

석조구조물의 효율적 유지관리를 위한

형상역공학적, 지반공학적 및 구조동역학적 특성연구

- 침성대를 중심으로 -

손호웅¹⁾, 김성범²⁾

¹⁾배재대학교 토목환경공학과)

²⁾국립문화재연구소 유적조사연구실

Studies on the characteristics of stone structures by shape reversal,
geotechnical and dynamic structural engineerings

Howoong Shon¹⁾, Seong Beom Kim²⁾

¹⁾*Dept. of Civil and Geotech. Eng'g, Paichai Univ., Korea*

²⁾*Archaeological Studies Division, NRICP, Korea*

요 약 : 구조물의 시간경과에 따른 변형 및 성능저하 현상은 인위적 요인 및 시간경과에 따른 지반상태의 변화 혹은 지반 변위요인의 누적에 의해 발생한다. 본 연구에서는 경상남도 경주시에 위치한 침성대를 연구대상으로 설정하였다. 침성대는 약 1,300여 년 전 건립된 석축구조물로서 지반침하로 약간 기울어져 있으며, 일부 석재 사이의 틈이 벌어져 있는 상태이다. 본질적인 대책수립을 위하여 본 연구에서는 이러한 목적을 위하여 3차원 레이저스캐닝시스템에 의한 (형상)역공학적인 연구, 물리탐사에 의한 지반공학적인 특성 연구 및 고유진동수 측정에 의한 침성대의 동적특성 등의 다음과 같은 연구들을 수행하였다. 첫째, 정밀측량에 의한 침성대의 정밀한 변형량 측정 및 지속적인 변위측정을 위하여 3차원 레이저 스캐닝에 의한 침성대의 3차원 공간위치정보를 취득하여 형상역공학에 의한 3차원 벡터이미지 형상구현 및 침성대의 크기, 변위량, 변위방향 등 여러 가지 제원을 구하고자 하였다. 둘째, 다양한 비파괴적 물리탐사 방법들을 적용하여 침성대 및 주변 지반의 물성분포 및 지반특성을 파악하고자 하였다. 한편, 다양한 물리탐사를 통하여 향후 유사한 조사에 있어서 적절한 물리탐사 방법을 제시하고자 하였다. 셋째, 경주 침성대의 1/10 모형에 대한 동적특성실험 및 실물에 대한 고유진동수 측정을 통해 침성대의 구조적 특성을 연구하여 침성대의 구조특성 및 상태판단 및 동적특성 파악에 의한 내진성능을 판단하고자 하였다.

주요어 : 3D 레이저스캐닝시스템, 형상역공학, 변위, 기울기, 3D 전기탐사, GPR탐사, 굴절법 탄성과 탐사, 표면파 탐사, 동적전단탄성계수, 동적탄성계수, 동적특성, 고유진동수, 강성율, 지진하중

Abstract : Structures show the phenomena of deformation and lowering of function with time-lapse by artificial environments and changes of geotechnical conditions or accumulation of initial deformation elements. This study aims the structural assessment of cultural property, Chum-Sung-Dae, located in Kyeongju city, Korea. It was built about 1,300 years ago, and has undergone deformation and ground-subsidence with time-lapse. Non-destructive evaluation techniques were applied to the Chum-Sung-Dae, to protect it from survey. Because of this reason, 3D precise laser scanning surveying system was applied to measure the exact size of Chum-Sung-Dae, displacement and declining angles. Geophysical exploration also was applied to study the subsurface distribution of geotechnical parameters or physical properties. Natural frequencies were measured from real and model of Chum-Sung-Dae to study the dynamic characteristics of vibration and/or earthquake load and stiffness of structures.

Keywords : 3D laser scanning system, shape reverse engineering, displacement, declining angle, 3D electric survey, GPR survey, seismic refraction survey, MASW, dynamic rigidity modulus, dynamic elastic modulus, structural dynamic characteristics, natural frequency, stiffnesss, earthquake load

1. 서 론

구조물은 일반적으로 시간이 경과함에 따라 여러 가지 원인으로 변형 및 성능저하 현상이 나타난다. 즉, 자연환경에 노출되어 장기간에 걸친 풍화 및 기타 자연적, 인위적 요인에 의해 발생하게 되며, 시간경과에 따른 지반상태의 변화 혹은 초기 지반상태에서 지반 변위요인의 시간경과에 따른 누적에 의해 발생한다(손호웅 등, 2003).

본 연구에서는 석조구조물로서 경상남도 경주시에 위치한 첨성대를 연구대상으로 설정하였다. 첨성대는 약 1,300여 년 전인 신라 27대 선덕여왕 16년(647 A.D)에 건립된 것으로 추정된다. 1962년에 국보 제31호로 지정되었으며 경주 월성을 중심으로 반경 2-3km안에서 지상구조물로서 현재까지 그 원형을 보존되고 있는 유일한 귀중한 문화유산이다. 그러나 지반 침하로 약간 기울어져 있으며, 일부 석재 사이의 틈이 벌어져 있는 상태이다. 지금이 더 이상의 지반침하나 변형이 발생하지 않도록 관리해야 할 시점이라고 판단되며, 본질적인 대책 수립을 위하여 침하원인의 규명, 정밀한 변위량의 지속적인 측정 및 거동예측 등은 매우 중요하다고 판단된다. 본 연구에서는 이러한 목적을 위하여 크게 다음의 연구들을 수행하였다:

첫째, 정밀측량에 의한 첨성대의 정밀한 변형량 측정 및 지속적인 변위측정을 위하여 3차원 레이저 스캐닝에 의한 첨성대의 3차원 공간위치정보(x, y, z)를 취득하여 형상역공학(shape reverse engineering)에 의한 3차원 벡터이미지 형상구현 및 첨성대의 크기, 변위량, 변위방향 등 여러 가지 제원을 구하고자 하였다.

둘째, 첨성대의 문화재적 가치 때문에 첨성대 및 주변에서의 파괴검사에 의한 지반의 특성파악이 불가능하므로 다양한 비파괴적 물리탐사 방법들을 적용하여 첨성대 및 주변 지반의 물성분포 및 지반특성을 파악하고자 하였다. 한편, 다양한 물리탐사를 통하여 향후 유사한 조사에 있어서 적절한 물리탐사 방법을 제시하고자 하였다.

셋째, 경주 첨성대의 1/10 모형에 대한 동적특성실험 및 실물에 대한 고유진동수 측정을 통해 첨성대의 구조적 특성을 연구하여 첨성대의 구조특성 및 상태판단 및 동적특성 파악에 의한 내진성능을 판단하기 위함이다.

2. 첨성대에 관한 제연구

瞻星臺는 경상북도 경주시 仁旺洞에 자리 잡은 동양 最古의 천문대로 알려진 석조 구조물로 1962년 12월 20일 국보 제31호로 지정되어 현재까지 원형을 유지한 채로 관리되고 있다.

첨성대의 건립에 대하여는, 『삼국유사(三國遺事)』 「善德王 知幾三事」 조에 ‘別記云是王代鍊石築瞻星臺(별기에 말하기를 이 임금 때에 돌을 다듬어 첨성대를 쌓았다)’라고만 나와 있어 정확한 연대는 알 수 없으나, 선덕여왕 재위시(632~646)에 건립되었을 것으로 짐작된다. 『世宗實錄』의 첨성대에 관한 내용은 다음과 같다: “첨성대(瞻星臺). 부성(府城)의 남쪽 모퉁이에 있다. 당나라 태종(太宗) 정관(貞觀) 7년 계사(癸巳: 서기 633년)에 신라 선덕여왕(善德女王)이 쌓은 것이다. 돌을 쌓아 만들었는데, 위는 방형(方形)이고 아래는 원형(圓形)으로, 높이가 19척 5촌, 위의 둘레가 21척 6촌, 아래의 둘레가 35척 7촌이며, 그 가운데를 통하여 사람이 올라가게 되어 있다.” 또한 『新增東國輿地勝覽』에는 “첨성대 안을 사람이 오르내리면서 천문을 관측했다”는 내용이 있고 『東京雜記』에는 “첨성대는 官府의 동남쪽 3리 되는 곳에 있으며 治石한 돌로 만든 臺로서 위는 方形이고 아래는 圓形으로 되어 있다. 높이는 19尺이며 그 속에 사람이 오르내리게 되어 있고 기상과 天文을 관측했다”라고 기록되어 있어 첨성대가 천문대였음을 암시하고 있다.

첨성대가 처음으로 학계에 알려진 것은 구한말부터 한국 관측소의 책임자로 우리나라에 와 있던 일본인 천문기상학자 와다유지(和田雄治)가 1910년과 1917년의 두 차례에 걸쳐 발표한 논문에 의해서였다(和田雄治, 1917). 그 후 1962년 洪思俊에 의해 첨성대가 최초로 실측되어, 평면도, 입면도, 전개도 등이 작성되었으며, 미터 단위로 정리하면 그 결과는 다음의 Table 1과 같다(홍사준, 1963).

Table 1. The result surveying of Chumsungdae

1. 높이(기단부의 윗단 포함)		9.11m
2. 원통부의 복원 직경	1단	4.93m
	27단	2.85m
3. 기단부의 넓이	상부	5.18m×5.18m
	하부	5.36m×5.36m
4. 단위석재의 개수	원통석	362개
	정자석	16개
	남창구문 주석	2개
	내부판석	1개
	합계	381개

첨성대의 기능 및 용도에 관한 논쟁은 가장 활발히 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔지만 그에 대한 결론은 아직 내리지 못하고 있다. 이는 독특한 형태와 기능 및 용도를 결부시키는데 많은 문제점을 갖고 있기 때문이다. 첨성대의 기능 및 용도에 대한 학설은 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 천문대, 즉 천문관측을 하는 곳이라는 학설(홍사준, 1963, 1965, 1967; 유경노, 1974; 전상운, 1964; 남천우, 1974, 1987; 박홍수, 1979; 和田雄治, 1917)로서 첨성대 위에 목조 구조물이 세워져 혼천의(渾天儀)등의 관측기가 설치되었다는 설이다.

물리탐사 기술 심포지움

둘째, 첨성대가 실제로 관측에 사용된 것이 아니며, 수학, 천문학에 관한 주비산경(周髀算經)의 내용을 반영, 축조한 상징적인 탑이라는 설이다(김용운, 1974, 1974).

셋째, 첨성대는 천문관측과는 관계가 없으며, 수미산(須彌山)의 형태를 본떠서 만든 제단(祭壇)이라는 설이다(이용범, 1974, 1987, 1993; 박성래, 1980, 1982).

