

미 군사규격을 적용한 권취 코어 자동공급장치의 진동해석

고정일*, 박수현**, 허장욱*[#]

*금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합공학전공), **금오공과대학교 기계시스템공학과

Vibration Analysis of Film Winding Core Automatic Supply System Using US Military Standards

Jeong-Il Go*, Soo-Hyun Park**, Jang-Wook Hur*[#]

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

**Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received 26 December 2021; received in revised form 10 January 2022; accepted 15 February 2022)

ABSTRACT

By applying METHOD 514.8 of the US military standard MIL-STD-810H, vibration analysis of the winding core automatic feeding device was performed during vehicle transportation. The contact point between the LM guide and main support frame was weak in the vertical axis, transverse axis, and longitudinal axis during the transportation of the automatic winding core feeder vehicle, and the maximum equivalent stress was 236.31 MPa in the longitudinal axis. When random vibration was applied, the safety margin in the longitudinal direction was 0.26, indicating low safety. The safety margin was changed by increasing the damage factor to 0.1. Finally, the safety margin was improved to 3.48 to secure safety. Resonance occurred with a Q factor of 9.34 in the harmonic response to which the RMS value of the ASD data was input, and the vertical axis safety margin was derived as 0.16. When the damping factor was 0.15, the Q factor was 3.37, and resonance was avoided with a safety margin of 6.62.

Keywords : Film Winding Core(권취 코어), Automatic Supply System(자동공급장치), Random Vibration Analysis(랜덤 진동 해석), Modal Analysis(모드 해석), Harmonic Response(하모닉 응답)

1. 서 론

IT용 박막은 4차 산업혁명의 영향으로 반도체 산업의 성장에 따라 지속적으로 수요가 예상되는 신소재이며, IT용 박막의 권취 코어 자동공급장치는

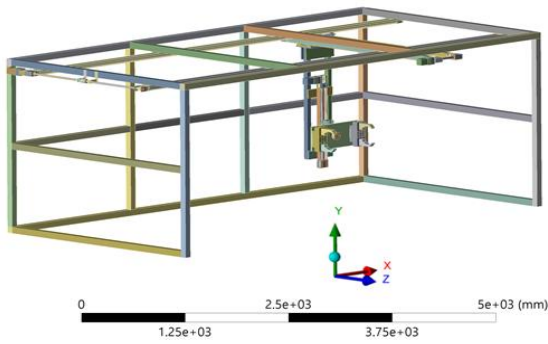
첨단소재의 원자재를 재단하기 위한 핵심장치로 그에 따른 제조장비의 자동화도 꾸준한 성장이 예상되고 있다^[1].

Master Roll로 부터 공급된 박막을 감기 위한 기존 권취 코어는 폭이 0.2 ~ 1.3m, 무게가 10kg 이하였으나, 최근 기술의 발전으로 대형 박막 제작이 가능하여 폭이 2.8m, 무게가 40kg에 이르고 있다. 이러한 박막이 권취된 대형 코어를 원하는 위치로

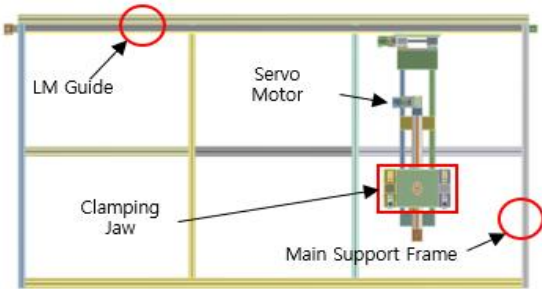
Corresponding Author : hhjw88@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7399

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <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.



(a) Isometric view



(b) Front side view

Fig. 1 Configuration of film winding core automatic supply system for IT

이송시키는 자동공급장 치또한 대형화되고 있으며, 형상은 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같고, 무게는 약 500kg 수준이다.

