

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 XIII

## Payload 구동용 모터의 회전 속도를 고려한 관측안테나의 동적 안정성에 관한 연구

### A Study on the Dynamic Stability of Observation Antenna Considering Rotational Speed by Payload Drive Motor

김재실<sup>1,✉</sup>, 신민재<sup>2</sup>, 금창민<sup>1</sup>, 김재민<sup>1</sup>, 최현오<sup>3</sup>  
Chae Sil Kim<sup>1,✉</sup>, Min Jae Shin<sup>2</sup>, Chang Min Keum<sup>1</sup>, Jae Min Kim<sup>1</sup>, and Hun Oh Choi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)

<sup>2</sup> 창원대학교 진동내구성연구센터 (Vibration Durability Research Center, Changwon National University)

<sup>3</sup> 씨엔케이 엔지니어링 (C&K Engineering)

✉ Corresponding author: kimcs@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3604

Manuscript received: 2016.6.10. / Revised: 2016.7.13. / Accepted: 2016.7.21.

*The article describes the determination of the dynamic stability for an observation antenna, considering the rotational speed by the payload driving motor. A finite element model of the observation antenna was made using the solid and beam elements. The connecting parts between the solid and the beam was adequately coupled. The boundary conditions were made by restriction of the degree of freedoms in the supporting points. With the comparison between the modal analysis results and the rotating speed of the payload driving motor, no resonance for the structure of antenna was identified and first natural frequency was determined under 33 Hz (Seismic Cut-Off Frequency). Therefore, the dynamic stability of the antenna was confirmed by the comparison between the seismic safety criterion and the stress results of the dynamic analysis applied the loading conditions and required response spectrum (RRS).*

KEYWORDS: Observation antenna (관측 안테나), Dynamic stability (동적 안정성), Seismic analysis (내진 해석), Modal analysis (모드 해석)

#### 1. 서론

최근 항공 산업 기술이 발전함에 따라 항공 산업에 필요한 관측 기술 또한 발전되고 있다. 특히 관측 기술에 필요한 관측 안테나는 관측 설비 중 전형적인 설비로 자리매김하게 되었으나 Fig. 1과 같이 안테나 단면에 비해 길이가 상대적으로 매우

긴 부재를 사용하면서 기하학적 형상이 발생하므로 외부 가진원 또는 힘이 적용된 동적 안정성 확보가 필요한 실정이다. 또한, 관측 안테나에 위치한 Payload를 구동하기 위한 모터의 회전 속도에 의하여 공진의 위험이 발생할 우려가 있는 실정이다.

앞서 언급한 기하학적 형상을 가진 구조물의 문제를 해결하기 위하여 정<sup>1</sup> 등은 대형 크레인 인

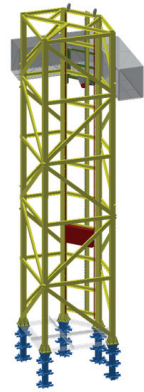


Fig. 1 Structural shape of observation antenna

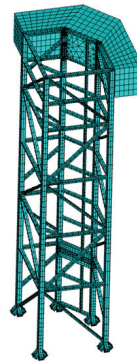


Fig. 2 Finite elements model of observation antenna

양용 마스트의 안정성 유무를 판단하기 위하여 마스트를 유한요소 모델로 구축한 뒤, 구조물의 하중과 태풍의 풍속을 고려하여 구조 해석을 수행하였다. 또한, 김<sup>2</sup> 등은 콜리엇 크레인 모델을 이용하여 풍하중과 지진하중을 적용한 구조 해석을 수행하였고 콜리엇 크레인 전체 설계 모델의 구조 안정성을 평가하였다. 언급된 논문 연구의 모델과 본 논문에서 사용된 관측 안테나는 기하학적인 형상을 가진 구조물의 안정성 유무를 판단하는 관점에서 유사하다. 하지만, 언급된 논문들은 크레인에 작용하는 외력만을 고려하여 구조 해석만을 수행하였지만 본 논문에서 연구하고자 하는 것은 Payload 구동용 모터의 회전 속도를 고려하여 관측 안테나의 공진 유무를 확인 후, 내진 해석을 수행하여 동적 안정성을 판단하는 부분에서 차이가 있다.