넷째, 첨성대는 시각을 알리기 위한 時報臺라는 학설로서(성남해, 2002), 그 이유로서 현재 여러 사찰의 瞻愴閣에서 “때를 받는(有時)” 의식절차를 행하고 있으며, 첨성대의 창이나 내부 중간 공간구조가 음향조절을 위한 것으로 보고 있다.

이러한 첨성대의 기능 및 용도에 관한 연구 및 학설은 많이 존재하고 있으나, 첨성대에 대한 정밀한 측량에 의한 제원, 구조공학적 연구사례는 거의 없다고 해도 과언이 아니며, 특히 구조특성과 지반에 대해서는 연구된 바가 없다.

첨성대의 석재는 화강암이며, 석재와 석재사이에는 회반죽과 같은 교착제를 사용하지 않았다. 인위적으로 조성된 지반위에 2층의 기단이 구축되었고, 그 상부에 원통부가 구축되었다. 원통부 12단까지는 내부에 채움재(잡석)로 채워져 있으며, 원통부 중간에는 출입을 위한 남향의 문이 있고 출입구 상부에는 원통부의 변형을 구속하기 위한 장대석이 원통부를 가로 지르고 있다. 그리고 첨성대의 최상부에는 井字石이 놓여 있다. 석재의 수는 하층부터 27단까지 362매, 지대석 8매, 기단 12매, 井字石 2단 28매, 중간 정자석(25, 26단 및 19, 20단) 8매, 남측門柱 2매, 27단의 판석 1매로 구성되어 있다.

2.1 고밀도 정밀 3차원 측량을 통한 구조물의 역설계

형상역공학(shape reverse engineering)은 형상을 재현하는 기술로서 고밀도 고정밀 3차원 측량을 통하여 실물을 측정하고(Fig. 1-2), 측정데이터를 구조화된 점집합 모델로 변환하며, 변환된 점집합 모델(Fig. 3a)로부터 3D 모델이나 texture를 갖는 3차원 형상 모델(Fig. 3c, d)을 구성하게 된다. 이를 위하여 3차원 레이저스캐너(3D laser scanner)를 활용한다. 3D laser scanning system은 정밀하고 빠르게 물체의 3차원 형상을 측정할 수 있는 시스템이다. 3D laser scanning system은 기본적으로 종전의 레이저 측정기의 기능을 갖고 있으나, total station의 단순한 1점측량에서 벗어나 현재로서는 초당 최대 5,000점까지 레이저를 대상체 표면에 발사하여 대상체의 표면형태를 (x, y, z) 의 공간위치정보를 갖는 무수한 측정점군(point-cloud)으로서 표현하게 된다. 이로써 토목, 플랜트 시설과 같은 산업시설에서부터 건축물, 지형 및 문화재들을 3차원 도면 및 수치화하여 관리 할 수 있게 되었다(Bohler *et. al.*, 1989; 손호웅 등, 2003).

3D laser scanning system의 대상체면에 투사한 laser光의 간섭이나 반사를 이용하여 대상체면상의 측정점의 공간정보를 획득하는 측정방식으로서, 3차원 정밀 측량은 대상체의 표면으로부터 상대적인 3차원 (x, y, z) 공간좌표를 각각의 point data로 기록하며, 측정방법에 따라 일정량의 굴절각 증분을 주기 위해 하나 또는 두 개의 mirror를 사용하거나, 장비 전체가 회전하여 3차원 공간좌표를 얻는다. 3차원 Laser scanning에 의한 정밀측량의 위치 측정 방법은 다음과 같은 방법들이 있다.

(1) 주행시간법

주행시간(time-of-flight; TOF)측정방법은 Ranging으로도 불리며, Fig. 1에서와 같이 레이저가 반사되어 돌아오는 시간을 계산하여 거리를 결정하고 R_h 와 R_v 각도만큼 수평, 수직으로 회전하여 측정된 점 P 위치를 결정하는 방법이다.

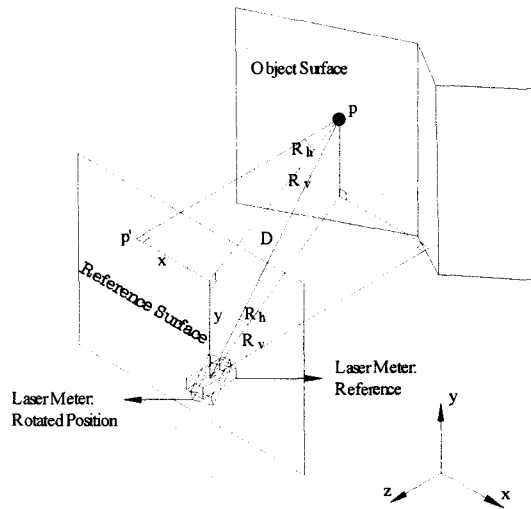


Fig. 1. Time-of-Flight Method.

(2) 광삼각법

간단한 삼각법(triangulation)원리를 이용한 방법이며, Fig. 2와 같이 레이저가 점이나 선으로 대상 물체 표면에 투영되는 것으로 하나 또는 그 이상의 CCD 카메라로 물체의 위치를 기록한다. 레이저 빔의 각도는 스캐너가 내부적으로 기록하고, 고정된 Base 길이로부터 기하학적으로 대상 물체와 장비의 거리가 결정되는 방법이다.

정확도는 스캐너의 기선길이와 물체와의 거리에 의존하며, 정밀도가 높은 반면에 시간이 오래 걸린다는 것과 실물에 주사된 레이저가 CCD 카메라로 구분이 가능해야 하므로 직사 광성이 있는 곳에서는 데이터의 오류가 많이 발생하므로 보다 좋은 데이터를 얻기 위해서는 야간에 측량해야하는 불편함을 가지고 있다.

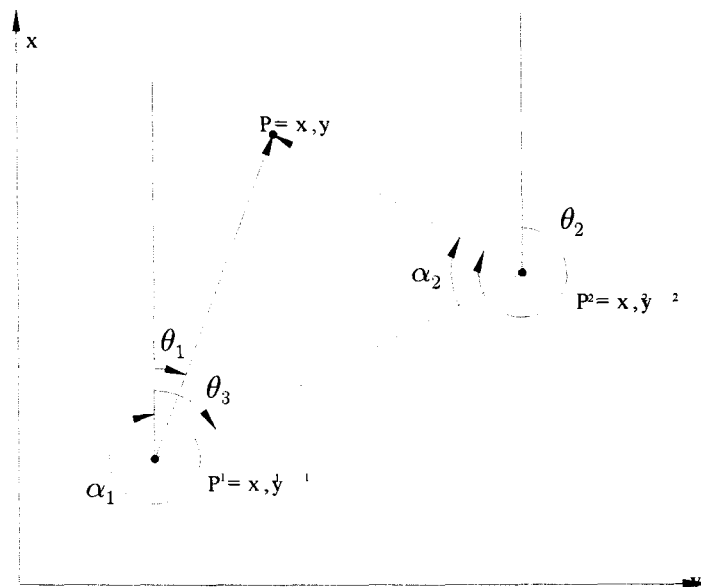


Fig. 2. Triangulation Method.

레이저 스캐너 내부에서의 관측각(θ_1, θ_2)을 사용하여 기지점을 근거로 미지점의 위치를 개별적으로 구하는 방법으로서, 주로 전방회회법이 적용된다. 기지점(레이저스캐너에 의해 인식된 임의의 기계좌표)에 기기를 설치하여 미지점의 방향을 관측하여 그들 방향선의 교점으로서 미지점의 위치를 결정하는 방법이다.

본 연구에서는 침성대의 정밀한 변위를 측정하기 위하여 광삼각측량법에 의한 laser scanning system(S25, Mensi)을 주로 사용하였으며 정확도 검증 및 오차조정을 위하여 TOF방식의 laser scanning system(GS100, Mensi)을 활용하였으며, 3차원 형상의 정합(registration or merging)의 정밀도 및 조정(adjustment)을 위하여 total station을 사용하였다.

침성대는 3차원 구조물이므로 세 방향에서 각각 측정을 하여, 각 측정군을 정합함으로써 3차원 벡터이미지 형상을 구현하였으며, Fig. 3과 같은 과정에 의한다.

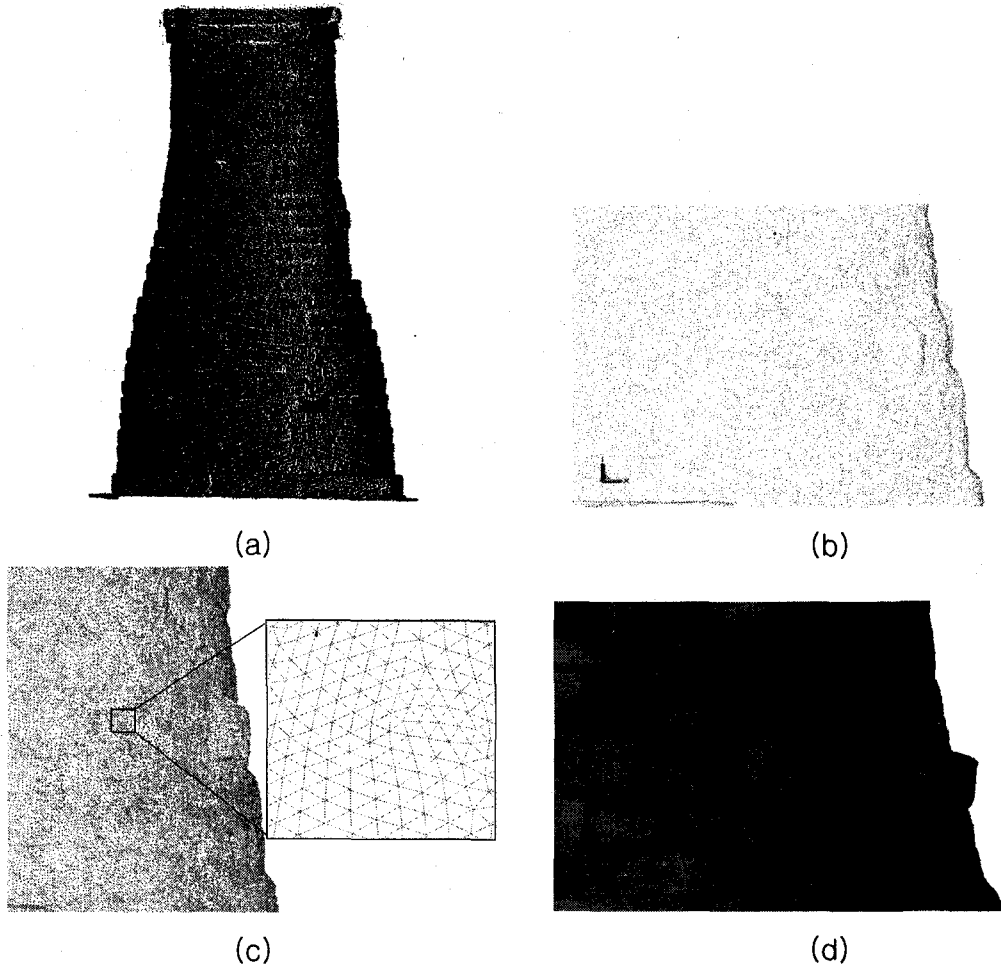
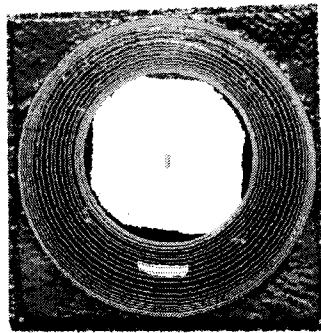


Fig. 3. Laser scanner data. (a) points-cloud, (b) points that has spatial position information, (c) triangulated points, and (d) surface modelling.

