

차량 탑재형 안테나 포지셔너의 반사판 지지대 최적설계

Design Optimization of the Support Frame of an Antenna Positioner Mounted on a Vehicle

장태호¹, 김영식^{2,✉}
Taeho Jang¹ and Youngshik Kim^{2,✉}

¹ 한밭대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Hanbat National Univ.)

² 한밭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat National Univ.)

✉ youngshik@hanbat.ac.kr, Tel: +82-42-821-1163

Manuscript received: 2013.10.14 / Revised: 2014.3.25 / Accepted: 2014.4.11

In this research we present design optimization methods for a vehicle-mounted satellite antenna positioner. Our initial antenna positioner was conservatively designed to satisfy a worst case scenario where wind blew across the positioner at the speed of 120 km/h. Investigating stresses and safety based on Finite Element Methods (FEM), we find reflector support frames can be optimized to significantly reduce the weight of the positioner system. Thus, we optimize the reflector support frame from the given initial design while considering weight, maximum stress, maximum allowable deflection, cross section, and thickness. As a result, Shape C and the thickness of 2 mm are determined for the cross section of the reflector support frame. Applying this result, the weight of the new antenna positioner is 57.343 kg, which is decreased by 10.74% compared to the initial conservative design.

Key Words: Antenna Positioner (안테나 포지셔너), Optimization (최적화), Finite Elements Method (유한요소법), Wind Load (풍하중)

기호설명

P = Wind velocity pressure

ρ = Air density

V = Wind speed

F = Wind load

C_D = Drag coefficient

A = Area of reflector dish

1. 서론

본 논문에서는 최악의 시나리오로 설정한 120km/h의 풍속이 불 때, 구조적으로 안정한 차량

탑재용 안테나 포지셔너의 설계 최적화를 진행한 다. 안테나 포지셔너(Positioner)는 안테나 반사판을 원하는 특정 인공위성의 방향으로 위치시켜주는 모터로 구동되는 기계시스템이다.

안테나 포지셔너와 관련된 기존 연구들은 주로 제어 또는 전자 시스템에 집중하였다. : Noordin¹은 위성 시스템용 차량 탑재형 안테나 포지셔너의 구동 제어 방식을 제안하였다. J.R. Cleveland²은 56km/h 풍속에서 2.4미터 Tri-band 안테나 시스템의 tracking 성능을 연구하였다. 윤장희³는 안테나 포지셔너 시스템 모델에 대해 안테나 포지셔너가 기준 입력을 추종하는 강건한 2-자유도(two degree of freedom) 제어를 설계하였다. 하지만 안테나

포지셔너 기계부의 설계 최적화 관련 연구는 국내 외에서 찾아보기 힘들다.

기존 연구들이 주로 전자 제어 시스템에 대해 다루는 반면 본 연구는 구조적 안정성을 고려한 안테나 포지셔너 설계 방법에 대해서 논의한다. 우선 분석적 해석이 가능한 안테나 포지셔너의 단순화 모델을 제시하고 정적 평형을 고려한 FEM 해석을 통해 설계 파라미터를 최적화하였다.

안테나 포지셔너 성능의 주 요소는 반사판을 위성의 방위각과 양각 방향으로 정확하게 위치시키는 것이며 이를 위해 정적 및 동적 변형을 고려한 구조물 설계가 필요하다. 차량 탑재형 안테나 포지셔너는 외부에 노출되어 있어 태풍과 같은 극단적인 외력을 받을 수 있다. 이 때 포지셔너 작동 정밀도가 허용 범위를 만족하도록 변위 및 변형이 작아야 되기 때문에 이를 위한 충분한 구조적 강성이 필요하다. 또한 이동식 차량탑재형 안테나 포지셔너에서는 구조적 안정성에 더해, 휴대성과 연비 그리고 차량에 가해지는 스트레스 등을 고려한 경량화된 구조물 설계도 중요하다.

