

랜덤진동에서 군용 항공기 외부연료탱크 및 파일런 구조 강건성 평가

김현기*, 김성찬
한국항공우주연구원

Evaluation of Structural Robustness of External Fuel Tank and Pylon for Military Aircraft under Random Vibration

Hyun-Gi Kim*, Sungchan Kim
Korea Aerospace Research Institute

요약 항공기는 기동 중 다양한 진동의 영향을 받게 된다. 이러한 진동들은 상황에 따라서는 항공기 생존에 치명적인 영향을 미칠 수 있으므로 항공기에 적용되는 구성품들은 랜덤 진동해석을 통해 다양한 진동 조건에 대한 안전성이 입증되어야 한다. 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 MSC.Random을 사용하여 랜덤진동 조건에서 군용항공기 외부연료탱크와 파일런에 대한 구조 강건성을 평가하였다. 랜덤 진동해석은 경계조건 지점에 단위하중을 부과하여 주파수 응답해석을 수행한 후 파워 스펙트럼 밀도 프로파일로 가진하게 되는데, 이 과정에서 필요한 모드 데이터는 모달해석 방법을 통해 추출하였다. 그리고, 랜덤진동 조건으로 미국 국방환경규격에서 규정하고 있는 랜덤 진동 프로파일을 적용하였고, G 단위로 주어진 파워 스펙트럼 밀도 프로파일을 중력가속도 단위로 변환하여 사용하였다. 수치해석 결과로, x축, y축 및 z축 방향에서의 랜덤 가진에 대해 수치해석 모델을 구성하는 빔 요소, 셸 요소 그리고 솔리드 요소의 안전여유를 파악하여 본 논문에서 다루고 있는 군용 항공기에 장착되는 외부연료탱크와 파일런의 구조 강건성을 평가하였다.

Abstract Aircraft are affected by various vibrations during maneuvering. These vibrations may have a fatal effect on the survival of aircraft in some cases, so the safety of components applied to the aircraft should be proven against various vibrations through random vibration analysis. In this study, the structural robustness of an external fuel tank and pylon for military aircraft was evaluated under random vibration conditions using commercial software, MSC Random. In the random vibration analysis, a frequency response analysis was performed by imposing a unit load on the boundary condition point, and then excitation was performed with a PSD profile. In this process, the required mode data was extracted through a modal analysis method. In addition, the random vibration profile specified in the US Defense Environment Standard was applied as random vibration conditions, and the PSD profile given in units of G's was converted into units of gravitational acceleration. As a result of the numerical analysis, we evaluated the structural robustness of the external fuel tank and pylon by identifying the safety margins of beam elements, shell elements, and solid elements in a numerical model for random vibration in the x, y, and z directions.

Keywords : External Fuel Tank, MIL-T-18847, Power Spectral Density, Pylon, Random Vibration

*Corresponding Author : Hyun-Gi Kim(Korea Aerospace Research Institute)

email: shotgun1@kari.re.kr

Received November 30, 2020

Accepted March 5, 2021

Revised February 17, 2021

Published March 31, 2021

1. 서론

항공기는 기동 중에 다양한 진동의 영향을 받게 된다. 이러한 진동은 상황에 따라서 항공기 생존성에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 따라서, 항공기에 장착하여 사용하기 위해 개발된 구성품들은 랜덤 진동 요구사항에 대한 구조적 안전성이 입증되어야만 항공기에 탑재될 수 있다. 이런 이유로, 과거부터 항공 또는 위성 등 다양한 분야에서 랜덤 진동에 의한 구조 강건성을 평가하고자 하는 연구가 많이 진행되어 왔다[1-10].