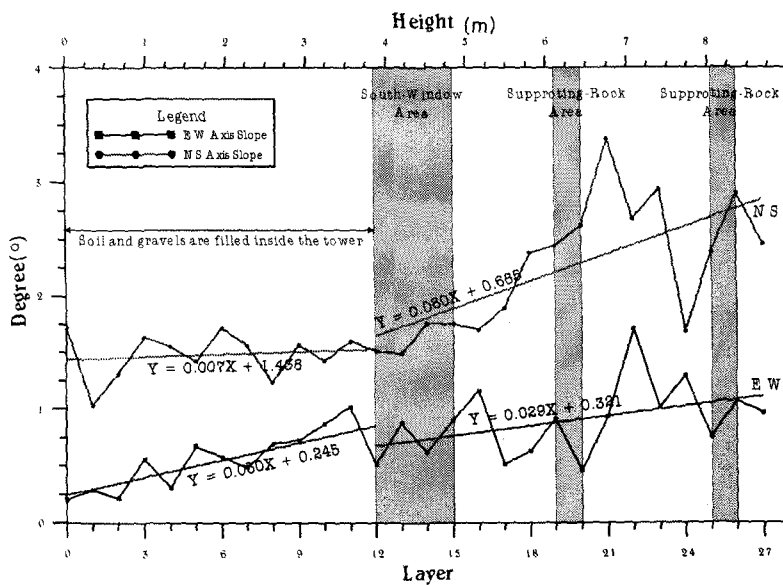
역공학은 여러 학문이 접목된 분야로서, 광학 및 컴퓨터 공학에서 CAD/CAM에 이르는 다양한 기술에 바탕을 두고 있다. 이 기술은 실물로부터 신속하게 정확한 삼차원 모델을 제작하고자 하는 자동차, 항공, 가전 등 제조업 분야뿐만 아니라, 현실감 있는 3차원 모델을

연고자 하는 광고, 영화 등 문화산업에 이르기까지 산업전반에서 수요가 급증하고 있다.

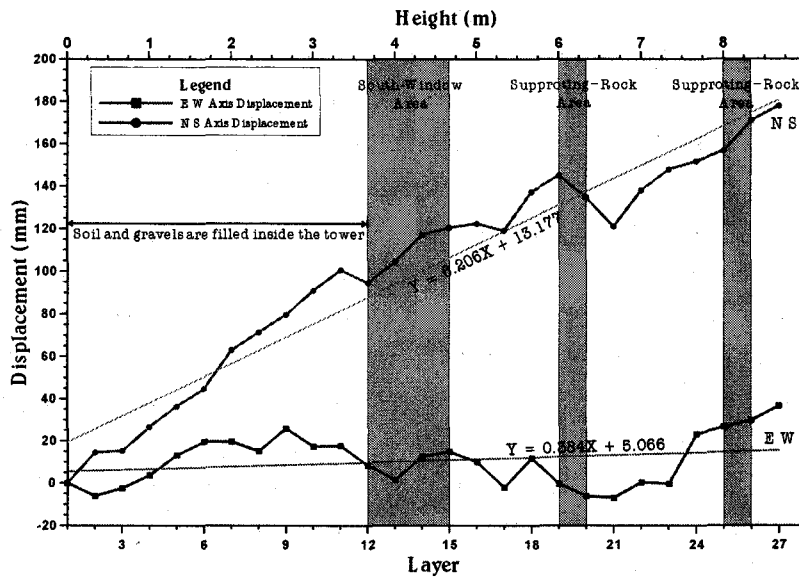
첨성대가 축조이후 그 형태가 변형되어 있고, 특히 북쪽 기단부의 기초 부등침하, 원통석들의 이음매의 벌어짐 및 상부 정자석의 변형 등, 전체적 변형 육안으로도 식별할 수 있을 정도이다. 현재의 변형상태를 정확히 측정하고 앞으로 미세한 변형을 추적하기 위하여 정밀한 측량이 필요하게 되었다. 본 연구에서는 이러한 필요성에 따라 첨성대에 대하여 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 첨성대의 3차원 공간정보를 가진 측정군(points-cloud)으로 부터 각종 공학적 도면을 얻기 위하여 형상 역공학을 적용하였다. 첨성대의 상태 및 변형의 정도를 알아보기 위하여 최적원(Fig. 4a)을 만들었으며, 이를 토대로 각 단별로 최적단면의 크기, 중심점 및 중심축을 분석을 하였다. 분석결과 첨성대의 전체적인 기울기의 변화정도는 단이 증가함에 따라 중심축의 이동 및 기울기의 증가를 보이고 있으며, 첨성대 내부의 채움재 유무에 따라 다른 양상을 보이고 있다. 이는 첨성대의 내부 채움재가 블록의 변화를 막아주는 구속력을 가지고 있는 것으로 판단되어 진다(Fig. 4b). 첨성대 전체의 기울기는 기단석을 중심으로 동쪽으로 0.745° 북쪽으로 1.91° 만큼 기울어져 있으며, 전체적으로는 북동쪽으로 2.07°의 기울기를 갖고 있다(Fig. 4, 5).



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Optimum circles, declining angles and displacement of Chumsungdae
 (a) top view of optimum circles, (b) declining angles, and (c) displacement

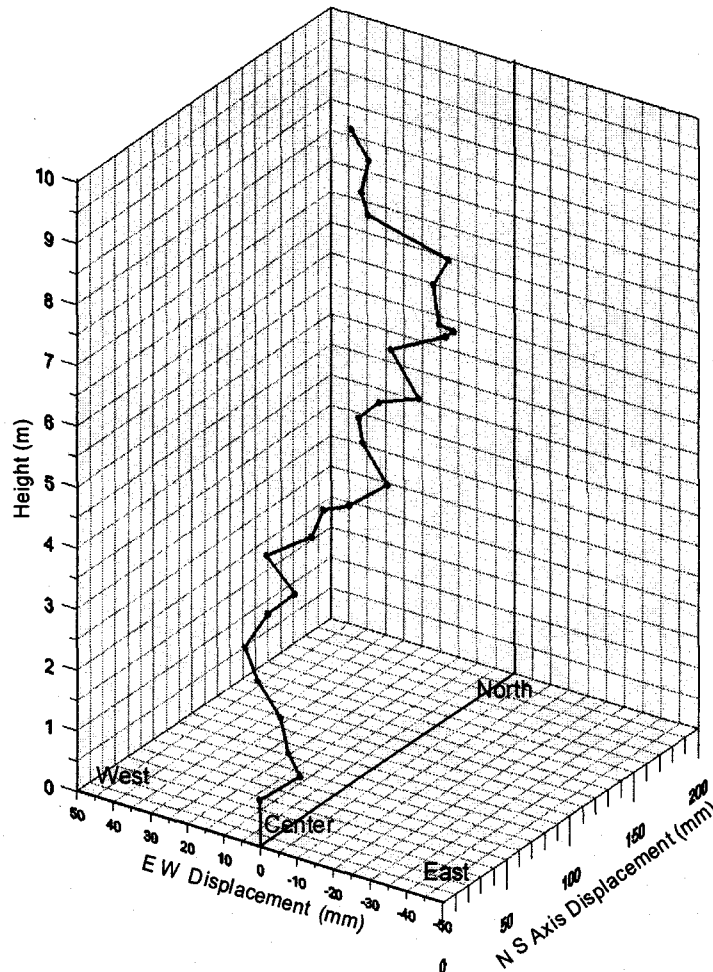


Fig. 5. 3D Displacement of central axis.

2.2 물리탐사를 이용한 지반해석

(1) 전기비저항 탐사(Electrical Resistivity Survey)

전기비저항탐사는 지하에 전류를 인위적으로 흘려보내고 지하의 전기적 물성 차이에 의한 전위차를 측정함으로써 지하구조를 탐사하는 방법으로서, 전기비저항값으로부터 지반의 매질 및 상태를 유추할 수 있다(Dobrin *et al.*,1988; Telford *et al.*,1992; Ward, 1990; 민경덕 외, 1994; 손호웅 외, 2001). 본 연구지역에서 2차원 전기비저항탐사는 침성대 북쪽과 서쪽 지반에 대하여 수행을 하였으며, 침성대 주변지반의 전체적인 특성을 파악하기 위하여 3차원 전기비저항탐사를 수행하였다. 2차원 전기비저항의 경우 Fig. 6a와 같이 36 m씩 기단석의 북쪽과 서쪽 두 단면에 대해서만 수행을 하였으며, 전극간격을 1.5 m로 한 쌍극자 배열(dipole-dipole array)방법을 적용하였다. 또한, 3차원 전기비저항의 경우 Fig. 6b와 같이 전극간격은 2.0 m이며, 전극을 침성대 주변으로 121개 설치하여 동서남북으로 10 m 주변지반에 대하여 전체적으로 조사를 실시하였으며, 단극자 배열(pole-pole array)방법을 이용하여 측정하였다. 침성대의 높이가 약 9 m 정도이므로 2배 정도인 20 m정도 깊이의 지반에 대하여 해석을 실시하였다. 탐사장비로는 미국 AGI사의 STING을 사용하였다. 역산 프로그램은 DIPROWIN(김정호, 1987)과 RES2D/3DINV (Loke, 1999)를 이용하였다.

