Research Paper

Expected Segmentation of the Chugaryung Fault System Estimated by the Gravity Field Interpretation

Sungchan Choi¹, Eun-Kyeong Choi^{1,*}, Sung-Wook Kim¹, Young-Cheol Lee²

¹Geo-information Institute, GI Co. Ltd., Busan 47598, Korea

²Institute of Geologic Hazard & Industrial Resources, Pusan National University, Busan 46241, Korea

*Corresponding author : choiek@naver.com

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 20 October 2021

Received in revised form 28 November 2021

Manuscript accepted 21 December 2021

Available online 28 December 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.6.743>

Research Highlights

- To analyze the three-dimensional distribution of the Chugaryung fault zone, gravity field interpretation such as curvature analysis and Euler deconvolution was performed.
- The extension and activity of the anticipated fault were evaluated by comparing the gravity anomaly and the location of the epicenter.

ABSTRACT

The three-dimensional distribution of the fault was evaluated using gravity field interpretation such as curvature analysis and Euler deconvolution in the Seoul-Gyeonggi region where the Chugaryeong fault zone was developed. In addition, earthquakes that occurred after 2000 and the location of faults were compared. In Bouguer anomaly of Chugaryeong faults, the Pocheon Fault is an approximately 100 km fault that is extended from the northern part of Gyeonggi Province to the west coast through the central part of Seoul. Considering the frequency of epicenters is high, there is a possibility of an active fault. The Wangsukcheon Fault is divided into the northeast and southwest parts of Seoul, but it shows that the fault is connected underground in the bouguer anomaly. The magnitude 3.0 earthquake that occurred in Siheung city in 2010 occurred in an anticipated fault (aF) that developed in the north-south direction. In the western region of the Dongducheon Fault ($\approx 5,500$ m), the density boundary of the rock mass is deeper than that in the eastern region ($\approx 4,000$ m), suggesting that the tectonic movements of the western and eastern regions of the Dongducheon Fault is different. The maximum depth of the fracture zone developed in the Dongducheon Fault is about 6,500 m, and it is the deepest in the research area. It is estimated that the fracture zone extends to a depth of about 6,000 m for the Pocheon Fault, about 5,000 m for the Wangsukcheon Fault, and about 6,000 m for the Gyeonggang Fault.

Keywords : gravity field interpretation, curvature analysis, Pocheon fault, Wangsukcheon fault, Dongducheon fault

Citation: Choi, S., Choi, E.-K., Kim, S.-W., Lee, Y.-C. (2021) Expected Segmentation of the Chugaryung Fault System Estimated by the Gravity Field Interpretation. Korea Economic and Environmental Geology, v.54, p.743-752, doi:10.9719/EEG2021.54.6.743.

연구논문

추가령단층대의 중력장 데이터 해석

최승찬¹ · 최은경^{1,*} · 김성욱¹ · 이영철²

¹지아이 지반정보연구소

²부산대학교 지질재해·산업자원연구소

*책임저자 : choiek@naver.com

요 약

추가령 단층대가 발달하는 서울-경기 지역에서 단층의 3차원적인 규모를 확인하기 위해서, 곡률 분석(Curvature analysis)과 오일러 디콘볼루션(Euler deconvolution) 등의 중력장 해석 방법을 이용하여 잔여 중력이상을 해석하였다. 또한 2000년 이후 발생한 진앙과 비교하여 단열 특성을 비교하였다. 부계이상에서 포천단층은 경기 북부에서 서울의 중심부를 지나서 서해안 지역까지 연결된 약 100 km 단층으로 진앙이 빈도가 높아 활성 단층의 가능성이 있고, 단층을 경계로 동서 방향으로 7 km 정도의 변위가 관찰된다. 왕숙천단층은 서울을 중심으로 북동부와 서남부로 분절되어 있으나 지하에서 연결을 암시하는 단층 분절로 추정되는 중력이상대가 관찰된다. 특히 2010년 시흥에서 발생한 규모 3.0의 지진은 남북 방향으로 발달하는 20 km 길이의 단층에 의한 것으로 판단된다. 동두천단층의 서쪽 지역(≒5,500 m)은 중력경계면이 동쪽 지역(≒4,000 m)보다 깊게 나타나며 이는 동두천단층을 중심으로 서쪽 지역과 동쪽 지역의 지구조적인 운동이 다르다는 것을 시사한다. 동두천단층에서 발달한 파쇄대의 최대 깊이는 약 6,500 m이며 연구 지역에서는 가장 깊다. 포천 단층은 약 6,000 m, 왕숙천 단층은 약 5,000 m, 경강 단층은 약 6,000 m 깊이까지 파쇄대가 연장되는 것으로 판단된다.

주요어 : 중력장 해석, 곡률 분석, 포천단층, 왕숙천단층, 동두천단층

1. 서 언

한반도는 인접하고 있는 중국 북동부와 일본 열도에 비해서 지진 활동이 적은 편으로 지진 안전지대로 인식되었다. 그러나 2016년과 2017년 연이어서 발생한 경주지진(M5.8, Fig. 1A의 GJ 지역)과 포항지진(M5.4, Fig. 1A의 PO 지역)은 한반도가 더 이상 지진으로부터 안전하지 않다는 인식의 변화를 끌어낼 정도로 큰 충격을 주었다. 경주지진은 한반도의 계기지진 관측 이래 최대 규모의 지진으로 양산단층의 운동에 의해서 중부 분절의 남측말단부에 연결된 주변 단층의 움직임(Kim et al., 2017)이 경상분지의 평균 밀도(2.67 g/cm^3)에 비해서 밀도가 낮은 고립된 화강암(2.60 g/cm^3)에 응력이 작용하여 발생한 것으로 보고되었다(Choi et al., 2019). 2017년 11월에 발생한 포항지진의 원인에 대해서는 다양한 이견이 있지만, 대체로 경주지진에 의해서 활성화된 포항 분지의 알려지지 않은 단층에서 일어난 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2018; Choi et al., 2020). 이처럼, 경주지진과 포항지진과 같은 큰 규모의 지진들은 양산단층(Fig. 1A에서 YSF, KIGAM, 2002)과 같은 대규모 단층의 움직임에 의한 것으로 알려져 있으며, 이러한 대형 단층의 주변에 미확인된 숨은 단층 위치를 알아내는 것은 현재의 지진 활동

뿐만 아니라 미래의 지진 활동을 예측하는 데 매우 중요하다.

