

군용 궤도장비 보조동력장치의 소음저감 최적화 연구

이주승, 김병호, 김병현*
국방기술품질원 기동화력센터

A Study on Optimization of Noise Reduction of Auxiliary Power Unit for Military Tracked Vehicle

Ju-Seung Lee, Byeong-Ho Kim, Byung-Hyun Kim*

Land Systems Center, Defence Agency for Technology and Quality

요약 군용으로 사용하는 궤도장비 디젤엔진의 보조동력장치에 대한 소음저감은 소요군의 감성품질을 만족시키는 중요한 요소 중 하나이다. 본 연구에서 이러한 보조동력장치의 소음을 줄이기 위해 구조기인소음을 저감하는 방법과 공기기인소음을 저감하는 방법을 고안하여 시험을 수행하였다. 그 결과 구조기인소음 저감을 위해 소음기를 개선하였을 때 약 22 dB(A)의 소음저감 효과가 있었다. 공기기인소음 저감의 영향을 알아보기 위해 흡음계의 종류와 후방문 그릴의 형상에 따른 소음을 측정하였고 그 영향은 인간이 인지하지 못하는 수준인 3 dB(A) 미만의 소음저감 효과가 나타났다. 또한, 실제차량에 소음저감을 위한 방안들을 적용하여 시험한 결과 구조기인소음을 저감하였을 때 약 9 dB(A)의 소음저감 효과가 나타났으며 공기기인소음의 저감효과는 1 dB(A) 이하로 측정된 것을 확인하였다. 따라서 궤도장비의 APU 소음저감을 위해서는 공기기인소음을 저감하는 방법보다 구조물을 통해 전달되는 소음을 저감하는 방안이 효과적이라는 것을 확인하였다. 본 연구결과를 통해 추후 개발하는 타 군용 궤도장비의 소음을 저감하기 위한 기초자료로 사용될 것으로 기대된다.

Abstract Noise reduction is an important issue in auxiliary power unit(APU) of tracking equipments for using military. In this study, we designed and tested reduction methods of structure borne noise and airborne source noise at the auxiliary power unit. From the bench test results, it is found that the effect of noise reduction is about 22 dB(A) if the silencer is redesigned, which is the rescue structure. However, the influence of noise reduction by air is insufficient. In addition, it is confirmed that the effect of noise reduction is excellent when structure borne noise reduction is applied to the vehicle. We expected that the test results of this study are used as basic data to reduce the noise of other tracking equipment developed later.

Keywords : Auxiliary Power Unit, Transmission Loss, Silencer, Airborne Noise, Structure Borne Noise, Tracked Vehicle

1. 서론

군용 궤도장비의 경우 상용자동차와 다르게 군사적 특성상 소음 및 진동, 승차감 등 감성적인 품질보다는 장비의 내구도 및 고·저온, 충격 등 극한 환경에서의 명시적 또는 묵시적 품질을 중요한 요인으로 간주한다.

그러나 최근에 소요군에서는 점차 일차원적인 명시적 또는 묵시적 품질보다 고차원적인 감성품질을 주요한 요소로 여기는 추세이다.

본 연구에서는 소요군의 감성품질을 만족시키고자 간헐적인 소음문제를 발생시키는 군용 궤도장비 디젤엔진의 보조동력장치(APU : Auxiliary Power Unit)에 대한

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

Tel: +82-55-279-4032 email: tkdkim16@dtaq.re.kr

Received July 5, 2018

Revised July 23, 2018

Accepted August 3, 2018

Published August 31, 2018

소음저감을 연구 하였다.

현재 적용중인 군용 궤도장비의 APU는 장착을 위해 4개의 방진마운트로 연결되어 있는데, 이 마운트가 정상 상태에서는 APU에서 발생하는 진동을 감쇄시켜 소음이 감소하지만, 비정상상태에서는 소음이 크게 증대되어 심한 Noise를 발생시킨다. 이러한 APU 고소음은 장시간 진술훈련을 받고 있는 병사들의 청각피로에 의한 일시적 청력손실(TTS, Temporary Threshold Shift)로 군 사기와 전투훈련에 직접적인 영향을 미친다. 또한 과도한 소음 노출로 인해 난청(Hearing Loss)과 같은 청력장애를 유발할 수 도 있다.

