

대형팬 구동 환경에서의 이동식 위성통신 안테나 진동 저감 방법론

Methodology of Vibration Reduction for Satellite Communication Antenna in Large Fan Operating Environments

이 은 호* · 전 종 익** · 정 의 봉** · 박 노 철†

Eun-Ho Lee*, Jong-Ik Jeon**, Eui-Bong Jeong** and No-Cheol Park†

(Received September 4, 2020 ; Revised November 11, 2020 ; Accepted November 24, 2020)

Key Words : Antenna System(안테나 시스템), Dynamic Characteristics(동특성), Vibration Reduction(진동 저감), Finite Element Analysis(유한요소해석)

ABSTRACT

A large offset antenna, which is used as military satellite communication terminal, is generally operated in extremely harsh environments. As a very large reflector is mounted, the reflector has to undergo communication performance tests for external forces such as wind vibrations. Wind vibration tests have been replaced with artificial wind tests conducted using large fans because of space and cost constraints. Therefore, there is a need to improve the communication performance through vibration reduction for the excitation force caused by artificial wind. In this study, the frequency characteristics were verified by analyzing the excitation force caused by artificial wind, and a vibration reduction methodology was presented based on the finite element model which was verified via experiments. This study suggested a general vibration reduction approach for large offset antennas and is expected to be useful in industries.

기 호 설 명

- W : 풍하중
- q : 풍압
- c : 풍력 계수
- A : 풍압이 작용하는 면적
- V : 풍속
- f_{BPF} : 날개통과주파수
- No. Blades : 대형팬 날개 개수
- RPM : 대형팬 구동 RPM

1. 서 론

전투환경에서 운용되는 안테나는 고정된 시설에서 운용되는 고정식 위성 통신 안테나와 차량에 장착되어 전술적 운용 목적으로 이용되는 이동식 위성 통신 안테나로 나눌 수 있다. 특히 이동식 위성 통신 안테나는 다양한 전투 상황에 맞게 운용되어야 하고 고정식 안테나에 비해 가혹한 환경에서 통신 성능 및 구조 건전성을 만족해야 하므로 매우 엄격한 설계 기준

† Corresponding Author; Member, Yonsei University, Department of Mechanical Engineering, Professor
E-mail:pnch@yonsei.ac.kr

* Member, Yonsei University, Department of Mechanical Engineering, Student

** Member, LIG Nex1, Researcher

‡ Recommended by Editor Jae Eun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

으로 개발되고 이동·수송·인도·운용 조건에서 열·진동·충격·일사·화확 등의 다양한 성능 평가가 이루어진다⁽¹⁻³⁾. MIL-STD-188-164에 따르면 대형 offset 안테나가 야지에서 구동할 때 antenna pointing loss가 2 dB이하로 제한하고 있다⁽⁴⁾. Antenna pointing loss는 최대 피크 비콘수신레벨에서 외력에 의해 변화된 비콘수신레벨 차이를 나타낸다. 비콘 신호는 위성의 위치를 알리기 위하여 전송하는 신호로 지표면에 위치한 위성 통신 단말의 안테나에서 비콘 신호를 수신하여 비콘수신레벨의 최고점을 지향한다. 따라서 비콘수신레벨은 안테나의 지향성을 확인할 수 있는 지표로써 간접적으로 위성 통신 성능을 확인할 수 있다. 비콘수신레벨이 낮아지면 위성 통신 상태의 불량 발생하고 허용된 비콘수신레벨 이하로 낮아지게 되면 통신 두절이 발생하게 된다. 따라서 안테나 구조물의 통신 성능을 저하시킬 수 있는 다양한 외력을 분석하고 개선안을 도출하는 연구가 많이 진행되었다⁽⁵⁻⁷⁾. Kim, S. H. et al.⁽⁸⁾은 대형 다물체 복합 안테나 구조물의 통신성능을 저하시키는 외력으로 풍속조건에 노출된 구조물의 진동에 의하여 큰 영향을 받아 안테나의 정밀 지향 성능에 악영향을 미침을 밝히고 풍속조건에서 안테나 구조물의 성능을 현실성 있게 평가하기 위한 방법으로 대형팬을 통한 인공바람 시험으로 대체할 수 있음을 밝혔다. 뿐만 아니라 국부적인 부재의 강성 보완으로 안테나 진동에 의한 지향각 편차 감소 및 안테나 통신 성능 향상의 가능성을 확인하였다. 그리고 풍속 환경에서의 유사한 대형 안테나 구조물의 취약한 고유모드를 정의하고 안테나 통신 성능 향상을 위한 설계 관점 및 방향을 제시하였다⁽⁹⁾.

이 연구는 풍속조건에서의 이동식 대형 안테나의 통신 성능 향상을 위하여 전투환경에서 발생할 수 있는 풍속환경을 Table 1로 정의하여 약 27 m/s이하의 풍속 조건에서 구조물 진동 저감을 목표로 연구를 수행하였다.

Table 1 Wind speed condition of operation environment

Wind speed definition		Operation concept	
Operating	20 m/s	Averaged wind speed	Normal communication
	27 m/s	Instantaneous wind speed	Poor communication quality
Non-operating	40 m/s	Averaged wind speed	Stowed

풍속조건에서 안테나 구조물의 진동 현상을 파악하기 위하여 풍속조건을 모사한 대형팬의 인공바람을 이용한 시험을 수행하였고 인공바람의 가진주파수 특성을 분석하여 안테나 통신 성능에 악영향을 미치는 대형팬 구동 조건 및 가진주파수 대역을 도출하였으며 이와 같은 가진력이 구조물에 작용할 때 안테나 구조물의 진동에 취약한 고유 동특성을 확인하고 형상 변경 및 구조 개선을 통하여 일반적인 대형 offset 안테나 구조물의 진동 저감 방법론을 도출하고 그 효과를 분석하였다. 대형 안테나 구조물에 대하여 효율적인 진동 저감 방안을 도출하기 위하여 유한요소해석을 기반으로 연구를 수행하였고 해석 모델에 대한 실험적 검증을 통하여 이 연구 과정의 유효성을 확보하였다.