연이은 두 번의 지진 이후 양산단층을 중심으로 경상 분지 지역의 활성단층 연구가 국가연구사업으로 지난 5년간 진행되었다(Kim et al., 2017; 2020). 연구의 주된 방향은 중력장 해석을 통해 단층의 위치를 확인하고 3차원적인 규모를 파악하는 작업으로 수행되었으며, 그 성과가 매우 성공적이었다(Choi et al., 2019; 2020; 2021; Sohn et al., 2020). 한편, 전체 인구의 절반이 거주하고 있는 수도권 지역은 양산단층에 준하는 규모의 취성전단대인 추가령단층대(Fig. 1A에서 CFS로 표시된 빨간색의 단층선)가 북동-남서 방향으로 수도권 전역에 분포한다(Choi et al., 2012; Chung et al., 2014).

수도권에서 경주 및 포항지진과 유사한 규모의 지진이 발생할 경우, 물리적 피해와 정신적 충격은 경주와 포항지진 때보다 몇 배는 더 클 것으로 예측된다. 효과적인 지진 대응 체계 마련을 위해 수도권 지역에 분포하는 단층의 존재를 확인하기 위한 지질 및 지구물리화학적 연구는 매우 시급한 과제이나 다음과 같은 문제점들로 인해서 연구에 제약이 있다. 첫째로, 지표면의 많은 지역이 시멘트, 아스팔트 등으로 포장되어 단층운동에 수반된 변위를 확인하기 위한 야외 지질조사에 제약이 따른다. 둘째로, 비행금지 구역이 많은 수도권 지역에서 제4기 변

Fig. 1. (A) Study area (green solid rectangle) locates in the western part of the Gyeonggi Massif, middle part of the Korean peninsula. CFS: Chugaryung Fault System, YSF: Yangsan Fault, GY: Gyeongju earthquake, PO: Pohang earthquake. (B) The NNE-SSW directing Chugaryung Fault System (CFS in A) is composed of several fault lines numbered by 1 ~ 7. Gravity stations in the study area were about 5,000 points, which are indicated by green dots. (C) The Annual frequency of earthquake registered in the study area shows a clear difference before and after the Gyeongju earthquake (black rectangle). The annual earthquake frequency after the Gyeongju earthquake increased rapidly to more than 4 times.

이 정도를 파악하기 위한 LiDAR 및 항공 촬영 등의 작업은 거의 불가능하다. 셋째로, 표층의 대부분이 포장된 수도권에서 굴착 내지 탄성과 탐사와 같은 연구용 파괴 검사를 실시할 공간이 한정적이다. 그러므로, 수도권 지역에서의 활성단층 탐사에는 중력장 탐사를 통한 3차원 밀도 구조 해석과 같은 비파괴 지구물리학적 연구 방법이 효과적인 대안이 될 수 있다.

이 연구는 정상분지를 중심으로 수행하였던 지구퍼텐셜 연구의 경험을 바탕으로, 수도권 지역의 추가령단층계에 속한 단층의 규모와 지금까지 알려지지 않은 미확인 단층의 분포를 파악하기 위해 수행되었고, 곡률 분석(Curvature analysis)과 오일러 디콘볼루션(Euler deconvolution) 등의 중력장 해석을 이용하였다. 지상에서 측정된 중력장 해석은 숨겨진 단층의 위치와 규모를 확인하는 방법으로 유용하며 지진의 진원과 빈도 등의 자료와 통합하여 활성화 여부를 판단하는 중요한 정보가 될 것이다.

2. 연구 지역

연구 지역(Fig. 1A에서 녹색 실선으로 표시된 지역)은

서울, 경기도 및 강원도 서쪽 일부를 포함한 수도권 지역으로 우리나라 인구의 절반이 넘는 약 2천5백만 명의 인구가 거주하고 있으며, 전국 건축물의 약 25%(제공: 국가통계포털, kosis.kr)가 밀집된 곳이다. 음영도(Fig. 1B)에서 보는 것과 같이, 수도권 일원은 북북동에서 남남서로 이어지는 대규모 선상 구조선들에 의해서 분할되는데, 전문가마다 다소의 이견이 있지만, 대체로 이러한 구조선을 통칭하여 추가령단층대(Choi et al., 2012; Chung et al., 2014)라고 한다.

2.1. 추가령단층대

추가령단층대는 양산단층(Fig. 1A의 YSF, KIGAM, 2002)과 거의 평행하게 북북동 내지 북동 방향의 주향으로 동해안 원산에서 추가령에 이르는 협곡을 지나며 한반도 중부 지역인 평강, 철원, 연천 및 서울의 삼각산과 북한산을 통과하여 남쪽으로 충청남도 서해안까지 이어지는 대규모 구조선으로 최소 4개의 단층대로 나누어진 다(Choi et al., 2012; Chung et al., 2014).