개발된 권취 코어 자동공급장치는 크기로 인해 트럭에 고정시켜 운송하여야 하며, 이동간 진동의 영향으로 파손 및 고장의 위험이 있다. 그러므로 무기체계 개발간 적용하는 군사표준인 MIL-STD-810H에 기반하여 진동에 대한 해석으로 안전성을 검토한다면 운송 중 파손위험성을 크게 줄일 수 있다^[2].

따라서 본 연구에서는 ANSYS Workbench의 모달 해석에 군사표준 MIL-STD-810H의 METHOD 514.8에 제시된 차량 운송 진동 데이터를 입력 후 랜덤 진동 해석으로 권취 코어 자동공급장치의 차량 운송 시 안전성을 확인하였으며, 모달 해석을 통해 계산한 모드 주파수와 차량 운송 시 발생하는 진동의 특정 주파수 영역 간 하모닉 응답 해석을 수행하여 공진 발생 여부를 검토하였다^[3].

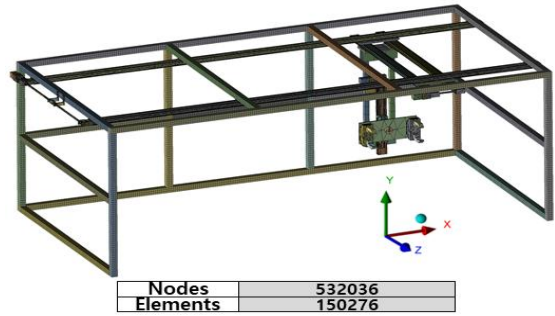


Fig. 2 Mesh of analysis model

2. 해석방법

IT용 박막 권취 코어 자동공급장치의 형상은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이, 본체인 주지지 프레임, 코어를 클램핑하는 권취 장치, 서보 모터 및 직선 가이드를 이용한 이송장치 등으로 구성되며, x, y 및 z축에 설치된 서보 모터를 이용하여 장치들이 각각 6방향으로 직선 가이드를 따라 이동한다.

직선 가이드는 주지지 프레임에 볼트 및 너트로 고정되어 있으나, 유한요소 해석의 단순화를 위해 볼트, 너트 및 구멍을 제거하고 구속조건을 적용하였고, 요소분할은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 절점 수 532,036개, 요소수 150,276개이며^[4], 이는 해석을 위해 충분한 요소가 사용되었는지 격자 수렴성을 반영한 내용이다. 즉, 격자 크기를 반복적으로 축소 하면서 모달 해석을 수행하여 1차 모드의 주파수 수렴성을 점검하였으며, 격자 크기가 1,250mm부터 수렴이 되었으나, 컴퓨터 성능을 고려하여 수렴한 값 중 가장 작은 격자 크기인 1,000mm를 사용하였고, 이에 따른 결과를 Table 1에 나타내었다.

권취 코어 자동공급장치의 주지지 프레임은 차량 외부에 움직임을 고정하고 있으므로 밀면에 6 자유도를 구속시켰다. 또한 사용된 재료의 기계적 성질은 Table 2과 같으며, 주지지 프레임은 AL 6061, 직선 가이드는 SCM420, 나머지 부품들은 알루미늄 합금을 적용하였다. 권취 코어 자동이송장치는 차량 외부에 고정되어 운송되기 때문에 MIL-STD-810H의 METHOD 514.8에 제시된 데이터 중 실제 제품을 차량에 적재 후 운송하는 환경과 유사하게 시험하여 추출된 데이터인 ASD(Acceleration Spectral Density)

Table 1 Frequency convergence in 1st mode according to mesh size

Mesh Size	1000mm	1050mm	1100mm	1150mm	1200mm	1250mm	1300mm
Nodes	532035	443394	440651	414982	403823	400534	375586
Elements	150276	98306	97791	94862	91208	90436	87563
Frequency(Hz)	7.7189	7.7512	7.6843	7.7422	7.7773	7.7754	2.9666

Table 2 Properties of material

Material	AL 6061	SCM420	Alluminum alloy
Density [g/cm ³]	2.7	7.85	2.78
Young's Modulus [GPa]	68.9	190	71
Poisson's Ratio	0.33	0.28	0.33
Shear Modulus [GPa]	25.9	80	26.6
Yield Strength [MPa}	276	365	280

