

초계분지의 상시미동 지진응답

이희경 · 김령이 · 강태섭*

부경대학교 지구환경시스템과학부

Seismic Response from Microtremor of Chogye Basin, Korea

Heekyoung Lee, Rounyi Kim, and Tae-Seob Kang*

Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University

요약: 초계분지는 그릇과 같이 주변이 모암으로 둘러싸여 있는 닫힌 분지의 형태를 갖고 있다. 이러한 닫힌 분지에서는 입사한 지진에너지가 분지 내에서 다중 반사파를 형성하며 에너지의 집중이 발생하기 쉽다. 경상남도 합천군 초계면과 적중면에 위치한 타원형의 초계분지를 대상으로 상시미동 관측 조사를 수행하였다. 상시미동 관측 자료를 주파수 영역으로 변환하고 수평 대 수직성분 스펙트럼 비를 계산하였다. 이 결과로부터 각 관측 지점에 대한 기본 공명주파수를 측정하였다. 이전 연구에서 알려진 우리나라 퇴적층에 대한 고유주기와 두께의 경험적인 상관관계를 이용하여, 기본 공명주파수로부터 초계분지의 퇴적층 두께 분포를 결정하였다. 급한 경사를 갖는 산지로 둘러싸인 분지 외곽에 비하여, 분지 내부의 관측점에서 기본 공명주파수가 최소 1.03 Hz로 낮으며, 이에 상응하는 퇴적층이 두껍고, 그 깊이는 최대 약 100 m에 이른다. 각 관측점에서 결정한 분지 깊이를 내삽하여 초계분지의 기반암 지형에 대한 3차원 분지 모델을 작성하였다.

주요어: 초계분지, 상시미동, 공명주파수, 퇴적물 두께, 3차원 분지 모델

Abstract: Chogye basin, which is surrounded by country rock, has a closed-basin form. In such a basin, incident seismic energy can form multiply reflected waves, thus causing energy concentration to occur at this closed-basin area. Microtremor measurement survey was performed at the Chogye basin, which is located in Chogye-myeon and Jeokjung-myeon, Hapcheon-gun, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea. Microtremor data were transformed into the frequency domain, and then the horizontal-to-vertical spectral ratios (HVSr) were calculated. Fundamental resonance frequencies were estimated from the HVSr results for every observation point. Using the empirical relationship between site period and thickness for sediment sites in Korea known from the previous study, the distribution of sediment thickness of the Chogye basin was estimated from the fundamental resonance frequencies. Being compared with the mountainous rim with steep slope, the measurement points inside the basin have low values of the fundamental resonance frequency with the minimum of 1.03 Hz, which corresponds to the thickness of sedimentary layer with the maximum depth of about 100 m. A three-dimensional basin model was constructed for bedrock topography of the Chogye basin by an interpolation of basin depths estimated at each measurement site.

Keywords: Chogye basin, microtremor, resonance frequency, sediment thickness, 3D basin model

서 론

지진파가 도달했을 때의 지반 반응은 지진 규모나 진원 거리와 같이 지진의 속성뿐만 아니라 지질이나 지형과 같은 지

역적인 지반 조건에도 크게 좌우된다. 그 중에서도 특히 지반 조건은 지진파의 증폭을 일으킬 수 있으며, 이는 지진으로 인한 잠재적인 피해에 매우 큰 영향을 미친다. 지진동에 영향을 미치는 지반 특성은 퇴적물의 두께와 전단파 속도로 대표할 수 있다. 지진파 증폭 현상은 퇴적층과 기반암 사이의 임피던스 차이에 의해서 발생하며, 증폭이 발생하는 지진동의 주기는 퇴적층의 두께에 따라서 달라진다. 이러한 지반 증폭 특성은 상시미동을 측정하여 평가할 수 있다(Kanai *et al.*, 1954). 이를 위해서는 먼저 상시미동 진원 효과를 제거하여 부지 하부의 지반에 의한 영향만을 보전해야 한다. 가장 널리 알려진 방법은 Nakamura (1989)가 제시한 것으로, 3성분 지진계를 이용하여 기록한 상시미동의 수평성분 스펙트럼을 수직성분 스펙트럼으로 나누는 방법(이하 H/V 스펙트럼비 방법)이다. 하나

Received: 22 February 2017; Revised: 5 March 2017;

Accepted: 6 March 2017

*Corresponding author

E-mail: tskang@pknu.ac.kr

Address: Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

©2017, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 독립적인 3성분 지진계만으로 해당 지점 하부의 부지 효과를 특성화할 수 있는 정보를 얻을 수 있기 때문에, 이 방법은 간편하고 비용이 적은 장점이 있다.

