대기온도는 32 ℃를 적용하여 적합한 모델을 선정하고, 이후 최고 온도인 50 ℃를 적용하였다. 일사량은 기후분류지역의 최대치인 1120W/m²로 분석하였다. 해석에서는 상용 CFD 프로그램인 Fluent V15.0.0을 사용하였고, 해석 모델의 Mesh Type은 Polyhedral, Mesh Size는 3,567,091 cells, 19,626,705개의 node로 구성하였다.

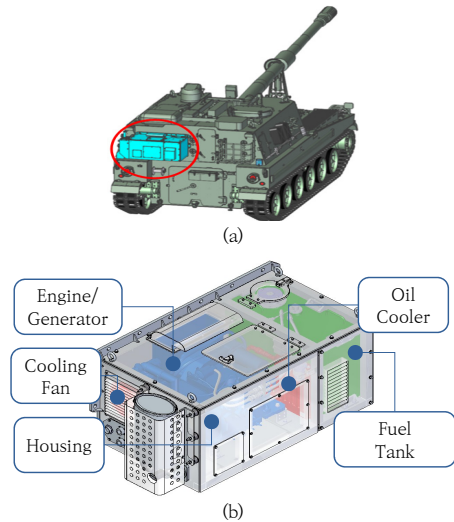


Fig. 1. APU schematic

Table 1. APU operating condition

Ambient temperature	32~50 ℃	MIL-STD-810F (Hot dry:A1)
Solar radiation	1120 W/m ²	
Design spec	APU Engine Oil temp. under 110 ℃	

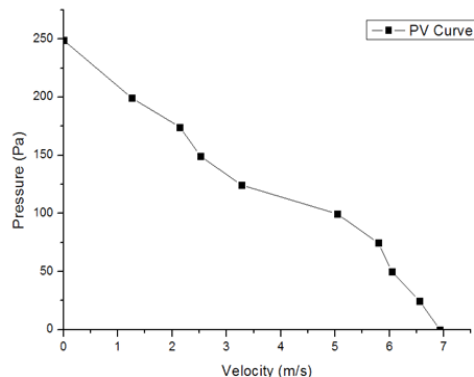


Fig. 2. Fan data sheet

밀폐된 공간에서 보조동력장치의 열유동 해석은 기본적으로 다음과 같은 대류복사 열전달 해석 모델을 사용하였다. APU 공기 출입구와 배출구 Fan의 성능곡선은 Fig. 2와 같다.

2.2 해석 모델

APU 내부 온도 상승 방지 설계를 위하여 Table 2와 같이 총 3가지 모델에 대하여 해석을 진행하였다. Case1은 공기 흡입/배기구에 Fan을 적용 하였다. Case2는 흡입구에 Fan과 오일쿨러를 적용 하였다. Case3은 오일쿨러와 흡입/배출구 Fan 3가지 모듈을 적용하였다.

엔진 오일쿨러의 적용 여부에 따라 엔진과 오일쿨러의 발열량을 Table 3과 같이 구분하여 열유동 해석을 진행하였다. 난류모델은 Realizable k-ε two layer 모델을 적용하였고, 압축성 유체 조건을 적용하였다. Fan이 적용되지 않은 경우 대기압 조건을 적용하여 해석을 진행하였다.

Table 2. Specifications of design parameters

	Suction Fan	Oil cooler	Emission Fan
Case1	O	X	O
Case2	O	O	X
Case3	O	O	O

Table 3. Boundary condition of APU and oil cooler

	Oil cooler (equipped)	Oil cooler (non equipped)
$Q_{Oilcooling}$	1,221W	-
$Q_{Remaining Heat}$	900W	1,300W

3. APU 내부 온도 해석 결과

흡입/배출구 Fan만 적용한 Case 1의 경우 실린더 헤드의 온도가 149.9℃까지 올라가며, 시험 결과로 얻어진 실린더 블록 헤드 온도와 오일 온도의 관계는 약 (0.63~0.68)이고, 이를 적용하여 추정 오일 온도는 94.4~102℃ 수준으로 나타난다.

