

MIL-STD-810H를 적용한 전력차단기 조립 자동화 설비의 진동해석

이선우, 허장욱*

금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합공학전공)

Vibration Analysis of a Power Breaker Automation Facility Using MIL-STD-810H

Seon-Woo Lee, Jang-Wook Hur*

Department of Mechanical Engineering (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic
Convergence Engineering of Mechanical Engineering), Kumoh National Institute of Technology

요약 현재 국내 전력 차단기 제조업체의 대다수는 생산성과 효율성이 낮은 방식으로 생산하고 제작 중에 별도의 성능 검사를 미 실시하여 완제품 불량률이 발생하고 있다. 이를 보완하기 위해 개발 중인 조립 자동화 설비는 에어 실린더, 연결된 주변 공정 등 다양한 진동 환경에 노출되어 있으므로 제작 전 설계 안전성을 검토하여 파손 및 고장에 대한 위험성을 예방해야 한다. 따라서 본 연구에서는 설계단계의 전력 차단기 조립 자동화 설비를 대상으로 미 군사 규격인 MIL-STD-810H Method 514.8에 규정된 복합 바퀴 차량의 가속도 스펙트럼 밀도 데이터를 이용해 개발 장비의 구조적 안전성을 확인하였다. ANSYS 소프트웨어를 통해 구조해석을 진행하였으며, 해석 값을 통해 안전여유를 계산한 결과 1.28 이상의 값이 계산되어 구조적 안전성을 확보할 수 있었다.

Abstract Currently, the majority of domestic power breaker manufacturers produce products with low productivity and efficiency and do not conduct separate performance tests during manufacturing, resulting in defects in finished products. To compensate for this, the safety of designs should be reviewed before manufacturing to prevent the risk of breakage and failure. An assembly automation facility that is under development is exposed to various vibration environments such as air cylinders and connected surrounding processes. In this study, the structural safety of the development equipment was confirmed using the acceleration spectrum density data of a complex wheel vehicle specified in the US military standard MIL-STD-810H Method 514.8 for a power breaker assembly automation facility in the design stage. Structural analysis was conducted through ANSYS software. The margin of safety was calculated, and a value of 1.28 or higher was found to ensure structural safety.

Keywords : Automatic Assembly System, MIL-STD-810H, Modal Analysis, Power Breaker, Random Vibration Analysis

본 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성사업(Grand ICT연구센터)의 연구결과로 수행되었음.
(IITP-2023-2020-0-01612)

*Corresponding Author : Jang-Wook Hur(Kumoh National Institute of Technology)

email: hhjw88@kumoh.ac.kr

Received February 22, 2023

Accepted May 12, 2023

Revised April 10, 2023

Published May 31, 2023

1. 서론

1.1 배경

4차 산업혁명의 영향으로 제조업 분야에서는 자동화를 통한 생산성을 향상하는 방안을 채택하고 있으며, 생산 자동화 기술의 발전으로 복잡한 연계로 이루어진 공정의 라인 설비들을 볼 수 있다.

이러한 자동화된 설비들을 제조 현장에서 운영하기 위해서는 높은 전압이 필요한 전기 기계를 사용하며, 복잡한 시설을 갖추는 경우가 많아 지속적이고 세밀한 정비를 하기에 한계가 있어 누전으로 인한 화재의 위험이 있다[1,2]. 실제로 공장화재에 대한 뉴스나 신문 기사를 빈번히 볼 수 있으며, 이를 위한 대책으로 화재를 예방하는 설비가 강화되고 있다. 다음 Table 1은 최근 5개년 동안의 국내 전기화재로 사고 통계를 보여준다[3].

1.2 연구 목적

전력차단기는 누전되는 전류를 감지하여 그 전류를 차단하는 기기이며, 전기화재를 미연에 방지할 수 있는 장치이다. 현재 전력차단기 제조업체의 대다수는 제품 생산방식으로 수작업 및 해외 OEM 공급 방안을 적용하고

있어 생산량과 가동률이 미흡하여 생산성과 효율성이 저조하다. 또한 전력차단기 조립 후 마그넷 동작하중을 측정하지 않고 완제품이 조립되어 완제품 불량률이 많이 발생하고 있다. 따라서, 생산성 향상 및 성능검사를 실시하여 양품률을 증가시키는 전력차단기 조립 자동화 설비를 개발할 필요가 있다[4].

