

침성대의 축조현황을 고려한 구조적 특성평가

Structural Characteristics Evaluation Considering Construction Circumstances of Cheomseongdae

김 호 수*
Kim, Ho-Soo

김 정 환**
Kim, Jung-Hwan

Abstract

Cheomseongdae is the masonry stone structure with the cultural and historical values. But, this structure has the various damages such as cracks, gaps, slope variations and ground subsidence. So, the interests for the safety security in the structural parts have been increased. Therefore, this study performs the structural modelling which considers the several damage cases, and then evaluates the structural behavior characteristics through the discrete element analysis. Especially, this study checks the swelling and displacement gap of the whole structure and the separation between the neighboring members.

Keywords : Cheomseongdae, Construction circumstances, Discrete element analysis, Structural behavior evaluation

1. 서론

침성대는 신라시대에 축조된 조적식 구조물로서 문화적, 역사적 가치가 높고 당시의 과학적 수준을 보여주는 귀중한 문화재라 할 수 있다. 그러나 오랜 세월이 지남에 따라 균열 및 이격, 기울어짐 현상 등의 다양한 손상유형이 나타나 구조적인 측면에서 안전성 여부에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재 침성대의 다양한 손상현황과 지반침하 현황을 고려한 구조모형화 방안을 실시하고 개별요소해석기법을 적용하여 침성대의 구조적 특성을 평가하고자 한다. 특히 해석결과의 다양한 분석을 통해 침성대의 배부름과 찌그러짐 및 이격발생부재의 벌어짐 현상을 검토하고자 한다.

2. 축조형식 및 손상현황

2.1 침성대의 축조형식

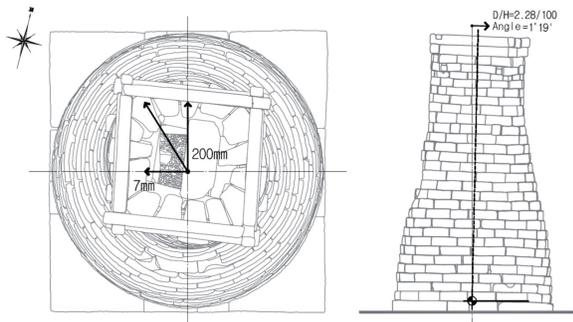
침성대는 크게 기단부, 원통부 및 정상부로 구분할 수 있다. 기단부의 기단은 지대석 위에 한 단이 있고 원통부는 총 27단이며 정상부는 2단으로 총 30단으로 축조되어 있다. 또한 남쪽의 13단부터 16단까지는 개구부가 존재하며 침성대의 하부는 퇴물림 기법으로 축조되었고 1단부터 12단까지는 내부에 적심이 채워져 있다.^{1,4)}

2.2 침성대의 손상현황

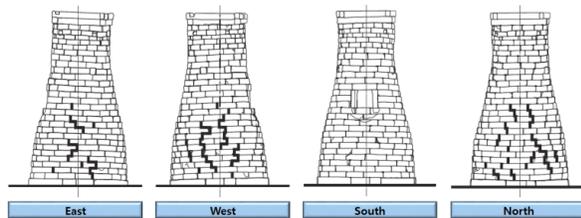
<Fig. 1>과 같이 현재 기단에서부터 북측으로 기울어져 있으며 이로 인해 기단 중심과 정자석 중심을 비교하면 북쪽으로 약 200mm, 서쪽으로 약 7mm 정도 기울어져 있고 입면상의 각도로 본다면 약 1°19' 기울어져 있다. 이에 따라 북쪽면을 중심으로 동쪽면과 서쪽면에서 석재와 석재 사이의 이격이나 균열 현상이 뚜렷하게 보이고 있다. 이러한 균열 및 이격 현상은 상부보다 12단 이하 하부쪽에서 더욱 진행된 상태였으며 상부에서는 면석 일부에서 석재 이탈의 조짐이 보이고 있다.^{1,5)}