Fig. 3(a)는 Case 1에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 실린더 헤드 부위에서 가장 높은 온도를 나타내고 있다. Fig. 3(b)는 APU 실 내부 중심부분의 온도 분포도를 나타 낸 것이다. 흡입/배출구 Fan 적용으로 인하여 유량

이 적정하여 엔진룸 내부 열 포화상태는 일어나지 않은 것을 볼 수 있다.

흡입구에 오일쿨러와 Fan을 적용한 Case 2의 경우 실린더 헤드의 온도가 136.5℃, 추정 오일 온도는 86.0~92.8℃ 수준으로 나타난다.

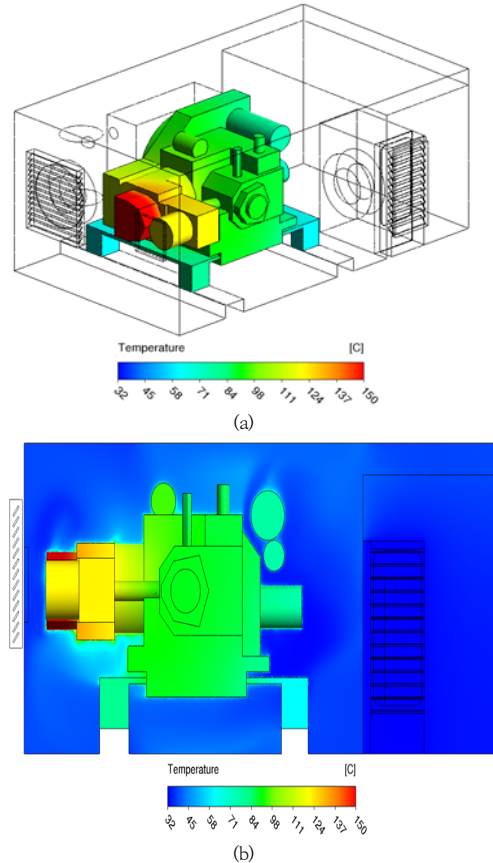


Fig. 3. Temperature distribution of Case 1

Fig. 4(a)는 Case 2에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 이전 해석과 마찬가지로 실린더 헤드 부위에서 가장 높은 온도를 나타내고 있다. 배출구 Fan을 적용하는 것보다 오일쿨러를 적용 하는 것이 실린더 헤드 온도를 낮추는데 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 APU 실 내부 중심부분의 온도 분포도를 나타 낸 것이다. APU 상단 부분을 보면 알 수 있듯이 빠져나가는 공기의 양이 적정하지 않아 엔진룸 내부 열 포화상태가 일어나는 것을 볼 수 있다.

모든 것을 적용한 Case 3의 경우 실린더 헤드의온도가 128.5℃, 추정 오일 온도는 80.9~87.3℃ 수준으로 나타난다.

Fig. 5는 Case 3에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 이전 해석과 마찬가지로 실린더 헤드 부위에서 가장 높은 온도를 나타내지만 Case 1에 비하여 실린더 헤드 온도가 21.4℃, Case 2에 비하여 8.0℃ 떨어 진 것을 볼 수 있다.