소음원을 감쇄하기 위한 방안으로 APU와 차체를 연결하는 마운트를 개선하는 방안과 엔진 배기구의 소음기를 개선하는 방안이 있다[1]. 전파경로를 개선하는 방안으로 흡·차음재를 추가 및 변경하는 방법과 APU 하우징부의 배기 그릴 형상을 변경하는 방안이 있다. 본 연구는 Fig. 1과 같이 밀폐형 구조의 APU가 아닌 외부와 개방된 구조의 APU에서 소음을 저감하기 위해 소음원 감쇄 및 전파경로 개선효과에 대한 결과를 논의하였다.

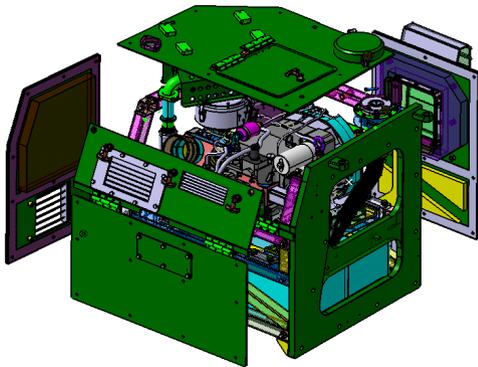


Fig. 1. The schema of auxiliary power unit

일반적으로 소음은 구조기인소음과 공기기인소음으로 분류할 수 있다[2]. 궤도장비 APU의 주 소음원은 APU 엔진에서 발생하는 소음으로써 구조물을 통해서 전달되는 소음과 엔진 주위의 공기를 가진 시켜 방사하는 소음으로 나눌 수 있다. 구조물을 통해 전달되는 소음을 저감하기 위한 방안으로는 엔진 마운트의 방진구를 개선하는 방법과 소음기를 개선하는 방법이 있다. 기존 연구에서 엔진 마운트를 고무재질의 방진마운트로 개선함으로써 진동이 저감되고 그에 따라 차량 내의 실내 소

음도 87 dB(A)에서 74 dB(A)로 13 dB(A)가 저감되는 것으로 보고되고 있다[1]. 공기기인소음을 저감하기 위한 방안으로는 흡·차음재 추가를 통한 소음 감소와 그릴 형상변경을 통한 소음의 전파방향 변경이 있다. 본 연구에서는 소음저감을 위한 방안으로 소음기 재설계 및 흡·차음재 추가, 그릴 형상변경 등을 연구하였으며, 연구 수행방안은 이론적으로 설계입증을 위해 실험실 단위에서 소음저감 효과를 최적화 한 후, 실제 궤도차량 APU에 적용하여 소음저감 효과를 확인하였다.

2. 구조기인소음 저감

2.1 소음기 투과손실량 이론

일반적으로 구조기인소음은 저주파수 대역의 소음을 강하게 나타낸다[2]. APU의 소음은 주로 저주파수 대역의 소음이 강하기 때문에 저주파수 대역 소음저감에 효과적인 확장형 소음기를 추가하는 방안을 고안하였다 [3-4].

확장형 소음기 혹은 단순확장관(Simple Expansion Chamber)에서 발생하는 음의 전파특성은 Fig. 2와 같이 모식 할 수 있으며, 소음기의 효과는 다음과 같이 투과손실량(Transmission Loss)으로 확인한다.

투과손실량은 음향요소의 에너지 손실을 표현하는 것으로 입사하는 음과 투과하는 음의 파워 레벨의 차로 다음과 같이 표현할 수 있다.

확장되기 이전의 작은 관의 파동은 다음의 식 (1)~(2)과 같이 입사하는 파동 p_i 와 경계의 변화에 의해 반사되는 파동 p_r 로 분리할 수 있다.

$$p_i(z, t) = P_i e^{-j(\omega t - kz)} \quad (1)$$

$$p_r(z, t) = P_r e^{-j(\omega t + kz)} \quad (2)$$

Fig. 2의 $0 \leq z \leq L$ 구간의 파동도 z 축의 양의 방향과 음의 방향으로 전파하는 파동으로 나누어서 식 (3)~(4)로 정의할 수 있다. 여기에서 p_{si} 는 $0 \leq z \leq L$ 구간에서 입사하는 파동이며, p_{sr} 은 반사되는 파동이다.