본 논문에서는 MSC Patran/Nstran의 MSC.Random을 이용하여 군용 항공기에 장착되는 외부연료탱크(external fuel tank)와 파일런(pylon)에 대한 랜덤 진동(random vibration) 해석을 수행하였다. MSC.Random은 랜덤환경에 노출된 구조물에 대한 랜덤해석을 수행하고, MSC Patran과 연계하여 등가응력(Von-Mises stress)과 변형률을 제공할 수 있다. 랜덤진동 해석 과정에서 필요한 모드 정보는 모달해석(modal analysis)을 사용하여 추출하였고, 감쇠비는 3%를 적용하였다. 그리고, 해석 조건으로 미국국방환경규격(MIL-T-18847)에서 규정하는 파워 스펙트럼 밀도(PSD: Power Spectral Density, 이하 PSD) 프로파일을 적용하였는데[11], 외부연료탱크는 파일런에 탑재되는 구성품의 진동시험 레벨 프로파일을 적용하고, 파일런은 파일런 자체의 진동레벨 프로파일을 적용하였다. 그리고, x 축, y 축 및 z 축 방향의 각 랜덤 가진에 대해 수치해석 모델을 구성하는 빔 요소, 쉘 요소 그리고 솔리드 요소에서의 안전여부를 파악하여 미국국방환경규격에서 규정하는 랜덤진동 조건에 대해 본 연구에서 다루고 있는 군용항공기 외부연료탱크와 파일런에 대한 구조 강건성 여부를 평가하였다.

2. 수치해석 모델

Fig. 1과 2는 항공기용 외부연료탱크와 파일런의 외부형상이다. 외부연료탱크의 수치해석 모델(Fig. 1)은 26,166개 요소(element)와 47,892개 절점(node)으로 구성되었다. 외부연료탱크 경계조건은 전방러그(FWD Lug)와 후방러그(AFT Lug)는 x 방향, y 방향 및 z 방향 자유도를 구속하고, 후방 피벗(pivot)은 y 방향 및 z 방향의 자유도를 구속하였다.

파일런 수치해석 모델(Fig. 2)은 79,255개 요소와 27,202개 절점으로 구성되어 있고, 0D 요소(point

element)를 사용하여 외부연료탱크 중량을 모사하였다. Fig. 3과 같이 수치해석을 위한 경계조건은 전방 바깥쪽 고정부는 y 방향 및 z 방향 자유도, 전방 안쪽 고정부는 z 방향 자유도, 후방 고정부는 x 방향, y 방향 및 z 방향의 자유도를 구속하였다. 참고로, 본 논문에서는 보안상 대상 구성품의 외부형상만을 사용하였다.

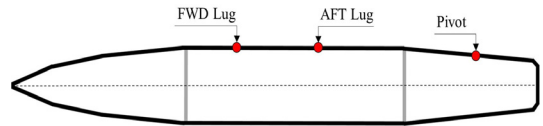


Fig. 1. Configuration of External Fuel Tank and Mounting Locations

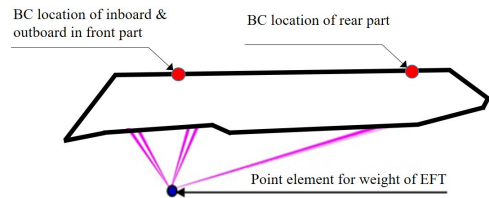


Fig. 2. Configuration of Pylon and Mounting Locations

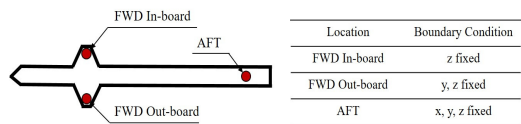


Fig. 3. Boundary Condition of Pylon

참고로, Fig. 1과 3에서 FWD는 전방(forward), AFT는 후방(after)을 의미하고, Fig. 2에서 BC는 경계조건(boundary condition)을 의미한다.

3. 랜덤 진동해석

3.1 랜덤 진동해석 절차

랜덤 진동해석을 수행하는 개략적인 절차는 Fig. 4와 같다. 먼저, 장착위치에 경계조건을 부과한다. 그리고, 랜덤 진동해석을 수행하는 각 방향에 대해 단위하중을 부과하여 주파수 응답해석을 수행한다. 마지막으로, MIL-T-18847에서 규정하는 PSD 선도로 가진하여 랜덤 진동해석을 수행한다.

Fig. 5는 MSC.Random에서 랜덤 진동해석을 위해

요구되는 정보를 호출하여 업로딩하는 인터페이스로써, 주파수 응답해석 결과를 선택하고 가진하고자 하는 PSD 선도를 선택한다. 그리고, 얻고자하는 결과를 선택하고, RMS scale을 입력하면 랜덤해석을 위한 기본 설정이 완료된다. 참고로, RMS는 평균값과 유사한 성격의 값으로써 RMS scale 값이 3인 경우는 시간에 걸쳐 발생할 수 있는 최대값을 나타내기 위해 사용된다.