본 연구에서는 120km/h 풍속이 작용하는 최악의 시나리오를 고려하여 안테나 구조물에 작용하는 응력을 계산한다. 그리고 FEM과 분석적 해석을 통해 가장 취약한 부위를 결정한 다음 구조적으로 안정하며 변위가 적고 경량화된 구조물로 설계 최적화하였다. 120km/h를 최악의 풍속으로 선택한 이유는 상용 안테나 포지셔너들의 사양을 고려한 것이다.^{4,5}

기존 유한요소해석법은 제어부품의 동역학적 설계⁶ 및 전체 구조물과 부분품 해석⁷에 이용되었다. 본 연구에서는 유한요소해석법으로 안테나 전체 구조물의 취약부위를 결정하였다. 그리고 응력 및 변형 등을 고려한 안전성 평가에도 사용 하였다.

경량화를 위한 최적화 기법은 형상(Shape),⁸ 위상(Topology),⁹ 치수(Size)¹⁰ 최적설계가 많이 사용된다. 우리는 초기 모델링 형상을 유지하고 해석 시간을 단축하기 위해 Sizing Optimization 방법을 사용하였다. 구조물 두께 값을 변수로, 안전계수와 최대변위, 최대응력을 구속 조건으로 설정하여 최적화를 진행하였다.

본문은 다음과 같이 구성되어있다. 2장에서는 최악의 시나리오 아래, 초기 모델을 설계하고 안테나 포지셔너에 작용하는 응력을 계산한다. 3장에서는 안테나 포지셔너에 응력이 작용할 때 가장 취약한 부위를 유한요소해석법 및 분석적 해석으



Fig. 1 Antenna positioner

Table 1 Aluminum 6063-T5 properties

Property	Value	Units
Poisson's ratio	0.33	
Density	2700	Kg/m ³
Yield strength	145×106	N/m ²

로 확인하여 구조 설계 및 최적화를 진행할 것이다. 4장에서는 최적화 결과 도출 및 설계 형상에 따른 결과를 비교 검토할 것이다. 마지막으로 5장에서는 결론을 제시한다.

2. 모델링 및 응력 계산

본 연구의 대상 모델은 1.2m 직경의 원형 반사판을 갖는 위성통신용 차량탑재형 안테나 포지셔너이다. 이 포지셔너 구조물이 바람에 의해 받는 풍하중을 계산하고, 풍하중에 의한 압력분포를 구조물에 적용하여, 변위 및 변형 현상과 응력을 계산하고 최적화를 진행하고자 한다.

2.1 안테나 포지셔너 초기 모델링

Fig. 1은 기존에 설계한 안테나 포지셔너이다.본 연구에서는 편의상 이를 초기 모델로 선정했다. 이 모델을 가지고 최적화를 진행한다. 초기 모델의 반사판 지지대 형상은 사각 중공 프레임이며 두께는 5mm이다(Fig. 2 참조). 반사판 지름은 1.2m이다. 무게는 약 64kg이다. 프레임 재질은 Aluminum 6063-T5로 선정하였다. Table 1은 재질의 속성표이다.

2.2 풍하중 계산

바람에 의해 발생하는 최대 풍하중을 결정하기

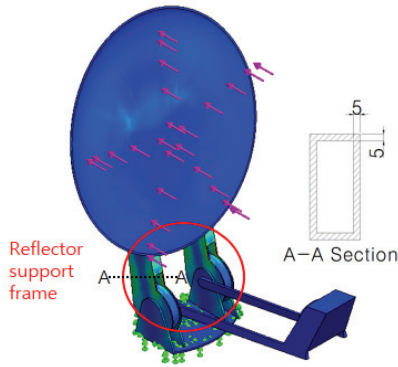


Fig. 2 Thickness of the support frame and FEM analysis applying 120km/h wind speed

위해 먼저, 속도압 P 를 Bernoulli 방정식¹¹을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P = \frac{\rho V^2}{2} \quad (1)$$

여기서 V 는 최대 풍속이며 120km/h(=33.33m/s)로 설정하였다. ρ 는 공기밀도이며 1.26 kg/m³이다. 따라서 최대 속도압 P 는 736.95 N/m²이다. 이 속도압을 사용하여 반사판에 작용하는 최대 풍하중 F 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = PC_d A \quad (2)$$

여기에서 면적 A 는 구조물 대부분의 면적을 차지하는 반사판 면적이다. 그리고 원형 반사판에 대한 항력계수 C_d 는 1.2로 적용된다.¹² 따라서 안테나의 최대 풍하중 F 는 대략 1kN이다.