$$p_{si}(z, t) = P_{si} e^{-j(\omega t - kz)} \quad (3)$$

$$p_{sr}(z, t) = P_{sr} e^{-j(\omega t + kz)} \quad (4)$$

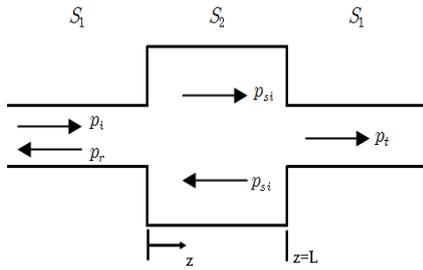


Fig. 2. Reflection and transmission of sound wave generation in extension ducts

또한, Fig. 2의 $L < z$ 구간에서는 소음기를 투과하여서 식 (5)와 같이 오직 한 방향으로만 전파하는 파동만이 존재하게 된다.

$$p_t(z,t) = P_t e^{-j(\omega t - kz)} \quad (5)$$

단, 식 (1)~(5)은 단면이 확장되는 면($z=0$)과 축소되는 면($z=L$)에서 연속조건, 즉 음압과 속도가 연속적이어야 한다는 조건을 만족해야 하므로 $z=0$ 에서 압력 연속조건을 표현하면 식 (6)과 같다.

$$P_i + P_r = P_{si} + P_{sr} \quad (6)$$

한 방향으로 전파하는 일차원 파동의 임피던스가 $\rho_0 c$ 인 점을 고려하면, $z=0$ 인 지점에서의 단위 시간당 들어오고 나가는 질량은 같아야 하므로 식 (7)의 속도 연속조건을 얻을 수 있다.

$$\rho_0 S_1 \left(\frac{P_i}{\rho_0 c} - \frac{P_r}{\rho_0 c} \right) = \rho_0 S_2 \left(\frac{P_{si}}{\rho_0 c} - \frac{P_{sr}}{\rho_0 c} \right) \quad (7)$$

또한, $z=L$ 의 경계조건에서의 연속조건도 $z=0$ 인 지점과 유사하게 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$P_{si} e^{jkL} + P_{sr} e^{-jkL} = P_t e^{jkL} \\ \rho_0 S_2 \left(\frac{P_{si}}{\rho_0 c} e^{jkL} - \frac{P_{sr}}{\rho_0 c} e^{-jkL} \right) = \rho_0 S_1 \frac{P_t}{\rho_0 c} e^{jkL} \quad (8)$$

위 식 (7)과 (8)의 결과로부터 입사파에 대한 투과파의 크기 비를 구하면 식 (9)와 같이 계산된다.

따라서 입사파의 세기가 소음기를 통과하여 손실되는 양을 나타내는 투과손실(TL)은 다음 식 (10)과 같다.

$$\tau = \frac{P_t}{P_i} = \frac{e^{-jkL}}{\cos kL - \frac{j}{2} \left(\frac{S_1}{S_2} + \frac{S_2}{S_1} \right) \sin kL} \quad (9)$$

$$TL = 10 \log \frac{1}{|\tau|^2} \\ = 10 \log \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{S_1}{S_2} - \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \sin^2 kL \right\} \quad (10)$$

즉, 소음기의 투과손실은 확장관의 크기와 길이에 따라 변화된다는 것을 알 수 있다. 투과손실 값을 높이기 위해서는 단면적의 비(S_2/S_1)를 증가하는 방안과 $\sin kL$ 의 값을 1이 되도록 설계하는 방안이 있다. 즉, kL 이 $(m + 1/2)\pi$ 가 되도록 k 를 조절하면 높은 투과손실 값을 얻을 수 있다. $\sin kL$ 이 1이 되도록 설계하기 위해서는 소음기의 길이와 주파수 등을 변경하여야 하지만 본 연구에서는 주파수(k)의 조절이 제한되기 때문에 단순확장관의 단면적의 비(S_2/S_1)와 길이(L)를 고려하여 케도장비용 APU 소음기 설계에 반영하였다 [5-7].

2.2 소음기 단위 부품 소음 측정 실험

각각의 소음기가 소음저감 효과가 있는지 확인하기 위해 다음과 같이 시험을 실시하였다. 시험방법은 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 무향실에서 각각의 소음기를 설치 한 후 입구와 출구 사이의 음압을 측정하여 투과손실을 계산하였다. 마이크로폰은 소음기 출구 부 50 cm 높이에 장착하여 소음을 측정하였다.