그러므로 본 논문에서는 관측 안테나의 동적 안정성을 판단하기 위하여 모드 해석을 수행 후 관측 안테나의 고유진동수를 도출하고 Payload 구동용 모터의 회전 속도를 고려하여 공진 유무를 확인하였다. 또한, 도출된 모드 해석 결과를 참고하여 지진 주파수 대역인 33 Hz를 기준으로 관측 안테나에 지진이 발생하였을 때의 상황을 고려한 내진 해석을 수행하였으며 도출된 결과를 바탕으로 지진에 대한 동적 안정성 유무를 판단하고자 한다.

## 2. Payload 구동용 모터의 회전 속도를 고려한 관측 안테나의 모드 해석

### 2.1 관측 안테나의 유한요소 모델 구축

관측 안테나의 동적 안정성을 판별하기 위하여 Fig. 2와 같이 해석용 유한요소 모델을 구축하였다.

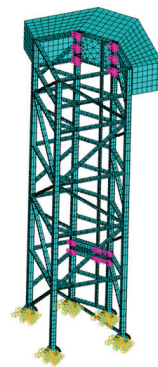


Fig. 3 Boundary condition of observation antenna

이 때, 사용된 요소는 Beam188 요소와 Solid185 요소를 사용하였으며 관측 안테나의 구조물은 기하학적 형상을 가진 Truss 구조이므로 상대적으로 단면에 비해 길이가 긴 부재는 Beam188 요소를 사용하였다. 또한, 관측 안테나의 구성 요소 중 Payload 및 Counter Mass는 Solid185 요소를 사용하여 유한요소 모델을 구축하였다. 구축된 유한요소 모델의 Elements 수는 6,653 EA, Nodes 수는 6,316 EA와 같이 생성되었다.

관측 안테나의 모드 해석을 수행하기 위하여 Fig. 3과 같이 경계 조건을 설정하였다. 관측 안테나의 하단부는 지면을 지지하도록 완전 고정되므로 병진 자유도 및 회전 자유도를 모두 구속하는 Fixed Support를 적용하였으며, 안테나 부재와 결합되는 Payload 및 Counter Mass는 서로 다른 요소를 사용하여 유한요소 모델을 구축하였으므로 각각의 자유도가 다른 요소를 하나로 통합하여 결합할 수 있는 Coupling 요소를 적용하여 경계 조건을 설정하였다.

Table 1 Material property of SS400

	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Yield strength [MPa]
SS400	200	0.3	7,850	245

이 때, 관측 안테나의 해석을 위하여 사용된 재질은 SS400이며 재질에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

2.2 관측 안테나의 모드 해석 결과 및 공진 분석

구축된 유한요소 모델과 경계조건을 적용하여 관측 안테나의 모드 해석을 수행하였다. 모드 해석을 통해 발생된 관측 안테나의 고유진동수는 1차 고유진동수부터 3차까지의 고유진동수 및 모드 형상을 도출하도록 설정하였으며, 해석 결과는 Table 2와 같이 정리하였다.

또한, 모드 해석을 수행하여 고유진동수 결과와 더불어 Figs. 4 - 6과 같이 관측 안테나의 각 차수별 모드 형상을 나타내었다.

관측 안테나의 1차 모드에서는 5.85 Hz의 고유진동수가 발생하였으며, 구조물 상단부에서 최대 변형이 발생하는 것을 확인하였다. 2차 모드에서는 6.81 Hz의 고유진동수가 발생하였으며, 1차 모드와 동일하게 구조물 상단부에서 최대 변형이 발생하는 것을 확인하였다. 마지막으로 3차 모드에서는 9.99 Hz의 고유진동수가 발생하였으며, 구조물 하단부에 위치한 보강재에서 최대 변형이 발생하는 것을 확인하였다.

위와 같이 도출된 관측 안테나의 고유진동수와 Table 3과 같은 사양을 가진 Payload 구동용 모터의 회전 속도를 비교하여 구조물의 공진 여부를 확인하였다.