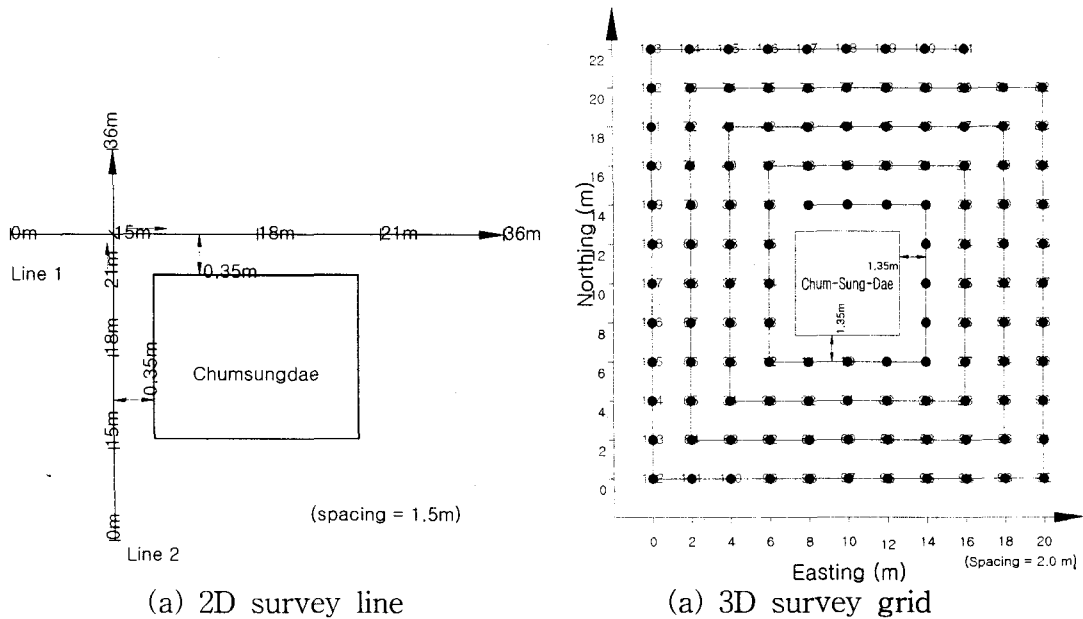
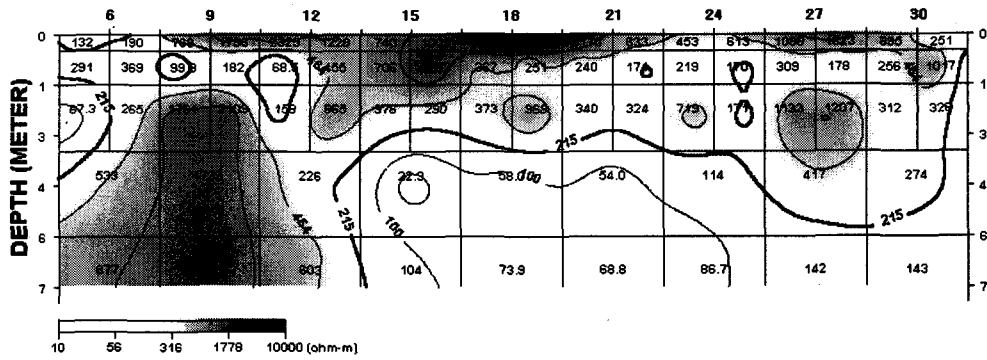
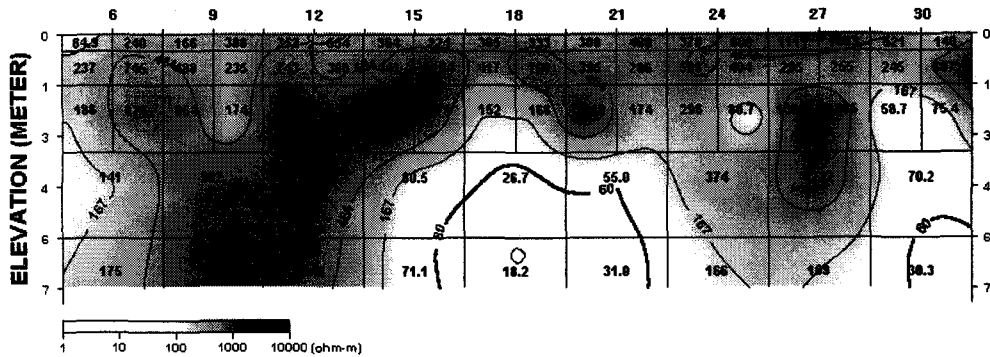


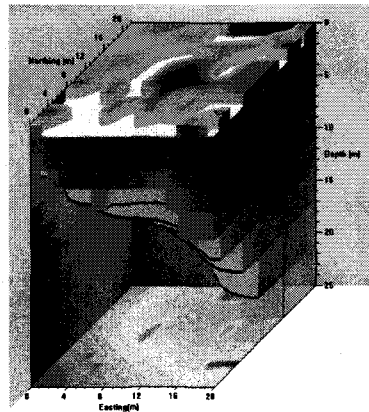
Fig. 6. DC Resistivity survey line. (a) 2D survey, (b) 3D survey grid.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. (a) Line 1, (b) Line 2 : the results of 2D resistivity, and (c) 3D Subsurface distribution of electric resistivity.

Fig. 7a는 기단석의 북쪽 지반을 동서방향으로 실시한 결과이며, Fig. 7b는 기단석의 서쪽 지반을 남북방향으로 실시한 탐사결과이다. 두 단면 모두 15 m~18 m까지 깊이 1 m에 대하여 높은 비저항대가 존재하여 이는 침성대의 하부 기단석이 존재하는 구간이다. 두 단면의 7 m~9 m구간과 26 m~28 m구간에서 고비저항대가 존재하는데 이는 현재 침성대 보존

을 위한 경계 울타리가 있는 곳이며, 1910년대 침성대 사진에서도 침성대 주변으로 돌을 쌓아 만들어 놓은 경계 울타리가 존재하는 것으로 확인되었다. 전기비저항 단면에서 전기비저항의 분포가 서쪽지반에 비해 동쪽지반의 비저항치가 낮은 것을 볼 수가 있다. 이는 서쪽지반에 비해 동쪽지반이 함수비가 높거나, 공극률이 다른 지반에서 비해 높은 결과이기 때문이라고 판단된다. Fig. 7c는 3차원 전기비저항탐사 결과단면을 3차원 모델링한 것으로서 침성대 주변지반 기반암의 분포가 남서방향에서는 약 10 m부터 존재하고 있으나 북동방향으로 갈수록 기반암이 이보다 깊어진다. 이는 함수비가 높거나 공극율이 높은 지반의 분포가 남서쪽 지반보다는 북동쪽 지반에서 보다 깊게 분포하고 있는 것으로 해석할 수 있다.

(2) 지하 투과 레이더(Ground Penetrating Radar)탐사

지하투과레이더(이하 GPR) 10 MHz~수 GHz 주파수 대역의 전자기 펄스를 이용하여 천부 지하구조를 파악하는 기법이다(손호웅 외, 2001). 탐사결과는 유전상수, 전기전도도와 같은 지반 물리적 성질 및 안테나중심주파수, 안테나 간격, 샘플링 간격등과 같은 설계변수의 영향을 받게 된다(박상규, 1998; 손호웅 외, 2001).

본 조사에서 사용된 장비는 캐나다의 Sensors and Software사의 PulseEKKO로서 안테나의 중심주파수는 450 MHz를 사용하였으며, 최대 샘플링 간격은 0.2 ns이며, Fig. 8과 같이 침성대를 중심으로 측정을 하였다. 취득된 자료는 Dewow, 이득조절(Gain-Control), 중첩, 필터링 등을 통하여 보다 나은 영상을 얻고자 하였다. 이렇게 얻은 지하단면을 Fig. 9~10에 나타냈다.

단면에서 투과심도는 2.4 m까지 도시하였다. 침성대 기반석에 근접하여 측정된 Line 1~Line 8에서 보는 바와 같이 -5 ~ 5 m 사이 깊이 2 m에서 뚜렷하게 관측되는 하나의 층이 발견되고 있다. 이는 물성차이가 큰 층이 존재하고 있음을 시사하며, 이 들 반사면은 침성대의 기초 및 호박돌과 토사층과의 경계로 해석된다. 또한 이 구간에서 전체적으로 점 반사원이 뚜렷하게 감지되고 있으며, 침성대를 지지하게 위하여 침성대 하부 기반석 아래 호박돌이 존재를 시사한다. 침성대 북쪽과 동쪽보다 남쪽과 서쪽에서 점 반사원이 넓게 많이 발견되는 것으로 보아 남쪽과 서쪽에 더 많은 호박돌이 존재하고 있음을 알 수 있다.

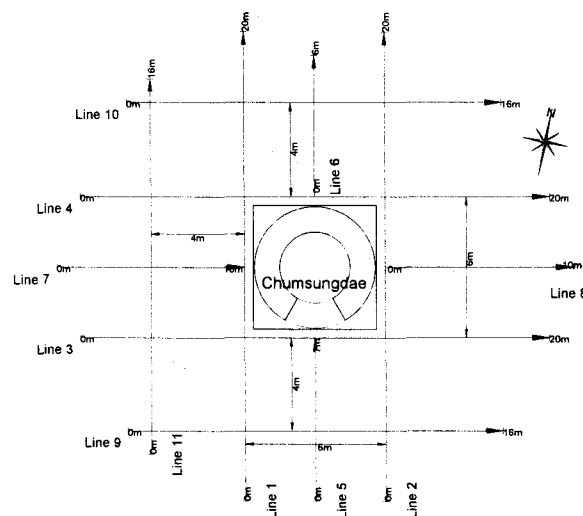


Fig. 8 GPR survey line.

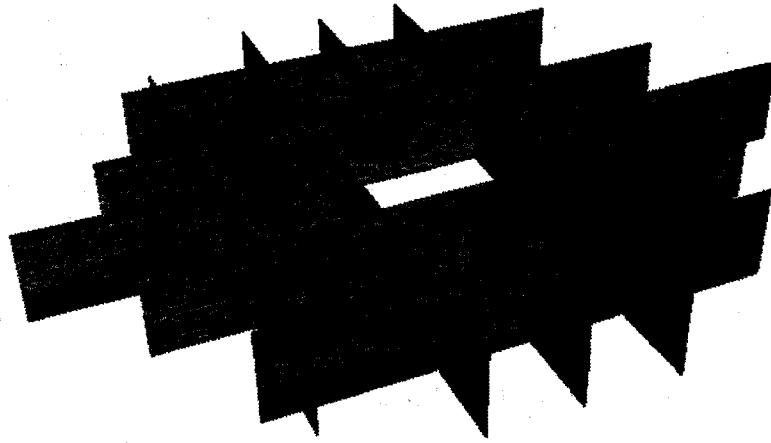


Fig. 9. The Result of 3D GPR Modeling.