3. 유한요소해석 및 최적화 설계

3.1 최대 모멘트 분석적 해석

Fig. 3는 앞에서 계산한 풍하중과 포지셔너 구조물들의 자중을 표시한 안테나 포지셔너 시스템의 자유 물체도(FBD)이다.

안정한 구조물 설계를 위해서 포지셔너에 작용하는 최악의 시나리오를 고려한다. 이를 위해 먼저 자유물체도로부터 모멘트를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T(\theta) = 1000.17 \sin \theta + 156.96 \cos \theta + 29.43 \cos \theta - 14.72 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (3)$$

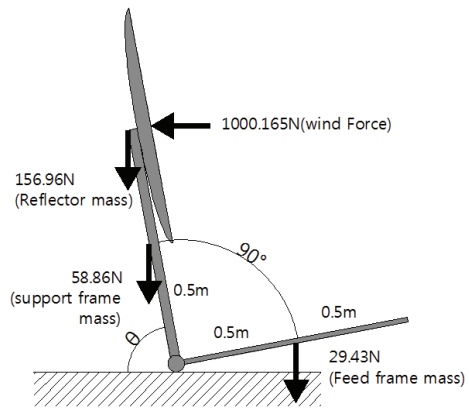


Fig. 3 FBD of an antenna positioner

이로부터 포지셔너에 작용하는 최대 모멘트 1002.92Nm와 그 때에 포지셔너 지지대의 각도 $\theta = 79.29^\circ$ 를 구할 수 있다.

3.2 초기 모델 유한요소해석

Fig. 2는 각도 θ 가 79.29° 일 때 풍하중이 작용하는 포지셔너의 응력분포를 보여준다. 반사판 지지대부(Reflector support frame)에 가장 많은 응력이 발생함을 알 수 있다. Fig. 4은 유한요소해석으로 얻은 응력값을 보여주며 $\theta = 79.29^\circ$ 일 때, 반사판 지지대에 최대 응력이 발생함을 확인해준다. 초기 모델링한 포지셔너에 작용하는 최대 응력이 12.28Mpa이며 반사판 지지대의 최대 변위는 0.39mm였다. 참고로 본 연구에서는 포지셔너의 정밀한 작동을 위하여 최대 허용 변위는 0.9mm로 설정하였다. Frame재질로 선정된 Aluminum 6063-T5의 항복 응력이 145Mpa이므로 구조적 안정성은 만족하며 안테나 포지셔너의 허용 변위량도 만족한다.

3.3 최적화 설계

이번 절에서는 구조적으로 안정하며 변위량도 만족하는 초기 포지셔너의 Reflector support frame을 경량화하기 위한 치수 최적화를 수행하였다.

최적설계를 위해 목적함수는 최소 질량으로 정하였다. 제한조건은 3.2절에서 언급한 것처럼, 변위 δ 가 허용 변위 δ_y (0.9mm)를 넘지않도록 정하였고 응력 σ 가 허용응력 σ_y (145Mpa)을 넘지않도록 정하였다. 여기서 허용 변위는 안테나 포지셔너의 백래쉬와 반사판 지지대 길이를 고려하여 보수적으로 결정하였다. 설계 변수는 Reflector support frame의 두께 t 와 단면의 형상으로 정하였다. 단면은