상시미동 H/V 스펙트럼비 분석을 통하여 퇴적층의 기본 공명주파수를 추정할 수 있다는 것은 여러 연구(예, Ohta *et al.*, 1978; Lermo *et al.*, 1988; Field *et al.*, 1990; Field and Jacob, 1993)에서 제시되었으며, 이는 상시미동이 부지효과를 특성화하기 위한 효과적인 자료임을 보여준다(Lermo and Chávez-García, 1993). 국내에서도 상시미동을 이용한 연구가 활발하게 수행되어, 다양한 지역에서 광역 지진관측망에서 기록된 배경잡음 자료나 이동식 지진계를 이용하여 얻은 상시미동 자료를 이용하여 부지효과를 분석하고자 하는 여러 시도가 이루어졌다(예, Kim, 1991; Kim and Hwang, 2002; Cha *et al.*, 2006; Hwang and Kim, 2006; Jung *et al.*, 2010; Hong and Kim, 2010; Kim and Hong, 2010; Kang and Shin, 2011; Kim and Hong, 2012; Yun *et al.*, 2013; Chávez-García and Kang, 2014). 또한 Ibs-von Seht and Wohlenberg (1999)는 H/V 스펙트럼비로부터 얻은 공명주파수가 기반암을 덮고 있는 퇴적층의 전체적인 두께와 밀접한 상관관계를 갖는다는 것을 제시하였다. 이 연구에서 제시한 기본 공명주파수와 퇴적층 두께 사이의 경험 관계식은 이후 여러 후속 상시미동 연구를 통하여 퇴적층 두께 산출을 위한 실용적인 방법으로 알려졌다(예, Delgado *et al.*, 2000; Parolai *et al.*, 2002; Hinzen *et al.*, 2004; Özalaybey *et al.*, 2011; Paudyal *et al.*, 2013).

이 연구는 상시미동 측정 자료를 이용하여 경남 합천군에 위치하는 초계분지의 퇴적층 두께 분포를 추정하기 위한 목적으로 수행되었다. 초계분지는 분지 내에서 발달한 소하천이 분지 밖으로 향하는 출구를 제외하고 모두 상대적으로 높은 지형을 이루는 산으로 둘러싸인 폐쇄형 분지(endorheic basin)이다. 초계분지의 형성 기원에 대하여 지금까지 수행된 연구는 크게 세 가지 주장으로 요약할 수 있다. 먼저 풍화와 침식에 의한 화강암이 변성암에 둘러싸여 상대적으로 차별침식을 받아 형성되었다는 침식분지라는 가설이 있다(Chang, 2002). Choi *et al.* (2001, 2004)은 중력자료 해석으로부터 초계분지의 파쇄대가 최대 약 600 m 깊이까지 분포한다는 결과를 제시하고 운석과 같은 외부 충격에 의하여 초계분지의 환상지형이 형성되었다는 가설을 제시하였다. 이 연구에 따르면 초계분지 내에서는 시추 조사로부터 80 m 깊이까지 퇴적암이 존재하고, 주변 퇴적암에서 화강암과 같은 관입체에 의한 접촉변성작용의 징후가 전혀 없기 때문에, 차별 침식에 따른 분지 지형 형성은 가능성이 매우 낮음을 설명하였다. 또한 주변에서 화산 활동의 증거가 전혀 없기 때문에 화산 분화구의 가능성도 없음을 밝혔다. 한편, Hwang and Yoon (2016)은 초계분지가 기반암의 차별침식이나 운석 충돌보다 지반운동에 의한 지질구조선이나 단층선을 따라 기반암이 풍화되면서 형성된 구조분지의 가능성을 주장하였다. 이와 같이 침식분지, 운석 충돌, 구

조분지 등의 세 가지 가설이 초계분지의 형성 원인으로 제기되었으나, 아직까지 각각의 가설을 뒷받침할 수 있는 뚜렷한 증거 제시와 후속 연구는 이루어지지 않고 있다.

초계분지는 조선시대에 초계군에 해당하며, 조선왕조실록으로 이 지역에서 모두 11건의 감진 사례를 확인할 수 있다. 이는 조선시대 5백여 년간 지속된 지방행정구역(부, 목, 군, 현) 330읍 가운데 지진과 연관되어 언급된 지명으로는 최상위 10% 이내에 속한다. 초계에서 감지된 지진 가운데 대표적인 사례로 단종 2년(서기 1454년) 12월 28일의 기사는 다음과 같다.

“경상도 초계·선산·홍해와 전라도 전주·익산·용안·홍덕·무장·고창·영광·함평·무안·나주·영암·해남·진도·강진·장흥·보성·홍양·낙안·순천·광양·구례·운봉·남원·임실·곡성·장수·순창·금구·함열 및 제주의 대정 정의에 지진이 일어나 담과 가옥이 무너지고 허물어졌으며, 사람이 많이 깔려 죽었으므로, 향과 축문을 내려 해피제를 행하였다.”

이 지진은 제주를 포함하여 전라와 경상 지역 전체를 감진 면적으로 하는 대단히 큰 사건이었다. 이 가운데 초계는 경상 지역을 대표하는 감진 지역 세 곳 가운데 하나로 거명되어 있는 것이 특징적이다. 이와 같이 역사기록으로부터 확인할 수 있는 초계 지역 감진 기록이 빈번한 것은 수백 미터에 이르는 깊은 퇴적층과 파쇄대로 이루어진 초계분지에서 지진동 부지 증폭으로 인하여 다른 지역보다 더 큰 지진동을 경험한 결과일 수 있다. 이 연구를 통하여 초계분지의 지질학적 특성을 고찰하고, 향후 초계분지의 지진 지반운동 연구를 위한 기본 자료 활용을 목적으로 분지의 기하학적 모델을 구축하고자 한다.