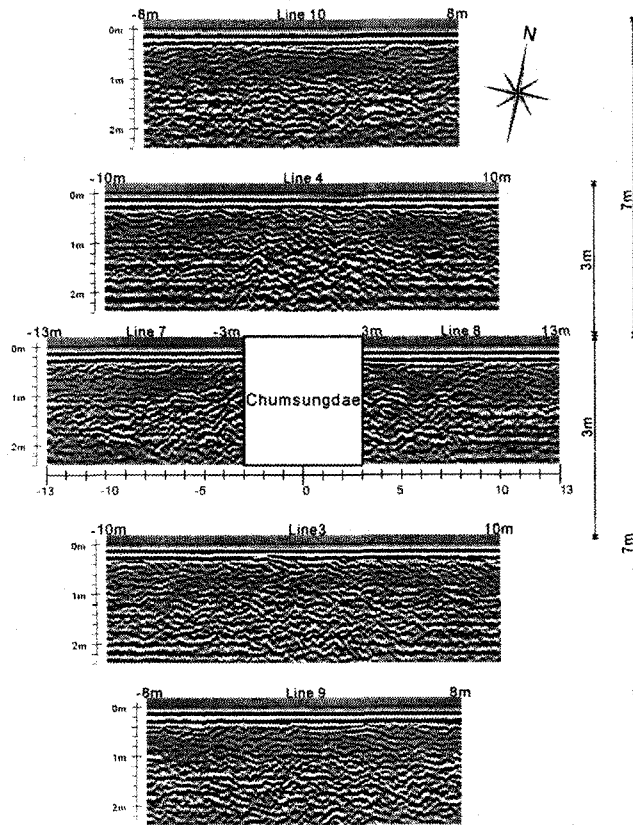


Fig. 10. The Results of 2D GPR section (West→East).

한편, 측정 하부의 레이다파의 속도분포를 얻기 위하여 Fig. 11과 같이 측정점을 기준으로 수신 안테나간격(offset)을 점차 넓혀가면서 측정을 수행하는 WARR방법을 적용하였다. 안테나 중심주파수는 225 Mhz, 측정간격은 10 cm, 측정길이는 4.5 m까지 측정하였다. 남쪽과 서쪽 지반은 전체적으로 깊이에 따라서 전자파의 속도가 9.0 cm/ns~13.0 cm/ns 정도이며, 동쪽과 북쪽 지반은 5.5 cm/ns ~ 9.0 cm/ns로 남쪽과 서쪽 지반에 비해서 동쪽과 북쪽 지반의 속도가 낮게 분포하는 것을 알 수 있다(Fig. 12). 따라서 전체적으로 동쪽과

북쪽 지반에 함수비가 높거나 점토성분이 많이 분포하고 있는 것으로 판단된다. 이 결과는 전기비저항탐사와 일치하고 있으며, 전기비저항과 GPR 결과를 같이 분석하면 남서쪽에 비해 북동쪽 지반의 함수비가 높은 것으로 판단된다.

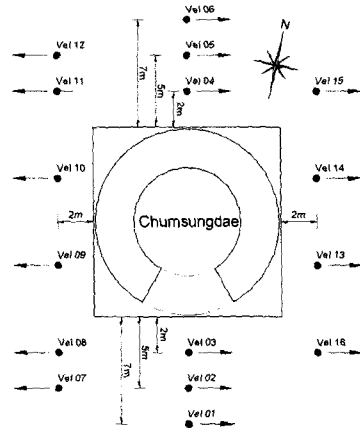


Fig. 11. WARR method survey position.

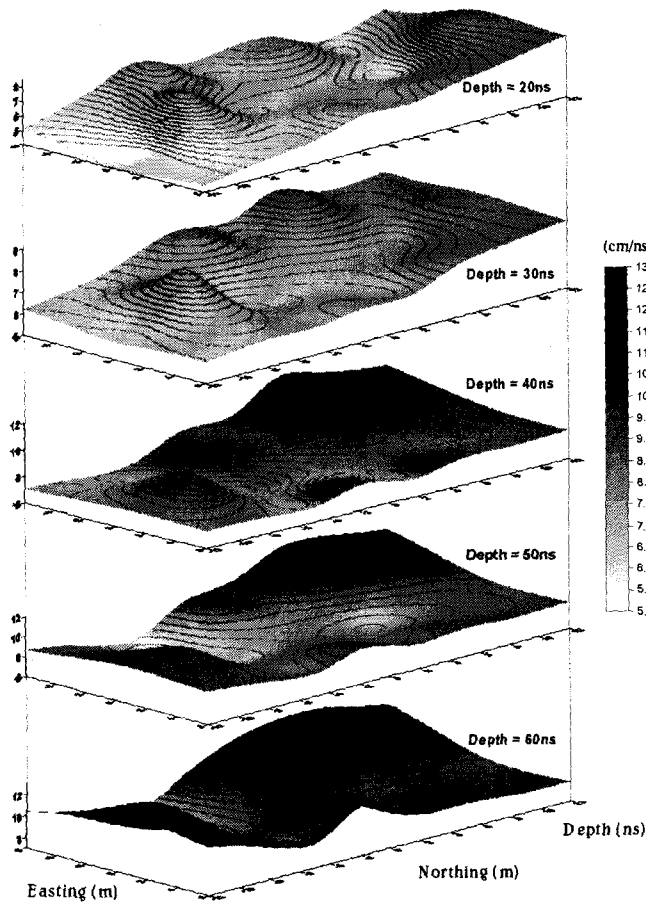


Fig. 12. EM Wave Velocity Distribution.

(3) 탄성파탐사

탄성파는 파의 전파성질에 따라 실체파(body wave)와 표면파(surface wave)로 크게 나눌 수 있다. 이중 실체파의 전파원리를 이용하여 지하구조를 규명하는 것이 굴절법 및 반사법 탄성파탐사로서 일반적으로 압력파(P파)의 속도분포를 얻을 수 있다(손호웅 외, 2002). 본 연구에서는 지하의 P파 속도 분포를 규명하기 위하여 굴절법 탄성파탐사를 Fig. 13(a)에서 나타낸 바와 같이 침성대 주변의 4개 축선에서 수행하였다.

한편, 표면파는 거의 모든 탄성파를 발생시키는 파원으로부터 쉽게 발생시킬 수 있으며, 지하매질의 속도 변화양상에 따라 표면파의 주파수 성분에 따른 위상속도를 갖는 분산(Dispersion)을 갖게 된다. 분산곡선은 지반의 특성을 반영하며 전단파(S-wave) 속도분포를 도출하는데 이용할 수 있다. 본 연구에서는 다수의 수진기를 이용한 주파수 영역의 표면파 해석을 하기 위하여 MASW(Multi-channel Analysis of Surface Wave) 탐사기법을 적용하였으며 (Park et. al, 1999; Xia et. al., 2002), 굴절법탄성파 탐사축선과 같은 축선에서 표면파 탄성파 탐사를 수행하여 지하의 S파 속도분포를 얻고자 하였다.

MASW 탐사 결과에서 얻은 전단파(V_s)와 굴절법 탄성파 탐사 결과에서 얻은 압축파(V_p)를 토대로 다음 식에 의해 침성대 주변 지반에 대한 동적물성인 동적전단탄성계수(dynamic rigidity modulus: G_d), 동적탄성계수(Dynamic elastic modulus: E_d)를 산정할 수 있으며, 또한 침성대 구조해석 및 내진해석을 위한 동적물성치를 이용할 수 있다.

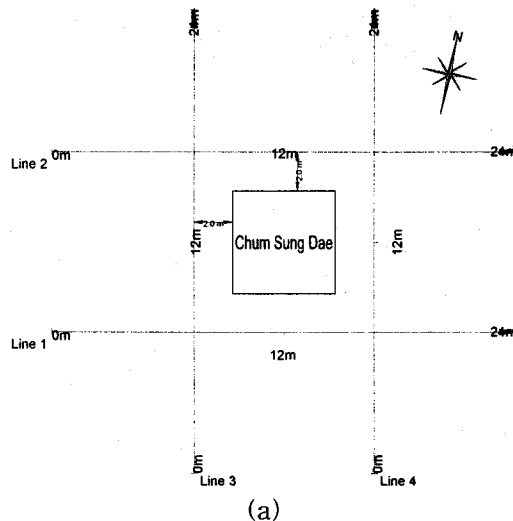
$$G_d = \rho \cdot V_s^2 \quad (1)$$

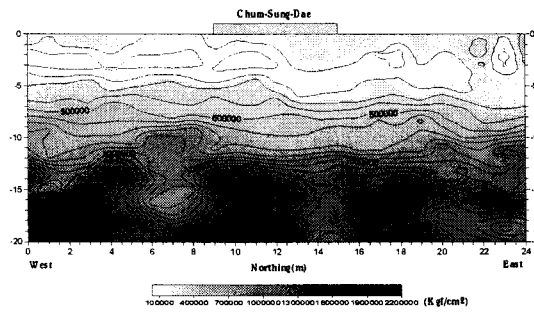
$$E_d = 2 \cdot G_d \cdot (1 + \nu) \quad (2)$$

여기서, ρ : 탐사실시 지층에 대한 밀도(γ_t/g), ν : 탐사실시 지층에 대한 동포아송비이다. 동계수 산정에 필요한 포아송비는 다음 식에 의해 산정하였고, 적용 단위 중량 값은 주변지역의 시추코어 실내시험 값을 적용하였다.

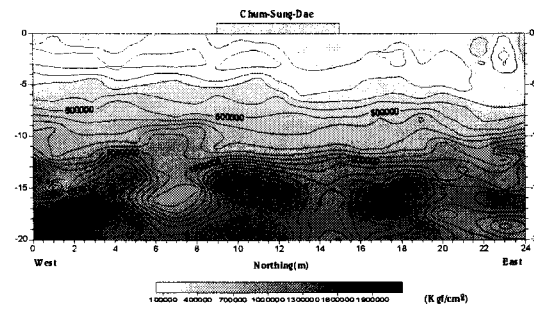
$$\nu = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (3)$$

여기서, V_p , V_s 는 각각 압축파 및 전단파 속도이다.