Table 3 Composite wheeled vehicle vibration exposure

Vertical		Transverse		Longitudinal	
Frequency(Hz)	ASD(g ² /Hz)	Frequency(Hz)	ASD(g ² /Hz)	Frequency(Hz)	ASD(g ² /Hz)
5	0.12765	5	0.04070	5	0.01848
6	0.12926	6	0.04415	6	0.02373
7	0.30000	7	0.11000	7	0.05000
8	0.30000	8	0.11000	8	0.05000
9	0.10000	9	0.04250	9	0.02016
12	0.10000	12	0.04250	12	0.02016
14	0.15000	14	0.07400	14	0.05000
16	0.15000	16	0.07400	16	0.05000
19	0.04000	19	0.02000	19	0.01030
90	0.00600	100	0.00074	23	0.01030
125	0.00400	189	0.00130	25	0.00833
190	0.00400	350	0.00400	66	0.00114
211	0.00600	425	0.00400	84	0.00107
440	0.00600	482	0.00210	90	0.00167
500	0.00204	500	0.00142	165	0.00151
rms = 2.24g		rms = 1.45g		221	0.00333
				455	0.00296
				500	0.00204
				rms = 1.32g	

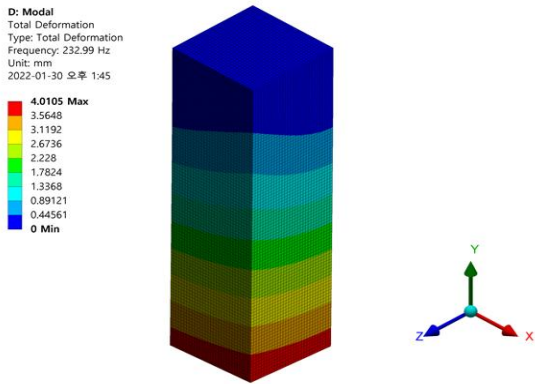


Fig. 3 Modal shape of automatic supply system

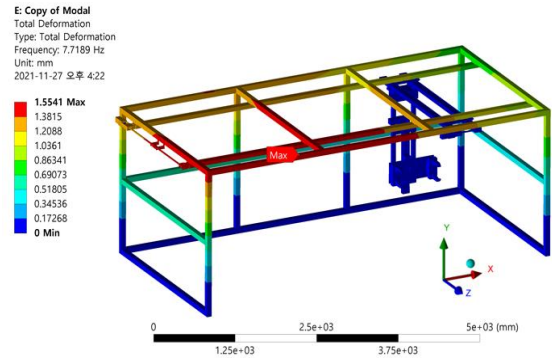
데이터를 사용하였다. 데이터는 군에서 사용하는 트럭을 대상으로 추출한 진동 데이터이며, 35%는 포장도로 데이터이고, 나머지 65%는 비포장도로 데이터이다. ASD 데이터는 실제 권취 코어 자동공급장치가 차량 외부에 고정되어 운송될 때 발생하는 진동의 하중으로 입력하였으며, 주파수가 7Hz 및 8Hz 일 때 Table 3에 나타난 바와 같이 ASD값이 0.3으로 가장 큰 결과를 나타내었다^[5].

권취 코어 자동공급장치 운송 시 안전성은 먼저 모달 해석을 진행한 후 모드주파수와 모드형상의 값을 기반으로 입력 한 ASD 데이터의 하중이 부가되는 진동 특성을 얻기 위해서 랜덤 진동 해석을 진행하였다.

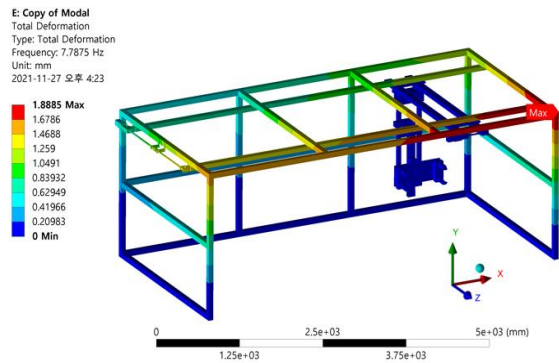
ASD 데이터는 가로 방향(x축), 수직 방향(y축) 및 세로 방향(z축)의 3가지 축을 가지며, 각각의 축에 맞게 해석을 진행하였다.