Fig. 3. Noise measurement of 'A' silencer



Fig. 4. Noise measurement of 'B' silencer

시험 결과 Fig. 5와 같이 두 소음기 모두 소음기가 적용되지 않은 상태에 비해 소음 개선효과가 사람이 인지할 수 있는 3 dB(A) 이상 나타났다.

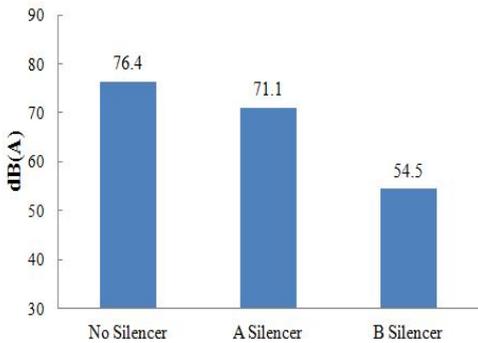


Fig. 5. Transmission loss according to silencer type

특히, 'B' 소음기는 소음기를 미설치한 장비에 비해 투과손실량이 21.9 dB(A) 저감되었고, 'A' 소음기 보다 16.6 dB(A) 저감된 것을 확인 할 수 있었다. 미국 국방규격(MIL-STD-1472G)에 따라 지속소음 수준 노출한계가 연속적인 소음의 경우 75 dB(A), 8시간 노출한계는 85 dB(A)로 규제하고 있는데, 'B' 소음기를 적용하면 이러한 인체공학적인 규제를 충족할 수 있음을 시험적으로 확인할 수 있었다[8]. 또한 Fig. 6은 주파수에 따른 투과손실량을 나타낸 그래프이며, 확인 결과 'B' 소음기가 'A' 소음기에 비해 전 주파수 대역에서 소음이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 본 연구의 주목적인 저주파수 대역의 소음인 63 Hz와 125 Hz 대역의 소음이 각각 16.8 dB(A), 10.7 dB(A) 감소하였다.

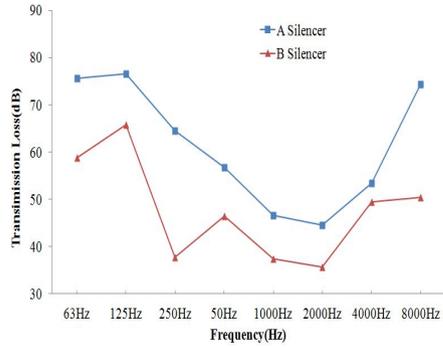


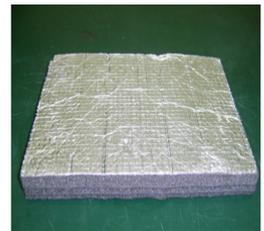
Fig. 6. Transmission loss according to silencer type per frequency

3. 공기기인소음 저감

공기 중으로 방사되는 소음을 저감하기 위한 방안으로 Fig. 7과 같이 폴리우레탄 폼의 흡음재('A' 흡음재)와 알루미늄/폴리우레탄폼/탄성중합체로 구성된 흡·차음재('B' 흡·차음재)를 분석하였다. 추가적으로 Fig. 8과 같이 평면 경사형('A' 그릴)의 후방문 그릴과 L자형 그릴('B' 그릴)도 분석하였다.



(a) 'A' Absorbing Material



(b) 'B' Absorbing and Insulation Material

Fig. 7. Difference between with 'A' and 'B' absorbing materials



(a) 'A' Grill



(b) 'B' Grill

Fig. 8. Difference between with 'A' and 'B' grill

Table 1과 같이 Case 1은 ‘A’ 소음기, ‘A’ 흡음재, ‘A’ 그릴이 적용되어 있으며, Case 2는 Case 1에서 ‘B’ 흡·차음재를 적용하였고, Case 3은 ‘B’ 그릴을 적용하였다. Table 2와 같이 저부하 시 공기기인소음 저감 방안에 따른 효과가 미미하였으며, 100% 부하일 때 ‘B’ 흡·차음재를 적용한 시험대상은 ‘A’ 흡음재만 적용하였을 때 보다 2.04 dB(A) 차이가 저감되었으나, ‘B’ 그릴을 적용하였을 때는 고부하일 때 전부하에서 소음이 증가하였다.