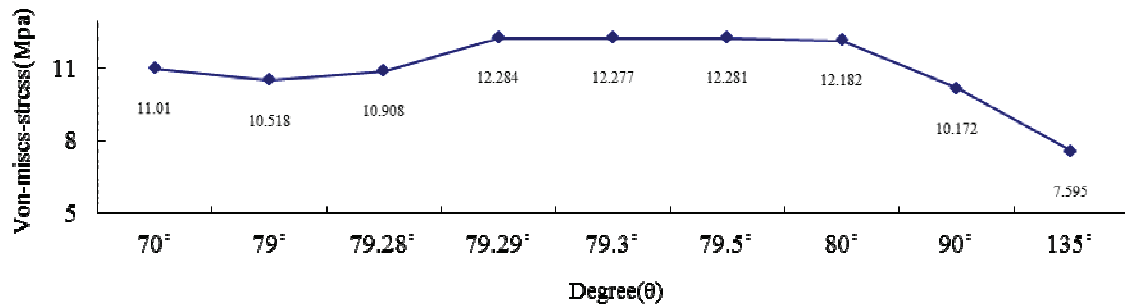


Fig. 4 Von Mises stress as a function of the angle of the support frame (θ)

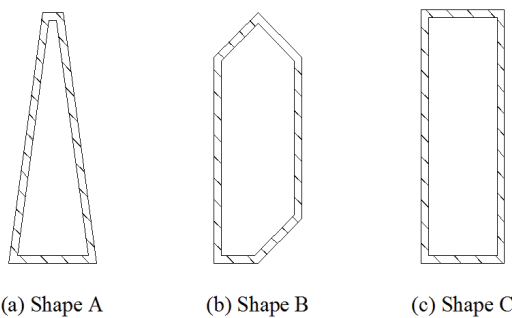


Fig. 5 Possible Cross sections for a support frame

Table 2 Configurations for size optimization

Cost function	Constraints
Min. Support frame mass	$\delta < \delta_y$ $\sigma < \sigma_y$
Initial value	Design variable(t, Cross section)
t:5mm, Shape C	$U = \{t 0 < t \leq 5\}$, Shape of Cross Section: (Shape A, B, C)

단순한 대칭 형상과 비대칭 형상을 비교하기 위해 Fig. 5와 같이 선정하였다. Table 2는 목적함수, 설계 제한조건, 설계변수, 초기값을 보여준다.

4. 최적화 결과 검토

최적화 설계 조건이 수립될 때까지 단면 shape 과 두께를 변화시키며 반복적으로 설계를 수행하였다. 설계 결과는 Fig. 6에 나와있다.

먼저 Fig. 6(a)에서, Shape A, B, C 모두 두께가 감소할수록 변위가 증가한다. Shape A는 약 2.9mm 에서, B는 2.4mm에서, Shape C는 1.9mm에서 허용 변위 0.9mm를 초과한다. 그러므로 Shape C의 t가

가장 작음을 알 수 있다. 이것은 Shape C가 질량 최소화에 적합함을 의미한다.

Fig. 6(b)에서 Shape A, B, C는 두께가 감소할수록 응력이 증가한다. Shape A, C는 작용하는 응력 크기가 비슷하나 Shape A가 더 큰 편이다. Shape B는 t의 범위가 2mm이상일 때, 중간에 감소되는 부분도 있지만 전반적으로 작용하는 응력이 상대적으로 크다. t의 범위가 2mm 이하일 때, Shape B는 가장 작은 응력을 받는다. 세 단면 모두 허용 응력 제한조건을 만족한다.

Fig. 6(c)에서는 shape A, B, C의 두께가 줄어들수록 무게가 감소하는 것을 보여준다. 세 단면형상에 대해 초기 무게는 같게 설정하였다. 두께가 감소할수록 Shape A, C는 비슷하게 무게가 감소한다. Shape B는 비교적 무게 감소가 적다. 그러므로 무게를 고려한 최적화에 shape A, C가 적합하다.