지형 및 지질

초계분지는 경상남도 합천군 초계면과 적중면에 위치하고 있으며, 분지 내부를 흐르는 작은 하천의 지류는 모두 북쪽으로 모여들어 분지 외곽의 북부에서 동서 방향으로 발달한 황강으로 배수되는 폐쇄형 분지이다(Fig. 1). 분지 내부의 산기슭을 따라 완만한 사면이 초계면 원당리, 유태리에서 약간 발달하였고, 분지를 둘러싼 외곽의 산지와 접하는 대부분의 가장자리는 작은 계곡으로부터 흘러나와 쌓인 퇴적물이 선상지를 이루어 분지의 대부분이 경작지로 이용된다. 초계분지 내부는 퇴적물로 덮여 있어서 노두를 거의 확인하기 어렵다. 분지 외곽을 이루는 지역의 지질은 중생대 경상누층군의 지층으로 혈암·이암·사암·역암 등의 지층이 분포한다. 초계분지를 포함한 주변 지역의 지질에 대하여 상시미동 측정과 함께 이루어진 지질조사와 합천 도폭(Chang, 1968)과 창녕 도폭(Kim and Lee, 1969)을 종합하여 지질도를 작성하였다(Fig. 2). 지질도를 구성하는 지층에 대한 세부사항은 다음과 같다.

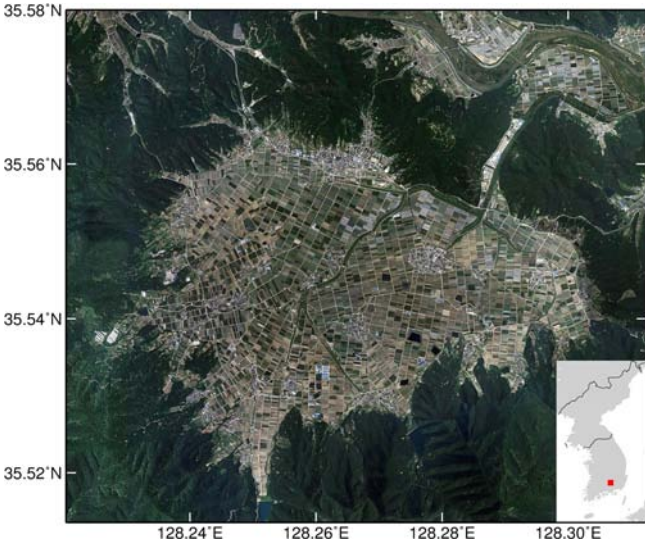


Fig. 1. Location of the Chogye basin in Hapcheon-gun, Gyeongsangnam-do.

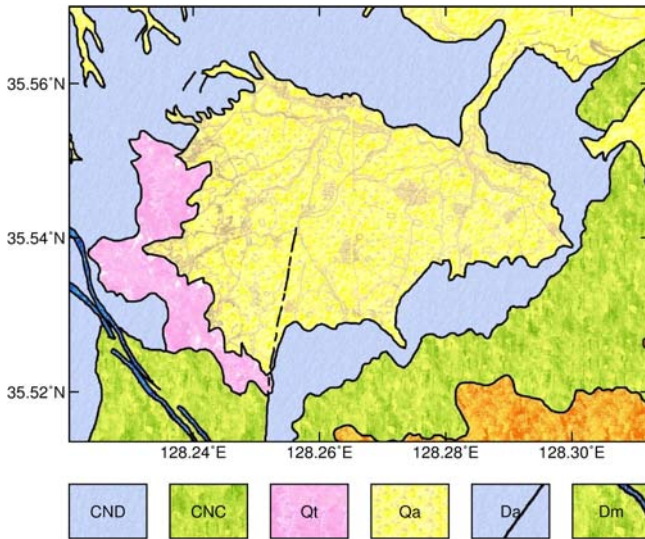


Fig. 2. Geological map of the Chogye basin.

초계분지를 구성하는 지층 기반은 중생대 경상누층군에 해당하는 동명층과 칠곡층으로 이루어져 있으며, 이들 지층을 덮고 있는 미고결 충적층이 분지 내부를 차지하고 있다. 동명층(Fig. 2의 CND)은 초계분지를 둘러싼 외곽의 높은 지형을 이루는 지역의 암석의 대부분을 차지한다. 일반적으로 회색, 녹회색의 사암, 셰일, 이암, 흑색 내지 암회색의 셰일, 사질셰일과 역질사암 및 비정질 석회암 등으로 구성되어 있다. 대체로 동명층은 사암과 셰일의 호층이라 할 수 있으며 심한 깎고 메우기(cut-and-filling)가 발견된다. 동명층을 이루는 사암은 일반적으로 녹회색 또는 회색을 정하는 세립질 내지 중립질의 사암으로 모래입자가 모여 굳어진 쇠설성 퇴적암인 알코스사암이 대부분이나 하부 경사지역에서는 석회질이 대부분이다.

칠곡층(Fig. 2의 CNC)은 녹회색, 암회색, 회갈색의 사암층간에 자색의 셰일 및 이암층을 협재하고 있으며 회색 및 암회색 셰일, 이암, 암회색의 사질셰일, 석회암의 결핵체 및 역암으로 구성되어 있다. 칠곡층이 지질도의 동남부역에서 가장 광범위한 분포를 보이는데, 이것은 지층의 요곡에 의해서 나타나는 양상으로 층후의 증가와는 무관한 것으로 판단된다. 이들 기반 암 지층을 덮고 있는 충적층(Fig. 2의 Qa)이 넓게 분지 내부에 분포하며, 그 밖에 돌서령(talus; Fig. 2의 Qt), 규장암 및 규장반암과 산성암맥(Fig. 2의 Da), 중성암맥(Fig. 2의 Dm)인 섬록반암 등을 일부 지역에서 확인할 수 있다.