2. 대상 시스템 및 풍속 환경 분석

2.1 유한요소해석 모델 구축

이 연구의 대상인 이동식 위성 통신 안테나는 Fig. 1과 같이 전체 높이 약 3.3 m에 직경 약 2 m의 반사판으로 구성된 안테나 시스템으로 각종 구동 장치, 제어 장치, 신호 증폭기 등의 전자장비가 다수 장착되어 있으며 부재를 체결하는 다양한 연결 블록 및 볼트로 구성된 매우 복잡한 시스템이다. 안테나 시스템은 크게 안테나의 지향을 위하여 고각 및 방위각을 조절하고 및 전체 구조물을 지지하는 페테스탈장치, 위성 신호를 하나의 초점으로 모아주는 반사판 조립체 및 반사판에 의하여 전달된 신호를 수신하는 급전혼 조립체 3가지로 나눌 수 있다. 효과적으로 이동식 위성 통신 안테나에 대한 유한요소해석 모델을 구축하기 위하여 몇 가지 부품에 대하여 생략 및 단순화하였다. 먼저, 구조물의 전체적인 거동에 큰 영향을 미치지 않는 구멍, 필렛, 볼트 등을 생략하였다. 그리고 안테나의 고각 및 방위각을 조절하는 페테스탈장치의

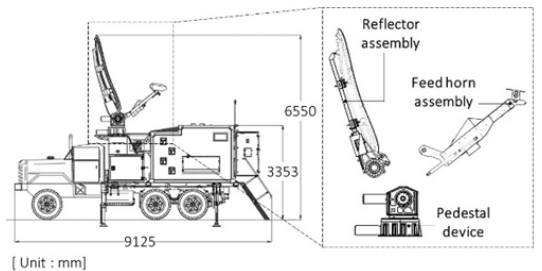


Fig. 1 Schematic diagram of antenna system

하우징을 생략하고 반사판 조립체와 급전혼 조립체를 연결하는 샤프트는 실린더 서포트 경계조건으로 단순화하였다.

추가적으로 안테나 반사판과 각종 탑재 장비는 강제 거동을 하는 것으로 가정하고 질량 관성 효과만 고려하기 위하여 점질량으로 모사하였다. 최종적으로 유한요소해석 모델은 총 238 772개의 요소와 총 265 842개의 절점으로 구축하였다. 구축한 유한요소해석 모델은 Fig. 2와 같다.

이 연구는 유한요소해석 모델을 기반으로 수행되기 때문에 구축한 유한요소해석 모델의 신뢰성과 유효성을 검증할 필요가 있다. 따라서 실제 이동식 위성 통신 안테나에 대하여 모드 시험을 수행하여 시스템의 주요 모드에 대한 고유진동수와 모드형상을 확보하였다. 모드 시험 결과와 유한요소해석 모델의 모드해석 결과를 Table 2와 Fig. 3에 비교하였다. 시험 결과 1차모드는 11.46 Hz로 반사판 조립체와 급전혼 조립체의 역위상 굽힘모드, 2차모드는 17.64 Hz로 급전혼 조립체의 굽힘모드, 3차모드는 23.55 Hz로 급전혼 조립체의 비틀림모드가 발생하였다. 유한요소해석 결과는 1차모드 11.08 Hz, 2차모드 15.98 Hz, 3차모드 25.71 Hz이고 모드형상은 시험 결과와 동일하여 시험과 해석의 오차가 10% 이내로 구축한 유한요소해석모델의 신뢰성을 검증하였다.

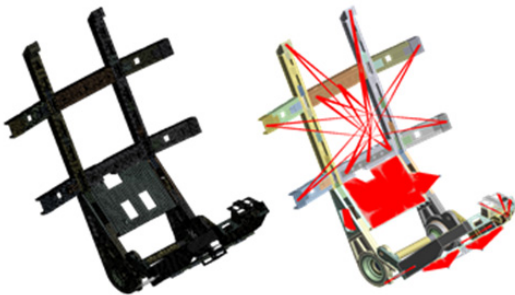


Fig. 2 Finite element model of antenna system

Table 2 Dynamic characteristics of antenna system

Mode	Mode shape	Natural frequency [Hz]		Error [%]
		EXP.	FEM	
1	Main & sub ant. Bending (OOP)	11.46	11.08	-3.32
2	Sub ant. bending	17.64	15.98	-9.41
3	Sub ant. twist	23.55	25.71	9.17