세부적으로는 동두천단층은 철원-연천-동두천-양주-의정부-서울로 이어지는 구조선(Fig. 1B의 ①)으로 약 100 km

Fig. 2. The geological map of the study area shows that the Chugaryung fault system is mainly covered by Precambrian Gneiss, Jurassic Granites and Cretaceous volcanics. About 100 density measurements of igneous, metamorphic, and volcanic rocks are indicated by symbols that relate to the observed values (Park et al., 2009). The mean densities of the Granites, Volcanics and Gneiss are measured of 2.60, 2.56 and 2.67 g/cm³, respectively. ① - ⑦ : Fault lines (see Fig. 2 for the identifications).

연장의 대규모 단층이다. 동두천단층의 동쪽에 발달하는 포천단층(Fig. 1B의 ②)은 경기 북부의 철원에서 시작하여 포천을 지나서 양주 동쪽 지역까지 이어진다. 포천단층의 동부 지역에는 왕숙천단층(Fig. 1B의 ③)과 경강단층(Fig. 1B의 ④)이 북동-남서 방향으로 발달한다. 한강(Fig. 1B에서 HR로 표시) 남쪽에는 남북 방향의 신갈단층(Fig. 1B의 ⑤), 곤지암단층(Fig. 1B의 ⑥)과 인제 단층(Fig. 1B의 ⑦)이 잘 알려져 있다(Choi et al., 2012; Chung et al., 2014; Kwon et al., 2012).

2.2. 지진 분포

2000년부터 2019년까지 수도권에서 150여 번의 지진이 발생하였으며, 대부분은 리히터 규모 3.0 이하의 미소 지진이었다. 연평균 발생 빈도는 경주지진 이전까지 약 5회였으나 경주지진 후에는 연간 30회로 급격하게 지진의 빈도가 증가하는 경향을 보인다(Fig. 1C, 참조: necis.kma.go.kr). 이는 수도권 지역도 경주지진의 영향으로 지반이 불안정해졌다는 것을 의미함과 동시에 한반도 내에서 경주지진과 같은 규모의 지진이 발생할 경우, 수도권 지역에서도 다양한 규모의 여진이 언제든지 일어날 수 있다는 것을 의미한다.

연구 지역에서 발생한 지진 중에서 가장 규모가 큰 것은

수도권 남서부 시흥시(Fig. 2에서 SE로 표시된 지역)에서 2010년에 발생한 규모 3.0의 지진이다(necis.kma.go.kr). 시흥지진은 광역적으로 추가령단층대에 속하는 지역이지만 지질도와 선행 지질조사에서 미확인된 숨은 단층에서 발생한 특징을 가지고 있다.

2.3. 암석 밀도

대부분 수도권 지역은 경기변성암복합체에 속하는 편마암과 이를 관입하는 화강암으로 구성되어 있고(Fig. 2), 수도권 북쪽과 서쪽 지역에는 부분적으로 화산암과 화강편마암이 분포하고 있다(KIGAM, 2002). 특히 철원-연천-동두천-양주-의정부-서울로 이어지는 동두천단층(Fig. 2의 ①)을 따라서 다양한 종류의 암석들이 분포하고 있는데, 북쪽으로부터 화산암, 편마암, 화강편마암과 백악기 화강암이다.

Park et al. (2009)은 수도권 지역의 암석 노두에서 암종별로 약 200여 점의 샘플을 채취하여 밀도를 측정하였다. 분석 자료에 의하면, 수도권 지역에서 가장 많이 분포하고 있는 화산암, 편마암, 화강편마암, 백악기 화강암의 평균 밀도들은 각각 $2.56 \pm 0.15 \text{ g/cm}^3$, $2.69 \pm 0.25 \text{ g/cm}^3$, $2.63 \pm 0.2 \text{ g/cm}^3$, $2.60 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 이다(Park et al., 2009). 연구지역의 지질과 암석의 밀도 분포는 중력장 해석에 중요한 정보가 된다.

3. 중력장 해석

지구 측지학 및 지구물리화학적 연구를 목적으로, 국토지리정보원, 지질자원연구원 및 부산대학교 등에 의해서 지난 30여 년에 걸쳐서 전국적으로 중력 측정이 시행되었다. 연구를 위해 수집한 연구 지역의 중력자료는 부산대학교에서 측정한 4,646개 지점의 중력자료와 국토지리정보원에서 수준점, 삼각점, 통합기준점에서 측정하고 고시한 1,209개 지점을 포함한 총 6,476개 지점의 중력자료를 확보하였다(Fig. 1B에서 녹색 점, Choi et al., 2003; Shin, 2006; KIGAM, 2014).

부산대학교에서 측정한 자료는 모든 측정이 부산대학교 기점으로 측정되었으며, 자료처리 또한 조석보정(Tamura, 1982), 드리프트 보정, 최소자승법에 의한 망 조정을 통하여 관측 중력값을 계산함으로써 일관된 자료처리가 이루어졌다. 타 기관과의 자료 합성에 있어 고도 이상 및 부계이상도를 작성하여 측정 지점 간에 이질적인 부분을 삭제하는 정성적인 방법을 통하여 중력 자료를 구성하였으며 일관된 자료 구성을 위하여 고도보정, 부계보정, 지형보정을 다시 계산하여 중력이상도를 작성하였다.