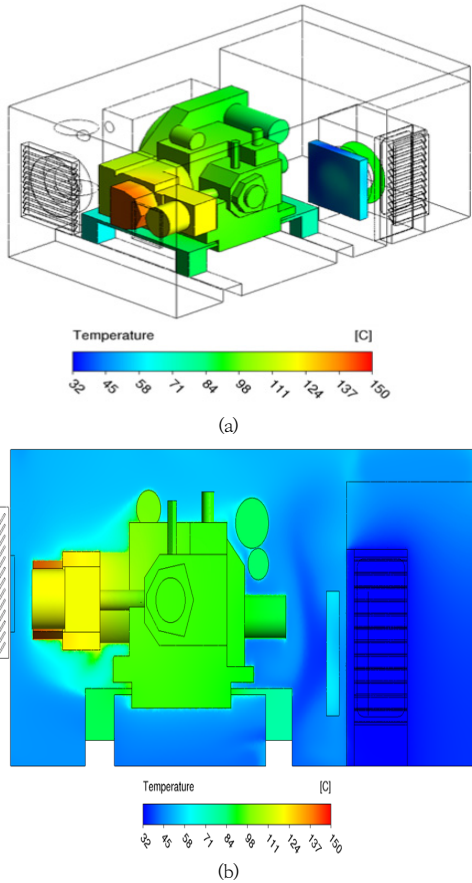


Fig. 4. Temperature distribution of Case 2

추정 오일온도는 실린더 헤드 부위 온도와 정비례 하기 때문에 Case 1에 비하여 약 14.5℃, Case 2에 비하여 약 5.1℃ 낮아 진 것을 볼 수 있다. 또한, 배출구 Fan 적용으로 인하여 Case 2와 같은 온도 포화상태가 나타나지 않는 것을 볼 수 있다.

3가지 모델의 열유동 해석을 통하여 32℃에서 설계치 (오일온도) 안에 들어오는 것을 확인 하였고, 그 중 Case 3이 엔진룸 내부 열에 관한 최적모델로 선정 하였다.

실제 기준인 MIL-STD-810의 Hout Dry 조건 중에서 위 해석 조건보다 약조건인 외기온도 50℃를 적용하여 추가로 해석을 진행 하였다.

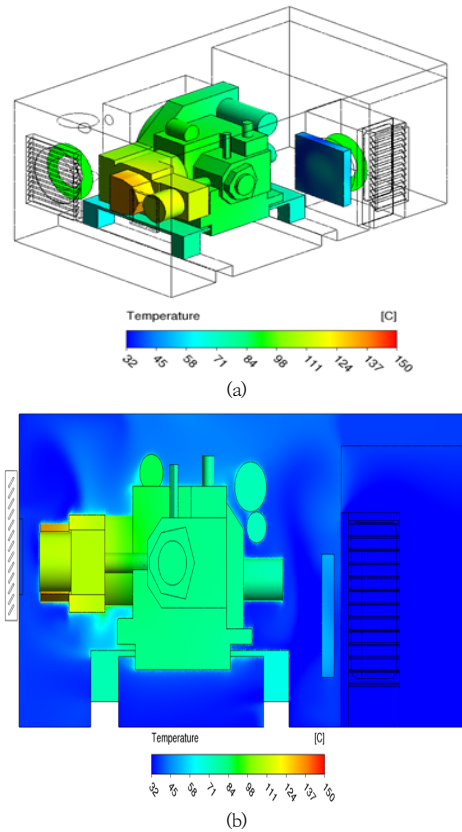


Fig. 5. Temperature distribution of Case 3

Table 4. Result of case study

	Case1	Case2	Case3
Mass flow rate	0.122kg/s	0.112kg/s	0.122kg/s
Cylinder head temperature	149.9℃	136.5℃	128.5℃
Oil temperature (assumption)	94.4~101.9℃	86.0~92.8℃	80.9~87.3℃

Table 5. Result of Ambient temperature effect

	Ambient temperature	
	32℃	50℃
Temperature distribution		
Cylinder head temperature	128.5℃	146.7℃
Oil temperature (assumption)	80.9~87.3℃	92.4~99.8℃

해석 결과 Table 5와 같이 외기온도의 상승에 따라 실린더 헤드 부위의 온도는 18.2℃ 상승하였고, 오일 추정온도도 99.8℃까지 상승하였다. Case 3의 경우 약조건에서도 설계 기준을 만족하는 것을 확인 할 수 있었다.

4. APU 내부 온도 측정 시험

4.1 측정 시험 조건

앞에서 모델링하여 해석한 결과에 대한 검증을 위해 시험을 실시하였다. Fig. 6과 같이 APU의 위치별 온도를 측정하기 위해 실린더 헤드, 오일룸 내부, 흡입/배출구 등 13곳에 온도센서를 설치하였다.