전력차단기 조립 자동화 설비는 Fig. 1과 같이 바이메탈 부품과 핀을 조립하는 공정부터 마그넷 동작하중을 검사하는 공정을 통해 완제품을 배출하는 공정까지 총 8가지의 공정을 거쳐 완성된다. 이러한 전력차단기 자동화 설비는 에어 실린더와 컨베이어 벨트, 옆 공정에서 발생하는 진동 등 다양한 요소로 인해 진동에 노출되어 있으며, 그 영향으로 인해 파손 및 고장의 위험이 있다. 그러므로 시제품 제작 전 운용환경에서의 진동 데이터가 없으므로 진동으로 인한 설비의 안전성을 확인하기 위한 환경진동에 대한 규격을 적용하여 안전성을 확인할 필요가 있다.

일반적으로 적용되는 환경진동에 대한 기준은 국제규격 중 대다수가 민수품에 ISO 국제규격을 적용하나 설계 단계에서 가혹한 조건을 통해 장비의 안전성을 더욱 보수적으로 확인하기 위해 미군에서 무기체계 개발 간 적용하는 환경시험 규격인 MIL-STD-810H를 기준으로 전력차단기 자동화 설비에서 진동에 취약할 것으로 보이는 마그넷 코킹 공정 설비를 대상으로 설계 안전성을 검토한다면 제작 후 진동으로 인한 파손 및 고장에 대한 위험성을 예방할 수 있다[5-7].

따라서 본 연구에서는 설계단계의 전력차단기 조립 자동화 설비의 마그넷 코킹 장치를 대상으로 MIL-STD-810H에서 제시하는 진동시험 데이터를 이용해 랜덤진동해석을 수행하여 진동에 대한 등가응력을 도출하였으며, 등가응력을 통한 안전여유를 계산하여 해당 공정 설비에 대한 구조적 안정성을 검토하였다[8].

Table 1. Electric fire statistics for the last 5 years

Type	Total number of fires	Number of electrical fires	Ratio (%)	Casualty (death)	Property damage (million won)
2018	42,338	10,471	24.7	87	119,960
2019	40,103	9,459	23.6	41	231,321
2020	38,659	9,329	24.1	39	133,600
2021	36,267	9,472	26.1	42	622,392
2022	40,114	10,002	24.9	48	159,297

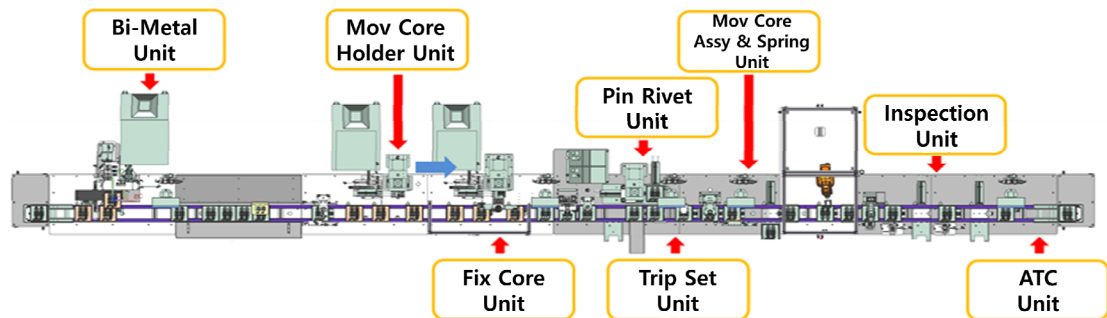


Fig. 1. Power breaker assembly automation facility work flow[4]

2. 해석 조건 및 방법

2.1 형상 및 재질

전력차단기 조립 자동화 설비의 마그넷 코킹 장치의 전체적 형상은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 마그넷 공급 부분, 정렬 및 코킹을 위해 에어 실린더와 그리퍼 등으로 구성된 부품 이송 부분, 마그넷 코킹 부분 그리고 이를 지탱해주는 테이블로 구성되어 있다. 여러 장치들이 볼트나 너트와 같은 작은 요소들로 결합되어 있으나, 유한 요소해석의 단순화를 위해 요소들을 제거하고 구멍이 난 부분을 채워 그에 따른 접촉 구속조건을 맞닿는 면들에 적용하였다.