또한 추출된 모드주파수와 모드형상 등을 가지고 하모닉 응답 해석을 3가지 축으로 구분하여 진행하였다. 이를 통해 주파수 영역에 대한 변위와 최대 등가응력을 계산하였으며, 고유주파수와 가진주파수 간 공진발생 가능성도 확인하였다.

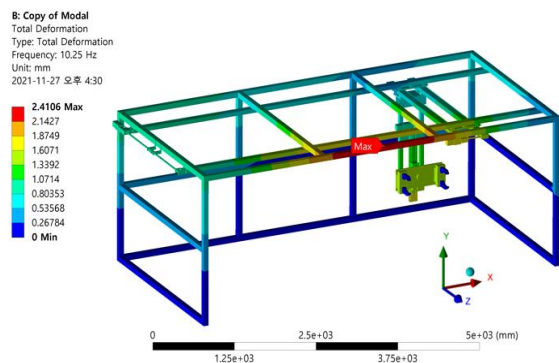
모달 해석의 검증을 위해 Fig. 3과 같이 권취 코어 자동공급장치에 장착된 권취 장치의 질량 중심 모멘트와 동일한 값을 갖는 상부가 고정된 외팔보 모델로 가정하였으며, 식 (1)을 적용해 이론적 고유진동수와 Ansys의 모달 해석 결과를 비교한 결과 235.59Hz로 약 1.12%의 오차를 나타내어 모달 해석 결과의 타당성을 확인하였다.



(a) 1st mode shape



(b) 2nd mode shape

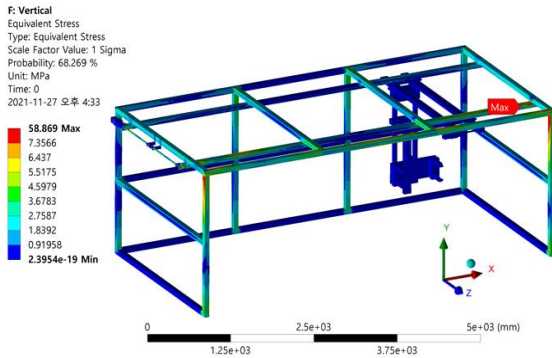


(c) 3rd mode shape

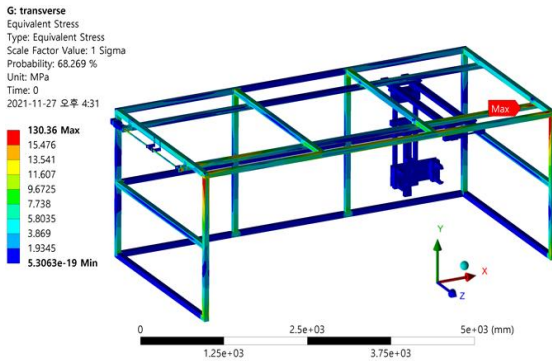
Fig. 4 Modal shape of automatic supply system

$$f_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad k = \frac{3EI}{l^3} \quad (1)$$

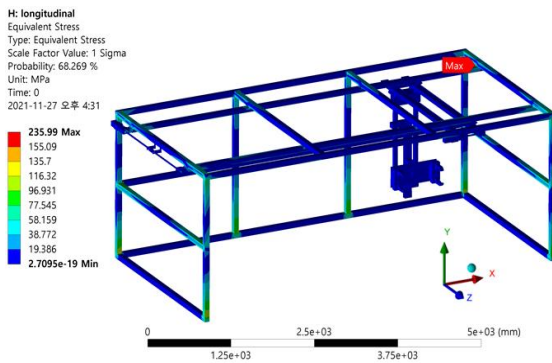
여기서, f_n 은 고유진동수, k 는 물체의 스프링 상수, m 은 물체의 질량을 의미한다^[6].