2.2 인공바람의 가진력 분석

Offset 안테나는 외부 노출형으로 거대한 접시형 반사판 때문에 바람의 영향을 크게 받게 된다. 일반적으로 바람에 의해 발생하는 풍하중의 크기는 식 (1) 과 식 (2)와 같이 표현할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$W = qcA \tag{1}$$

$$q \propto V^2 \tag{2}$$

식 (1), 식 (2)에서 풍하중의 크기는 풍속의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

대형팬과 같이 회전익에 의해 발생하는 풍하중의 주파수 특성은 식 (3), 식 (4)와 같이 표현할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$f_{BPF} = \frac{(\text{No. Blades})(\text{RPM})}{60} [\text{Hz}] \tag{3}$$

$$\text{Harmonic} = (f_{BPF}) \times N \tag{4}$$

식 (3), 식 (4)에서 대형팬의 구동 RPM과 날개 개수에 의하여 가진주파수가 결정되고 기본 가진주파수의 배수로 하모닉 성분의 가진력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 연구에서 사용한 대형팬 풍속데이터시트를 참조하여 대형팬 구동 RPM에 따라 보간한 풍속값과 날개 개수가 3개인 대형팬의 구동 RPM에 따른 1차 날개 통과주파수 계산값은 Table 3과 같다. 인공 바람에 의해 발생하는 가진력의 특성을 이론적으로 파악하였고 실제로 바람에 의해 안테나 시스템에 작용하는 가진력과 안테나 구조물에서 발생하는 진동의 관계를 파악하기 위하여 대형팬의 인공바람을 차량에 탑재된 안테나에 가해주는 풍속시험을 수행하였다. 풍속시험 set-up과 가속도계 부착위치를 Fig. 4에 나타냈다. 풍속시험 시험은 대형팬 구동 RPM을 1600 r/min

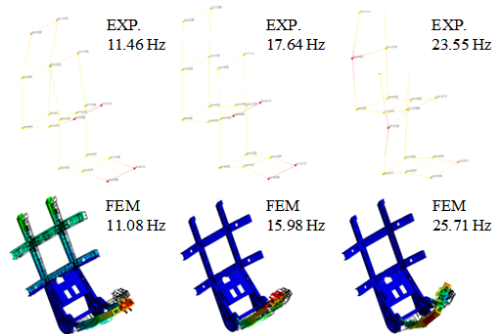


Fig. 3 Mode shapes of antenna system

에서 3200 r/min까지 변화시켜가며 반사판 조립체 및 급전혼 조립체에 부착한 가속도계에서 진동 응답을 측정하는 가변풍속시험을 수행하였고 측정된 가속도

의 주파수성분은 Fig. 5와 같다. 외팔보 형태로 진동하는 급전혼 조립체 구조물의 끝단부에서 측정된 Fig. 3과 Fig. 5의 주파수 응답이 매우 크게 나타나며 구동 RPM이 증가함에 따라 구조물의 진동 응답 주파수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 약 2400 r/min 이후부터 초저주파 대역의 응답이 발생한다. 이는 풍속이 증가함에 따라 공기력의 크기가 증가하여 구조물의 강성 한계를 초과하여 발생하는 강제운동으로 판단된다. 2600 r/min에서 상대적으로 높은 응답이 발생하는데 이는 모드해석을 통하여 확인한 결과, 143.8 Hz의 in-plane모드와 굽힘모드가 혼합된 형태의 모드 형상을 가지는 고유 모드의 유효질량비가 상대적으로 높아 해당 주파수의 가진력에 대한 응답이 높게 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 5의 응답 피크 주파수와 대형팬 구동 RPM에 따라 이론적으로 계산한 날개통과주파수를 Table 4에 비교하였다. 구조물의 응답 주파수와 날개통과주파수가 최대 5.57% 이내로 일치하는 것을 통하여 대형팬을 통한 풍속시험시 안테나 구조물의 진동을 발생시키는 가진력의 주요 주파수 성분은 날개통과주파수임을 확인할 수 있다. 이를 통하여 인공 바람 시험 풍하중의 주요 가진주파수 특성을 확인하였다.

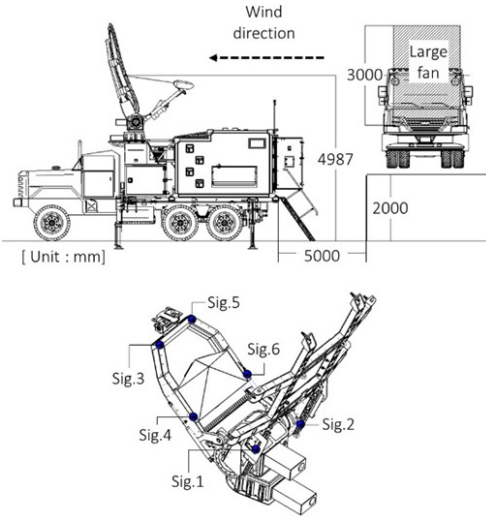


Fig. 4 Experimental set-up and locations of accelerometers

Table 3 Wind speeds and blade pass frequencies according to RPMs of fan

Large fan drive RPM	Wind speed [m/s]	1 st blade pass frequency [Hz]
1600	18.7	80
1800	20.8	90
2000	23.5	100
2200	26.7	110
2400	29.9	120
2600	32.5	130

Table 4 Comparison of peak response frequency and blade pass frequency

Large fan drive RPM	Frequency of peak response [Hz]	1 st blade pass frequency [Hz]	Discrepancy [%]
1600	75.78	80	5.57
1800	94.51	90	-4.77
2000	105.3	100	-5.03
2200	116.0	110	-5.17
2400	126.9	120	-5.44
2600	135.4	130	-3.99