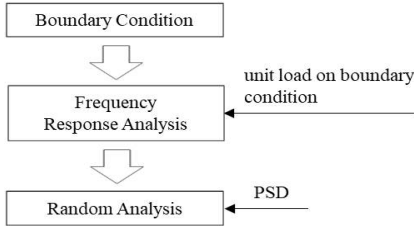


Fig. 4. Procedure of Random Vibration Analysis

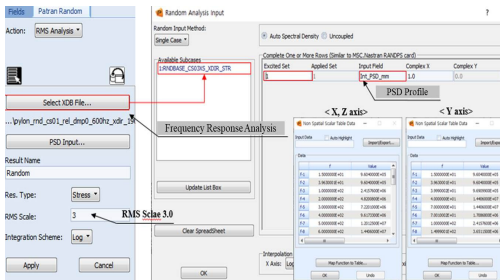


Fig. 5. Interface in MSC.Random[12]

3.2 랜덤진동 프로파일

3.2.1 외부연료탱크(External Fuel Tank)

외부연료탱크 랜덤 진동해석 조건은 Fig. 6과 같이 MIL-T-18847에 정의된 주익 파일런에 탑재되는 구성품의 진동시험 레벨 프로파일을 적용하였다. Fig. 6의 랜덤 진동 프로파일을 완성하기 위해서는 프로파일 내의 VAR 값을 계산해야 한다. VAR 값은 프로파일에서 정의하는 기울기 3dB/OCT를 이용하여 계산할 수 있다. 여기서, dB 단위는 헤르츠(Hz)이며 dB와 PSD는 Eq. (1)의 관계를 갖는다. OCT는 옥타브(Octave)로써 두 주파수의 비가 2 혹은 1/2 이 되는 주파수 간격을 의미하며, 주파수 f_2 와 f_1 사이의 옥타브는 Eq. (2)로 부터 계산된다.

Eq. (1)로 부터 $PSD=0.01$ 에서 $dB=-20.0$, $PSD=0.12$ 에서 $dB=-9.2$ 이므로 $\Delta dB=10.8$ Hz이다. 따라서, 기울기 3dB/OCT, $\Delta dB=10.8$ Hz 그리고 Eq. (2)의 Octave

계산식에 의해 Eq. (3)의 관계를 갖게 된다. Eq. (3)에 $f_2=600$ Hz를 대입하면, VAR은 49.5Hz로 구해진다.

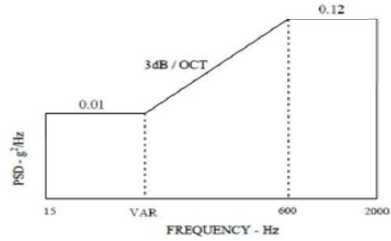


Fig. 6. Profile of Random Vibration for External Fuel Tank[11]

$$dB = 10 \times \log_{10} PSD \quad (1)$$

$$Octave = \log_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \quad (2)$$

$$3 \left[\frac{dB}{Octave} \right] = \frac{10.8}{\log_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)} \left[\frac{dB}{Octave} \right] \quad (3)$$

$$\log_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) = 3.6 \quad \therefore f_1 = \frac{f_2}{2^{3.6}}$$

Fig. 6의 랜덤 진동 프로파일에 대해 VAR 49.5Hz를 포함하여 15Hz~2000Hz 주파수 범위에서 각 주파수별 Octave, dB, PSD 값을 계산한 결과가 Table 1에 주어져 있다. 또한, Fig. 6의 PSD 선도는 G단위로 주어졌는데, 수치해석은 단위하중으로 진행한 응력해석 결과를 이용하기 때문에 중력가속도(mm/sec²) 단위로 환산하였다. Fig. 7은 PSD 선도를 중력가속도 단위로 환산하여 나타낸 그래프이다.