상시미동 관측과 분석

초계분지의 상시미동을 측정하기 위하여 두 차례에 걸쳐 야외조사를 수행하였다(Fig. 3). 상시미동 측정을 위하여 사용한 이동식 지진계는 Nanometrics사의 Taurus 기록계와 Trillium Compact 광대역 속도 센서 및 GPS와 12V 배터리로 구성되어 있다. 제1차 상시미동 관측 조사에서는 초계분지 내부에 23개 관측 지점을 설정하고, 8개의 이동식 지진계를 이용하여 관측점 당 200 Hz의 샘플율로 최소 30분 이상 동안 상시미동을 연속 기록하였다(Fig. 4). SESAME (2004)는 상시미동 관측 부지에서 예상되는 최소 기본 공명주파수에 따른 최소 상시미동 기록 지속시간을 제시하고 있다. 이에 따르면 최소 기본 공명주파수 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 Hz에 대하여 각각 30, 20, 10, 5, 3, 2분의 최소 지속시간이 필요하다. 초계분지에서 예상되는 최소 기본 공명주파수가 1 ~ 10 Hz임을 고려하였을 때, 최소 30분의 상시미동 기록시간은 위 조건을 만족하기에 충분한 것으로 판단된다. 또한 상시미동 측정 시간은 대부분 낮 시간의 일과 중에 이루어졌기 때문에, 주변 농업 경작에 따른 생활 잡음을 완전하게 피하기는 어렵다. 다만 식사 시간 등과 같이 주

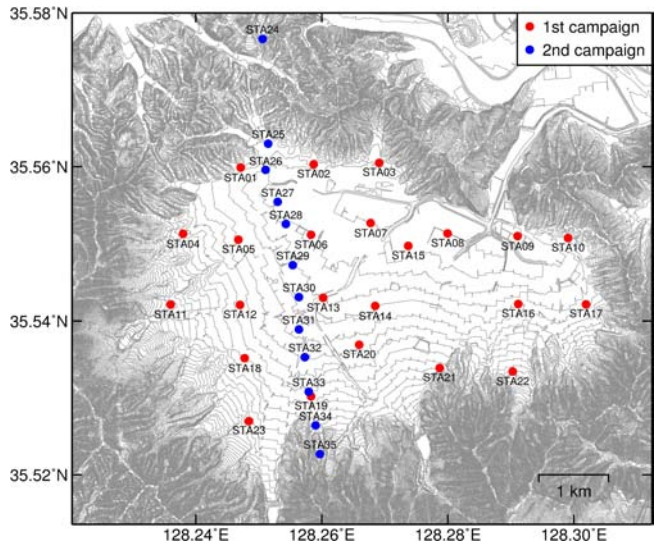


Fig. 3. Map of microtremor measurement sites in the Chogye basin.



Fig. 4. Example of microtremor measurement in the Chogye basin.

변에서 잡음원이 발생하는지 여부를 육안으로 확인하여 잡음이 발생하는 시간을 기록하고, 자료 처리 단계에서 이 시간대의 상시미동 기록 사용을 배제하였다. 무엇보다 충분한 기록 지속시간으로 판단되는 최소 30분 이상의 연속기록을 확보하였기 때문에, 인위적인 잡음으로 인하여 상시미동 분석 결과에 영향을 미칠 수 있는 구간은 최대한 배제할 수 있었다. 제1차 상시미동 관측 조사에서 분지 내부 관측점만을 설정한 반면에, 제2차 상시미동 관측 조사에서는 분지를 남북 방향으로 가로지르는 축선을 따라서 분지 내부뿐만 아니라 분지 외곽의 산을 포함하는 12개의 관측점을 설정하였다. 이를 통해서 지표면 고도와 공명주파수 사이의 상관관계를 파악할 수 있다.

관측점 하부 지층에 대한 정보를 파악하기 위하여 상시미동 측정 자료에 대한 H/V 스펙트럼 비 방법을 적용하였다. 이 연구에서 H/V 스펙트럼 비를 계산하기 위한 절차는 Wathelet (2006)이 제시한 바와 전체적으로 같고, 세부적으로 계산에 사용한 변수들에 대한 사항은 다음과 같다. 상시미동 관측기록으로부터 불필요한 인위적인 잡음 부분을 제거하고 60초의 시간창과 5초의 시간창 이동 간격을 설정하였다. 각 시간창에 대하여 시간이력의 기울기와 평균을 제거하고, 각 시간창의 양 끝단 5%에 해닝(Hanning) 감소함수를 적용한 후에 푸리에 변환을 하였다. 이 결과로 얻은 푸리에 진폭 스펙트럼에 대하여 256 샘플점 크기의 창을 이용하여 산술평균 부드럽게 하기(smoothing) 알고리즘을 적용하였다. 각 시간창의 푸리에 변환 영역에서 H/V 스펙트럼 비를 다음 식 (1)과 같이 계산하였다:

$$\frac{H}{V} = \sqrt{\frac{V_{NS}^2 + V_{EW}^2}{2V_{UD}^2}} \quad (1)$$

식 (1)에서 V_{NS} , V_{EW} , V_{UD} 는 각각 남북, 동서, 상하 방향 성분의 푸리에 진폭 스펙트럼을 나타낸다. 이 연구에서 사용한 H/V 스펙트럼 비 계산 과정은 Seismological Analysis Code (SAC; Goldstein *et al.*, 2003)의 매크로로 구현되었다.