* 교신저자, 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Eng., Cheongju University
Tel: 043-229-8483, Fax: 043-229-8483
E-mail: hskim@cju.ac.kr

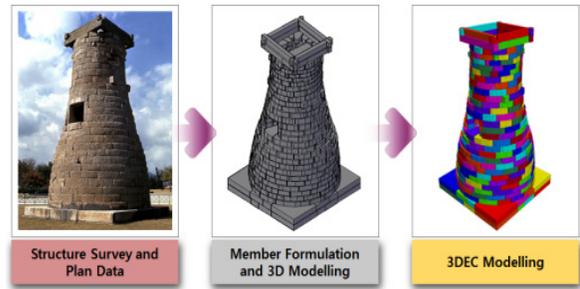
** 청주대학교 건축공학과 석사과정
Dept. of Architectural Eng., Cheongju University



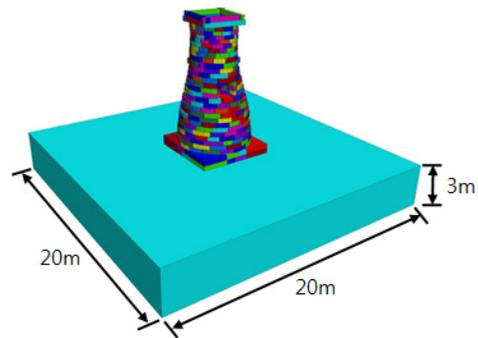
〈Fig. 1〉 Slope and angle variation



〈Fig. 2〉 Crack and separation of Cheomseongdae



〈Fig. 4〉 Structural modelling process

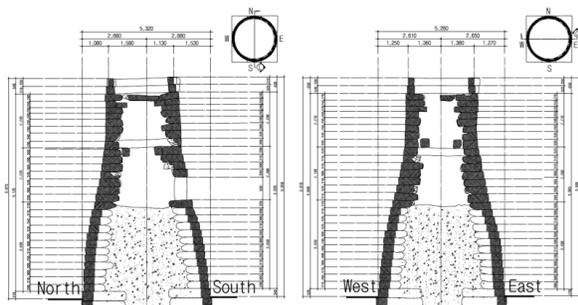


〈Fig. 5〉 Ground modelling

3. 구조모형화 및 해석기법

3.1 구조모형화 및 정형화 방안

본 연구에서는 보다 정확한 3D 모델링을 위해 <Fig. 3>과 같은 실측도면 자료의 각 단별 평면도, 입면도 및 단면도 등을 이용하여 <Fig. 4>와 같이 정형화 작업 및 3D 모형화 작업을 수행하고 이어서 3D 모형화의 부재 좌표를 도출하여 3DEC 모델링을 구축하는 작업을 수행하였다.⁵⁾ 또한 지반의 경우 <Fig. 5>와 같이 가로 20m, 세로 20m, 높이 3m로 설정하였으며, 지반물성치로는 밀도 $17kN/m^3$, 전단 계수 19MPa, 체적계수 40.9MPa가 적용되었다.



〈Fig. 3〉 Longitudinal and cross section

3.2 석재 및 절리면 재료특성분석

첨성대의 구조해석을 위해서는 석재 및 절리면의 재료특성에 대한 조사가 필수적이다. 따라서 '석조 문화재 안전관리 방안 연구보고서'의 내용¹⁾을 바탕으로 <Table 1> 및 <Table 2>와 같이 석재 및 절리면의 재료 특성을 설정하였으며, 풍화도 3등급의 데이터를 적용하였다.