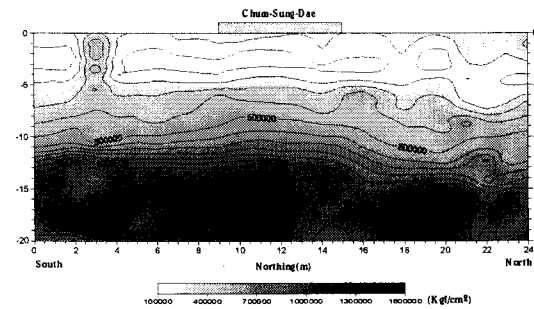




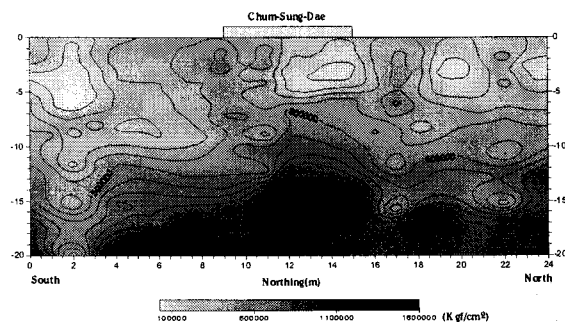
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 13. (a) survey lines around Chum-Sung-Dae which seismic refraction and MASW were performed, (b) dynamic rigidity modulus profile of south survey line, (c) dynamic rigidity modulus profile of north survey line, (d) dynamic rigidity modulus profile of west survey line, and (e) dynamic rigidity modulus profile of east survey line.

(4) 물리탐사에 의한 지반해석

본 조사 지반은 구조물을 지지하기 위해 일정부분에 대하여 호박돌과 다짐을 통한 기초가 조성되었으나, 시간의 경과에 따라 다짐도와 지하수위의 변화에 의한 지반침하로 조적 구조물인 침성대의 변형을 가져오고 있다. 침성대 주변지반 기반암의 분포가 남서방향에서는 약 10 m부터 존재하고 있으나 북동방향으로 갈수록 기반암이 이보다 깊어진다. 이는 함수비가 높거나 공극율이 높은 지반의 분포가 남서쪽 지반보다는 북동쪽 지반에서 보다 깊게 분포하고 있는 것으로 해석할 수 있다.

2.3 석축 구조물의 동적 특성

석축구조물의 동적특성을 파악하기 위하여 진동특성과 고유진동수(natural frequency)를 측정하였다. 동적특성을 파악하게 되면 동적하중/지진하중에 대한 구조물의 반응을 예측할 수 있는 강성(stiffness)을 파악할 수 있게 된다. 구조물에 균열 등이 발생하게 되면 강성의 변화가 발생하게 되므로 효율적인 상시모니터링의 대안을 제시할 수 있게 된다. 구조해석적 측면에서 일반 콘크리트구조물은 균질 연속체로 간주하여 구조 및 안전해석 등을 할 수 있으나, 석축구조물의 경우에는 석축구조물 사이의 interface의 spring 상수 등을 구해야 정확한 구조물의 구조적 해석이 가능해진다. 따라서 고유진동수 측정을 통하여 동적탄성계수를 구하고 이로부터 정적탄성계수를 계산하여 구조적 해석을 위한 정수로 활용하게 된다.

석조구조물은 구조특성상 연속체가 아니며 비선형성을 가지고 있다. 이러한 구조물의 동적특성을 연구하기 위해서는 어떠한 형태의 모델로 가정을 하느냐가 매우 중요하다. 본 연구에서는 침성대를 cantilever형 연속체 모델로 가정하고 진동계의 해석모델에 따른 고유진동수에 대하여 검토를 하여, 석조문화재를 구조적으로 해석하고 판단할 때 적합한 구조모델 가정에 관해 고찰하고자 하였다.

본 연구를 위해서 침성대의 1/10 축적의 모형을 제작하여 침성대가 기울어진 정도에 따른 모델에 대해 고유진동수를 측정하였으며, 다음과 같은 사항을 연구하였다. 첫째로, 침성대 모형을 기울여 가며 기울어진 상태에 따른 고유진동수의 차이를 관찰한다. 둘째로, 정밀 측량을 통해 얻어진 침성대의 전체적인 기울기는 약 2°정도 북쪽으로 기울어진 상태이지만, 지반침하와 침성대의 변형 즉 기울기가 더 진행이 되었을 경우를 가정하여 축소하고 고유진동수를 파악하여 침성대의 기울기가 동적·정적 구조특성에 어떠한 영향을 미치는지 관찰한다. 셋째로, 축소모형을 통해 실험을 한 후 향후 실물테스트를 위한 자료로 사용하며, 특히 경주지방의 지진의 영향을 검토한다.

(1) 모형실험

모형은 Fig. 14와 같이 화강암으로 축척 1/10(높이 0.91 m, 하단부 지름 0.49 m)로 제작하였다. 실측도면 및 실물 사진을 참고하여 각 단의 석재크기를 단순화, 규격화하였다. 또한, 재료의 표면처리는 상·하단의 표면의 거칠기 정도가 석재의 중요한 내부마찰각의 변수가 될 것으로 예상된다. 제작된 모형 침성대의 마찰계수를 측정한 결과, 전체적인 마찰계수는 0.437로 나타났다.

측정방법은 진동대에 모형을 제작하여 설치하고 유압잭을 설치하여 침성대 모형에 기울기를 주었다. 측정장비로는 Blastmate III가 사용되었으며, 삼축 가속도계를 침성대 정자석 상부, 기단석 상부에 각각 설치하고, 하단에서 rubber hammer로 가진을 하여 가진방향의 수평진동과 수직진동에 대해서만 측정을 하였다. 측정된 진동자료는 FFT분석에 의해 고유진동수 및 감쇠비를 구하였다.

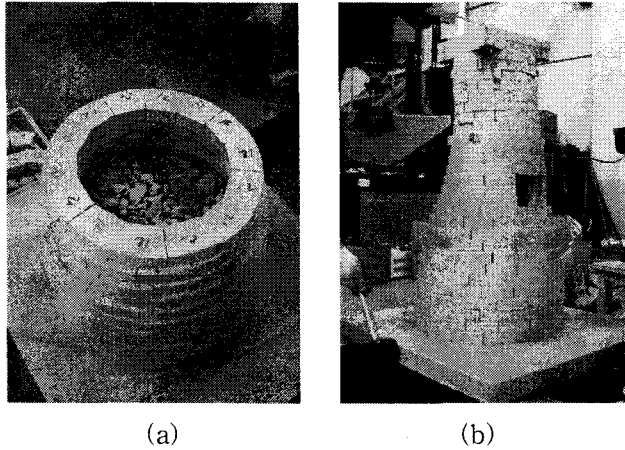


Fig. 14. Model of Chum-Sung-Dae which was made into 1/10 scale. Height: 0.91m, Diameter of lower bottom: 0.49m.

침성대를 쌓는 과정에서 내부에 흙을 채우지 않고 쌓아도 전혀 구조적으로 불안한 상태는 없었다. 내쌓기 방식으로 석재가 내부로 전도되는 것을 막기 위해 내부 채움재를 사용(이동우, 1998)하였다고 설명하고 있으나, 모형실험에서 내쌓기를 하였음에도 안정성을 유지하는 것은 인접 석재가 횡방향지지(laterally supporting)를 하여 전도를 막기 때문인 것으로 판단된다.

침성대의 기울기에 대한 측정결과는 Fig. 15~16에서 볼 수 있듯이 다음과 같이 정리할 수 있다. 즉, 첫째로, 기울기가 0°~4°까지는 모형의 변형이 발생하지 않았으나, 5°에서 침성대 모형의 변형이 발생하였다. 0°~4°에서 동서방향에서는 16.25~17.50 Hz 범위로 측정이 되었으며, 남북방향에서는 16.25~17.25 Hz 범위로 측정되었고, 변형이 발생한 5° 이상부터는 13.25~14.75 Hz 범위로 측정되었다. 이것은 4° 이상의 기울기에서는 stick-slip이 발생하며, 석축구조물의 강성이 slip과 함께 현저히 낮아짐을 의미한다. <침성대 모형의 단면이 일정한 원통형단면(외경 37.5 cm, 내경 25.5 cm)으로 전단진동형으로 간주하여 전단탄성계수를 계산하여 1차 고유진동수를 17 Hz로 전단탄성계수¹⁾는 갖는다.>

$$1) Q = GA \frac{\partial y}{\partial x}$$

여기서, G : 전단탄성계수, A : 단면적이다.

단면 A_0 에서 d_x 떨어진 B_0 단면에 발생하는 전단력은 다음과 같으며,

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx = GA \frac{\partial y}{\partial x} + GA \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx$$

이들의 전단력의 차는 d_x 부분에 발생하는 관성력의 차와 같으므로 D'Alembert의 원리에 따라

$$GA \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx = \rho A dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

따라서 운동방정식은 다음 형태를 취한다.

$$c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, c^2 = \frac{G}{\rho}$$

물리탐사 기술 심포지움

$$f_1 = \frac{1}{4 \times 0.87} \sqrt{\frac{0.528 \times G \times 9.8}{2700}} = 17 \text{ (Hz)}$$

$$\therefore G_{(17\text{Hz})} = 1.826 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 = 182.6 \text{ kg/cm}^2$$

불연속 다절점계로 가정할 경우, 식 5.14에 17Hz에 대한 $G=182.6 \times 10 \text{ kg/cm}^2$ 를 대입하여 스프링 상수 K 를 계산하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{(17\text{Hz})} &= \frac{1.826 \times 10^6 \times 0.528 \times 5.935 \times 10^{-2} \times 29}{0.87} \times 10^{-2} \\ &= 1.907 \times 10^6 \text{ kg/m} = 1.907 \times 10^4 \text{ kg/cm} \end{aligned}$$

여기서 ρ 는 단위체적당의 질량이다. 주어진 계가 각속도 w (rad/sec)를 가지고 조화진동을 한다고 상기 식의 일반해는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y(x, t) = \left\{ C_1 \cos\left(\frac{wx}{c}\right) + C_2 \sin\left(\frac{wx}{c}\right) \right\} \sin(wt)$$

적분상수를 결정하기 위한 경계조건은

$$[y]_{x=0} = 0, \quad [GA \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)]_{x=H} = 0$$

위의 두 식으로부터 각속도로 표시한 고유진동수 w_n 은(이수곤 외, 1999)

$$w_n = \frac{(2n-1)\pi}{2H} \sqrt{\frac{\lambda G}{\rho}} \quad (n = 1, 2, \dots)$$

여기서, H : 전단진동계의 높이, G : 재료의 전단탄성계수, n : 진동모드 차수이다. 고유진동수 f 는

$$f_n = \frac{w_n}{2\pi} = \frac{(2n-1)}{4H} \sqrt{\frac{\lambda G}{\rho}} \quad (n = 1, 2, \dots)$$