Table 1. Test methods of airborne source noise reduction

Case Number	Test Method		
	Silencer Type	Absorbing Material Type	Gill Type
Case 1	A	A	A
Case 2	A	B	A
Case 3	A	A	B

Table 2. Noise test results according to APU load

Case	RMS(dB) According to load(%)			
	0%	50%	80%	100%
1	80.04	84.15	86.66	89.64
2	80.58	83.78	85.74	87.60
3	79.94	84.17	86.86	89.74

흡·차음재 개선 및 그릴 개선으로는 인간이 인지할 수 있는 음압의 차이인 3 dB(A)를 만족하지 않기 때문에 효과가 미미한 것으로 판단하였다. 현재 적용중인 APU의 형상은 엔진 내부 방열을 위해 밀폐형 구조가 아닌 오픈형 구조로 되어 있다. 따라서 부분적인 흡·차음재 추가 및 그릴 형상 변경으로는 소음저감에 큰 효과가 없다는 것을 확인하였다.

4. 실차장착 입증 시험

2.2장의 소음기 단품시험에서 확인한 것과 같이 소음 저감의 실제 효과를 확인하기 위해 Fig. 9와 같이 실제 케도차량에 장착하여 소음을 측정하였다. 미국 국방규격 (MIL-DTL-53133C)에 따라 마이크로폰은 발전기를 기준으로 반경 7 m, 지상으로 1.2 m 위치에 설치하였으며,

시험조건은 APU의 부하율을 0%, 50%, 80%, 100%로 변경하면서 측정하였다[9].



Fig. 9. Methods of noise reduction applied vehicle

체계장착 시험별 조건은 Table 3과 같이 Case 1~3은 1개 직렬형태인 ‘A’ 소음기를 장착하였고, Case 4~6은 2차 직렬형태인 ‘B’ 소음기를 장착하였다. 공기기인소음의 저감효과를 확인하기 위해 Case 1은 흡음재만 적용한 ‘A’ 흡음재와 평면 경사형 그릴을 적용한 ‘A’ 그릴이며, Case 2는 ‘A’ 흡음재와 L자형 그릴을 적용한 ‘B’ 그릴이며, Case 3은 흡·차음재가 적용된 ‘B’ 흡음재와 ‘A’ 그릴로 시험을 수행하였다. Case 4는 ‘A’ 흡음재와 ‘B’ 그릴을 적용하였으며, Case 5는 ‘B’ 흡음재와 ‘B’ 그릴을 적용하였고, Case 6은 ‘A’ 흡음재와 ‘A’ 그릴을 적용하여 시험을 수행하였다.

Table 3. Test methods of noise reduction applied to vehicle

Case Number	Test Method		
	Silencer Type	Absorbing Material Type	Gill Type
Case 1	A	A	A
Case 2	A	A	B
Case 3	A	B	A
Case 4	B	A	B
Case 5	B	B	B
Case 6	B	A	A

Table 4와 같이 소음기 개선에 따른 효과가 부하율 0%일 때 약 2 dB(A) 차이가 나고 부하율이 100%일 때 소음이 약 9 dB(A) 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 공기기인소음 감소를 위한 흡·차음재 개선 및 그릴 창살형상 개선은 차이가 1 dB(A) 이하로 그 영향이 미미

하였다. 실차장착 입증 시험을 통해 케도장비 APU 소음 저감을 위해서는 구조기인소음을 저감하는 방안이 가장 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. Noise test results applied to vehicle

Case	RMS(dB) According to load(%)			
	0%	50%	80%	100%
1	71.81	74.28	77.95	83.12
2	71.63	73.82	77.95	82.96
3	71.56	73.67	77.07	82.89
4	69.46	71.62	73.24	73.74
5	69.37	71.46	73.37	74.39
6	69.09	71.27	73.07	73.82

5. 결론

본 연구는 APU의 소음을 저감하고자 소음의 생성 및 전파방법을 분석하여 구조기인소음 저감을 위한 소음기 개선과 공기기인소음 저감을 위한 흡·차음재 개선 및 그릴 창살 개선으로 분류하여 연구를 수행하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1. 소음기의 효과를 확인하기 위해 소음기가 1개인 1차 소음기(‘A’ 소음기)와 소음기가 2개 직렬구조인 2차 소음기(‘B’ 소음기)로 분석하였다. APU 단품상태에서 ‘A’ 소음기는 소음기가 설치되지 않았을 때보다 5.3 dB(A)의 소음저감 효과가 있었고, ‘B’ 소음기는 21.9 dB(A)의 효과가 있었다. 실차장착 시험에서도 ‘A’ 소음기를 장착한 결과보다 ‘B’ 소음기를 장착했을 때 부하율 100%인 조건에서 약 9 dB(A)의 소음저감 효과가 있었다.