Payload 구동용 모터의 회전 속도는 2,000 rpm으로써 33.3 Hz의 주파수로 구동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 모터가 평균적으로 구동할 때의 속도이며 관측 안테나의 고유진동수와 비교하였을 때 공진의 위험은 없다고 판단된다. 하지만, Payload가 정지 시에는 모터가 구동하지 않으므로 모터가 정지 시부터 구동할 때까지의 범위, 즉 0 Hz부터 33.3 Hz 사이의 범위를 적용하면 관측안테나의 고유진동수와 순간적으로 일치하는 영역이 발생되어 공진의 우려가 있다. 이를 해결하기 위해서는 정지된 모터를 구동할 때 회전 속도가 공진 영역에서 유지하지 않도록 주의가 요구된다.

Table 2 Natural frequency of observation antenna

Mode no.	Natural frequency [Hz]
1	5.85
2	6.81
3	9.99

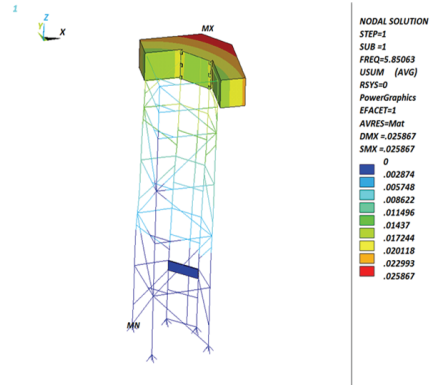


Fig. 4 1<sup>st</sup> Mode shape of observation antenna

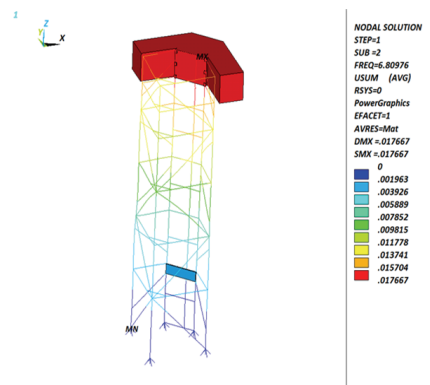


Fig. 5 2<sup>nd</sup> Mode shape of observation antenna

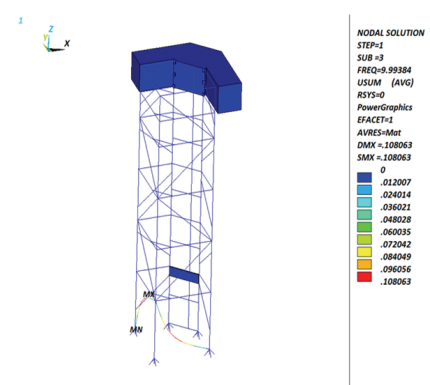


Fig. 6 3<sup>rd</sup> Mode shape of observation antenna

Table 3 Specifications of payload drive motor

Specification	Value	Unit
Rated speed	2,000	rpm
Rated power	3.1	kW
Rated torque	15.0	Nm
Rated current	4.4	A
Weight	18.3	kg

Table 4 Loading condition of seismic analysis

Operating condition	Loading combination
Normal	Dead weight
Upset	Dead weight + OBE seismic loads
Faulted	Dead weight + SSE seismic loads