〈Table 1〉 Material properties

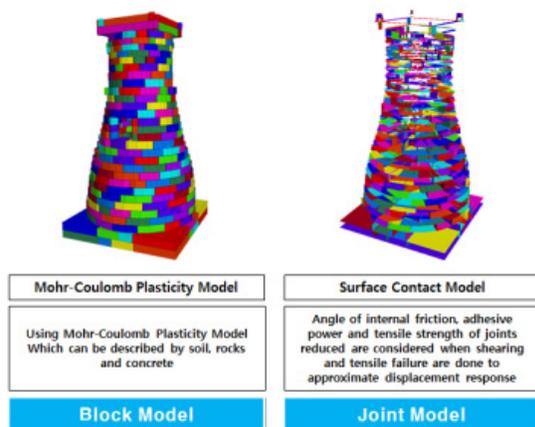
Variables	Average
Density (kg/m^3)	2,500
Poisson's ratio	0.26
Elastic modulus (GPa)	6.21
Compressive strength (MPa)	52.67
Tensile strength (MPa)	3.70
Viscosity (MPa)	6.87
Frictional angle (°)	52.93
Bulk modulus (GPa)	4.31
Modulus of rigidity (GPa)	2.46

<Table 2> Contact properties

Variables	Average
Roughness (JRC)	12~14
Viscosity (MPa)	0.01
Frictional angle (°)	24.5

3.3 해석기법 분석

침성대와 같은 조적식 구조물은 근본적으로 연속체구조물과는 다른 역학적 거동을 나타내는 불연속체구조물로서 다루어져야 한다. 불연속체 구조물의 역학적 거동을 파악하기 위해서는 특히 불연속면에 대한 모델링이 매우 중요하며, 불연속면의 역학적 특성을 잘 표현할 수 있는 개별요소법은 석재 사이의 미끄러짐, 큰 변위 및 회전, 균열에 의한 벌어짐, 석재의 완전한 분리, 새로운 접촉면의 탐색이 가능하다. 본 연구에서 사용되는 3DEC 프로그램²⁾은 불연속체 모델의 해석을 위해 개별요소법을 적용한 3차원 수치해석 프로그램으로써 <Fig. 6>과 같이 블록구성 모델과 절리면 구성모델을 이용하게 된다.⁵⁾ 따라서 블록구성 모델로는 모아-쿨롱소성모델을 사용하고 절리면 구성모델로는 면접촉 모델을 이용한다.



<Fig. 6> Block and joint modelling

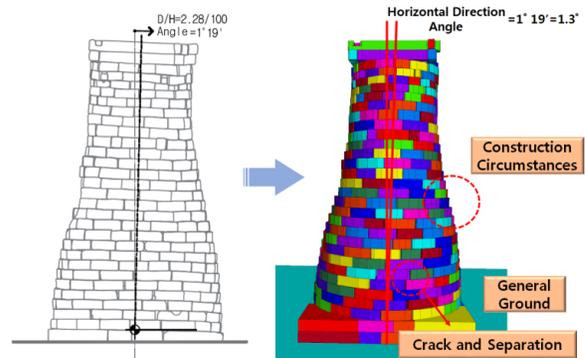
4. 해석결과 분석

4.1 해석모델 설정

4.1.1 기본모델

침성대의 기본적인 축조현황과 현재 발생된 균열,

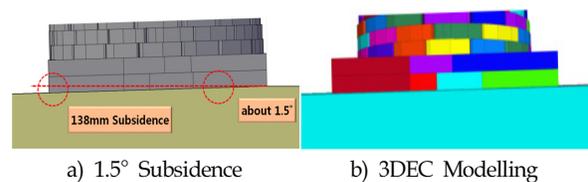
이격 등 각종 손상현황과 내부의 적심을 고려하였고 특히 <Fig. 7>과 같이 침성대의 수평방향 기울기 1°19' (약 1.3°)를 반영하였다. 또한 구조해석을 위한 작용하중으로는 석재의 자중을 연직하중으로 입력하였다.