Table 1. Parameters Results of PSD profile for External Fuel Tank

Hz	Octave	ΔdB (Hz)	dB (Hz)	PSD [G ² /Hz]	PSD [(mm/sec ²) ² /Hz]
15			-20.0	0.01	960,400
49.5	1.72	5.17	-20.0	0.01	960,400
100	1.02	3.05	-16.95	0.02	1,920,800
200	1.00	3.00	-13.95	0.04	3,841,600
300	0.58	1.75	-12.20	0.06	5,762,400
400	0.42	1.25	-10.95	0.08	7,683,200
500	0.32	0.97	-9.99	0.10	9,604,000
600	0.26	0.79	-9.21	0.12	11,524,800
2000			-9.21	0.12	11,524,800

수치해석 방법으로 모달해석 방법을 적용하였고, 유효 질량분율(effective mass fraction)에 대해 거동의 80% 이상을 모사할 수 있는 범위로 고유주파수 600Hz까지 반영하였다. 통상 감쇠비(damping)는 3~5%를 적용하는데 본 해석에서는 보수적인 구조 강건성 평가를 위해 감쇠비 3%를 사용하였다. 그리고, 단위하중에 의한 주파수응답해석 결과에 Fig. 7의 PSD 선도를 x 축, y 축 및 z 축에 대해 각각 가진하여 랜덤 진동해석을 수행하였다.

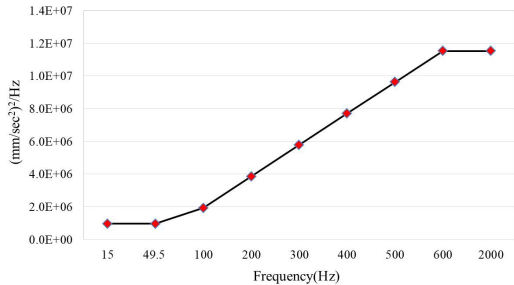


Fig. 7. PSD Profile based on Gravity Acceleration Unit for External Fuel Tank

3.2.2 파일런(Pylon)

파일런에 적용된 MIL-T-18847의 랜덤 진동 프로파일은 Fig. 8과 같다. 외부연료탱크 랜덤 진동 프로파일과 유사하게 Fig. 8의 PSD 선도를 완성하기 위해 VAR값이 필요하다. Fig. 8의 그래프 중 Endurance 기준으로 GR 값을 0.15로 적용하고 기울기 3dB/OCT를 적용하면 VAR 값은 39.6Hz로 계산된다. VAR 값을 구하는 구체적인 계산과정은 Eq. (4)에 주어져 있다. 여기서, PSD=0.01에서 dB=-20.0, PSD=0.15에서 dB=-8.2로 계산되므로, $\Delta dB=11.8\text{Hz}$ 이다. 따라서, 기울기 3dB/OCT, $\Delta dB=11.8\text{Hz}$ 그리고 Eq. (2)의 Octave와 주파수 관계로부터 Eq. (4)의 관계를 갖게 된다. Fig. 8의 랜덤 진동 프로파일에 대해 각 주파수별 Octave, dB, PSD 계산 결과는 Table 2와 같다. 또한, Fig. 8의 G단위로 주어진 랜덤 프로파일을 증력가속도 단위로 변환하여 Fig. 9로 나타내었다. 외부연료탱크와 동일하게 수치해석 방법으로 모달해석 방법을 적용하였고, 감쇠비 3%를 사용하였다. 그리고, Fig. 9의 랜덤 진동 프로파일을 x 축, y 축 및 z 축으로 각각 가진하여 랜덤 진동해석을 수행하였다.

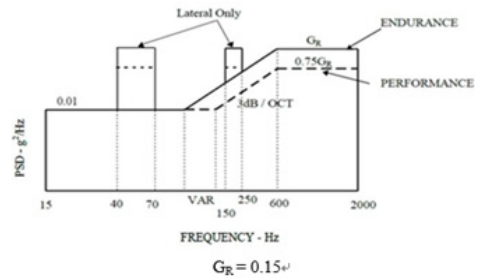


Fig. 8. Random Vibration Profile for Pylon [11]

$$3 \left[\frac{dB}{Octave} \right] = \frac{11.8}{\log_2 \left(\frac{f_2}{VAR} \right)} \left[\frac{dB}{Octave} \right] \quad (4)$$

$$\log_2 \left(\frac{f_2}{VAR} \right) = 3.92$$

$$\therefore VAR = 39.6\text{Hz}$$

Table 2. Parameters Results of PSD profile for Pylon

Hz	Octave	ΔdB (Hz)	dB (Hz)	PSD [G^2/Hz]	PSD [(mm/sec ²) ² /Hz]
15			-20.0	0.01	960,400
39.6			-20.0	0.01	960,400
100	1.34	4.01	-15.99	0.025	2,415,765
200	1.00	3.00	-12.99	0.050	4,820,085
300	0.58	1.75	-11.24	0.075	7,220,103
400	0.42	1.25	-9.99	0.100	9,617,333
500	0.32	0.97	-9.03	0.125	12,012,491
600			-8.24	0.15	14,406,000
2000			-8.24	0.15	14,406,000