하나의 관측점에서 얻은 상시미동 자료의 모든 시간창에 대하여 H/V 스펙트럼 비를 계산한 후, 이들을 산술평균하여 최

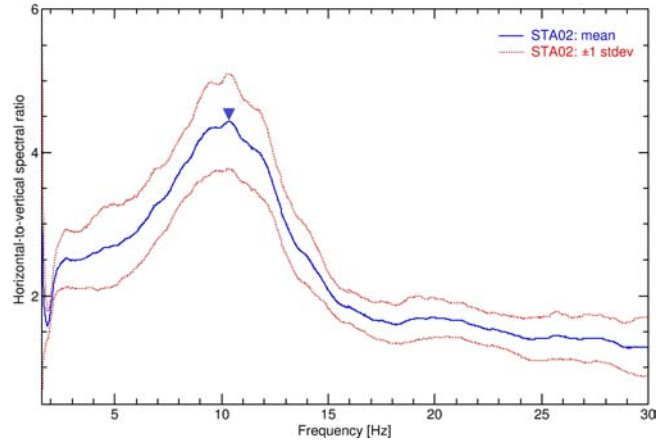


Fig. 5. Example showing the determination of the fundamental resonance frequency (blue triangle) from horizontal-to-vertical spectrum ratio of microtremor records measured at a single site. The site is STA02 in Fig. 3.

종적인 H/V 스펙트럼 비를 산출하였다. H/V 스펙트럼 비의 첫 번째 정곡점에 해당하는 주파수가 해당 부지의 기본 공명 주파수를 대표한다는 사실에 근거하여(SESAME, 2004), 각 관측점에 대한 부지 고유 기본 주파수를 결정하였다. Fig. 5는 초계분지에서 측정된 상시미동 자료를 이용하여 H/V 스펙트럼 비를 계산하고 기본 공명주파수를 결정하는 예를 나타낸다.

H/V 스펙트럼 비 방법은 공명하는 파동의 한쪽 끝을 고정하는 역할을 하는 기반암과 이 파동이 퇴적분지 내부를 전파함에 따라 자유롭게 움직일 수 있도록 열려 있는 것처럼 거동하는 분지 표면까지의 단순한 2층 모델로 퇴적분지를 가정한다. 이러한 가정은 4분의 1 파장(λ) 길이의 홀수 배에 해당하는 배음(multiple) 파동이 분지 표면과 기반암 깊이까지의 구간에서 공명하는 상황과 같다. 이러한 퇴적분지에 대한 파동의 전달함수에 최저 정곡점 주파수는 파동의 4분의 1 파장에 해당한다. 공명주파수(f)는 분지 내부를 통과하는 파동의 속도(v_s)를 파장으로 나눈 것과 같다. 또한 파동이 공명하는 분지의 깊이(D)는 4분의 1 파장과 같다. 이들 관계를 결합하면 다음과 같은

식을 얻을 수 있다:

$$f_r = \frac{v_s}{\lambda}, \quad (2)$$

$$D = \frac{n\lambda}{4}, \text{ for } n = 1, 3, 5, \dots \quad (3)$$

$$f_r = \frac{n v_s}{4D}. \quad (4)$$

식 (4)는 퇴적분지의 전단파 속도와 깊이 및 공명주파수 사이의 관계를 나타낸다. H/V 스펙트럼 비로부터 공명주파수를 측정하고, 퇴적분지에 대한 조사로부터 전단파 속도를 알고 있다면, 이 지점에서의 퇴적분지 깊이에 대한 결정할 수 있다. 이 연구에서는 초계분지에 대한 이전 조사 정보를 파악하지 못하였다. 따라서 속도 정보에 대한 소요를 우회할 수 있는 다른 방법을 도입할 필요가 있다.

Ibs-von Seht and Wohlenberg (1999)는 퇴적층의 기본 공명주파수가 층의 두께와 밀접한 상관관계가 있음을 보였고, 다음과 같은 형태를 갖는 비선형 관계식을 제안하였다:

$$D = a f_r^b. \quad (5)$$

이 식에서 a 와 b 는 퇴적층의 기본 공명주파수와 두께 사이의 상관관계수에 대한 표준 오차를 나타낸다. 식 (5)는 시추공으로부터 기반암까지의 깊이 정보를 기본 공명주파수와 대비하는 경험식의 형태로써, 어떤 지역에서 퇴적층 속도에 대한 정보가 없는 상황에서도 퇴적층의 두께를 파악할 수 있음을 보여준다. 한편, Sun (2010)은 국내 지반 운동에 대한 부지 분류 체계를 합리적으로 개선하기 위하여 부지 주기(T_G)를 분류 기준으로 보완 제시하는 과정에서, 부지 주기와 기반암 심도 사이의 관계를 나타내는 경험식을 다음과 같이 제시하였다.

$$T_G = 0.010D \quad (6)$$

$$f_r = \frac{100}{D} \quad (7)$$

식 (7)은 (5)가 선형화된 형태이다. 비록 식 (6) 또는 (7)이 국내 75개 부지에 한정된 자료를 이용하여 도출한 관계식이지만, 부지 주기와 기반암 심도 사이의 상관성이 매우 높음을 확인할 수 있다. 향후 초계분지 지역에 대한 시추조사 등의 지반조사 결과를 종합하여, 이 지역에 적합한 기본 공명주파수와 퇴적층 두께 사이의 관계식을 도출하는 것은 광범위한 속도 분포를 파악하는데 있어서 매우 중요하다. 한편, 직접적으로 사용 가능한 지반조사 자료가 없는 상황을 감안하여, 초계분지 지역이 식 (6) 또는 (7)과 같이 국내 지반의 일반적인 특성을 따르는 것으로 가정하였다. 각 상시미동 관측점에 대하여 H/V 스펙트럼 비로부터 측정된 기본 공명주파수를 식 (7)에 대입하여 측정 지점 하부의 공명 퇴적층 두께를 파악하였다.