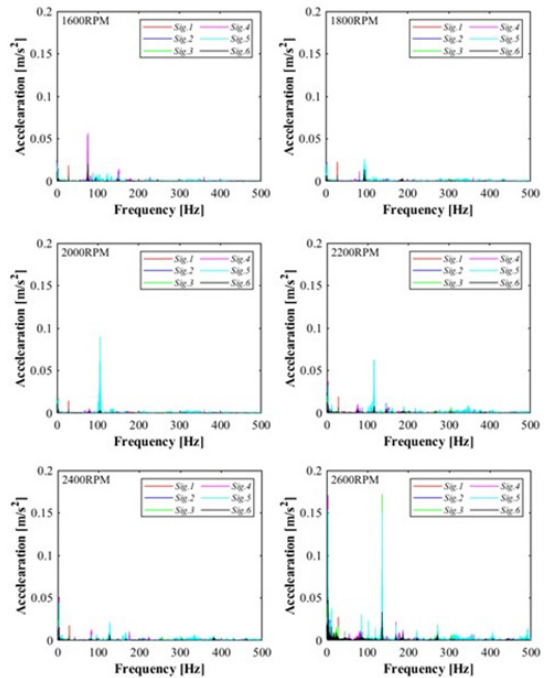


Fig. 5 Frequency responses of antenna structure

2.3 진동 저감 목표 주파수 선정

안테나 시스템의 진동 저감 목표는 대형팬에서 발생하는 공기력이 충분히 안테나 구조물의 진동을 발생시킬 수 있는 크기의 가진력이어야 한다. Fig. 6에 대형팬 구동 RPM 변화에 따른 X대역 및 Ka대역 안테나 비콘수신신호의 변화를 나타냈다. 대형팬 구동 RPM이 증가함에 따라 안테나 구조물에 작용하는 풍하중의 크기가 증가하여 구조물의 진동 응답이 증가한다. 따라서 안테나의 지향 성능이 저하되고 비콘수신레벨의 변동성이 커지고 레벨이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. X대역 보다 상대적으로 높은 주파수대역을 가지는 Ka대역 비콘수신레벨의 빔폭각이 작아 풍하중에 의한 진동에 취약함을 확인할 수 있다. Table 5에 대형팬 구동 RPM에 따른 각 대역의 비콘수신 레벨 평균값을 정리하였다. 약 1600 r/min 이후부터 Ka대역 비콘수신레벨의 변동이 크게 발생하여

약 2000 r/min에서 비콘수신레벨이 2 dB 이상 열화된다. 따라서 약 1600 r/min 이상으로 대형팬이 구동할 때 안테나 구조물을 충분히 가진할 수 있을 것으로 판단된다. Table 1의 전투환경에서 발생할 수 있는 풍속환경 기준과 풍속에 따른 안테나 비콘수신레벨을 고려하여 진동 저감 목표를 1600 r/min ~ 2200 r/min 으로 선정하였다. 이는 대형팬 제조사 풍속데이터시트 기준 약 18.7 m/s ~ 26.7 m/s의 풍속에 해당하는 조건으로 전투환경에서 발생할 수 있는 풍속조건에서 가장 가혹한 조건을 포함할 수 있도록 하였고 충분히 안테나 구조물을 가진하여 안테나 성능을 저해할 수 있는 주파수 대역으로 선정하였다.

대형팬에서 발생하는 공기력은 날개통과주파수 특성을 나타내기 때문에 진동 저감 목표인 1600 r/min ~ 2200 r/min에 해당하는 날개통과주파수 80 Hz ~ 110 Hz 가진력 성분에 대하여 대형팬의 구동 오차, 외부 자연풍에 의한 불확실성 및 대형팬과 안테나 구조물간의 거리에 대한 보수적인 평가 등의 이유로 주파수 범위를 10% 확대하여 72 Hz ~ 121 Hz 주파수 범위에 대한 진동 저감을 최종 목표로 하였다.

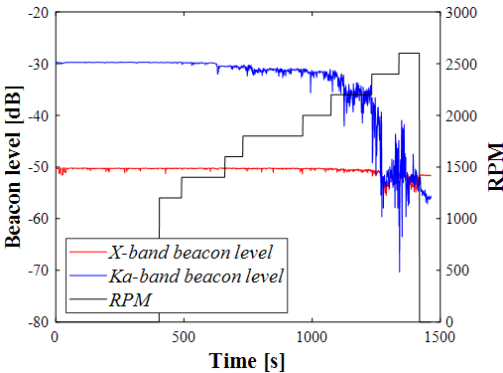


Fig. 6 Beacon levels according to RPM

Table 5 Averaged beacon levels according to RPM

Large fan drive RPM [r/min]	X-band beacon level avg. [dB]	Reception level drop [dB]	Ka-band beacon level avg. [dB]	Reception level drop [dB]
Idle	-50.32	-	-29.77	-
1200	-50.28	-0.04	-29.78	0.01
1400	-50.27	-0.05	-30.05	0.28
1600	-50.26	-0.06	-30.61	0.84
1800	-50.30	-0.02	-31.27	1.5
2000	-50.34	0.02	-31.86	2.09
2200	-50.60	0.28	-35.32	5.55
2400	-51.87	1.55	-48.26	18.49
2600	-52.33	2.01	-52.18	22.41

3. 풍속 환경 하의 진동 저감 방법론

대상 시스템은 대형 구조물로 직접적인 시험을 수행하는 것보다 유한요소해석을 통하여 진동 저감 방법론을 구축하는 것이 비용 및 시간 측면에서 효율적이다. 그리고 매우 다양한 장비들이 체결되어 있는 복잡한 구조물이기 때문에 2.1절에서 검증된 유한요소해석모델을 이용하여 해석을 기반으로 풍속 환경 하의 진동 저감 방법론을 제시하였다.