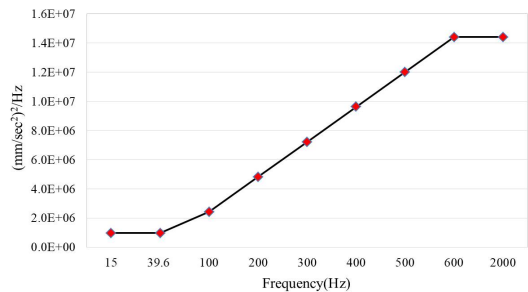


Fig. 9. PSD Profile based on Gravity Acceleration Unit for Pylon

4. 수치해석 결과

3장에서 설명한 랜덤 진동해석 절차와 PSD 선도를 적

용하여 외부연료탱크와 파일런에 대한 랜덤 진동해석을 수행하였다. 참고로, 보안상 해당 부품의 구체적인 형상 제시와 정량 수치사용의 제한으로 본 논문에서는 외곽형상만을 사용하여 안전여유가 가장 낮은 영역을 표시하였다.

4.1 외부연료탱크(External Fuel Tank)

Fig. 10~12는 외부연료탱크에서 x 축, y 축 및 z 축 방향 랜덤 가진에 의해 셸 요소와 솔리드 요소에서 발생하는 최소 안전여유(MS: Margin of Safety, 이하 MS)를 보여주고 있다. 참고로, 안전여유가 0을 초과하면 항복강도를 초과하지 않음을 의미한다.

외부연료탱크에 대한 랜덤 진동해석 결과, 솔리드 요소에 대해서는 x 축 랜덤 가진에 의해 외부연료탱크 중앙부에서 가장 낮은 안전여유를 갖는 것으로 파악되었고, 그 때의 안전여유는 6.07로 계산되었다. 셸 요소에 대해서도 x 축 랜덤 가진이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다. Fig. 10에 나타난 영역의 셸 요소에서 발생하고 있으며, 최소 안전여유는 2.18로 계산되었다. Table 3은 외부연료탱크의 각 축에 가해진 랜덤 가진에 의한 안전여유 계산 결과를 정리한 것인데, 셸 요소와 솔리드 요소에서 모두 안전여유가 0을 초과하는 것으로 파악되었다. 참고로, Fig. 10~12에서 안전여유가 5 이상인 경우는 high로 표시하였다.

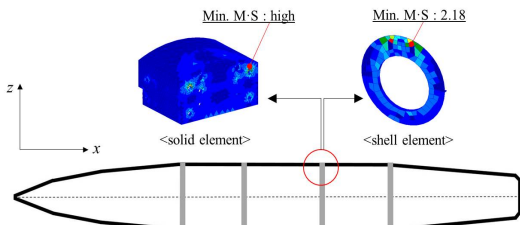


Fig. 10. Minimum Margin of Safety by x-axis Random Analysis for External Fuel Tank

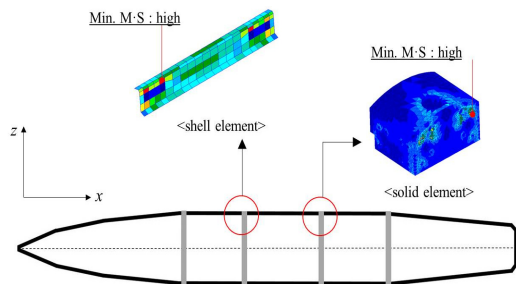


Fig. 11. Minimum Margin of Safety by y-axis Random Analysis for External Fuel Tank