2. 공기기인소음 감소를 위한 흡·차음재 및 그릴 개선은 실험실 단위의 단품시험에서는 2.04 dB(A)가 저감되었고, 실제 장착 소음시험에서는 소음저감 효과가 1 dB(A) 이하로 측정되었다. 이는 인간이 인지하지 못하는 수준의 소음저감 효과이므로 그 영향이 미미한 것을 확인하였다.

따라서 케도장비의 APU 소음저감을 위해서는 구조물을 통해 전달되는 소음을 저감하는 방안이 효과적이라는 것을 본 연구를 통해 확인하였다. 공기기인소음을 저감하기 위해서는 본 연구에 적용한 방안과 같이 APU 엔

진이 외부에 밀폐되지 않으면 흡음재 개선 등의 효과는 미미하기 때문에, APU 엔진이 밀폐되는 구조 등의 설계 변경을 통해 소음을 저감하는 방안을 추후에 연구할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 유사한 APU가 장착되는 타 군용 케도장비의 소음을 저감하기 위한 연구의 기초자료로 쓰일 것으로 기대된다.

References

- [1] B. H. Kim, J. H. Seo, Y. I. Park, Y. W. Kim, B. H. Kim, "A study on improvement of strength safety factor for K55A1 APU engine mounts", *Korean Institute of military science and technology*, Vol.19, No.3 pp. 281-287, 2015.
DOI : <https://doi.org/10.9766/KIMST.2016.19.3.281>
- [2] B. H. Kim, S. K. Lee, J. S. Yoon, K. C. Shin, S. J. Lee., "Identification of Airborne-noise Source and Analysis for Noise Source Contribution of a GDI Engine Using Sound Intensity Method", *Korean Society for noise and vibration engineering*, Vol.22, No.10 pp. 985-993, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2012.22.10.985>
- [3] Y. H. Kim, "Lecture notes on acoustics", No. 2008-36-0073, SAE technical paper, 2008.
- [4] Lawrence E. Kinsler, "Fundamentals of acoustics" 4th edition, ISBN 0-471-84789-5, John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [5] Y. H. Kim, W. H. Joo, J. G. Bae, "A study on the performance improvement of medium speed diesel engine exhaust silencer in the low-frequency range using array resonators", *Korean Society for noise and vibration engineering*, Vol.19, No.7 pp. 693-698, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.5050/KSNVN.2009.19.7.693>
- [6] Y. H. Kim, "Low frequency noise reduction inside duct by using membrane", *Korea Society for noise and vibration engineering*, Vol.14, No.11 pp. 1083-1090, 2004.
- [7] J. Kwon., W. B. Jeong, C. S. Hong, "Effects of fluid velocity on acoustic transmission loss of simple expansion chamber", *Korea Society for noise and vibration engineering*, Vol.22, No.10 pp. 994-1002, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2012.22.10.99>
- [8] MIL-STD-1472G, Human Engineering, p. 151, 2012.
- [9] MIL-DTL-53133C, Generator Sets, Skid Mounted, Tactical, Quiet, Diesel Engine Driven, Alternating Current 5 Through 60 Kilowatts, General Specification For, p. 27, 2002.

이 주 승(Ju-Seung Lee)

[정회원]



- 2012년 2월 : 부산대학교 재료공학부 (공학사)
- 2014년 2월 : 부산대학교 재료공학과 (공학석사)
- 2014년 7월 ~ 2015년 7월 : 현대중공업 용접연구실 연구원
- 2015년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

국방, 기계/재료, 진동/소음

김 병 호(Byeong-Ho Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 부산대학교 재료공학부 (공학사)
- 2009년 2월 : 부산대학교 재료공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 : 부산대학교 재료공학과 (공학박사)
- 2012년 7월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

국방, 기계/재료, 화력장비

김 병 현(Byung-Hyun Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

국방, 기계/재료, 진동/소음