결과와 토의

어떤 지역에 공명주파수와 일치하는 지진파가 도달하면 지반의 운동이 급격히 활발해지는 증폭을 일으킨다. 특히 초계분지와 같이 지역을 구성하는 지질이 암반이 아닌 퇴적층으로 이루어졌을 경우에, 느린 지진파 전파속도로 인하여 지진 지반 운동의 증폭현상이 더욱 크게 나타날 수 있다. 또한 초계분지는 그릇과도 같이 주변이 모암으로 둘러싸여 있는 닫힌 분지

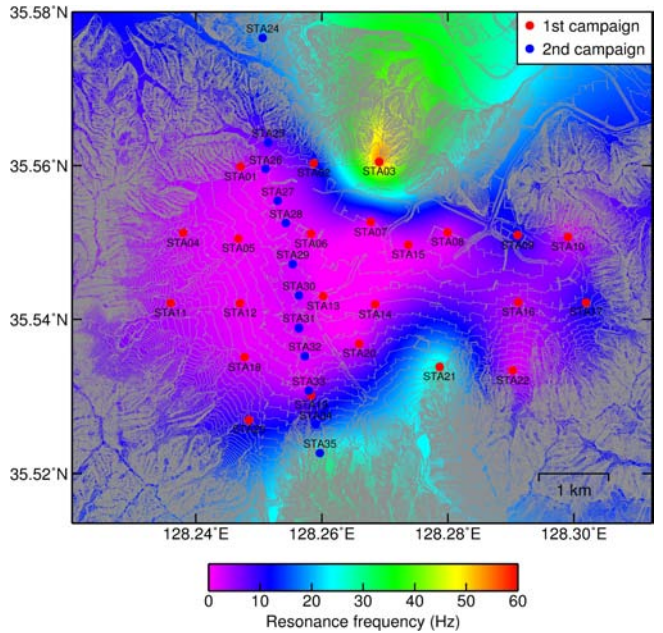


Fig. 6. Distribution of the fundamental resonance frequency in the Chogye basin.

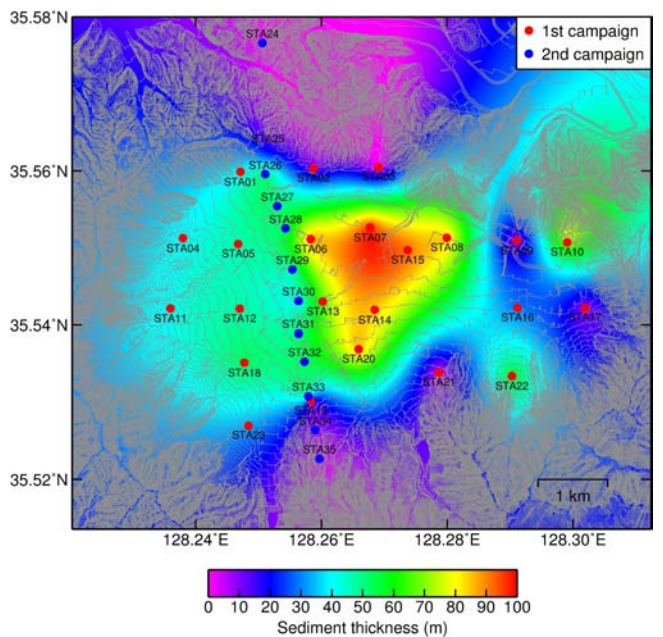


Fig. 7. Distribution of sediment thickness in the Chogye basin.

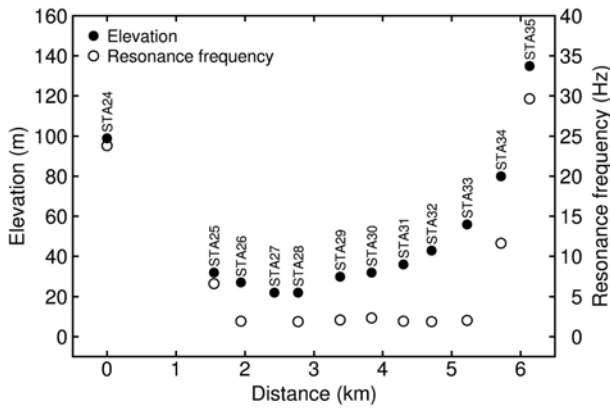


Fig. 8. Comparison of elevation and the resonance frequency along the profile crossing the Chogye basin in north-south direction.

의 형태를 갖고 있으며, 이러한 단한 분지에서는 입사한 지진 에너지가 분지 내에서 다중 반사파를 형성하며 에너지의 집중이 발생하기 쉽다. 따라서 초계분지라는 단한 분지의 공명주파수를 측정하는 것은 지진재해도 평가의 측면에서 이 지역에 고유한 지진응답을 추정하는데 중요한 자료로 활용될 수 있다.