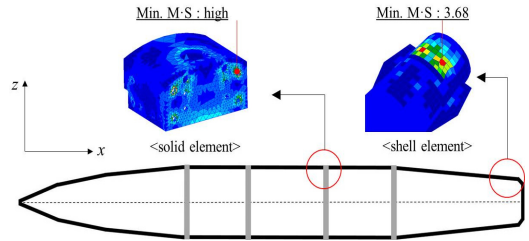


Fig. 12. Minimum Margin of Safety by z-axis Random Analysis for External Fuel Tank

Table 3. Result of Random Vibration in External Fuel Tank

Type	Axis	Margin of Safety (MS)	Note
Shell	x	2.18	Criterion : MS > 0
	y	8.06	
	z	3.68	
Solid	x	6.07	
	y	15.11	
	z	10.05	

4.2 파일런(Pylon)

Fig. 13~15는 파일런에 대한 x 축, y 축 및 z 축 방향 랜덤 가진으로 발생하는 최소 안전여유를 보여주고 있다. 파일런은 빔 요소, 셸 요소 그리고 솔리드 요소로 구성되어 있는데, 빔 요소는 y 축 랜덤 가진, 셸 요소는 z 축 랜덤 가진, 솔리드 요소는 y 축 랜덤 가진에 의해 가장 큰 영향을 받는 것으로 파악되었다. 최소 안전여유는 z 축 랜덤 가진에 의해 셸 요소에서 0.3으로 계산되었고, 해당 부위는 Fig. 15에 나타난 후방 하부영역으로 파악되었다.

Table 4는 파일런의 랜덤 진동해석에 의한 안전여유 계산 결과를 정리한 것인데, 빔 요소, 셸 요소 그리고 솔리드 요소에서 모두 안전여유가 0을 초과하는 것으로 파악되었다.

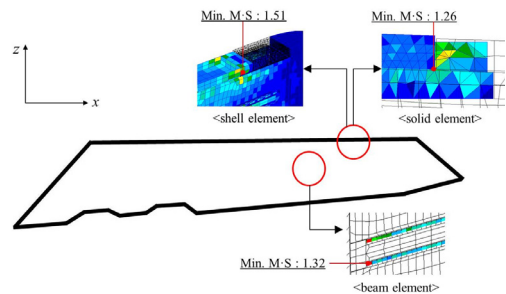


Fig. 13. Minimum Margin of Safety by x-axis Random Analysis for Pylon

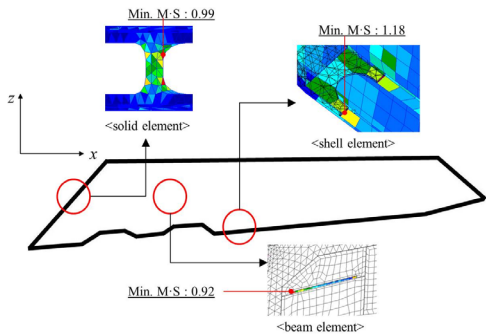


Fig. 14. Minimum Margin of Safety by y-axis Random Analysis for Pylon

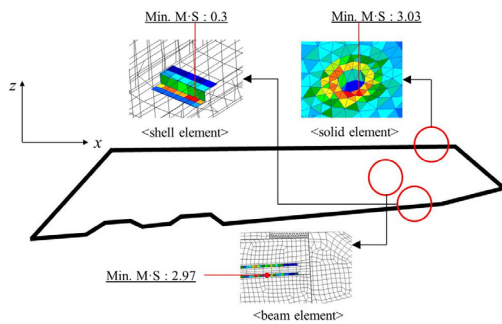


Fig. 15. Minimum Margin of Safety by z-axis Random Analysis for Pylon

Table 4. Result of Random Analysis in Pylon

Type	Axis	Margin of Safety (MS)	Note
Beam	x	1.32	Criterion : MS > 0
	y	0.92	
	z	2.97	
Shell	x	1.51	
	y	1.18	
	z	0.30	
Solid	x	1.26	
	y	0.99	
	z	3.03	

5. 결론

본 논문에서는 군용 항공기에 적용되는 외부연료탱크와 파일런에 대한 개발의 일환으로 MSC.Random을 사용하여 랜덤 진동조건에 대한 구조 강건성을 평가하였다.