3.1 가진주파수 회피

풍속 환경 하의 진동 저감 방법으로 안테나 시스템의 구조 변경을 통하여 구조물의 취약 고유 모드를 대형팬 구동시 발생하는 가진주파수 범위에서 회피시키는 방법을 이용하였다. 일반적으로 진동 시스템의 임의의 변수에 대한 고유치의 변화는 변수에 대한 강성행렬과 질량행렬의 변화로 나타낼 수 있다⁽¹²⁾. 즉, 구조 변경에 대한 구조물의 강성행렬과 질량행렬의 변화 크기에 따라서 고유진동수의 변화량을 결정할 수 있다. 구조 변경을 통한 가진주파수 회피에 앞서 안테나 시스템의 진동 저감 목표 주파수 대역에서의

동특성을 확인하였다. 대형팬에 의해 발생하는 공기력은 특정 풍속에 해당하는 구동 RPM에 따라 날개 통과주파수 특성을 나타내기 때문에 구조물은 특정 주파수의 정현파 가진을 받아 진동이 발생한다. 따라서 구축한 유한요소해석모델을 기반으로 조화해석을 수행하여 가진주파수에 따른 구조물 응답을 확인하였다. 해석조건은 안테나 구조물에 대하여 정방향(안테나 반사판 정면)으로 풍하중이 작용할 때를 조건으로 하여 동일 방향으로 1g의 가속도를 인가하였고 급전혼 조립체 끝단의 응답을 추출하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 진동 저감 목표 주파수 대역에 대한 조화 응답 및 주요 피크에서의 급전혼 조립체 거동 형상이다. 69 Hz의 비대칭 굽힘모드, 106.5 Hz의 비대칭 비틀림모드 및 98.5 Hz, 102 Hz, 113.5 Hz, 119 Hz의 비대칭

면내 변형 모드 형태의 거동이 발생한다. 이러한 거동은 진동 저감 목표 주파수 대역에 있는 응답으로 대형팬 구동시 발생하는 공기력에 대한 취약 모드이므로 구조 변경을 통하여 해당 모드 고유진동수를 변경하여 가진주파수를 회피하였고 안테나 구조물의 진동 저감 효과를 분석하였다.

(1) 저주파 대역 회피

상대적으로 저주파대역에 있는 취약 모드인 69 Hz의 모드는 가진주파수 대역보다 더 낮은 주파수로 회피하는 것이 효율적이다. 기본적으로 구조물의 강성을 감소시키거나 질량을 증가시켜 고유진동수를 더 낮은 주파수로 회피할 수 있다. 하지만 가혹한 환경에서 운용되는 특성상 구조 건전성에 악영향을 미치지 않아야 하므로 질량을 증가시키는 방향으로 구조를 변경하였다. 임의의 구조 변경이 서로 다른 모드의 고유진동수에 미치는 영향이 각각 상이하고 특정 모드의 질량행렬에 미치는 영향이 클수록 고유진동수 변화 폭이 크다. 즉, 상대적으로 저주파 대역의 취약 모드에 질량효과가 크게 작용하고 상대적으로 고주파 대역의 취약

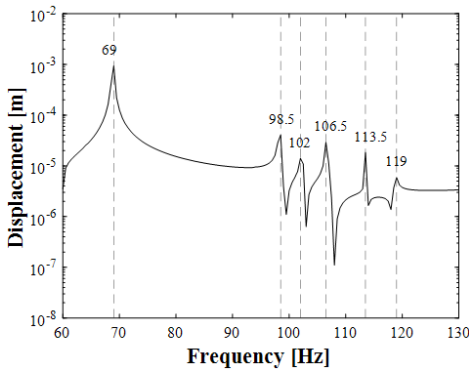


Fig. 7 Frequency response of antenna system

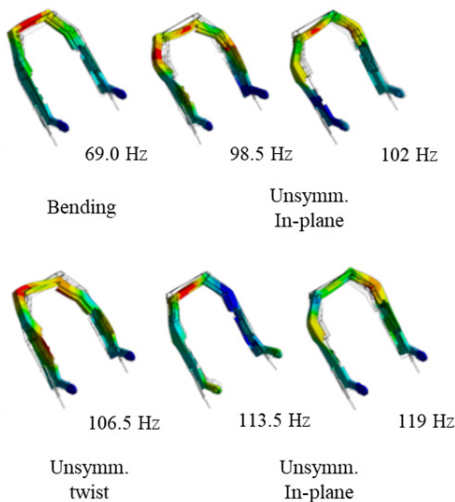


Fig. 8 Vibration shape of antenna system by frequency

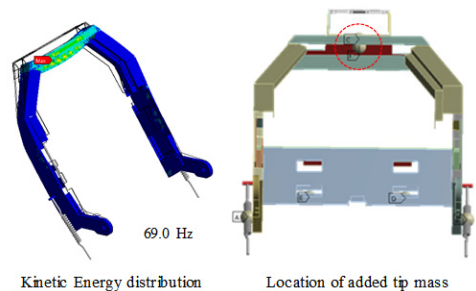


Fig. 9 Kinetic energy of 69 Hz mode and location of added mass

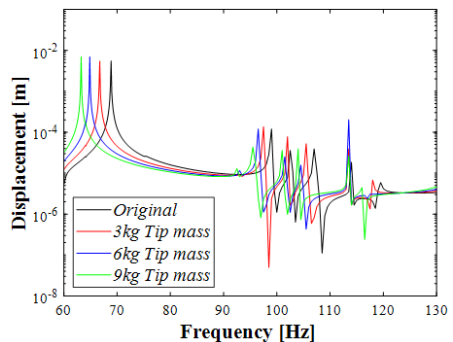


Fig. 10 Change of frequency response according to added tip mass

모드에는 질량효과가 작게 작용할 수 있는 위치를 선정하여 질량을 추가해야 한다. 따라서 Fig. 9와 같이 취약 모드인 69 Hz의 최대 운동에너지가 발생하는 위치를 확인하였고 해당 위치에 질량을 추가하였다. 운동에너지가 최대로 발생하는 위치에 대하여 질량을 다양하게 추가하였을 때 취약모드의 변화를 Fig. 10에 나타냈다. 추가되는 질량이 클수록 69 Hz의 취약 모드 고유진동수 감소가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 저주파대역의 취약모드의 운동에너지가 최대 지점에 질량을 추가했기 때문에 고주파 대역의 취약 모드의 고유진동수 변화 폭은 작은 것을 확인할 수 있다.