초계분지에서 측정한 상시미동에 대하여 얻은 H/V 스펙트럼 비로부터 기본 공명주파수를 결정하고(Fig. 6), 국내 지반에 대하여 알려진 기본 공명주파수와 퇴적층 두께의 상관관계를 이용하여 상시미동 관측점 하부의 퇴적물의 두께를 추정하였다(Fig. 7). 퇴적층 두께는 초계분지의 중앙부에서 퇴적층과 하부의 퇴적 기반암 사이가 깊고 분지의 외곽으로 갈수록 얇아진다는 것을 보여준다. 상시미동 자료를 이용하여 결정한 기본 공명주파수 최저값은 분지 중앙부에서 1.03 Hz이며, 이로부터 추정한 최대 퇴적층 깊이는 거의 100 m에 이른다. 이 결과는 Choi *et al.* (2001, 2004)에서 인용한 시추조사 결과에서 80 m 깊이까지 퇴적암이 존재한다는 사실과도 잘 부합한다.

한편, 퇴적층 두께의 급격한 변화는 분지의 북쪽과 남쪽 경계를 따라 보이며, 동쪽을 향해서도 다소 급한 경사를 갖는다. 이러한 양상은 동서 방향으로 길고 서쪽 방향을 향해서 분지의 폭이 넓게 발달하는 초계분지의 형태와 관련 있을 것으로 추정되며, 급경사 지역에서는 상대적으로 얇은 깊이에서 퇴적 기반이 존재한다는 것을 지시한다. 분지 내부의 관측점 보완과 더불어 분지 단면을 따라 기본 공명주파수의 변화를 관찰할 목적으로 수행된 제2차 상시미동 관측 조사는 초계분지의 중앙부를 남북 방향으로 가로질러서 분지 내부를 포함하여 외곽의 산지에 이르는 측선을 따라 이루어졌다. Fig. 8은 남북방향의 측선을 따라 측정한 기본 공명주파수와 지형고도의 변화를 비교한 것이다. 물리적으로 연관되지 않은 두 변수가 뚜렷한 상관관계를 갖고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 기본 공명주파수가 퇴적물의 두께와 직접적인 관계에 놓여 있다고 가정할 때, 초계분지를 가로지르는 지형의 변화는 피복한 퇴적물의 두께에 영향을 주었음을 시사한다. 그러나 관입압력과 주변 모암

사이의 차별 침식이나 운석구와 같은 외부 충격에 의한 분지 형성 등과 같이, 어느 하나에 해당하는 초계분지의 생성 원인에 대한 직접적인 증거는 아니다.

결론

이 연구에서 경상남도 함천군 초계면과 적중면에 위치한 타원형의 초계분지를 대상으로 35개 지점에서 상시미동 관측을 실시하였다. 두 차례에 걸쳐 획득한 상시미동 관측자료를 바탕으로 시간에 따른 진폭의 변화를 주파수 영역으로 변환하여, 3 성분 주파수 영역 상시미동 자료에 대한 H/V 스펙트럼 비를 계산하였다. 이 계산 결과에서 각 관측 지점에 대한 공명주파수를 측정하였다. 이 과정을 통하여 측정 고도와 공명주파수 관계를 알 수 있었고, 퇴적물의 두께와 공명주파수가 전반적으로 서로 반비례 관계에 있음을 확인하였다. 상시미동 자료를 이용하여 측정한 기본 공명주파수 최저값은 초계분지 중앙부에서 1.03 Hz에 이른다. 이전 연구로부터 알려진 우리나라의 기본 공명주파수와 퇴적층 두께 사이의 상관관계로부터 초계분지의 퇴적층 두께는 최대 100 m에 이르고, 이 깊이는 분지 내에서 수행된 것으로 알려진 시추조사와도 상응하는 결과이다. 또한 초계분지를 가로지르는 지형의 변화가 퇴적층 두께와 직접적인 상관이 있는 것으로 보이지만, 초계분지의 생성 원인에 대한 어떤 직접적인 증거로 활용하기는 어렵다. 이 연구로부터 얻은 초계분지의 퇴적층과 기반암 사이의 3차원 경계 분포는 상시미동 관측 자료의 H/V 스펙트럼 비로부터 추정한 결과이다. H/V 스펙트럼 비의 기본 공명주파수가 의미하는 바는 원리적으로 기반암과 그 상부를 피복하고 있는 퇴적층 사이의 임피던스 차이에 의하여 나타나는 것이기 때문에, 전단파속도가 두 지층을 구분하는 주요 인자라고 할 수 있다. 따라서 초계분지의 3차원 경계분포는 향후 이 지역에 대한 지진동 부지 응답 효과 연구에서 기본 분지 모델로 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음. 상시미동 측정은 부경대학교 지구환경과학과 학부생 장보라, 전해진, 조아현, 한효정, 양수진의 지질조사실습 과제 수행을 통하여 이루어졌습니다. 논문에 대하여 상세한 의견을 제시하여 수정에 도움을 주신 심사위원께도 감사를 드립니다.

References

- Cha, Y. H., Kang, J. S., and Jo, C.-H., 2006, Application of linear-array microtremor surveys for rock mass classification in urban tunnel design, *Exploration Geophysics*, **37**, 108-113.
- Chang, J. H., 2002, *Granite Erosion Landforms of Korea*,