중력이상 계산은 GRS1980계를 기준계로 결정하여 수행되었으며, 관측중력값을 고도 보정, 부계 보정, 지형보

정을 거쳐 부계이상도를 작성하였다. 고도보정은 타원체에서 높이에 따른 변화율을 2차항까지 고려한 계산식(Li and Götze, 2001)을 이용하였고, 부계이상은 구면 캡(LaFehr, 1991) 효과를 이용하여 계산하였다. Choi et al. (2007)은 NIMA(National Imagery and Mapping Agency)에서 공개한 3" × 3" 지형자료와 한반도 일원의 수심 자료를 합성 및 재편집하여 3" × 3" 지형자료를 재편집하였다. 또한, 이를 이용하여 지구 곡률을 고려한 지형보정 프로그램을 작성하였다. 이 연구에서는 Choi et al. (2007)에서 작성한 프로그램과 지형자료를 이용하여 지형보정을 수행하였다. 부계이상의 계산과 지형보정에서 지각의 평균 밀도는 2.67 g/cm^3 , 해수의 평균 밀도는 1.03 g/cm^3 을 적용하였다.

3.1. 부계이상 및 잔여중력이상

Fig. 3A는 연구 지역의 부계이상도(Bouguer anomaly map)이며 평균 부계이상은 약 0.5 mGal 이며 최소 -25.0 mGal 에서 최대 약 20.0 mGal 의 범위를 보인다. 15.0 mGal 보다 높은 부계이상은 주로 서쪽 해안가를 따라서 나타나며, 평균 부계이상(0.5 mGal)보다 낮은 값들은 추가령단층대를 따라서 북북동쪽에서 남남서쪽으로 이어져 나타나고 있다.

수도권 지역에서 주로 발생하고 있는 지진의 깊이는 $7\sim 15 \text{ km}$ 범위를 보이므로 상부 지각의 평균 깊이(약

Fig. 3. The complete Bouguer anomaly map (A) over the research area has a mean value of approximately -5.0 mGal and a range from -25.0 to 20.0 mGal . The higher Bouguer gravity anomalies relative to the mean value (-5.0 mGal) are generally observed to the west along the coast. The anomalies lower than the mean value (-5 mGal) reveal along the Chugaryoung fault system, where the Jurassic Granite are mainly exposed. ① - ⑦ : Fault lines (see Fig. 2 for the identifications). (B) The regional gravity anomalies are calculated using a wavelength of 20 km .

10 km)까지의 밀도 분포를 파악하는 것은 수도권 지역의 지진 발생 원인을 분석하는 데 매우 중요한 정보를 제공한다. 중력장에서 파장(wave length)의 길이와 대략적인 깊이에 대한 상관관계 연구 중에서 본 연구에서 채택한 방법은 다음과 같다:

$$L_c = \frac{3}{\sqrt{2}} D_{\max} \quad (\text{Degro, 1986; Lahmeyer, 1990})$$

여기서 L_c 는 파장의 길이를 나타내며, $D_{\max}$ 는 파장이 미치는 최대 깊이를 나타낸다. 위의 식으로부터 10 km 안에 분포하는 상부 지각의 중력효과 값만을 계산하기 위해서는, 부계이상 값(Fig. 3A)에서 약 20 km의 장파장(long wave length)으로 표현되는 광역 중력이상 효과(Fig. 3B)를 제거해 주어야 한다. 그 결과로 계산한 연구 지역 내에서의 잔여 중력이상(Residual gravity field)을 동서 및 남북 방향으로 200미터 간격의 격자 크기로 그리딩(Gridding)하여 Fig. 4A에 나타내었다. 수도권 지역의 잔여중력이상의 평균은 약 1.0 mGal이며, 최소 약 -10 mGal에서 최대 약 14 mGal의 변화를 나타낸다. Fig. 4A에 제시된 바와 같이 잔여중력이상 지도와 부계이상도를 비교하면 추가령단층대를 따라서 북북동-남남서 방향의 낮은 중력이상의 분포가 뚜렷하게 표현된다.

지질도의 암석 분포와 잔여 중력이상 분포를 비교하면,

연천지역(Fig. 4A에서 YEA로 표시된 지역)에 나타나는 낮은 중력이상은 상대적으로 낮은 밀도의 화산암(2.56 g/cm^3)과 밀접한 관계가 있다는 것을 확인할 수 있다. 그 이외의 지역에서 중력이상이 낮게 관찰되는 지역은 편마암(평균 약 2.69 g/cm^3)에 비해 저밀도 암석인 백악기 화강암(평균 약 2.60 g/cm^3)의 분포지와 일치한다.

3.2. 곡률 분석과 미확인 단층

중력장의 곡률 분석(Curvature analysis)은 지표면 가까운 곳에 존재하는 밀도의 경계면을 알아내기 위해서 사용되는 방법이다(Roberts, 2001; Choi et al., 2020; 2021). 곡률 분석에 대한 이론적인 배경은 지난 연구(Choi et al., 2021)에서 자세하게 설명되어 있어 간단히 소개하고자 한다. 밀도가 같은 2개의 지표면 하부 구조(RHO1, RHO3) 사이에 밀도가 낮은 하부 구조(RHO2)가 위치하는 경우 RHO2 때문에 나타나는 이론적인 중력 분포는 가운데가 음의 값을 나타내는 것은 당연하다. 이렇게 나타난 중력 분포를 2차 미분에 의한 곡률의 기울기 값을 기준으로 하여 색깔로 표시할 수가 있다. 만약 이차 미분식에 의해서 계산된 값이 0에 가까이 접근하면, 이는 이 지역의 하부에 중력장에 영향을 미치는 밀도의 변화가 없다는 것을 뜻하며, 흰색 계통의 색으로 표시하여 지각 내에서 밀도의 변화가 없음을 표시할 수 있다. 한편 곡률이 양

Fig. 4. A residual anomaly map of the research area (A), which is calculated by subtracting the regional gravity field (Fig. 3B) from the Bouguer gravity field (Fig. 3A). The residual anomalies reflect the gravity effects of the crustal rocks much better than Bouguer anomalies (Fig. 3A). The dip curvature map (B) shows anticipated fault lines with a NE-SW direction (red dotted lines with aF2, aF5, aF8 and aF9) and a N-S direction (red dotted lines with aF1, aF3, aF4 and aF6). ① - ⑦ : Fault (see Fig. 2 for the identifications).