(a) Vertical



(b) Transverse



(c) Longitudinal

Fig. 5 Equivalent stress(random vibration)

Table 4 Margin of safeties(random vibration)

Direction	Vertical	Transverse	Longitudinal
Value	3.96	1.24	0.26

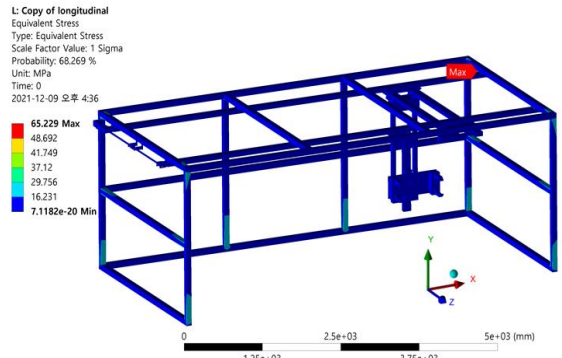


Fig. 6 Damping factor 0.1 in random vibration (longitudinal)

3. 결과 및 고찰

3.1 모달 해석

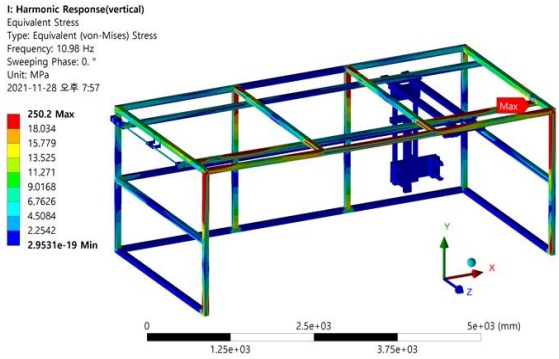
모달 해석은 Table 2의 주파수를 반영하기 위해 500Hz 까지 수행한 결과 총 300개의 모드를 추출하였으며, 1차 모드, 2차 모드 및 3차 모드를 각각 Fig. 4(a), Fig. 4(b) 및 Fig. 4(c)에 나타내었다. 주지지 프레임의 최대 변위는 1차 모드에서는 1.55mm로 왼쪽 모서리가 가장 큰 것을 확인할 수 있었고, 2차 모드에서는 1.89mm로 오른쪽 모서리에서 발생하였으며, 3차 모드에서는 2.4mm로 입구의 위쪽 프레임에서 도출되었다. 이때, 고유 주파수는 각각 7.7189Hz, 7.8124Hz 및 10.807Hz로 계산되었다.

3.2 랜덤 진동 해석

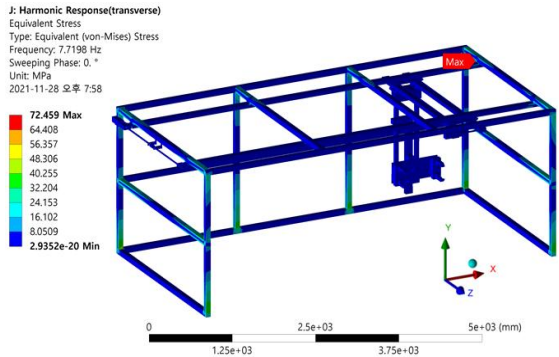
모달 해석에서 추출된 모드 주파수, 모드 형상 및 ASD 데이터를 입력하여 각각의 축에 맞게 권취 코어 자동공급장치의 랜덤 진동 해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. y축의 최대 등가응력은 입구방향의 x축 직선 가이드와 주지지 프레임의 접촉지점에서 58.849MPa이 발생하였고, z축에서 발생하는 최대 등가응력의 위치는 y축과 동일하지만 등가 응력이 증가한 130.31MPa이 도출되었다. 또한 x축에서는 입구 반대방향의 x축 직선 가이드와 주지지 프레임의 접촉지점에서 236.31MPa로 가장 큰 등가응력을 보였다. 이러한 등가응력에 대해 식 (2)을 이용하여 각각의 축 방향에 따른 권취 코어 자동공급장치의 안