따라서 위 3가지 결과로부터 허용 가능한 형상 별두께와 무게를 고려하였을 때, Shape C가 최적화에 적합하며 2mm 두께까지 경량화 가능함을 확인하였다. Shape C는 실제로 1.9mm 두께에서 허용 변위를 초과하지만 안전계수와 제작 편의를 위해 2mm 두께로 정하였다. 그때에 반사판 지지대에 작용하는 응력값은 25.94Mpa로써 재질의 항복응력(145Mpa)보다 작으며 변위량은 0.85mm로써 설계제한조건($\delta_y < 0.9mm$)을 충족한다. 최적화된 포지셔너 질량은 57.34kg이며 초기 모델링보다 6.9kg (10.74%) 감소하였다. 참고로 지지부의 초기 무게는 12.58kg으로 포지셔너 전체 무게의 약 19.6%이다. 이는 반사판 무게(15kg)와 비슷한 값이다. 최적화 후에 반사판 지지부 무게는 5.7kg이며 무려 54.85% 무게 감소를 하였다. 응력과 변위량은 초기 설계에 비해 각각 117.2%, 120.42% 증가하였지만 구조적 안정성과 성능요구조건에 모두 충족하

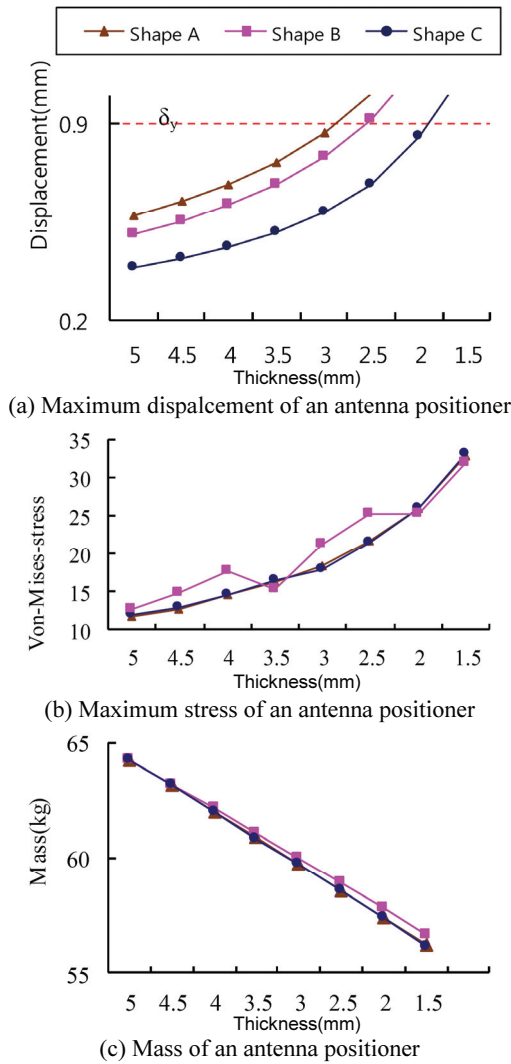


Fig. 6 Results of size optimization as a function of thickness

므로 문제되지 않는다고 판단된다.

초기 설계시, 자중은 64kg으로 상용 안테나 포지셔너와 비교하여 무거운 무게는 아니지만 본 연구의 최적화 설계를 통해 포지셔너 무게를 10.74% 감소하여 전체 구조물의 자중을 성공적으로 경량화할 수 있었다. 참고로 Aluminum 6063-T5 재료의 피로한도는 70Mpa이다.¹³ 최악의 시나리오인 120 km/h 풍속에서 최대 응력은 25.94Mpa이다. 그리고 실제 작동 환경은 한국의 연평균 풍속을 고려할 때 27km/h 이하이다. 따라서 Goodman의 기준을 고려할 때 피로에 대해서 안정하다.