(2) 고주파 대역 회피

상대적으로 고주파대역에 있는 취약 모드인 98.5 Hz, 102 Hz, 106.5 Hz, 113.5 Hz, 119 Hz의 모드는 가진 주파수 대역보다 더 높은 주파수로 회피하는 것이 효율적이다. 구조물의 강성을 증가시키거나 질량을 감소시켜 고유진동수를 더 높은 주파수로 회피할 수 있지만 질량을 감소시키는 방법은 구조물의 부재를 제거하거나 재료 물성을 변경시켜야 하므로 비효율적이다. 따라서 강성을 증가시키는 방향으로 구조를 변경하였다. 저주파 대역 회피 방법과 마찬가지로 논리적으로 상대적으로 고주파대역의 취약 모드에 강성효과가 크게 작용할 수 있는 위치를 선정하여 강성을 보강해야 한다. 따라서 Fig. 11과 같이 취약 모드인 98.5 Hz, 102 Hz, 106.5 Hz, 113.5 Hz, 119 Hz의 최대 변형에너지가 발생하는 위치를 확인하였고 해당 위치에 대하여 강성 보강용 판재를 추가하였고 기존의 side block 길이를 증가시켜 강성을 보강하였다. 변형에너지가 최대로 발생하는 위치에 대하여 강성을 보강하였을 때 취약모드의 변화를 Fig. 12에 나타냈다. 강성이 보강됨에 따라 106.5 Hz의 비대칭 비틀림모드가 사라지고 98.5 Hz, 102 Hz와 113.5 Hz, 119 Hz의 비대칭 면내 변형 모드가 109 Hz와 129 Hz의 단일 모드로 고유진동수가 크게 증가하였다. 고주파대역의 취약모드의 변형에너지가 최대 지점의 강성을 보강했기 때문에 저주파 대역의 취약 모드의 고유진동수 변화 폭은 작은 것을 확인할 수 있다.

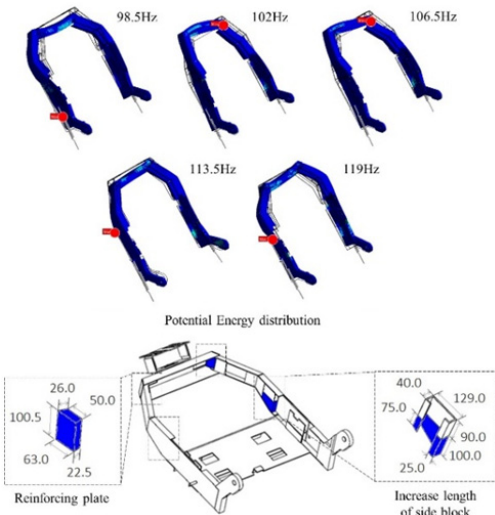


Fig. 11 Potential energy of 98.5 Hz, 102 Hz, 106.5 Hz, 113.5 Hz, 119 Hz mode and parts of reinforcement

취약 고유 모드의 최대 운동에너지가 발생하는 위치에 질량을 추가하고 동시에 최대 변형에너지가 발생하는 위치에 강성을 보강하였을 때 두 효과가 커플링되어 각 효과가 상쇄되는 한계가 있지만 유한요소 해석을 통하여 최대 에너지 발생 위치에 질량 추가 및 강성 보강을 하는 것이 매우 효과적으로 주파수 이동을 시킬 수 있다.

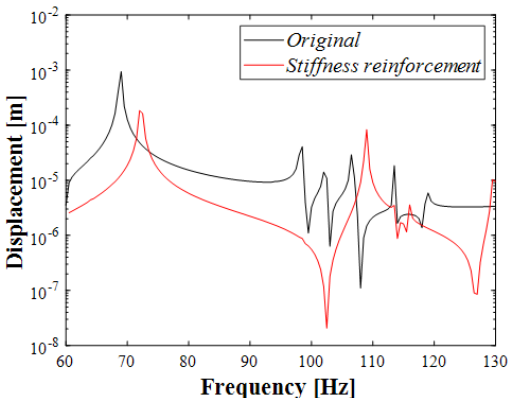


Fig. 12 Change of frequency response according to stiffness reinforcement

3.2 구조물 진동 수준 저감

대상 시스템의 동특성을 가진주파수 범위에서 회피시키는 방법 외에도 가진주파수 대역의 전체적인 주파수 응답을 감소시키는 방법으로 시스템의 진동을 저감할 수 있다. 주파수 응답 피크를 제거하거나 전체적인 구조물의 진동 수준을 감소시키는 방법이다. 이러한 방법으로 주로 사용되는 방법은 댐퍼를 설계하는 것이다. 일반적으로 댐퍼는 특정하고 고정된 위치