<Fig. 7> Basic damage modelling

4.1.2 지반침하 반영모델

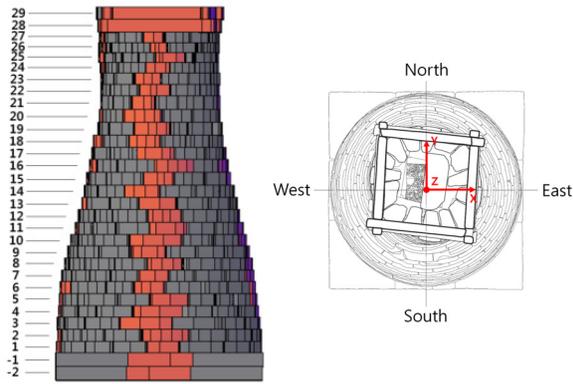
'석조문화재 안전관리 방안 연구보고서'의 기단 현황을 살펴보면 북측으로 침하현상이 크게 나타나고 있으며 남측 기단 좌측 모서리를 기준으로 하여 비교하면 북측 기단의 서측부분 모서리는 -116mm, 중앙부분은 -172mm, 동측부분 모서리는 -127mm 정도 된다. 이러한 북측의 침하현상을 모델링에 반영하기 위하여 <Fig. 8>과 같이 북측 기단의 침하량의 평균값인 138mm(약 1.5°)를 구조모형화에 고려하였다.



<Fig. 8> Damage modelling of ground subsidence

4.1.3 측정위치 및 방향축 설정

해석모델 및 설계변수에 따른 해석결과를 검토하기 위해 응력 및 변위의 측정위치 및 방향축을 <Fig. 9>와 같이 설정하였다.



〈Fig. 9〉 Check position and direction

4.2 해석결과 분석

4.2.1 기본모델

1) X축 응력 및 변위

〈Fig. 10〉과 같이 X축 응력검토결과, 일부 단을 제외하면 전체적으로 유사한 경향이 나타났으며, 하부에서는 북측에서 상대적으로 큰 경향이 나타나고 나머지 부분은 서로 비슷한 경향을 보여주었다. 또한 X축 변위검토결과, 동측과 서측의 변위가 하부에서 서로 반대방향으로 나타나며, 남측과 북측에 비해 상대적으로 큰 변위값을 보여주었는데 이는 하부의 벌어짐 현상과 관련이 있음을 나타낸다.



a) X-Stress

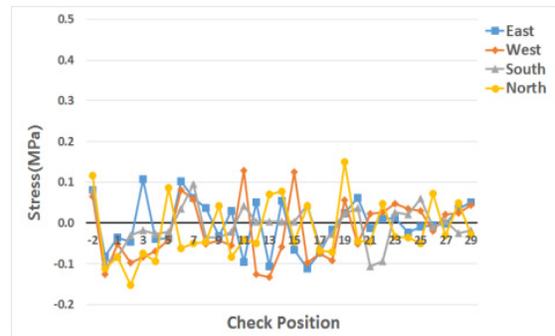


b) X-Displacement

〈Fig. 10〉 X-Stress and displacement

2) Y축 응력 및 변위

〈Fig. 11〉과 같이 Y축 응력검토결과, 전체적으로 비슷한 경향을 보여주었으며, 대체적으로 서측과 북측의 결과값이 상대적으로 크게 나타났고 남측의 결과값이 작게 나타났다. 또한 Y축 변위검토결과, 전체적으로 적심으로 채워져 있는 하부에서 북측의 변위가 다른 방향에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 특히, 동측과 서측은 기단석에서 18단까지 변위가 증가하다가 20단까지는 떨어진 뒤 다시 증가하는 경향이 나타났는데 이는 19단과 20단에 위치하는 비너석이 어느정도 긴결재 역할을 한 것으로 판단된다.