해석과 가장 유사한 상태에서 실험을 진행하기 위하여 외기온도가 32.8℃ 일 때 시험을 진행하였고, 100% 부하 조건에서 내부 온도가 안정상태에 도달 할 수 있도록 2시간동안 APU를 가동하여 내부 온도의 변화를 측정하였다.

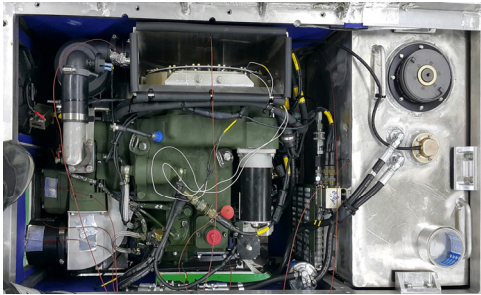


Fig. 6. APU temperature test

4.2 측정 시험 결과 및 비교

시험 결과 APU를 가동한지 약 1.5시간이 지나서야 엔진룸 내부 온도가 안정상태에 도달하였다. 내부에서 가장 고온인 실린더 헤드의 온도가 가동 후 70분후에는 133.2℃, 가동 후 2시간 이후에는 132.6℃로 나타났다. 또한 오일의 온도는 가동 후 70분후에는 79.0℃, 2시간 후에는 76.0℃로 측정이 되었다.

해석결과와 시험결과를 비교해 보면 Table 7.과 같다. 실험값의 실린더 헤드 부위 온도가 4.1℃ 높고, 오일의 온도는 4.9℃ 이상 낮다. 오일 온도의 차이는 오일 온도 추정 시 기 개발된 APU의 시험결과에서 유추된 계수를 적용 한 것으로 실제 측정값과 차이를 뱐다.

APU 내부 열유동 해석에는 측정 센서 연결선, 호스,

케이블을 생략하였기 때문에 해석 값과 실제 측정값이 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다.

Table 6. Temperature measurement test result

	70 minutes after operation	120 minutes after operation
Temperature distribution		
Cylinder head temperature	133.2℃	132.6℃
Oil temperature (assumption)	79.0℃	76.0℃

Table 7. Comparison between analysis value and test value

	Case1	Case2	Case3
Mass flow rate	0.122kg/s	0.112kg/s	0.122kg/s
Cylinder head temperature	149.9℃	136.5℃	128.5℃
Oil temperature (assumption)	94.4~101.9℃	86.0~92.8℃	80.9~87.3℃

5. 결론

본 연구는 자주포용 밀폐식 하우징을 적용한 APU의 열유동을 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 사용하여 예측하고, 약조건(외기온도 50℃)에서도 설계기준을 만족할 수 있는 냉각 방법을 도출하였다. 또한, 실제 APU에 적용 시험을 통하여 해석 결과의 적절성을 확인한 결론은 다음과 같다.

- (1) 흡입/배출구에 Fan을 적용한 Case 1의 경우 유동은 원활하게 진행되나 냉각효과가 미비하다. 흡입구에 Fan과 오일쿨러를 적용한 Case 2는 냉각효과가 더 좋아졌지만 엔진룸에서 열 포화상태가 일어나는 것을 확인하였다. 흡입/배출구 Fan 및 오일쿨러를 적용한 Case 3가 냉각효과와 유동 흐름이 좋은 것을 해석으로 확인하여 APU 엔진룸 내

부 열유동에 최적 모델로 선정 하였다.