의 중력값에서 음의 중력값으로 넘어가는 지점(RHO1에서 RHO2로 넘어가는 경계면)의 곡률값은 당연히 음의 값을 갖게 되며, 이런 음의 곡률 값을 지도에서 파란색으로 그 반대쪽 경계면(RHO2에서 RHO1로 넘어가는 경계면) 즉 양의 곡률 값은 빨간색으로 표시할 수 있다. 즉, 지도에서 빨간색 계통과 파란색 계통의 경계들은 지각 내의 밀도의 경계 부분임과 동시에 단층의 가능성이 매우 큰 곳이라는 것을 의미한다(Choi et al., 2019; 2020; 2021).

Fig. 4B는 잔여중력이상(Fig. 4A) 분포를 곡률 분석 방식을 이용하여 위에서 언급한 색깔로 표시한 지도이다. 기존에 잘 알려진 추가령단층대의 각 단층선을 따라서 파란색과 빨간색의 경계면이 잘 나타나고 있다. 이는 대부분의 추가령 단층선들이 매우 뚜렷한 밀도의 경계면들이라는 것을 의미한다. 다만, 지질도 상에서 나타난 모든 단층선에서 뚜렷한 밀도의 경계면이 관찰되고 있지는 않은데, 그 이유는 다음과 같은 몇 가지 원인으로 설명할 수 있겠다. 첫째로 지질도에 표기된 단층의 위치가 노두 산출 부족 등의 원인으로 정확성이 떨어질 수 있다. 둘째로는 기존 단층을 중심으로 암반의 밀도 경계가 뚜렷하지 않을 수 있다. 셋째로는 단층 지역에 충분한 중력 측정 데이터가 없어서 생길 수 있는 오류일 가능성도 있다. 상세한 해석을 위해서는 다양한 지질정보의 구축과 지각 내부의 밀도 경계면을 확인하기 위해서는 더 많은 중력 측정 자료들이 필요하다.

기존 단층 경계면(Fig. 4B에서 검은색 실선)과 더불어 지금까지 지표조사에서 확인되지 않은 밀도 경계면(미확인 단층, Fig. 4B에서 빨간색 파선)들도 곡률 분석 결과로 나타난다.

1) 포천단층(Fig. 4의 ②)과 왕숙천단층(Fig. 4B의 ③) 사이에서 지금까지 알려지지 않았던 뚜렷한 밀도의 경계면(aF8, 빨간색 파선)이 관찰된다. 지질도와 비교하면 미확인 단층은 백악기 화강암의 수직적 분포와 밀접한 관계가 있으며, 추정 연장선을 따라 규모 2.0 이상의 지진이 발생한 것으로 볼 때 활성의 가능성이 매우 크다.

2) 왕숙천단층(Fig. 4의 ③) 동부 지역에서 aF8과 유사한 방향의 밀도경계면에 해당하는 미확인 단층(Fig. 4B에서 aF9)이 보이며, 최근에도 단층선을 따라 지진이 발생한 것으로 판단하건대 밀도 경계는 활성의 가능성이 있다.

3) 포천단층(Fig. 4의 ②)은 연구 지역의 북북동 지역에서 시작하여 서울의 북서부 외곽까지 연결된 약 50 km 연장의 단층이라고 알려져 있다(Choi et al., 2012; Chung et al., 2014). 중력의 곡률 해석에서 포천단층은 aF2와 연결되는 단열로 보이는데 분석에 사용된 중력장 자료만으로 단정하기는 어렵지만 포천단층과 동일한 방향의 aF2 이상대가 연결된 단층이라면 포천단층은 기존에 알려진

바와 달리 서울의 북부 경계를 지나 서해안까지 연결되어 최소 100 km 이상의 단층으로 추정되며(Fig. 4B에서 aF2로 표시된 빨간색 파선) 이를 확인하기 위해서는 포천단층 남단과 aF2의 북동 연장부에 대한 상세한 연구가 필요하다. 또한 최근 aF2의 예상단층선 상에서 미소 지진이 발생하여 활성의 가능성을 무시할 수 없다.

4) 왕숙천단층은 북동쪽의 단층(Fig. 4B의 ③)과 서남쪽의 단층(Fig. 4B에서 ③번 실선)으로 나누어져 있다고 보고되었으나(Choi et al., 2012; Chung et al., 2014), 두 단층 사이의 연결성은 보고된 바가 없다. 곡률 분석에서 단층(③과 ③)의 연결 가능성을 암시하는 새로운 단층 예상 선(Fig. 4B에서 aF5로 표시된 빨간색 파선)이 서울 남서부를 통과하는 것을 암시한다.