와 구조물을 연결하여 구조물의 진동 에너지를 소산시킨다. 하지만 군용 offset 안테나는 이동중 또는 강풍시 안테나 반사판을 접고 필요 상황에서만 운용한다. 그리고 정지 궤도 위성을 따라서 실시간으로 지향 및 추적하여 통신해야 하므로 반사판의 고각과 방위각이 변하게 된다. 따라서 댐퍼를 설치함에 있어서 공간적 제약과 구동환경적 제약이 따른다. 따라서 적절한 댐퍼 설치 위치를 선정해야 한다. 일반적으로 offset 안테나의 급전흔 조립체는 U자형 구조물로 저차 모드는 급전흔 조립체의 굽힘모드 및 비틀림모드가 발생하고 고차모드에서 면내 변형 모드가 발생한다. 이 연구의 대상 안테나 시스템의 진동 저감 목표 주파수 대역은 고차 모드가 발생하는 주파수 대역으로 Fig. 8과 같이 in-plane 변형 모드가 주로 발생한다. 따라서 면내 변형 모드에 의해 상대 변위(속도)가 최대인 위치를 선정하여 Fig. 13과 같이 급전흔 조립체 양단의

사이드 블록에 댐퍼를 설치하였다. 댐퍼는 일반적인 차량에 사용되는 사양인 6000 Ns/m의 댐핑 계수를 적용하여 해석상에 댐핑 요소를 사용하여 구현하였다. 댐퍼 추가에 따른 주파수 응답을 Fig. 14에 나타냈다. 각 피크가 제거되는 현상이 두드러지게 나타나는 것으로 댐퍼 설치의 효과를 확인할 수 있다. 실제로 군용 차량에 적용되는 댐퍼의 성능은 다양하지만 일반적으로 야지 및 비포장로를 설계기준으로 포함하기 때문에 일반 차량에 비하여 댐퍼의 성능이 우수하게 설계된다. 따라서 실제 군용 차량에 적용되는 고성능의 댐퍼를 적용하면 더 높은 진동 저감 효과를 나타낼 것으로 기대된다.

3.3 최적 진동 저감 개선안

앞서 언급한 가진주파수 범위 회피 및 전체적인 구조물 진동 수준 저감 방법을 조합하여 최종적인 진동 저감 개선 안을 도출하였다. 69 Hz의 굽힘 모드를 회피하기 위하여 해당 모드의 최대 운동에너지가 발생하는 위치에 3 kg의 질량을 추가하였고 전반적인 진동 수준을 저감하기 위하여 U자형 구조물의 상대 속도가 최대로 발생하는 위치에 댐퍼를 설치하였다. 그리고 고주파 대역의 비대칭 in-plane 모드 및 비틀림 모드를 회피하기 위하여 시스템의 구동에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 해당 모드의 최대 변형에너지가 발생하는 위치에 강성 보강재를 추가하였다. 강성 보강을 통하여 고주파 영역의 응답 주파수를 더 고주파 영역으로 옮기고 국부적인 강성 차이로 인하여 산재해 있는 응답 피크를 단일 피크로 변환하는 효과를 확인할 수 있다. 추가적으로 구조물의 강성이 증가하

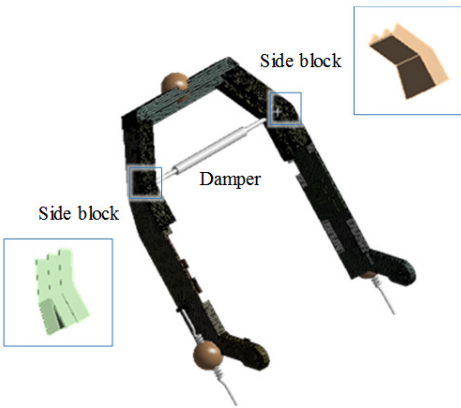


Fig. 13 Location of damper installation

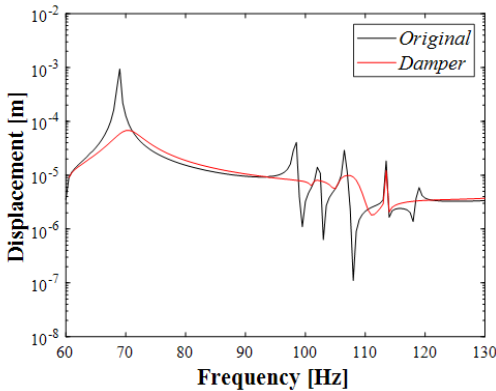


Fig. 14 Change of frequency response according to damper installation

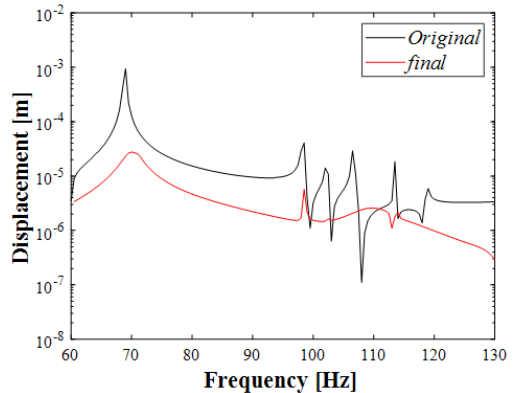


Fig. 15 Change of frequency response according to final structural improvement

였기 때문에 동일한 하중 조건에서 전체적인 응답의 저감 효과를 확인할 수 있다. 최종 진동 저감 개선안을 적용하였을 때 주파수 응답은 Fig. 15와 같다. 다수의 주파수 응답 피크가 제거되었고 전체적인 주파수 응답 크기가 감소한 것을 확인할 수 있다. 해당 진동 저감 개선안을 실제 안테나 시스템에 적용한다면 풍속 20 m/s 이하의 정상 운용 조건에서의 구조물 진동 감소 및 통신 성능 개선 효과를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