여기서 우리의 관심대상인 1차고유진동만 고려하면

$$f_1 = \frac{1}{4H} \sqrt{\frac{\lambda G}{\rho}}$$

한편, 전단탄성계수 G 는

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{P \cdot h}{A \cdot \delta}$$

로 정의된다. 여기서, 전단변형을 $\gamma = \delta/h$, 전단응력 $\tau = P/A$ 이다. 일정한 단면을 갖는 전단진동계를 각 층의 질량 및 강성이 같은 m 자유도계로 가정 하에서 i 층에서의 높이를 h_0 라고 하면 $h_0 = h/m$ 이며, 층간 변위는 $\delta_0 = \delta/m$ 이다. 석재면 사이의 스프링 상수를 K 라고 하면 다음과 같다.

$$P = K \frac{\delta}{m}$$

따라서 전단탄성계수(G)와 스프링상수(K)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

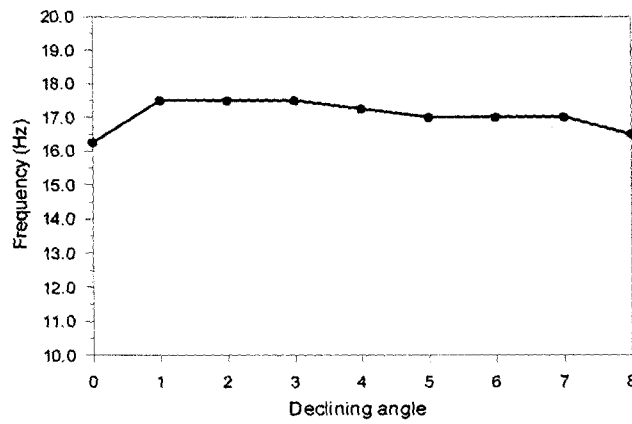
$$G = \frac{K \cdot h}{A \cdot m} = kh_0$$

여기서, k 는 단위면적당 스프링상수로서 $k = \frac{K}{A}$ 이다.

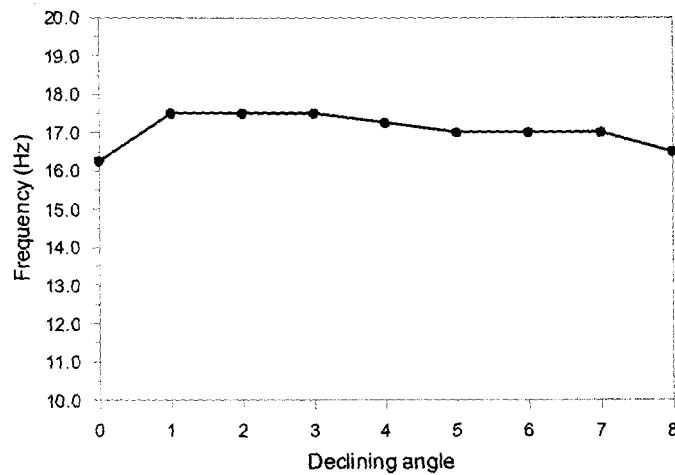
침성대 원통부는 원형으로 되었기 때문에 인접 석재가 횡방향지지(laterally supporting)를 하여 전도를 막기 때문에 안정성에 문제가 발생을 하지 않았지만, 기울기의 변화로 인해 균열 및 변위가 발생을 하였다. 이는 고유진동수가 저하되며, 또한 시스템의 강성저하를 유발한다(이성민, 2002). 이러한 관계로 볼 때 모형 침성대의 기울기를 증가시키면서 최초 5°에서 변형이 발생을 되었으면 측정된 고유진동수를 14 Hz라 할 때, 전단탄성계수를 구하면 다음과 같다.

$$f_1 = \frac{1}{4 \times 0.87} \sqrt{\frac{0.528 \times G \times 9.8}{2700}} = 14 \text{ (Hz)}$$

$$\therefore G_{(14\text{Hz})} = 1.239 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 = 123.9 \text{ kg/cm}^2$$



(a)



(b)

Fig. 15. Natural frequencies measured by sensor located at the top of foundation
(a) N-S response, (b) E-W response.

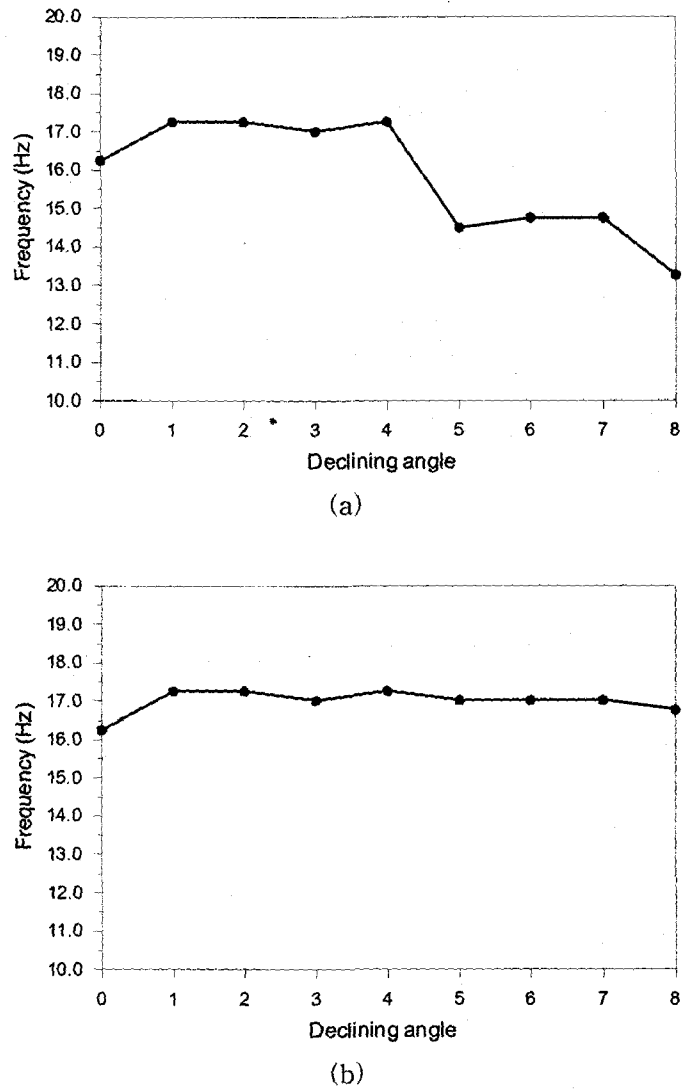


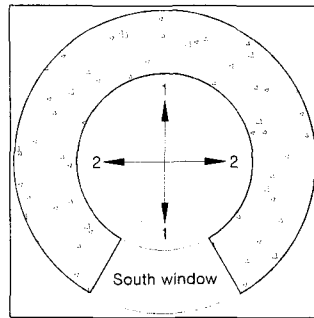
Fig. 16. Natural frequencies measured by sensor located at the top of well-shaped top stones. (a) N-S response, (b) E-W response.

(2) 침성대 실물의 고유진동수 측정 결과

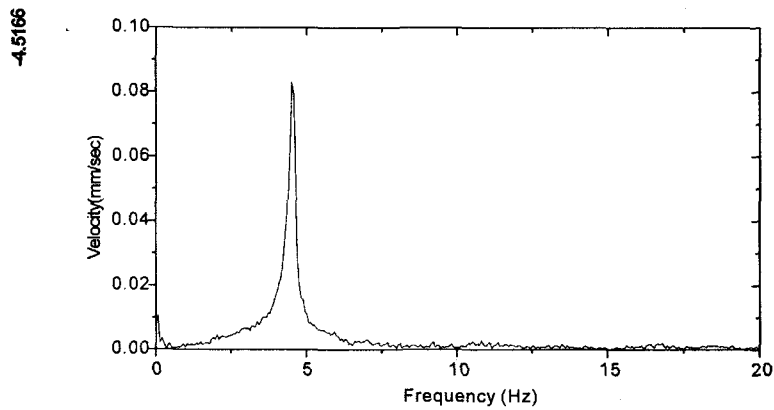
침성대 실물의 고유진동수를 측정함으로써 모형실험결과와 비교해 보고 지반의 침하에 따른 침성대 기울기의 변화에 따른 지진에 대한 공진가능성을 판단해보고자 하였다. 측정장비로는 Blastmate III가 사용되었으며, Fig. 17a와 같이 동서, 남북방향으로 진동을 주었다. 삼축 가속도계를 12단 적심석 상부 및 내부 정자석 상부에 설치하였다. 측정된 시간영역 진동 자료는 FFT분석을 하여 고유진동수 및 감쇠비를 구하였다.

측정된 1차 고유진동수는 Fig. 17b, c와 같이 남북방향으로 4.52 Hz, 동서방향으로 4.59 Hz로서 방향에 따른 차이는 거의 없었다. 전단진동형의 경우 고유진동수는 높이에 반비례하므로 1/10모형의 고유진동수가 17~18 Hz라면 똑같은 조건에서 실물의 고유진동수는 2 Hz 이하가 되어야 하겠지만 예측보다 높은 고유진동수로 측정되었다. 이는 침성대의 짜임새가 매우 견고하다고 추정할 수 있으며 내부 채움재도 전단탄성계수가 낮은 토사가 아닌 호박돌이나 깬 암석일 가능성이 높다는 의미가 될 것이다. 반면 경주지방의 13개 지점에서 지반의 동적거동특성을 분석한 연구 결과(방은석 외, 2001, 신진수 외, 1999; 조남대 외, 2001)는 지

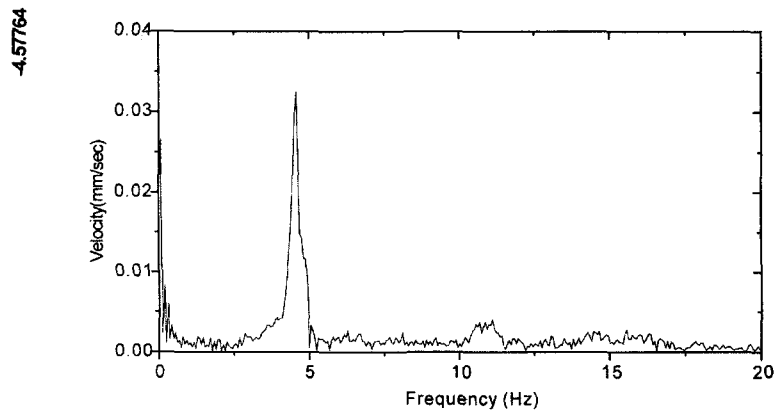
반고유진동수가 2 Hz ~ 8.8 Hz의 범위이며, 주로 3.0 Hz~4.0 Hz의 범위에 있는 것으로 나타났으므로 공진의 가능성에 대해서 향후 검토가 되어야 할 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 17. (a), (b) Frequency spectrum curve of south-north vibration, and (c) Frequency spectrum curve of east-west vibration.