5) 동두천단층(Fig. 4B의 ①)과 평행으로 발달한 미확인 단층선들이(Fig. 4B에서 aF1, aF3, aF4, aF6로 표시된 빨간색 파선) 동두천단층의 서쪽 지역에 보인다. aF6으로 표시된 부분은 동두천단층을 따라서 동두천 이남부터 서울의 북한산까지 남북으로 분포하는 백악기 화강암의 서쪽 경계에 해당하며, aF4로 표시된 남쪽 연장선은 서울 남부 지역에서 상부 지각 내에 분포하는 백악기 화강암과 관련하여 뚜렷한 밀도 경계면(단층 예상 선)이 존재한다는 것을 보여준다. 또한, 미확인 단층으로 추정되는 aF4와 aF6는 곡률 분석에서 새롭게 해석된 예상단층(aF2)에 의해 동서 방향으로 약 7km 어긋나 있다. 남-북 방향의 aF4와 aF6가 먼저 형성된 동일 단층이라는 전제하에 aF2는 후기에 발달한 우향 주향이동단층으로 해석된다.

6) aF3으로 표시된 미확인 단층은 지질도와 비교해 보았을 때, 서울 서부의 편마암 지역에 발달하는 단층 중의 하나로 판단된다. 경기도 부천 및 시흥 지역에는 aF3의 남쪽 연장선으로 판단되는 뚜렷한 밀도의 경계면(aF1)이 관찰된다. aF4와 aF6 예상 선과 마찬가지로 곡률 분석으로 확인된 aF1과 aF3 역시 북동-남서 방향의 미확인 단층(aF2)에 의해서 동서 방향으로 약 7km 어긋나 있고, aF2의 북동부의 주라기 화강암은 형상은 aF2의 우향 주향이동의 변위와 유사하다(Fig. 4A). 곡률의 형태로 볼 때 포천단층의 남서 연장선(aF2)을 따라서 남쪽 지역과 북쪽 지역이 서로 반대 방향의 지구조 운동(Tectonic movement)이 진행되고 있다는 것을 의미함과 동시에 북동-남서 방향의 예상 단층(aF2)이 활성단층일 가능성이 크다는 것을 시사한다.

7) 추가령 단층대의 단층은 대부분 북북동-남남서 방향의 주향을 가지고 있으나, 곤지암 단층을 비롯한 중소규모의 단층들은 남서-북동 방향 주향을 특징으로 한다. aF7는 곤지암 단층과 같은 남서-북동 방향을 보이며, 동두천 단층, 포천단층, 경강단층, 왕숙천단층을 가로지르는 큰 규모의 단층으로 추정되며 수도권 지역의 지질연구에 있어 중

요한 지질이상대로 판단된다.

8) 연구 지역에서 발생한 지진 중에서 가장 규모가 큰 것은 수도권 남서부 시흥시(Fig. 4에서 SE로 표시된 지역)에서 2010년에 발생한 규모 3.0의 지진이다. 지금까지 시흥 지진을 일으킨 단층이 추가령단층과 관련된 주변 단층이라는 추측은 있었으나, 정확한 단층 정보는 없었다. 곡률 분석으로 새롭게 밝혀진 약 20 km의 길이의 단층 예상 선(aF1)은 시흥지진이 일어나 곳과 정확하게 일치한다. 이는 새롭게 확인된 남북 방향의 단층이 규모 3.0 이상의 지진을 유발할 수 있는 가능성이 매우 크다는 것을 시사한다.

3.3. Euler deconvolution 역산에 의한 단층의 깊이

중력장 변화의 원인이 되는 밀도의 경계와 깊이(source depth)를 3차원적으로 계산하기 위해서 Euler deconvolution 역산법이 많이 사용되며 식 (1)과 같다(Thomson, 1982; Reid et al., 1990; Pašteka et al., 2009).

$$(x-x_0)\frac{\partial \Delta g}{\partial x} + (y-y_0)\frac{\partial \Delta g}{\partial y} + (z-z_0)\frac{\partial \Delta g}{\partial z} = -N\Delta g \quad (1)$$

여기서 x , y , z 는 측정점의 좌표이며, x_0 , y_0 , z_0 는 얻고자 하는 밀도 변화 경계 지점의 좌표이고, g 는 측정된 중력값이다. N 은 위 식에서 가장 중요한 변수로서 structural index (SI)이라고 하며, 위 식을 계산하기 위해 임의로 주어진 변수다. SI는 오일러 역산에서 연구자의 경험에 의해서 임의로 주어지는 값이기 때문에, 연구자가 SI의 개념을 이해해야만 지질학적인 밀도 구조의 깊이와 위치를 계산할 수 있다. 연구에서 사용한 Euler deconvolution Algorithm (REDGER, Pašteka et al., 2009)에서는 지각 내의 밀도 변화의 평균 깊이를 계산하기 위해서는 SI 값을 2로 주어야 하며, 지표면과 가장 가까운 깊이를 계산하기 위해서는 0에 가까운 값을, 그리고 단층면과 같은 곳을 찾아내기 위해서는 1의 값을 주도록 설계되었다(Pašteka et al., 2009; Choi et al., 2021). 계산식의 알고리즘에서 연구자는 찾고자 하는 지질학적인 요소의 깊이를 이해한 후에 SI 값을 선택하여 깊이를 계산해야 한다.

추가령단층대의 수직적 깊이를 계산하기 위해 3차원 Euler deconvolution 방식(식 1)을 사용하였다. 중력의 변화를 유발하는 원인 물질의 깊이(source depth) 분포를 알아내기 위해서, Fig. 4A에 제시한 잔여 중력이상, SI=2의 값(Pašteka et al., 2009)을 식 1에 대입한 후, 3차원 Euler deconvolution software (REDGER, Pašteka et al., 2009)를 이용하여 깊이를 계산하였다.