해석에 사용된 재질들의 기계적 성질은 Table 2와 같으며, 프로파일은 AL6061을 사용하였고, 나머지 부품들은 목적에 따라 AL6061, S45C, SM45C, SS41, SKD11, STS304, SUS304를 재료의 입력값으로 사용하여 해석을 진행하였다.

2.2 격자생성 및 경계조건

원활한 해석을 위해 격자 요소가 적은 부품에 모서리

부분을 사이징을 하여 격자 요소를 늘렸으며, 프로파일과 같이 곡선이 있어 과도하게 많은 격자를 만드는 부품의 경우 격자 생성 조건을 Multizone 방식으로 설정하였다. 해당 방식을 통해 여러 개의 영역을 분할하고 내부까지 균일한 격자를 생성하도록 하였고, 그 결과 기존 삼각 격자에서 직사각형 형태의 격자로 변경하여 해석을 진행하였다[8]. 최종모델의 격자 형상은 Fig. 3과 같이 나타내었으며, 이때 절점 수는 400,269개이고, 요소 수는 128,721개이다. 경계조건으로는 마그넷 코킹장치의 실제 운용 환경을 고려하여 테이블 하단 바닥 면을 모두 Fixed 구속 조건을 적용하였다.

2.3 진동시험규격

전력차단기 자동화 설비의 마그넷 코킹 장치에 적용되는 진동시험 환경은 미 군사규격 MIL-STD-810H를 기준으로 하였다.

MIL-STD-810은 미 국방부 관련 정부 기관에 납품하기 위해 장비에 대한 테스트 방법과 환경 조건에 대해 명시한 지침서이며, 사용 수명 동안 각종 환경 요소가 특정 군수품 체계에 미치는 부정적 영향을 체계적으로 고찰하는 적합하

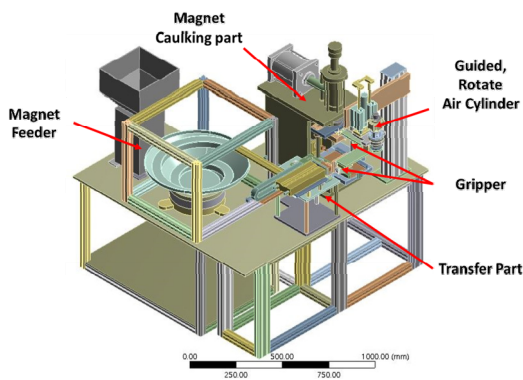


Fig. 2. Magnet caulking equipment structure

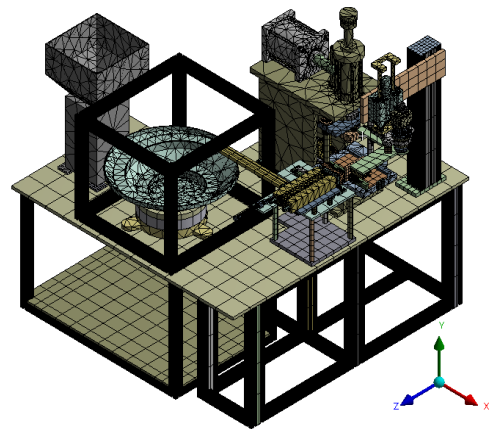


Fig. 3. Mesh of magnet caulking equipment

Table 2. Properties of material

Material	Density [g/cm ³]	Young's Modulus [GPa]	Poisson's Ratio	Yield Strength [MPa]
A6061	2.70	68.9	0.33	276
S45C	7.85	205	0.29	569
SM45C	7.85	205	0.29	569
SS41	7.85	200	0.29	415
SKD11	7.72	210	0.3	330
STS304	8.00	193	0.29	215
SUS304	8.00	193	0.29	215

과정을 기술하고 있다[9]. 또한 최근 군수품뿐만 아니라 스마트폰 위치, 핸드폰, 노트북과 같은 민수품에도 해당 규격을 적용하여 장비에 대한 내구성을 입증하고 있다.