a) Y-Stress

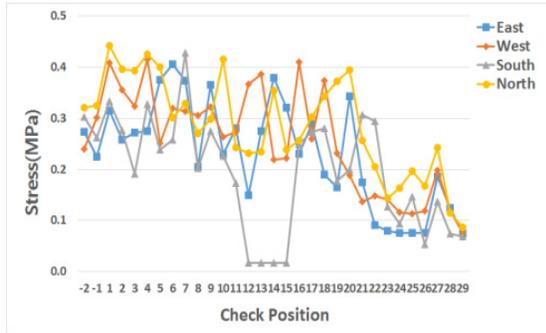


b) Y-Displacement

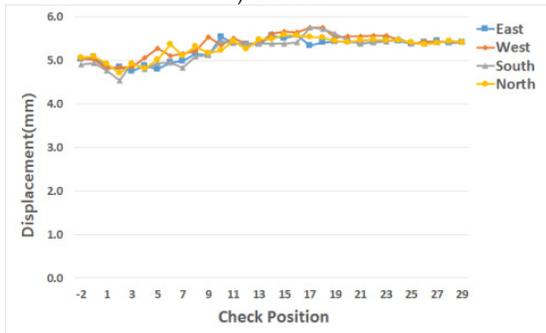
〈Fig. 11〉 Y-Stress and displacement

3) Z축 응력 및 변위

〈Fig. 12〉와 같이 Z축 응력검토결과, 전체적으로 X축, Y축 응력에 비해 상대적으로 변동폭이 크게 나타났으며, 상부에서 하부로 갈수록 응력값이 증가하는 경향을 보여주었다. 또한 Z축 변위검토결과, 모든 방향에서 하부에서 상부까지 4.5~5.8mm의 거의 일정한 변위값이 나타났다.



a) Z-Stress



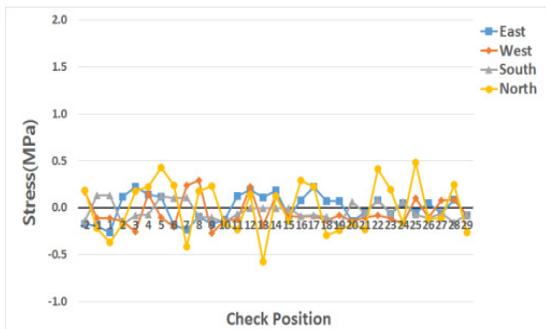
b) Z-Displacement

<Fig. 12> Z-Stress and displacement

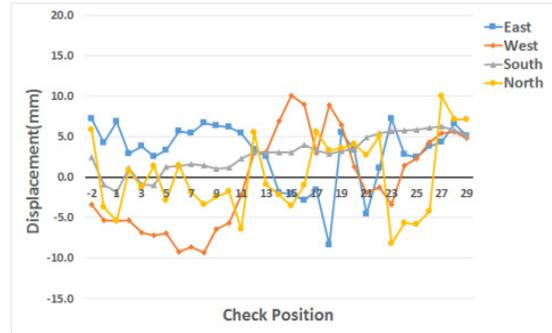
4.2.2 지반침하 1.5° 반영모델

1) X축 응력 및 변위

<Fig. 13>과 같이 X축 응력검토결과, 일부 부재를 제외하면 모든 방향에서 전체적으로 유사한 경향이 나타났으며, 그 중 북측이 상대적으로 큰 경향을 보여주었는데 이는 북측의 지반침하로 인해 북측의 일부 부재들이 집중하중을 받는 것으로 판단된다. 또한 X축 변위검토결과, 적심이 채워져 있는 하부에서 동측과 서측의 변위가 상대적으로 크게 서로 반대방향으로 나타났는데 이는 내부적심의 축압 영향과 함께 배부름현상과 관련이 있음을 보여준다.