전여유를 계산하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

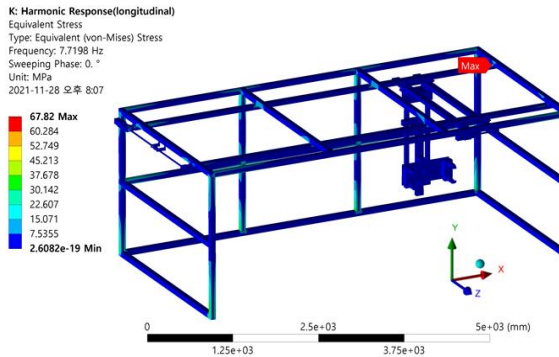
여기서 안전계수(Factor of safety)는 신뢰성 있는 재료를 사용하고, 작용하는 하중 및 응력의 크기를 정확하게 파악한 경우로 고려하여 1.25로 하였다.



(a) Vertical



(b) Transverse

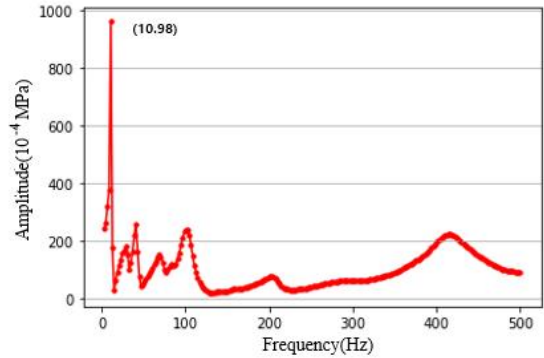


(c) Longitudinal

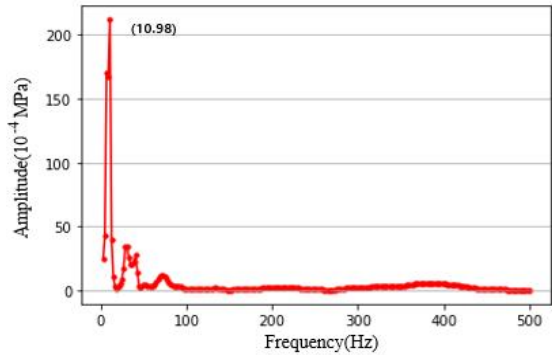
Fig. 7 Equivalent stress(harmonic response)

Table 5 Results of Q Factor

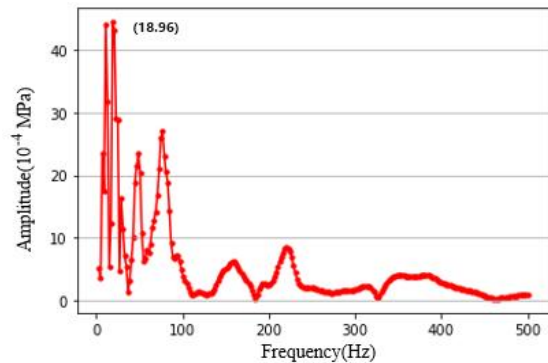
Direction	Vertical	Transverse	Longitudinal
Value	9.34	2.38	3.65