환경시험 중 Method 514.8은 군용 트럭, 트레일러, 기차, 항공 등 다양한 대상의 운송 시뮬레이션을 통해 진동 데이터를 추출하였으며, 진동 주파수에 따른 ASD (Acceleration Spectral Density) 데이터를 표기한다. 그중 진동해석에 일반적으로 사용되는 차량의 ASD 데이터를 활용하였으며, 활용한 차량은 복합 바퀴 차량(CWV : Composite Wheel Vehicle)으로 데이터를 추출한 운송시나리오는 다음과 같다. 총 804.6 km(500 mile)를 이동하였으며, 총 이동 거리 중 35%는 포장도로로 이동하고, 나머지 65%는 비포장도로를 이동하였다. 트럭이나 트레일러와 같은 복합 바퀴 차량에 의해 발생하는 ASD 데이터는 Fig. 4와 같으며, 해당 데이터를 전력차단기 조립 자동화 설비의 마그넷 코킹 장치에 가해지는 진동 입력 데이터로 입력하여 해석을 진행하였다[5,10].

2.4 해석 방법

진동해석을 위해 3D 모델링 한 마그넷 코킹 장치의 구성품들을 구조해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 격자구조를 생성하였으며, 모달해석을 수행하여 모드별 주파수와 변화된 형상과 그에 따른 변위를 계산하였다. 모달해석을 통해 획득한 결과값들을 바탕으로 미 군사규격에서 나타내는 복합 바퀴 차량의 ASD 데이터를 랜덤 진동해석의 입력값으로 설정하여 해석을 시행하였다[11].

ASD 데이터는 이동 수단을 이용한 운송환경에서 방향에 따른 각 축의 데이터가 있으며, 해당 데이터를 입력값으로 대입할 때 설비의 형상을 고려해야 한다. 축 별

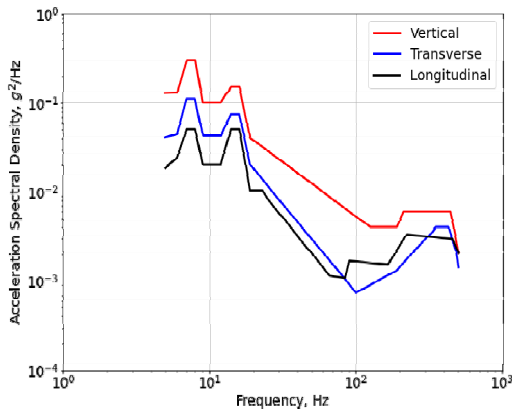


Fig. 4. CWV vibration exposure[5]

데이터는 이동 방향의 Longitudinal, 이동 방향의 횡 방향인 Transverse와 이동 방향의 수직 방향인 Vertical, 총 3개의 축 별 데이터가 있으며, 차량에 탑재되어 이동하는 방향을 z축으로 선정 하였고, 이동방향의 횡방향을 x축, 수직 방향을 y축으로 설정하여 랜덤진동해석을 수행하였다[12].

규격에 따른 진동시험으로부터 전력차단기 조립 자동화 설비 중 마그넷 코킹 장치의 구조적 안정성을 확인하기 위해 랜덤 진동해석으로부터 등가응력을 구하여 최대 등가응력이 발생한 지점의 항복강도와 비교하여 안전여유를 통해 안전성을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모달해석

해석은 미 군사규격에 따라 500Hz까지 수행하였으며, Fig. 5와 같이 총 31개의 모드를 추출하였다. 1차부터 3차까지 모드 주파수(27.618Hz, 41.316Hz, 70.843Hz)에 대한 변위 형상을 Fig. 6에 나타내었으며, 여기서 변위는 절대값이 아닌 각각의 위치에서 상대적인 크기를 표시하고 있다. 3가지 모드에서 모두 회전 에어 실린더에 장착되어있는 마그넷을 옮기는 이송용 그리퍼를 지탱해주는 판에서 최대변위가 발생하였다. 최대변위는 1차 모드에서 10.989 mm이며, 2차 모드에서 10.625 mm이고, 3차 모드에서는 21.675 mm가 발생하여 주파수에 따라 모드 형상이 변하면서 최대변위가 달라짐을 알 수 있다. 따라서, 판 두께를 증가시키거나 혹은 받침대를 추가하는 등의 설계 최적화를 통해 필요시 구조적 안전성을 더욱 향상시킬 수 있다.