- (2) 해당 모델을 MIL-STD-810의 Hot Dry조건(기후 조건 : 32℃~50℃, 일사량 : 1120W/m²)으로 해석을 진행한 결과 약조건에서도 설계 기준을 만족하는 것을 확인 하였다.
- (3) 해석 대기조건(외기온도 32℃)과 유사한 상황에서 실험을 진행한 결과, 실린더 헤드 온도는 4.1℃, 추정 오일의 온도와 실험치 값은 약 4.9℃의 차이가 나타났다. 실험으로 얻은 값이 해석과 7% 이내의 차이가 나타났고, 이를 통하여 MIL-STD-810 약조건에서도 설계조건을 만족하는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구결과를 통하여 추후 개발하는 타 군용 APU 열유동 최적화에 대한 기초자료로 사용될 것으로 기대된다.

References

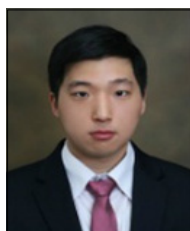
- [1] J. S. Lee, B. H. Kim, B. H. Kim, A Study on Optimization of Noise Reduction of Auxiliary Power Unit for Military Tracked Vehicle, Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol.19, No.8, pp.336-342, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.8.336>
- [2] T. E. Lee, J. S. Suh, S. H. Jeong, Y. S. Park, A Study on Thermal and Fluid Characteristics inside Engine Room of Auxiliary Power Unit for Tracked Vehicle, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.26, No.12, pp.85-93, 2009.
- [3] T. E. Lee, C. S. Yi, J. K. Hong, J. H. Yun, J. S. Suh, Numerical Analysis on Thermal and Flow in Auxiliary Power Unit Room for Tracked Vehicle, Journal of The Society of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, Pyeongchang, Korea, pp.1419-1424, 2010.
- [4] T. E. Lee, J. S. Suh, C. S. Yi, K. T. Chung, J. H. Yun, Effect of Area Change of Exhaust Hole on Temperature Distribution in Engine Room of Auxiliary Power Unit for Tracked Vehicle, Journal of Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Changwon, Korea, pp.877-878, 2010.
- [5] J. D. Lee, G. H. Kim, B. D. Heo, Y. I. Park, J. H. Seo, Analysis of Heat flow for operated in an enclosed space Auxiliary Power Unit, Fall conference, Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Deajeon, Korea, pp.62-68, 2015.11.
- [6] C. S. Yi, I. G. Jeong, J. H. Yun, J. S. Suh, T. E. Lee, A study on the Flow and Power Characteristics of Rotor in the APU, Journal of the Korean Society of

Manufacturing Technology Engineers, Vol.20, No.6, pp.805-810, 2011.

- [7] MIL-STD-810H, Environmental engineering considerations and laboratory tests, p.67, 2019.

노 상 완(Sang-Wan Noh)

[정회원]



- 2012년 7월 : Tsinghua University 정밀기계과 (공학사)
- 2015년 6월 : 연세대학교 기계공학부 (공학석사)
- 2015년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

국방, 기계/재료, 열/유체

박 영 민(Young-Min Park)

[정회원]



- 2013년 2월 : 울산대학교 조선공학과 (공학사)
- 2013년 1월 ~ 2017년 1월 : STX 조선해양 대리
- 2017년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

국방, 기계/조선, 진동/소음

김 성 훈(Sung-Hoon Kim)

[정회원]



- 2014년 12월 : 한양대학교 재료공학과 (공학사)
- 2014년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

재료공학, 열역학

김 병 현(Byung-Hyun Kim)

[정회원]



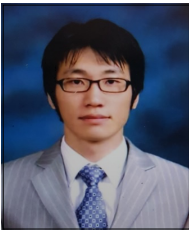
- 2011년 2월 : 인하대학교 기계공학
학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 인하대학교 기계공
학과 (공학석사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 선임연구원

〈관심분야〉

국방, 기계/재료, 진동/소음

이 재 동(Jae-Dong Lee)

[정회원]



- 2008년 2월 : 영남대학교 기계공
학과 (공학사)
- 2008년 7월 ~ 2013년 9월 : 삼성
테크윈 R&D 센터 선임연구원
- 2013년 10월 ~ 현재 : 한화디펜스
체계기술1팀 과장

〈관심분야〉

국방과학, 기계/재료