이렇게 계산된 단층들의 깊이는 단층이 존재하는 수평적 위치와 더불어 수직적 깊이에 대한 정보를 제공한다. 즉 단층들의 수평적 위치는 수평적으로 밀도가 뚜렷하게

변화하는 지점을 표시하며, 계산된 깊이 값들은 수평적으로 나타난 밀도의 변화가 어느 깊이까지 연장되는지에 대한 정보를 제공한다. 이를 통해서 단층의 최대 깊이에 대한 근사치를 도출해 낼 수 있다.

Fig. 5A에 표시한 것처럼, 추가령단층대의 평균 단층의 깊이는 약 5,000 m이라는 것과 최대 깊이는 약 8,000 m 정도라는 것을 확인하였다. 특이한 점은 동두천단층(Fig. 5A의 ①)을 경계로 서쪽의 평균 단층의 깊이는 약 5,500 m, 동쪽의 평균 깊이는 약 4,000 m로 서쪽 지형이 동쪽보다 약 1,500 m 정도 더 낮다는 것을 확인하였다. Fig. 5B는 추가령단층대를 서-동 방향으로 가로지르는 선(Fig. 5A의 W-E)을 따라서 나타난 잔여 중력이상 분포이다. 이 라인의 중력이상은 최소 -3.0 mGal에서 최대 6.0 mGal의 범위를 보인다. 지질도(Fig. 2)에서 이 선을 따라서 나타나는 암석 분포(Fig. 5C)와 비교하면 평균 중력이상(Fig. 5B에서 파란색 실선)보다 낮은 중력이상 값들이 나타나는 지역(Fig. 5B에서 LDZ1-LDZ3으로 표시)은 대체로 밀도가 낮은 화강암(평균 약 2.60 g/cm³) 분포와 일치한다. 또한, 평균보다 높은 중력이상 값들은 화강암보다 밀도가 높은 편마암(평균 약 2.69 g/cm³)의 분포와 대체로 일치한다. 그러므로, 밀도가 높은 편마암 지역에서 평균보다 낮은 중력 이상이 나타나는 지역(LDZ2와 LDZ3으로 표시된 지역)은 편마암 지역 하부에 밀도가 낮은 화강암(예로 Fig. 5C에서 G2, G3 표시된 화강암)이 분포할 가능성이 크다.

단층과 미확인 단층(Fig. 5B에서 검은색 실선으로 표시) 부근에서는 중력의 변화가 음의 방향으로 뚜렷하게 나타나는데, 이는 선행 연구(Choi et al., 2021)에서도 언급한 것처럼, 대규모 단층선에서 발달한 파쇄대에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 5D는 중력의 변이를 일으킨 원인 물질의 깊이를 Euler deconvolution 방식으로 계산한 것이다. 계산된 평균 깊이는 동두천단층(Fig. 5D에서 1로 표시)의 서쪽 지역에서 약 5,500 m(Fig. 5C에서 W-Average로 표시된 실선)이며, 동두천단층에서 포천단층(Fig. 5D에서 aF2로 표시된 곳)으로 갈수록 평균 깊이가 약 2,500 m까지 상승하며 보다 동쪽으로 이동하면 다시 평균 약 4,000 m로 깊어지는 것을 보여준다(Fig. 5D에서 E-Average로 표시된 실선). 이는 동두천단층을 중심으로 서쪽 지역과 동쪽 지역의 지구조적인 운동이 서로 다르다는 것을 시사한다. 또한, 각 단층 및 단층 예상선에는 파쇄대의 전형적인 형태인 켜기 형태의 깊이들이 보인다(Choi et al., 2021). 동두천단층에서 발달한 파쇄대의 최대 깊이는 약 6,500 m로서 연구 지역에서는 가장 깊은 파쇄대를 갖는 것으로 판단되며, 그와 비슷한 깊이의 파쇄대는 곡률 분석(Fig. 4B)으로 확인된 포천단층의 연장선(Fig. 5D에서 aF2로 표시

Fig. 5. (A) Euler deconvolution technique are applied by using the residual gravity- (Fig. 4A) to obtain preliminary information on the 3D distribution of source points in the study area. The deep mass points greater than the mean depth (4,500 m), are mainly clustered in the western parts of the Dongducheon fault line marked with ①, while the eastern part of the Pocheon fault marked with ② is expected to be less than 4,000 m deep. Residual anomalies along the W-E profile (B) (refer to Fig. A for the location of the profile) ranges from -2.0 mGal to 6.0 mGal. The maximum source depth along the profile (D) are compared to the rock types (C).

된 곳)에서의 약 6,000 m, 왕숙천단층(Fig. 5D의 ③)의 약 5,000 m, 경강단층(Fig. 5D의 ④)의 약 6,000 m이다.

4. 결 론

추가령단층대가 발달하는 수도권 지역을 대상으로 단층의 3차원적인 규모를 확인하기 위해서, 지난 20여 년에 걸쳐서 지상 관측한 약 5,000점의 중력장 데이터를 수집하고 부계이상 지도를 작성하였다. 지하 약 10 km까지의 상부 지각 내에서의 밀도 분포를 확인하기 위해서 20 km의 장파장 중력효과를 계산하였으며, 이 효과 값을 부계이상에서 제하여 잔여 중력이상 지도를 작성하였다. 곡률 분석(Curvature analysis)과 오일러 디콘볼루션(Euler deconvolution)과 같은 중력장 해석 방법을 이용하여 잔여 중력이상을 해석한 결과는 다음과 같다.

1) 포천단층과 왕숙천단층 사이에 지금까지 알려지지 않았던 북동-남서 방향의 활성단층이 존재할 가능성이 매우 크며, 이 단층은 백악기 화강암의 수직적 분포와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다.

2) 왕숙천단층과 경강단층 사이에 북동-남서 방향의 활성단층이 존재하며, 이 역시 백악기 화강암의 수직적 분포와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다.