수치해석 조건으로 미국국방환경규격에서 규정하는 PSD 프로파일을 적용하였고, x축, y축 및 z축 각 방향의 랜덤 가진에 대해 수치모델을 구성하는 빔 요소, 셸 요소

그리고 솔리드 요소에서의 안전여유를 평가하였다. 수치해석 결과, 외부연료탱크는 x축에 대한 랜덤 진동이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었고, 파일런은 z축에 대한 랜덤 가진에 의해 가장 큰 영향을 받은 것으로 파악되었다. 그리고, 외부연료탱크와 파일런의 모든 영역에서 0 이상의 안전여유를 확보하고 있는 것으로 확인되었다. 최종적으로, 본 논문에서 다루고 있는 군용 항공기의 외부연료탱크와 파일런은 미국국방환경규격에서 규정하고 있는 랜덤 진동조건에 대해 구조 강건성을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

References

- [1] H. Cho, J. Rhee "Random Vibration Characteristics of a Whole Structure Composite Satellite Having Hybrid Composite Sandwich Panels", *Journal of the Korean society for aeronautical and space sciences*, vol. 38, no. 8, pp. 798-805, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2010.38.8.798>
- [2] H.S. Kim, H.J. Kang, J.S. Kim, "Random Vibration of Coupled Beams", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 17, no. 10, pp. 2491-2497, 1993. DOI: <https://doi.org/10.22634/KSME.1993.17.10.2491>
- [3] S. Cheng, "Random Vibration Analysis of Structures by a Time-Domain Explicit Formulation Method", *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 52, no. 2, pp. 239-260, 2014. DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2014.52.2.239>
- [4] J. Hwang, B. Yoo, M. Park, "Dynamic Analysis of Aircraft Landing Gear under Nonstationary Random Excitations", *Journal of The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 251-259, 1998.
- [5] J. Hwang, B. Yoo, M. Park, "Random Vibration and Harmonic Response Analyses of Upper Guide Structure Assembly to Flow Induced Loads", *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, vol. 15, no. 1, pp. 59-68, 2002.
- [6] W. B. Lee, K.W. Kim, "Random Vibration Analysis for Satellite Design", *Aerospace engineering and technology*, vol. 5, no. 2, pp. 102-107, 2006.
- [7] C. H. Kim, K. W. Kim, S. W. Kim, J. H. Lim, D. S. Hwang, "Safety Analysis of Satellite Equipment under Random Vibration", *Proceedings of the KSNVE 2012 Spring Conference*, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp. 513-514, April 2012.
- [8] C. Yu, "A Study on Relation between Strength Analysis and Random Vibration Analysis of Bracket for Electric Vacuum Pump in Automobile", *Proceedings of KSAE 2014 Annual Conference*, The Korean Society of Automotive Engineers, pp. 166-167, Nov. 2014.
- [9] I. Dima, C. Moisek, C. Coman, M. Nastase, "Comparative

Study between Random Vibration and Linear Static Analysis using Miles Method for Thruster Brackets in Space Structures”, *INCAS BULLETIN-National Institute for Aerospace Research Elie Carafoli*, vol. 9, no. 2, pp. 61-75, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2017.9.2>

- [10] A. Tak, S. Lee, “Analysis of the Vibration Stability of Avionics Equipment Mount for Random Vibration”, *Proceedings of the KSNVE 2019 Annual Autumn Conference*, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp. 109, Oct. 2019.
- [11] Department of Defense, “MIL-T-18847C: Tanks, Fuel, Aircraft, Auxiliary External, Design and Installation of”, *Military Specifications and Standards*, 18 Jan. 2005.
- [12] MSC Nastran Dynamic Analysis User’s Guide, USA, MSC Software Corporation, 2017.

김 현 기(Hyun-Gi Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (학사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (석사)
- 2006년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (박사)
- 2006년 2월 ~ 2007년 12월 : 현대중공업 선임연구원
- 2007년 12월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 책임연구원

<관심분야>

항공기 구조해석, 구조최적화, 유체-구조 연성해석

김 성 찬(Sungchan Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한국항공대학교 항공기계공학과(학사)
- 1998년 8월 : 한국항공대학교 항공기계공학과(석사)
- 2009년 2월 : 충남대학교 항공우주공학과(박사)
- 1991년 3월 ~ 1994년 12월 : (주)광림 과장
- 1995년 2월 ~ 2000년 7월 : 한국항공우주산업 선임연구원
- 2000년 9월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 책임연구원

<관심분야>

항공기 구조설계 및 세부계통