a) X-Stress

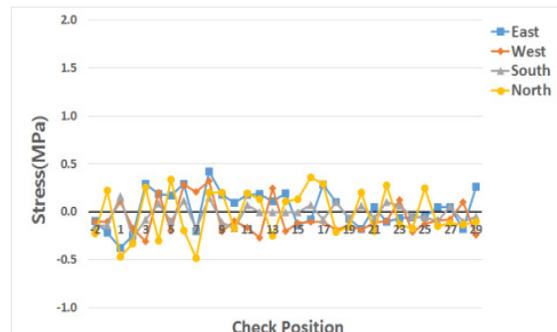


b) X-Displacement

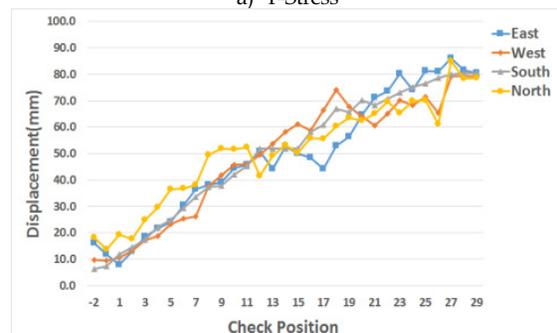
<Fig. 13> X-Stress and displacement

2) Y축 응력 및 변위

<Fig. 14>와 같이 Y축 응력검토결과, 모든 방향에서 유사한 경향을 나타내고 있으며, 특히 북측에서 상대적으로 큰 경향을 보여주고 남측에서 작은 경향을 보여주었다. Y축 변위검토결과, 전체적으로 하부에서 상부로 갈수록 변위값이 증가하는 경향을 보여주었고, 특히 적심이 채워져 있는 하부에서는 북측의 결과값이 상대적으로 크게 나타났다.



a) Y-Stress



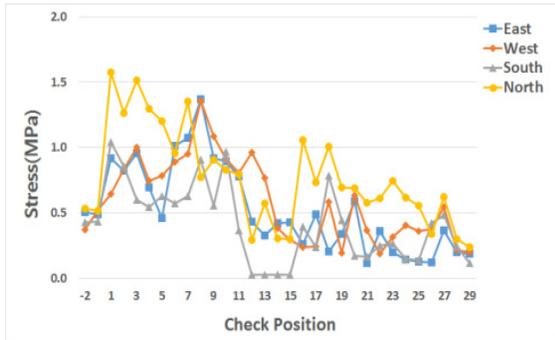
b) Y-Displacement

<Fig. 14> Y-Stress and displacement

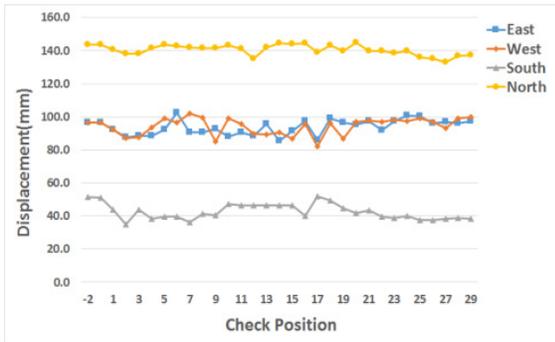
3) Z축 응력 및 변위

<Fig. 15>와 같이 Z축 응력검토결과, 전체적으로 상부에서 하부로 갈수록 응력값이 증가하는 경향을

볼 수 있으며, 북측에서 상대적으로 큰 값이 나타났다. 특히 최대응력은 약 1.6MPa로 기본모델의 최대 응력 0.46MPa에 비해 약 3.5배 증가하였다. Z축 변위검토결과, 북측이 가장 크게 남측이 가장 작으며 동측과 서측은 유사한 것으로 나타났다. 특히 최대 변위는 북측에서 약 144mm로 나타나 북측 지반의 평균 침하값 138mm보다 약간 증가한 것으로 나타났다.