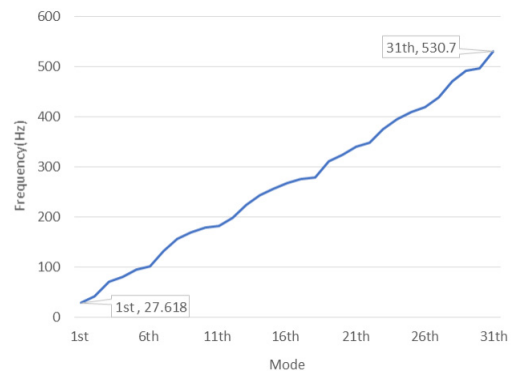
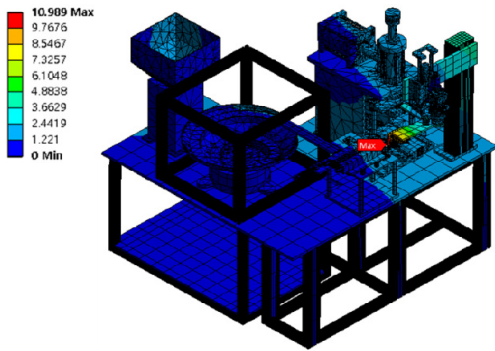
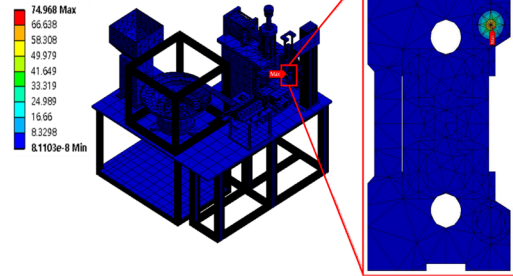


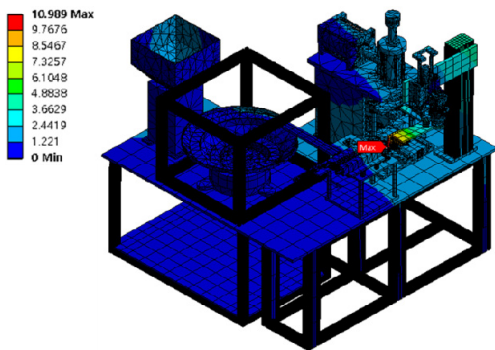
Fig. 5. Frequency by mode



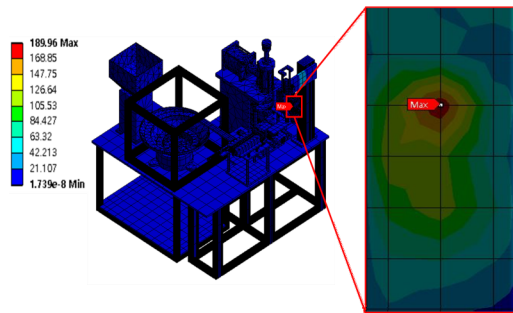
(a) 1st mode deformation shape(27.618Hz)



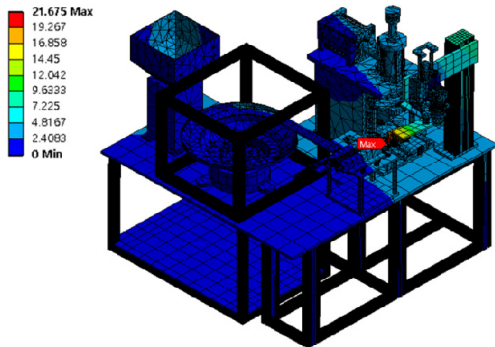
(a) Equivalent stress of longitudinal axis