감쇠비는 가진을 할 경우와 자유진동을 할 경우가 다르며 가진방법이나 가진력의 크기에 따라서도 차이가 있다(Juhasova, 1991). 본 연구에서는 자유진동곡선에서 다음의 식을 이용하여 감쇠비 ζ 를 계산하였다.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_0}{x_n} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (5)$$

이렇게 계산된 침성대의 감쇠비는 약 0.027 정도이다. 일반적으로 콘크리트 건물에서는 0.01~0.1, 석조건물에서는 0.05~0.15의 감쇠비(홍갑표, 1998)를 갖으며, 홍예교량에서는 0.02~0.13의 감쇠비(이성민, 2000, 2002)는 것으로 알려졌는데, 본 연구를 통해 측정된 값은 콘크리트 건물이나 일반 석조건물 및 홍예교량보다 매우 낮은 것으로 나타났다.

(3) 고유진동수에 대한 종합적 결과

경주 침성대의 1/10 모형에 대한 동적특성실험 및 실물에 대한 고유진동수 측정을 통해 침성대의 구조적 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째로, 내부에 흙을 채우지 않고 들여쌓기로 전혀 구조적으로 불안한 상태는 없었다. 이는 각 층의 단면이 원형단면이기 때문에 인접 석재가 횡방향 지지를 하여 전도를 막기 때문에 안정성에 문제가 발생을 하지 않았지만, 기울기의 변화로 인해 균열 및 변위가 발생을 하였다. 이는 고유진동수가 저하되며, 또한 시스템의 강성조하를 유발한다.

둘째로, 기울기 변화에 따른 침성대 모형의 변형이 발생하지 않은 상태에서 침성대의 1차 고유진동수를 17 Hz라고 할 때 석재간 접촉면의 스프링상수는 $1.907 \times 10^4 \text{ kg/cm}$, 이를 단위 면적당 스프링상수 k 로 환산하면 $32.13 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$ 이다. 또한 전단진동계로 가정할 경우 전단탄성계수 G 는 182.6 kg/cm^2 로 계산되었으며, 모형의 변형이 발생한 상태에서 1차 고유진동수를 14 Hz라고 할 때 전단진동계로 가정할 경우 전단탄성계수 G 는 123.9 kg/cm^2 로 계산되었다. 이러한 수치는 앞으로 컴퓨터 모델링을 할 때 유용하게 사용될 것이다.

셋째로, 침성대 실물의 1차 고유진동수는 남측창문 방향(Line 1)은 4.52 Hz, 남측창문 직각방향(Line 2)은 4.92 Hz로 나타났다. 이는 1/10모형의 고유진동수 측정결과와 비교할 때 다소 높은 값으로서 침성대의 짜임새가 매우 견고하다고 추정할 수 있으며, 내부 채움재도 전단탄성계수가 낮은 토사가 아닌 호박돌이나 깬 암석일 가능성이 높다는 의미가 될 것이다. 반면 경주지방의 13개 지점에서 지반의 동적거동특성을 분석한 연구 결과 지반고유진동수가 2 Hz~8.8Hz의 범위이며 주로 3.0 Hz~4.0 Hz의 범위에 있는 것으로 나타났으므로 공진의 가능성에 대하여 향후 검토가 되어야 할 것으로 판단된다.

넷째로, 침성대의 감쇠비는 0.027정도로써 콘크리트 건물이나 일반 석조건물의 감쇠비에 비하여 상대적으로 매우 낮은 값을 보이는 것으로 나타났다.

3. 결론

본 연구에서는 경상남도 경주시에 위치한 『침성대』를 연구대상으로 설정하였다. 침성대는 약 1,300여년전에 건립되었으며, 오랜 시간경과에 따라 침성대 석조 블록의 이동 및 지반 침하로 기울어지는 현상이 발생하였다. 본 연구에서는 3차원 정밀 측량을 통하여 구조물의 변형정도와 현재 구조물의 상태를 역설계하여 수치화하고, 지반의 물성과약을 위하여 물리탐사를 수행하였으며, 석조구조물의 안정성 평가를 위하여 동적특성을 관찰하였다. 이러한 연구결과 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

첫째로, 정밀 3차원 측량을 통하여 침성대는 동쪽으로 0.7°, 북쪽으로 1.9° 전체적으로는 북동방향 약 2°정도의 기울어 졌으며, 동쪽으로 29 mm, 북쪽으로 171 mm, 전체적으로는 북동방향 173 mm의 최대 변위량을 가지고 있다. 또한 지반 경우 0.163 mm의 최대 침하 정도를 가지고 있는 것을 분석되었다.

둘째로, 지반에 대한 물리탐사 결과단면을 분석한 결과, 전기비저항탐사와 GPR탐사의 경우 지반의 전체적인 양상을 잘 보여 주었으며, 연약대로 보이는 이상대가 발견되었으며, 함수비가 높은 것으로 분석이 되었다. 표면파탐사와 탄성과 굴절법 탐사로부터 전단파(V_s)와 압축파(V_p)의 속도값을 이용하여 층의 경계면을 찾았으며, 또한 내진해석을 위하여 동적 물성치를 산출하였다.

셋째로, 침성대의 1/10 축적 모형을 제작하여 기울기변화 따른 고유진동수를 측정하였다. 측정된 1/10모형의 변형이 발생하지 않을 경우의 1차 고유진동수는 17 Hz로 나타났으며, 기울기가 증가하면서 모형의 변형이 발생했으며, 그에 따라 1차 고유진동수는 14 Hz로 낮아졌다. 또한 침성대 실물의 고유진동수도 측정하였는데 1차 고유진동수는 남북방향 4.52 Hz, 동서방향 4.59 Hz인 것으로 분석되었다.

본 연구는 향후 침성대 실물의 정적·동적 특성 파악뿐 아니라 침성대 모형을 이용한 여러 가지 후속실험을 통해 침성대의 구조특성 및 안전성예측을 하는 데에 유익한 자료가 될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 일부 연구지원(KRF-2000-DP0434)으로 수행되었다. 훌륭한 자문과 함께 현장에서의 자료취득에 많은 지원을 아끼지 않으신 국립경주문화재연구소의 여러분들께 우선 감사를 드립니다. 아울러 물리탐사자료 취득에 많은 도움을 주신 지오택컨설턴트의 원경식 사장님, 동적특성 자료분석 및 해석에 도움을 주신 건설품질연구원의 이성민 박사님께 감사를 드리며, 배재대학교 토목환경공학과 지반조사공학연구실의 연구원들의 노고와 노력에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김용운, 1974, 침성대는 누구와 일을 하였을까: 자유교양, 10-13.
- 김용운, 1974, 침성대소고: 역사학보 64, 역사학회.
- 김정호, 1987, 이차원 전기비저항 탐사자료의 역산, 서울대학교 박사학위 논문.
- 남천우, 1974, 침성대에 관한 제설의 검토, 역사학보 제64호, pp.27-48.
- 남천우, 1987, 경주의 침성대, 유물의 재발견, 정음사.
- 민경덕, 서정희, 권병두, 1994, 응용지구물리학, 우성문화사, p.252, 275
- 박상규, 1998, GPR탐사 해석시 흙의 유전상수 결정 방법에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문.
- 박홍수, 1973, 침성대, 한국일보 5월 5일 보도자료.
- 성남해, 2002, 침성대는 시보대, 대한측량협회지, 98~104.
- 신진수, 이종립, 장천중, 1999, 1999년 6월 2일 경주의 지진의 스펙트럼 특성, 한국 지진공학회 1999년도 추계학술대회 논문집.
- 손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수, 2002, 지반 환경물리탐사, 시그마프레스.
- 유경노, 1974, 침성대는 천문대인가, 독서신문 11월 1일 6면
- 이동우, 1998, 경주 침성대의 축조에 관한 구조공학적 고찰, 한국전통과학기술학회지, 제 4, 5권 합본 제1호.
- 이수곤, 이성민, 박현구, 이중호, 1999, 석축의 고유진동수에 관한 연구, 대한건축학회 추계학술발표대회 논문집.

- 이성민, 박현구, 이수곤, 2000, 홍예교량의 고유진동수에 관한 연구, 대한건축학회, 2000년 춘계학술발표대회 논문집.
- 이성민, 2002, 석조문화재의 동적특성에 관한 연구, 전남대학교 박사학위 논문.
- 이용범, 1974, 첨성대준의, 진단학보 제38호, 27-48.
- 이용범, 1987, 속첨성대준의, 불교와 제과학, 동국대학교 개교80주년기념논총.
- 이용범, 1993, 첨성대문제, 한국과학사상사연구, 동국대출판부.
- 전상운, 1976, 한국과학기술사, 정음사.
- 조남대, 박창업, 2001, 추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강지진동 연구, 한국지공학회 논문집, 5권 4호, 17-26.
- 홍갑표 역, 1998, 구조동역학개론, 기문당.
- 홍사준, 1963, 첨성대실측, 고고미술, 161-163.
- 홍사준, 1965, 경주 첨성대 실측조서, 고고미술 제6권, 제3·4호, 통권56·57호, 한국미술사학회.
- 홍사준, 1967, 첨성대, 연제고고논문집-고고미술자료 12집, 고고미술동인회.
- 홍갑표, 1998, 구조동역학개론, 기문당.
- Bohler, W., Heinz, G., 1989, Documentation, Surveying, photogrammetry, *XVII CIPA Symposium, Recife, Brazil, Proceedings*.
- Dobrin, M.B., Savit C.H., 1988 Introduction to geophysical prospecting, 4th ed, McGraw-Hill Internation, 750-762.
- Juhasova, E., 1991, Seismic Effects on Structures Elsevier.
- Park, C. B, Miller, R.D., and Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, **64**, 800-808.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1992, *Applied Geophysics*, Second Ed, Cambridge, 545.
- Ward, S.H. 1990, Resistivity and induced polarization methods In, Ward, S.H. ed., Geotechnical and environmental geophysics. **1**. 147-189.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C. B, Hunter, J.A., Harris, J.B., and Ivanov, J., 2002, Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 181-190.
- 和田雄治, 1917, 慶州瞻星臺の說, 朝鮮古代觀測記錄調査報告, 144-151.