군용으로 사용되는 거대한 이동식 offset 위성통신 안테나의 바람에 대한 안테나 통신 성능을 평가함에 있어서 공간, 장비 및 비용적인 이유로 대형팬을 통하여 인공바람을 가하여 충분히 보수적으로 대체 시험을 수행한다. 이러한 풍하중이 가해지는 환경에서 거대한 접시형 반사판이 장착된 안테나는 진동에 매우 취약하다. 이 논문에서는 풍속시험을 통하여 인공바람에 대한 가진력을 분석하였고 대형팬을 통해 발생하는 공기력은 회전익에 의한 날개통과주파수 특성을 나타냄을 확인하였다. 정현파 형태의 가진력에 대하여 유효성을 검증한 유한요소해석 모델을 기반으로 진동 저감 방법론을 제시하였다.

- 대형팬에 의한 공기력은 날개통과주파수 특성을 가지므로 구조물을 충분히 가진할 수 있는 구동 RPM에 대한 가진주파수 대역을 확인할 수 있고 이를 바탕으로 진동 저감 목표 주파수를 선정한다.

- 가진주파수 대역의 주파수 응답을 분석하여 비교적 저주파 대역의 취약 모드에 대한 최대 운동에너지가 발생하는 위치에 질량을 추가하여 고유진동수를 낮추어 가진주파수를 회피한다.

- 비교적 고주파 대역의 취약 모드에 대한 최대 변형에너지가 발생하는 위치의 부재 및 체결 부품의 강성을 개선하여 고유진동수를 높여 가진주파수를 회피한다.

- 최대 운동에너지 및 최대 변형에너지 발생 위치는 각각 구조물의 질량행렬과 강성행렬에 큰 영향을 미치는 주요 위치이므로 취약 고유 모드의 고유진동수를 변화시키는 최적의 구조 변경 위치로 선정할 수 있다.

- Offset 안테나의 U자형 급전선 조립체의 고차모드는 일반적으로 면내 변형 모드가 발생하므로 공간

적/구동환경적 제약을 고려하여 최대 변위(속도)가 발생하는 위치에 댐퍼를 설치한다.

- 취약 고유 모드의 고유진동수를 변화시켜 가진력의 주파수를 회피하는 방법과 전체적인 진동 응답 수준을 감소시키는 방법을 조합하여 최적의 진동 저감 구조 개선안을 도출할 수 있다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M2D2A2048296)

References

- (1) US Department of Defense, 2008, Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, MIL-STD-810G.
- (2) US Department of Defense, 1985, Military Standard: Specification Practices, MIL-STD-490A.
- (3) US Department of Defense, 1963, Military Standard: Test Reports, Preparation, MIL-STD-831.
- (4) US Department of Defense, 2012, Interface Standard, MIL-STD-188-164.
- (5) Jeon, S. H., Lee, J. G., Jeong, S. H. S., Lee, M. J. and Oh, H. U., 2015, Verification of Micro-vibration Isolation Performance by Using Low Rotational Stiffness Isolator under Elevation Direction Operation of the X-band Antenna, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 238~246.
- (6) Park, J. S., Jung, S. Y. and Lee, Y. S., 2008, Effects of Vibration on Passive Intermodulation Distortion in Mobile Base Station Antennas, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 12, pp. 1394~1401.
- (7) Cho, H. K., Seo, J. K. and Myung, N. H., 2009, Spectrum and Equivalent Transient Vibration Analysis of Small Composite Satellite Structure, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 37, No. 6, pp. 586~594.
- (8) Kim, S. H., Jeon, J. I., Kim, B. J., Lee, J., Choi, J. H. and Hwang, K. M., 2016, The Study on a Correlation Among Wind Vibration and Aiming

Performance of Radio Wave for a Large Satellite Communication System on the Truck, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 6, pp. 744-754.

(9) Kim, S. H., Kim, B. J., Lee, J., Kang, D. S. and Lee, H. S., 2017, A Vibration Response Analysis of Large Offset Antenna in the Wind, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 27, No. 3, pp. 318-326.

(10) Dyrbye, C. and Hansen, S. O., 1997, Wind Loads on Structures, John Wiley & Sons, Inc, USA.

(11) Rodriguez, C. G., Equisquiza, E. and Santos, I. F., 2007, Frequencies in the Vibration Induced by the Rotor Stator Interaction in a Centrifugal Pump Turbine, Journal of Fluids Engineering, Vol. 129, No. 11, pp. 1428-1435.

(12) Jung, G. H., Kim, D.-O., Lee, C.-W. and Lee, I.-W., 1997, Algebraic Method for Computation of Natural Frequency and Mode Shape Sensitivities, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 21, No. 5, pp. 707-718.



Eun-Ho Lee received B.S. degrees from Yonsei University in 2016 and he is currently majoring in Structural Vibration in Yonsei University. He especially is interested in NPP component and structural vibration



Jong-Ik Jeon is research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. He received the degree of master from Hanyang University. His research interests are shock/vibration and fatigue/fracture.



Eui-Bong Jeong is research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. He received a Bachelor's degree in Dept. of Mechanical Engineering from Ajou University in 2000. His research interests are shock/vibration and

dynamics.



No-Cheol Park received B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Yonsei University in 1986, 1988, and 1997, respectively. Dr. Park is currently a professor at the department of Mechanical Engineering in Yonsei University. His research interest is

in Vibration & Optics