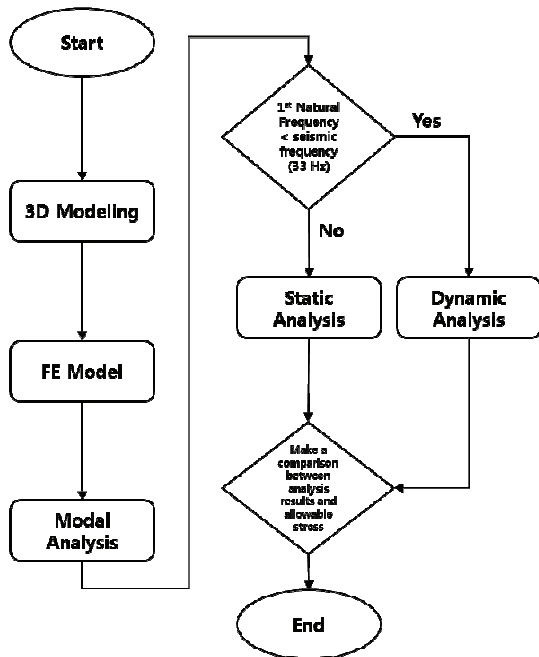


Fig. 7 Seismic analysis procedure of observation antenna

### 3. 관측 안테나의 동적 안정성 판별을 위한 내진 해석

#### 3.1 관측 안테나의 내진 해석의 절차

관측 안테나의 동적 안정성 판별을 위한 내진 해석의 절차는 Fig. 7과 같은 순서로 진행된다. 먼저, 관측 안테나의 3차원 모델을 구성하고 해석을 위한 유한요소 모델을 구축한다. 구축된 유한요소 모델을 이용하여 모드 해석을 수행 후, 도출된 구조물의 1차 고유진동수와 지진 주파수 대역인 33 Hz와 비교한다. 해석 결과와 지진 주파수 영역을 비교하여 구조물의 1차 고유진동수가 33 Hz 이내에 존재한다면 동적 해석을 실시하여 지진에 대한 동적 안정성을 확인하고, 만약 구조물의 1차 고유진동수가 33 Hz 이내에 존재하지 않는다면 정적 해석을 실시하여 지진에 대한 정적 안정성을 확인한다.

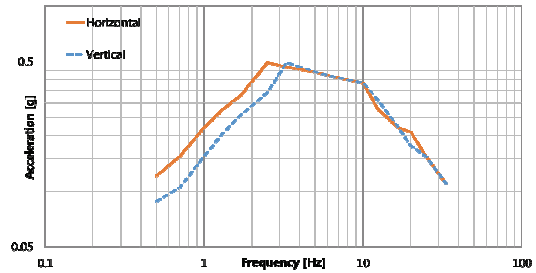


Fig. 8 Required response spectra of OBE

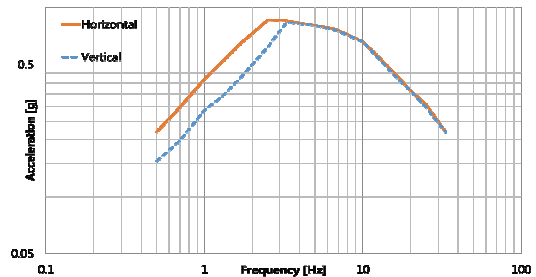


Fig. 9 Required response spectra of SSE

본 논문에 사용된 관측 안테나의 1차 고유진동수는 지진 주파수 대역인 33 Hz 이내에 존재하므로 동적 해석을 실시하여 관측 안테나의 동적 안정성을 판별하였다.

이 때, 특정한 하중을 작용하였을 때 단자유도계에서 발생하는 최대 응답에 대하여 모드 중첩법을 이용하여 다자유도계의 응답을 근사적으로 구하는 응답 스펙트럼 해석을 실시하였다. 또한, 내진 해석 시 적용되는 하중 조건은 Table 4와 같이 정<sup>3</sup> 등이 발표한 논문에서 수행한 내진 해석 방법 중 일부를 인용하였으며, Figs. 8과 9와 같은 요구 응답 스펙트럼 (Required Response Spectra)을 적용하여 해석을 수행하였다.

#### 3.2 관측 안테나의 내진 해석 결과

관측 안테나의 동적 안정성을 판별하기 위하여 하중 조건과 요구 응답 스펙트럼을 적용한 내진 해석을 수행하였다. 관측 안테나의 해석 결과는

Table 5 Comparison of maximum stress and allowable stress on the operating condition

Operating condition	Maximum stress [MPa]	Allowable stress [MPa]
Normal	15.3	147
Upset	90.6	195.51
Faulted	166	232.75



Fig. 10 Stress distribution of observation antenna (Normal condition)

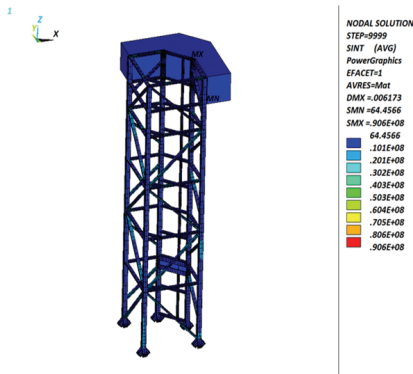


Fig. 11 Stress distribution of observation antenna (Upset condition)

하중 조건에 따른 허용 응력과 비교하였으며 Table 5와 같이 정리하였다.