a) Z-Stress



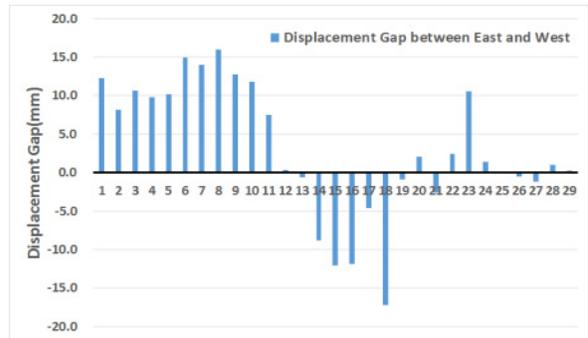
b) Z-Displacement

〈Fig. 15〉 Z-Stress and displacement

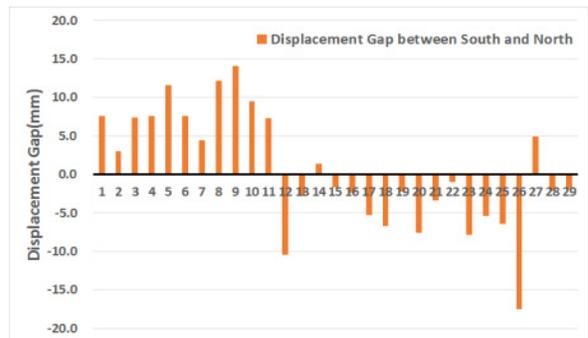
4.2.3 배부름 및 찌그러짐 현상 검토

지반침하 반영모델을 대상으로 <Fig. 16>과 같이 동측과 서측의 X축 변위차, 남측과 북측의 Y축 변위차를 각 단별로 측정하였고 각각의 변위차를 이용하여 배부름 현상과 찌그러짐 현상을 분석하였다.

동, 서측의 X축 변위차를 측정된 결과, 전체적으로는 하부에선 배부름 현상이 발생하였으며 상부에선 일부 찌그러짐 현상이 발생한 것으로 나타났다. 또한 남, 북측의 Y축 변위차를 측정된 결과, 하부 1단부터 11단까지는 배부름 현상이 발생하였고 12단 이후로는 찌그러짐 현상이 발생하였다.



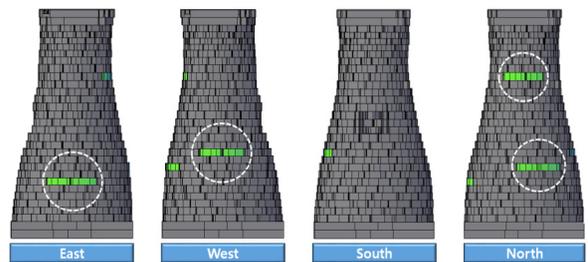
a) Displacement gap between East and West



b) Displacement gap between South and North
〈Fig. 16〉 Displacement gap

4.2.4 이격발생 부재의 벌어짐 현상 검토

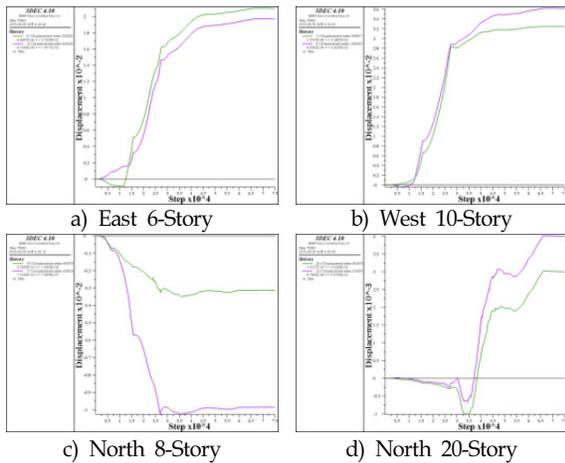
침성대에 이격이 발생된 부재에 대해서 벌어짐 현상의 진행 여부를 파악하기 위해 <Fig. 17>과 같이 지반침하 반영모델을 대상으로 동측 6단, 서측 10단, 북측 8단 및 20단에 이미 이격이 발생한 부재를 선정하여 X축 및 Y축 변위를 검토하였다.