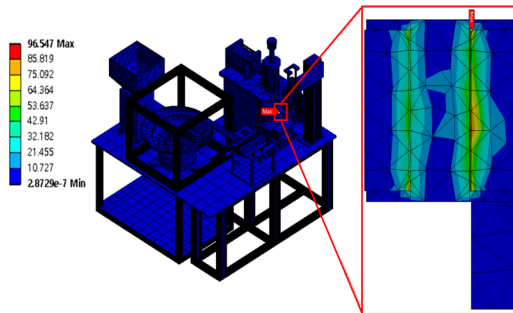
(b) 2nd mode deformation shape(41.316Hz)



(b) Equivalent stress of transverse axis



(c) 3rd mode deformation shape(70.843Hz)



(c) Equivalent stress of vertical axis

Fig. 6. Mode shape of power breaker automation facility

Table 3. Max. equivalent stress(random vibration)

Direction	Longitudinal	Transverse	Vertical
Value	74.968 MPa	189.96 MPa	96.547 MPa
Location	Guided air cylinder	Rotating air cylinder	Gripper

Fig. 7. Random vibration analysis

Table 4. Margin of safety

Direction	Longitudinal	Transverse	Vertical
Value	1.95	1.40	1.28

3.2 랜덤진동해석

모달해석을 통해 산출된 결과값과 이동 방향에 따른 축별 ASD데이터를 입력값으로 활용하여 전력 차단기 조립 자동화 설비의 마그넷 코킹 장치의 랜덤 진동해석을 실시하였다. 진동해석을 통해 도출된 최대 등가응력과 그 위치를 Fig. 7과 Table 3에 나타내었으며, 결과값은 유의성을 높이기 위해 Scale Factor Value를 2σ 수준으로 설정하여 응력 값을 도출하였다. 최대 등가응력은 종 방향에서 상하 에어 실린더 부분에 74.968 MPa이 발생하였고, 횡 방향에서는 회전 에어 실린더 부분에 189.96 MPa이 확인되었으며, 수직방향은 마그넷 이송용 그리퍼 부분에 96.528 MPa이 계산되었다. 자동화 설비의 안전성은 최대 등가응력이 발생한 구성요소에서 추가적인 응력에 얼마나 더 견딜 수 있는지를 Eq. (1)에 랜덤진동해석 결과를 적용하여 계산하였다. 계산한 안전여유는 Table 4에 나타내었으며, 안전계수는 연성재료에 일반적으로 사용되는 1.25를 대입하였다[13].

$$M.S = \frac{Yield.Strength}{Factor.of.Safety \times Applied.Stress} - 1 \quad (1)$$

계산 결과 중 가장 작은 안전여유는 1.28이며, 이는 최소 요구치인 0을 초과하여 전력차단기 자동화 설비의 마그넷 코킹 장치는 구조적 안전성을 확보한 것으로 판단할 수 있다. 그러나, 추가적인 보강을 한다면 가장 작은 안전여유를 보인 수직 방향은 이동 방향과 그 횡 방향에 비해 낮은 안전여유를 보이고 있어서 수직 방향에 대한 안전성 대책을 강구하여 전체적인 안전성을 높일 필요가 있다.

4. 결론

전력차단기 자동화 설비의 마그넷 코킹 장치를 대상으로 미 군사규격인 MIL-STD-810H를 적용하여 구조적 안전성을 검토하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 회전 에어 실린더에 장착 되어 마그넷을 옮기는 이송용 그리퍼를 지탱해주는 판은 모달해석을 결과로 얻은 모드 형상을 통해 공통적으로 높은 변위를 보이는 곳이며, 판 두께를 증가시키거나 받침대를 추가하는 등의 설계 최적화를 통해 구조적 안전성을

증가시킬 수 있다.