또한, 하중 조건에 따른 응력 분포 형상을 Figs. 10 - 12와 같이 나타내었다.

관측 안테나의 하중 조건에 따른 내진 해석 결과, Normal 조건에서의 최대 응력은 15.3 MPa이 발생했으며, Upset 조건에서의 최대 응력은 90.6 MPa, Faulted 조건에서는 166 MPa의 최대 응력이 발생하였음을 확인하였다.

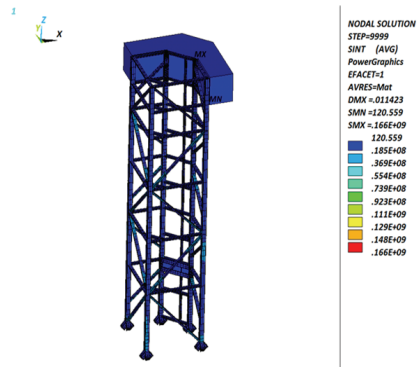


Fig. 12 Stress distribution of observation antenna (Faulted condition)

#### 4. 결론

본 논문에서는 Payload 구동용 모터의 회전 속도를 고려한 관측 안테나의 동적 안정성을 판별하기 위하여 다음과 같은 연구를 진행하였다.

(1) 관측 안테나의 동적 안정성을 판별하기 위하여 해석용 유한요소 모델을 구축하였다. 이 때, 관측 안테나의 유한요소 모델 구축 시 일반적으로 하나의 요소를 사용하지만, 본 논문에서는 관측 안테나의 보강재와 보 형태의 구조물은 Beam188 요소를 사용하였으며 관측 안테나의 구성 요소 중 Payload 및 Counter Mass는 Solid185 요소를 사용하여 유한요소 모델을 구축하여 연구를 진행하였다.

(2) 모드 해석 및 내진 해석을 수행하기 위하여 관측 안테나의 하단부는 지면을 지지하도록 완전 고정되므로 병진 자유도 및 회전 자유도를 모두 구속하는 Fixed Support를 적용하였으며, 안테나 부재와 결합되는 Payload 및 Counter Mass는 서로 다른 요소를 사용하여 유한요소 모델을 구축하였으므로 각각의 자유도가 다른 요소를 하나로 통합하여 결합할 수 있는 Coupling 요소를 적용하여 경계 조건을 설정하였다.

(3) 구축된 유한요소 모델과 경계조건을 적용한 관측 안테나의 모드 해석을 수행하여 고유진동수 및 모드 형상을 확인하였다. 또한, 관측안테나의 공진 유무를 판단하기 위하여 Payload 구동용 모터의 회전 속도와 관측 안테나의 고유진동수를 비교하였으며, 관측 안테나의 공진 위험은 없다고 판단된다.

(4) 마지막으로 관측 안테나의 동적 안정성을 판별하기 위하여 하중 조건과 요구 응답 스펙트럼

(Required Response Spectra)을 적용한 내진 해석을 수행하였다. 관측 안테나의 내진 해석 결과, 모든 하중 조건에서의 응력 결과는 허용 응력 이하에서 발생하므로 관측 안테나의 동적 안정성은 확보되었다고 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율연구 과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

## REFERENCES

1. Jung, H. H., Cho, H. M., and Kim, C. S., "A Study on the Stability of Mast for Hoisting a Large Crane," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 535-536, 2008.
2. Kim, J.-K., Shin, S.-H., Shin, Y.-I., Song, C. K., Lee, Y.-H., et al, "Structure Analysis and Evaluation of the 300ton Goliath Crane," Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers of Spring Conferences, pp. 25-28, 2010.
3. Jung, H. H., Cho, B. H., Kim, C. S., and Choi, H. O., "A Study on the Analytical Estimation of Structural Health for a Main Control Board in Nuclear Power Plant," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 1091-1092, 2012.