〈Fig. 17〉 Separation check position

<Fig. 18>과 같이 벌어짐 현상의 분석결과, 동측 6단 부재의 경우 두 부재 모두 북측으로 이동하였으며 각각의 변위는 약 22mm와 20mm로 2mm의 벌어짐 현상이 발생한 것으로 나타났다. 서측 10단의 경우에도 두 부재 모두 북측으로 이동하였으며 그 변위값은 약 36mm 및 32mm로 변위차는 4mm

로 나타났다. 또한 북측 8단 부재의 경우 서측으로 이동하였고 그 변위값은 3mm와 10mm로 7mm만큼 벌어짐이 발생한 것으로 나타났으며, 북측 20단 부재의 경우 동측으로 이동하였고 그 변위값은 각각 4mm 및 3mm로 1mm로 매우 미소한 벌어짐 현상이 나타났다.



(Fig. 18) Separation check result

5. 결론

첨성대의 축조현황 및 손상현황을 고려한 구조모형화 및 구조해석 결과를 바탕으로 구조적 거동특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 해석모델에 따른 거동분석결과, 지반침하 반영 모델이 기본모델에 비해 상대적으로 큰 응력 및 변위값이 나타났다. 또한 전체적으로 응력은 상부에서 하부로 갈수록 증가하는 경향이 나타났는데 이는 상부하중이 하부로 전달되면서 부재자중의 누적과 함께 지반침하 현상이 반영된 결과로 판단된다. 변위의 경우 하부에서는 동측과 서측은 X축 변위가 상대적으로 크게 나타났고, 북측은 Y축 변위가 크게 나타났는데 이는 하부에 있는 내부 적심의 영향으로 배부름이나 벌어짐 현상과 관련이 있는 것으로 판단된다. 그러나 기본모델의 경우 응력 및 변위의 값이 미소하기 때문에 구조물의 전체적인 거동에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보여지지만 지반침하 반영모델의 경우 상대적으로 큰 값을 나타내어 전체 구조물의 안전성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

2) 배부름 및 찌그러짐 현상 검토 결과 전체적으로 하부에서는 배부름 현상이 발생하였고 상부에서는 찌그러짐 현상이 나타났다. 이는 1단부터 11단 내부에 있는 적심의 축압의 영향을 받아 배부름 현상이 발생한 것으로 판단되며 상부에서는 적심의 영향을 받지 않고 부재들이 개별적으로 거동하면서 찌그러짐 현상이 발생한 것으로 판단된다.

3) 이격발생 부재의 벌어짐 현상 검토 결과 내부 적심이 있는 단에서 적심이 없는 단보다 상대적으로 큰 벌어짐 현상이 발생한 것으로 나타났다. 이는 내부 적심의 축압의 영향으로 부재 사이의 이격이 발생된 것으로 판단된다. 특히 북측 8단 부재의 경우 벌어짐 현상이 7mm로 가장 크게 발생하였는데 이는 북측 지반침하로 인해 부재들이 이동하는 방향과 적심의 축압 방향이 일치함에 따라 변위가 증가한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014~2015년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 것임.

References

1. National Cultural Properties Research Institute, "Safety Management Research of Stone Cultural Properties", 2011
2. Itasca Consulting Group, 3 Dimensional Distinct Element Code User's Guide, 2003
3. H.S. Kim, S.I. Hong, "Analysis Method for Masonry Stone Pagoda using Discrete Element Method", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction Vol.23, No.2, 2007
4. K.T. Kim, "A Study on the Chumsungdae's Figures and Functions", Publication of the Korean Astronomical Society, Vol.28, No.2, 2013
5. J.H. Kim, H.B. Jeong, H.S. Kim, "Structural

Modelling Considering Construction Type of Cheomseongdae”, Proceedings of Korean Association for Spatial Structures, Vol.11, No.1, 2015

6. H.G. Choi, S.G. Hong, “Structural Analysis and Stability of Cheomseongdae based on Graphic Statics”, Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction Vol.26, No.1, 2006

- Received : July 08, 2015
- Revised : August 07, 2015
- Accepted : September 07, 2015