(a) Vertical



(b) Transverse



(c) Longitudinal

Fig. 8 Frequency response worksheet

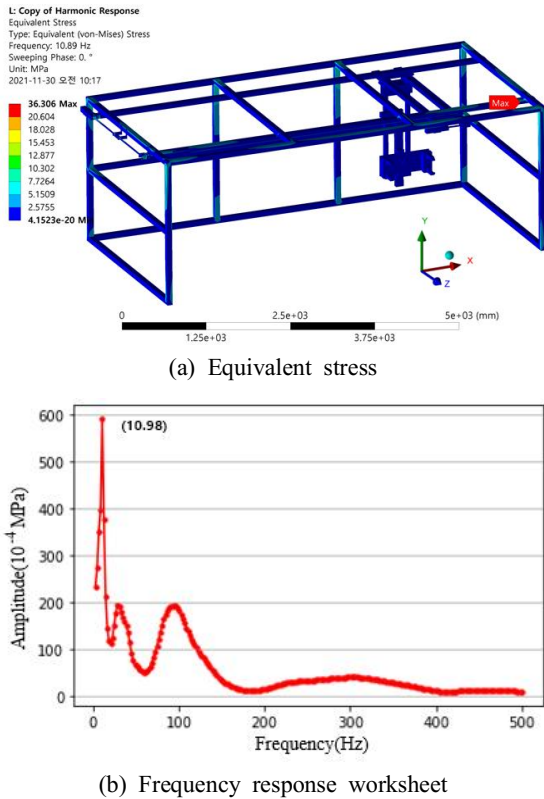


Fig. 9 Application of damping system

Table 6 Margin of safeties(harmonic response)

Direction	Vertical	Transverse	Longitudinal
Value	0.16	3.03	3.31

$$M.S = \frac{Yield\ Strength}{Factor\ of\ Safety \times Applied\ Stress} - 1 \quad (2)$$

안전여유는 모두 기준값 0보다 큰 값이 도출되었으나, x축의 경우 0.26으로 다른 방향보다 매우 낮기 때문에 차량 운송 시 파손 가능성을 배제하기 위해 감쇄 시스템의 적용이 필요하며, 감쇄 시스템의 모사를 위해 x축의 Damping Factor를 0.1로 증가시켜 안전여유를 다시 계산하였다⁹⁾. 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, x축의 최대 등가응력은 65.23MPa이 도출되었고, 안전여유는 3.48로 기준값보다 향상을 보여 감쇄 시스템의 적용 후 권취 코어 자동공급장치의 차량

운송시 구조적 안정성을 가지는 것으로 판단할 수 있다⁹⁾.

3.3 하모닉 응답 해석

모드 주파수, 모드 형상 및 MIL-STD-810H의 Method 514.8에 명시된 ASD 데이터의 rms 값을 외부 조화가진 값으로 입력하여 랜덤 진동 해석과 동일하게 각각의 축에 대한 하모닉 응답 해석을 진행하였다.

최대 등가응력은 Fig. 7에 나타난 바와 같으며, y축은 입구측(x축) 직선 가이드와 주지지 프레임이 접촉하는 부분에 250.20MPa이 발생하였고, z축과 x축은 입구 반대측(x축) 직선 가이드와 주지지 프레임이 접촉하는 부분에 각각 72.46MPa과 67.82MPa이 계산되었다. 또한 주파수 응답의 결과로는 y축 및 z축에서 각각 10.89Hz로 고유주파수와 유사하게 발생하였고, 높은 진폭을 나타내었다.

공진의 기준은 Q Factor로 판단할 수 있는데, Q Factor는 Frequency Response Worksheet에서 Peak가 발생한 부분의 주파수(f_0)와 Peak 부분의 에너지 값인 g값의 3dB 감소에 해당하는 양쪽의 주파수 값(f_1 및 f_2)들을 이용하여 식 (3)과 같이 계산할 수 있으며, Frequency Response Worksheet는 Fig. 8과 같이 나타내었다¹⁰⁾.

$$Q\ Factor = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (3)$$

각각의 축에 대해 Q Factor를 계산하였을 때, Table 5에 나타난 바와 같이 z축과 x축에서는 공진 기준치를 넘지 않았지만, y축에서는 기준치 5를 넘긴 9.34로 공진이 발생하였다. 이에 따라 도출된 최대 등가응력에 대한 안전여유를 Table 6과 같이 계산하였으며, 공진이 발생한 y축에서 가장 낮은 안전여유가 도출되었다¹¹⁾.