- Sungshin University Press (in Korean).
- Chang, K. H., 1968, *Explanatory text of the geological map of Habcheon sheet (1:50,000)*, Geological Survey of Korea, 21p (in Korean).
- Chávez-García, F. J., and Kang, T.-S., 2014, Lateral heterogeneities and microtremors: Limitations of HVSr and SPAC based studies for site response, *Engineering Geology*, **174**, 1-10.
- Choi, K.-S., Lee, S.-W., and Lee, Y.-A., 2001, Circular landform and basin of the Chogye-Jeokjung area in Hapcheon-gun, *2001 Fall Conference of the Geological Society of Korea* (in Korean).
- Choi, K.-S., Lee, S.-W., and Lee, Y.-S., 2004, A study on the sub-stratum structure in and around the Chogye-myon and Jukjung-myon of Hapchun-gun by gravity analysis, *The Journal, College of Education, Pusan National University*, **43**, 201-227 (in Korean with English abstract).
- Delgado, J., López Casado, C., Giner, J., Estévez, A., Cuenca, A., and Molina, S., 2000, Microtremors as a geophysical exploration tool: Applications and limitations, *Pure and Applied Geophysics*, **157**, 1445-1462.
- Field, E. H., Hough, S. H., and Jacob, K. H., 1990, Using microtremors to assess potential earthquake site response: A case study in flushing meadows New York City, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **80**, 1456-1480.
- Field, E., and Jacob, K., 1993, The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, **20**, 2925-2928.
- Goldstein, P., Dodge, D., Firpo, M., and Minner, L., 2003, SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to *The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Edited by W. H. K Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger, Academic Press, London.
- Hinzen, K.-G., Weber, B., and Scherbaum, F., 2004, On the resolution of H/V measurements to determine sediment thickness, a case study across a normal fault in the Lower Rhine Embayment, Germany, *J. Earthq. Eng.*, **8**, 909-926.
- Hong, M. H., and Kim, K. Y., 2010, H/V Spectral-ratio Analysis of Microtremors in Jeju Island, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **13**, 144-152 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S., and Yoon, S.-O., 2016, Geomorphic development of the Jeogchung-Chogye basin and inner alluvial fan, Hapcheon, South Korea, *J. Korean Assoc. Regional Geographers*, **22**, 225-239 (in Korean with English abstract).
- Hwang, Y. G., and Kim, K. Y., 2006, Shallow shear-wave velocities using the microtremor survey method, *J. Eng. Geology*, **16**, 381-392 (in Korean with English abstract).
- Ibs-von Seht, M., and Wohlenberg, J., 1999, Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **89**, 250-259.
- Jung, H., Kim, H. J., Jo, B. G., and Park, N. R., 2010, The microtremor HVSr in the SW Korean Peninsula I: Characteristics of the HVSr peak frequency and amplification, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **31**, 541-554 (in Korean with English abstract).
- Kanai, K., Tanaka, T., and Osada, K., 1954, Measurements of micro-tremors 1, *Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo University*, **32**, 199-210.
- Kang, T.-S., and Shin, J. S., 2011, Stability and correlation properties of microtremor response, *Geosciences Journal*, **15**, 95-103.
- Kim, K. W., and Lee, Y. J., 1969, *Explanatory text of the geological map of Changryeong sheet (1:50,000)*, Geological Survey of Korea, 18p (in Korean).
- Kim, K. Y., and Hong, M. H., 2010, Shear-wave velocity structures at the foot of Mt. Halla using the spatial autocorrelation method, *J. Geological Soc. Korean*, **46**, 39-48 (in Korean with English abstract).
- Kim, K. Y., and Hong, M. H., 2012, Shear-wave velocity structure of Jeju Island, Korea, *Geosciences Journal*, **16**, 35-45.
- Kim, S. K., 1991, Microtremor and underground structure, *J. Eng. Geology*, **1**, 109-120 (in Korean with English abstract).
- Kim, S. K., and Hwang, M. W., 2002, Estimation of subsurface structure and ground response by microtremor, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **23**, 380-392 (in Korean with English abstract).
- Lermo, J., and Chávez-García, F. J., 1993, Site effects evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **83**, 1574-1594.
- Lermo, J., Rodríguez, M., and Singh, S. K., 1988, The Mexico earthquake of september 19, 1985 – natural period of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements and strong motion data, *Earthquake Spectra*, **4**, 805-814.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*, **30**, 25-33.
- Ohta, Y., Kagami, H., Goto, N., and Kudo, K., 1978, Observation of 1 to 5-s microtremors and their application to earthquake engineering. Part I: Comparison with long-period accelerations at the Tokachi-oki earthquake of 1968, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **68**, 767-779.
- Özalaybey, S., Zor, E., Ergintav, S., and Centiz Tapırdamaz, M., 2011, Investigation of 3-D basin structures in the Izmit Bay area (Turkey) by single-station microtremor and gravimetric methods, *Geophy. J. Int.*, **186**, 883-894.
- Parolai, S., Bormann, P., and Milkereit, C., 2002, New relationship between vs, thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany), *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 2521-2527.
- Paudyal, Y. R., Yatabe, R., Bhandary, N. P., and Dahal, R. K., 2013, Basement topography of the Kathmandu Basin using microtremor observation, *J. Asian Earth Sci.*, **62**, 627-637.
- SESAME, 2004, *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: Measurements, processing and interpretation*, SESAME European Research Project WP12 – Deliverable D23.12, European Commission – Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-

00026 SESAME.

Sun, C.-G., 2010, Suggestion of additional criteria for site categorization in Korea by quantifying regional specific characteristics on seismic response, *Geophysi. and Geophys. Explor.*, **13**, 203-218 (in Korean with English abstract).
Wathelet, M., 2006, H/V measurements, *Geopsy Manual*, <http://www.geopsy.org/documentation/geopsy/hv.html> (December

12, 2016 Accessed).

Yun, W. Y., Park, S.-C., and Kim, K. Y., 2013, Near-surface shear-wave velocities derived from microtremors and teleseismic data at the Hwacheon seismic station, *Geophysi. and Geophys. Explor.*, **16**, 190-195 (in Korean with English abstract).