- 2) 랜덤진동해석을 수행하였을 때, 마그넷 코킹 장치에서 진동으로 취약한 위치는 이동 방향에서 상하 에어 실린더, 횡 방향에서 회전 에어 실린더, 수직 방향에서 이송용 그리퍼이며, 각각의 방향에서 안전여유는 1.95, 1.40 및 1.28이다.
- 3) 안전여유는 최대 등가응력값과 그 위치에서의 재료의 항복값의 비율을 통해 산출한 값으로 최대 등가응력이 임계값을 초과하지 않고 있으므로 구조적 안전성을 확보하고 있다.
- 4) 산업현장에서의 실제 진동과 차량에서의 진동이 다소 상이할 수 있으므로 시제품 제작 완료 후 시험결과와 해석결과를 비교분석하는 추가연구가 필요하다고 판단된다.

References

- [1] E. S. Park, S. H. Min, "Study on the Correlation Analysis between Leakage-Current Generation and Temperature using Half Circuit", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.19, No.7, pp.241-245, Dec. 2019. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.7.241>
- [2] S. E. Yang, S. O. Lee, H. K. Jung, "IoT Platform System for Electric Fire Prediction and Prevention", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp 223~229, Feb. 2022. DOI: <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.2.223>
- [3] National Fire Agency, "National Fire Data System," <http://nfdi.go.kr/stat/general.do> (Accessed 12 Feb. 2023)
- [4] J. S. Do, C. G. Cho, J. W. Hur, "Load Cell Fault Diagnosis Method of Power Circuit Breaker Automation Assembly Equipment", *Proceedings of the KSMPE Conference*, KSMPE, Yeosu, Korea, pp. 293-293, April 2022.
- [5] G. H. Shin, J. W. Hur, "A Study on the Random Vibration Analysis of Large Scale Antenna", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 20, No. 6, pp. 44-50, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.06.044>
- [6] Y. C. Huh, B. C. Jung, T. Y. Chung, S. J. Moon, "Analytical investigation on the vibration criteria for local structures of aluminum vessels", *Proceedings of the KSNVE Conference*, KSNVE, Gangchon, Korea, pp. 652-653, April 2014.
- [7] H. S. Kang, J. M. Kang, A. K. Jung, J. O. Lee, "Random Vibration Analysis of Handrail for Construction Equipment", *Proceedings of the KSNVE Conference*, KSNVE, Gangchon, Korea, pp. 652-653, April 2014.

- [8] J. S. Do, J. W. Hur, "Random Vibration Analysis of Portable Power Supply Container for Radar With U.S. Military Standards", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 21, No. 9, pp. 71-77, Sep. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.09.071>
- [9] MIL-STD-810H, "Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests", Department of Defense, US, 514.8C, 2019.
- [10] J. Jang, J. W. Park, S. Y. Lim, C. S. Lee, and J. H. Lee, "The Study on Changes of Vibration Test in MIL-STD-810H", *The Korean Reliability Society*, pp. 45-45, May 2019.
- [11] H. Mo and H. Qiu, "Simulation and Random Vibration Structural Dynamic of Test Characteristics of Vacuum Tube", *ICMMBE*, pp. 131-136, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.2991/icmbe-16.2016.26>
- [12] J. I. Go, S. H. Park, J. W. Hur, "Vibration Analysis of Film Winding Core Automatic Supply System Using US Military Standards", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 21 No. 4, pp. 91-99, April 2022.
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.04.091>
- [13] D. J. Shin, J. H. Lee and Y. S. Kang, "Development Process of Mechanical Structure for a Large Radar," *Jornal of the Korea Insitute of Military Science and Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-11, Feb. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.9766/KIMST.2017.20.1.001>

허 장 욱(Jang-Wook Hur)

[정회원]



- 1992년 10월 ~ 1995년 9월 : 일본 동경공대 기계물리공학과 (박사)
- 2009년 1월 ~ 2011년 12월 : 방사청 KHP사업단 체계종합/사업 총괄담당 (중령)
- 2012년 3월 ~ 2012년 8월 : 탄약사 기술관리처장 (대령)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 금오공과대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>

시스템엔지니어링, 신뢰성공학, RAM, CBM+

이 선 우(Seon-Woo Lee)

[준회원]



- 2022년 8월 : 금오공과대학교 기계시스템공학과 (학사)
- 2022년 9월 ~ 현재 : 금오공과대학교 기계공학과 항공기계전자융합공학전공 (석사과정)

<관심분야>

시스템엔지니어링, 신뢰성공학, RAM, CBM+