항복강도보다 낮은 최대 등가응력이 발생하여 이론상 공진으로 인한 파손은 발생하지 않지만, 낮은 안전여유로 인한 파손의 가능성을 배제할 수 없기 때문에 감쇄 시스템의 적용이 필요하다. 탄성 마운트와 같은 감쇄 시스템을 모사하기 위해 하모닉 응답 해석 내의 Damping 계수를 0.05에서 점차 증대

시켜 가며 공진을 피할 수 있는 Damping 계수를 도출하였다. 그 결과 Damping 계수가 0.15일 때, Q Factor가 3.37로 공진을 피할 수 있었으며, 안전여유는 6.62로 개선되었고, 이때 등가응력과 Work Sheet는 Fig. 9와 같다.

4. 결론

미 군사 규격 MIL-STD-810H의 METHOD 514.8을 적용하여 권취 코어 자동공급장치의 차량 운송 시 진동해석을 수행하였으며, 이때 등가응력과 안전여유 및 공진 여부를 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 권취 코어 자동공급장치의 차량 운송 중 x축, y축 및 z축 모두 직선 가이드와 주지지 프레임의 접촉 지점이 가장 취약하였으며, x축에서 236.31MPa의 최대 등가응력이 발생하였다.
- 2) 랜덤 진동이 입력되었을 때, x축의 안전여유가 0.26으로 가장 낮게 계산되었으며, Damping Factor를 0.1로 증가시켰을 때 안전여유가 3.48로 향상되어 안전성을 확보하였다.
- 3) ASD 데이터의 rms 값을 입력한 하모닉 응답 해석에서는 y축에서 Q Factor 9.34, 안전여유 0.16으로 공진이 우려되었으며, Damping 계수가 0.15일 때 Q Factor 3.37, 안전여유 6.62로 공진 발생을 회피하였다.
- 4) 차후 테스트베드를 통한 실제 진동 데이터 및 가진 데이터를 입력한 시험결과와 해석결과의 비교분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 후기

본 연구는 2021년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임[G21S301476801].

REFERENCES

1. Lee, S. J., Ryu, S. H., Gwak, G. H., "Analysis of the Growth Patterns of the Korean Semiconductor Industry : Hidden Markov Applied Model", Journal of The Korean Institute Of Industrial Engineers,

- Vol. 51, pp. 4233-4251, 2021.
2. Shin, G. H., Hur, J. W., "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, 2021.
3. Jee, Y. G., Lee, Y. S., "Random Vibration and Harmonic Response Analysis of Upper Guide Structure Assembly to Flow Induced Loads", Journal of the Korean Computational Structural Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 59-68, 2002.
4. Byun, J. B., Jyun, Y. J., Kang, S. M., Lee, K. H., Joun, M. S., "Finite Element Analysis of Mechanical Pre-stressing Processes of Cold Forging Dies", Journal of the Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. 29, No. 6, pp. 362-369, 2020.
5. MIL-STD-810H, "Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests", Department of Defense, US, 514.8C, 2019.
6. Park, J. W., Kim, H. J., Jo, B. H., Ha, T. H., "FEM Modeling and Experimental Assessment of Lightweight Floor Vibration", Journal of Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 27, No. 10, pp. 89-96, 2011.
7. Zu, Y. M., "The Study on Life and Safety Coefficient of Plastic Mold Steels by Heat Treatment Process", Ph.D.Diss., University of Myeong Gi, Seoul, 2012.
8. Jeon, B. S., Lee, J. H., "The Damping Coefficient Control for Increasing the Maneuverability of the Mobile Robot in the Rough-terrain", Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, pp. 1043-1045, 2016.
9. Yang, S. M., Kang, H. Y., Kim, H. K., "Reliability of Machine Elements Based on Static and Dynamic Factor of Allowable Safety Under Fluctuation Load", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, pp. 475-480, 1997.
10. Bae, J. H., Lee, J. M., Song, J. W., "Structure Vibration Analysis of a Gas Turbine Blade to

Avoid Resonance Condition", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, pp. 611-613, 2016.

11. Lee, B. R., Yun, T. J., Oh, W. B., Lee, C. W., Kim, H. H., Jeong, Y. J., Kim, I. S., "Study on Floodgate Resonance Avoidance Using FSI Analysis", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineer, Vol. 45, No. 3, pp. 223-230, 2021.