5. 결론

본 연구에서는 풍속을 고려한 안테나 포지셔너의 구조 설계 및 포지셔너의 반사판지지부 최적화 설계를 진행하였다. 반사판지지부는 가장 많은 응력이 발생하는 부위이기에 보강을 많이 해놓은 상태이며 반사판에 이어 무거운 부분품이기 때문에 최적화 부위로 선정하였다. 먼저, 분석적 해석으로 최대 모멘트와 그 때의 각도를 구하였고 유한요소 해석을 통해 포지셔너 구조물의 취약부위를 확인하였다. 다음으로 치수최적설계를 통해 최적화를 진행하였다. 이를 통해 안테나 포지셔너의 설계 및 최적화를 달성하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 단순화모델을 통한 해석으로, 최악의 환경에서 안테나 지지부가 79.29° 기울어져 있을 때 바람에 의한 가장 큰 응력을 받는다는 것을 알았다. 그리고 정적 구조해석 결과, 최대 응력(25.94Mpa)은 안테나 반사판 지지대 상에 나타났으며 이 결과를 이용하여 반사판 지지대의 설계최적화를 진행하였다. 입력 변수는 지지부의 두께(Thickness)와 단면 형상으로 선정하였다. 최적화를 통해 지지대의 무게를 기존 대비 약 7kg 경량화하였다. 이는 지지대의 무게 54%를 감소시킨 것이다. 이를 통해, 차량 연비 개선과 자중에 의한 차량 및 포지셔너에 작용하는 스트레스 감소를 기대할 수 있다. 최적화된 모델을 FEM해석한 결과, 작용하는 응력은 증가하였지만 재료의 항복응력과 비교하여 무시할 정도이며 변위 또한 증가하였지만 일반 안테나 포지셔너의 허용 변위값과 비교하여 무시할 정도였다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동기술개발사업(No. C0028301)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

REFERENCES

- Noordin, N. H., Irawan, A., and Khalidin, Z., "A Proposal of Antenna Positioner Implementation on a Moving Vehicle for Geosynchronous Satellite System," *Electronic Design*, pp. 1-3, 2008.
- Cleveland, J. R., Parekh, S. V., and Johnson, A. F., "Light-weight transportable 2.4-meter tri-band

- antenna system for commercial and military satellites," MILCOM 97 Proceedings, Vol. 1, pp. 256-260, 1997.
3. Yoon, J. I., "The Design of 2-DOF Controller with Robust Tracking Performance through Feedforward Compensation," M.Sc. Thesis, Department of Control and Measurement Engineering, Kwangwoon University, 2000.
 4. AvL, "AvL Technologies Designs for Ultimate Performance," http://www.avltech.com/_manuals/AvLIPBroadbandVehicle-MountAntennaFamilyDataSheet04292013.pdf (Accessed 29 April 2013)
 5. C-COM, "C-COM Satellite Systems Inc.," <http://www.c-comsat.com/uploads/documents/Datasheets/120-0.pdf> (Accessed 16 April 2014)
 6. Kim, B. S., Lee, J. W., Kim, Y. S., Kim, J. D., and Lee, H. J., "The Study of Kinematic Analysis and Control by Optimum Design of Redundantly Actuated Parallel Robot," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 4, pp. 426-432, 2012.
 7. Ku, H. K., Kim, J. W., Won, C., and Song, J. I., "Optimization and Structure Analysis of Brake Disc for Free-fall Winch," J. Korean Soc. Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 55-61, 2012.
 8. Choi, J. H., Park, T. W., and Lee, J. H., "Stress Analysis and Shape Optimization of Dynamic Locking Tongue (DLT) using FEM," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 36, No. 6, pp. 699-705, 2012.
 9. Yang, S. M., Baek, S. H., and Kang, S. M., "Shape Design for Disc of a Double-eccentric Butterfly Valve using the Topology Optimization Technique," J. Computational Fluids Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 61-69, 2012.
 10. Cho, J. G., Koo, J. S., and Jung, H. S., "A study on Size Optimization and Material Substitution Method to Reduce the Weight of the Urban Transit," Proc. of the Rail Way Conference 2012, Vol. 15, No. 6, pp. 667-669.
 11. John, E. A., William, H., "Introduction to Fluid Mechanics," Prentice-Hall International, 3rd Edition, Paper No. 106, 1988.
 12. Gil, H. B. and Lee, I. G., "A Study on Design and Construction of Long Span Bridges," Korea Institute of Construction Technology, Paper No. 268, 2001.
 13. Kaufman, J. G., "Properties of Aluminum Alloys: Fatigue Data and the Effects of Temperature, Product Form, and Processing," ASM International, pp. 12, 2008.