3) 포천단층 남단에서 남서 방향으로 중력이상대가 연장되며 동일한 전단을 가정하면 포천단층은 경기 북부 지역으로부터 서울의 중심부를 지나서 서해안 지역까지 연

결된 최소 약 100 km 연장의 활성단층의 가능성이 매우 크다.

4) 남북 방향으로 발달한 예상 단층이 동두천단층의 서쪽 지역에 발달하며, 이 단층은 포천 단층의 연장선을 경계로 동서 방향으로 약 7 km 정도 지구조 활동(Tectonic movement)을 한 흔적을 보여준다.

5) 서울을 중심으로 북동쪽과 서남쪽의 분절로 나누어져 있는 왕숙천단층의 연결 가능성을 암시하는 단층 분절이 서울의 중심부에 존재할 가능성이 있다.

6) 2010년 수도권 남서부의 시흥에서 발생한 규모 3.0의 지진은 곡률 분석으로 새롭게 밝혀진 남북 방향으로 발달한 약 20 km 길이의 단층의 움직임에 의한 것으로 판단된다.

7) 오일러 디콘볼루션 방식으로 계산된 원인 밀도 물질의 평균 깊이 분포는 동두천단층의 서쪽 지역(약 5,500 m)이 동쪽 지역(약 4,000 m)보다 또렷하게 깊다는 것을 보여준다. 이는 동두천단층을 중심으로 서쪽 지역과 동쪽 지역의 지구조적 운동(Tectonic movement)이 다르다는 것을 시사한다.

8) 동두천단층에서 발달한 파쇄대의 최대 깊이는 약 6,500 m로서 연구 지역에서는 가장 깊은 파쇄대를 갖는 것으로 판단되며, 포천단층은 약 6,000 m, 왕숙천단층은 약 5,000 m, 경강단층은 약 6,000 m 정도의 파쇄대로 판단된다.

이 연구에서 수행한 곡률 분석과 오일러 디콘볼루션 등의 중력장 해석은 방법론적인 면이나 측정된 데이터의 양과 질 및 그 균질성에 의해서 해석의 정확도가 달라질

수 있다. 인구가 밀집한 수도권에서 신뢰성 있는 미확인 단층 정보를 제공하기 위해서는 더 많은 중력 자료의 구축이 필요하다.

사 사

이 연구는 한국연구재단 기초연구사업(2020R1F1A1054863)의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- Choi, K.S., Yang, C.S., Shin, Y.H. and Ok, S.S. (2003) On the improvement of precision in gravity surveying and correction, and a dense Bouguer anomaly in and around the Korean Peninsula. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, v.24, p.205-215.
- Choi, K.S., Lee, Y.C. and Lim, M. (2007) Precise terrain correction for gravity measurement considering the earth's curvature. *The Journal of the Korean Earth Science Society*, v.28(7), p.825-837. doi: 10.5467/JKESS.2007.28.7.825
- Choi, S.C., Ryu, I.C. and Lee, Y.C. (2019) An analysis of the intraplate Earthquake(2016M5.8_GY) that occurred in the Gyeongsang Basin in the SE of the Korean Peninsula, based on 3D modelling of the gravity and magnetic Field. *Geophys. J. Int.*, v.217, p.90-107. doi:10.1093/gji/ggz001
- Choi, S.C., Ryu, I.C., Lee, Y.C. and Sohn, Y. (2020) Gravity and magnetic field interpretation to detect deep buried paleobasinal fault lines contributing to intraplate earthquakes: a case study from Pohang Basin, SE Korea. *Geophys. J. Int.*, v.220, p.490-500. doi: 10.1093/gji/ggz464
- Choi, S.C., Kim, S.W., Choi, E.K., Lee, Y.C. and Ha, S.M. (2021) Gravity Field Interpretation and Underground Structure Modelling as a Method of Setting Horizontal and Vertical Zoning of a Active Fault Core. *Econ. Environ. Geol.*, v.54, p.91-103. doi: 10.9719/EEG2021.54.1.91
- Choi, S.-J., Chwae, U., Lee, H.-K., Song, Y. and Kang, I.-M. (2012) Review on the Chugaryeong Fault. *Econ. Environ. Geol.*, v.45, p.441-446. doi: 10.9719/EEG2012.45.4.441
- Chung, D.H., Song, Y.G., Park, C.Y., Kang, I.-M., Choi, S.-J. and Khulganakhuu, C. (2014) Reactivated Timings of Some Major Faults in the Chugaryeong Fault Zone since the Cretaceous Period. *Econ. Environ. Geol.*, v.47, p.29-38. doi: 10.9719/EEG2014.47.1.29
- Degro, T. (1986) Zür Interpretation gravimetrischer und magnetischer Feldgrößen mit Hilfe von Übertragungsfunktionen. Dissertation, Institut für Geophysik der TU Clausthal, 139p. (unpublished).
- Kim, K.-H., Ree, J.-H., Kim, Y.H., Kim, S., Kang, S.Y. and Seo, W. (2018) Assessing whether the 2017 MW5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, v.360, p.1007-1009. doi: 10.1126/science.aat6081.
- Kim, Y.-S., Kim, T., Kyung, J.B. Cho, C.S., Choi, J.-H. and Choi, C.U. (2017) Preliminary study on rupture mechanism of the 9.12 Gyeongju Earthquake. *J. Geol. Soc. Korea*, v.53, p.407-422. doi: 10.14770/jgsk.2017.53.3.407
- Kim, Y.-S., Son, M., Choi, J.-H., Choi, J.-H., Seong, Y.B. and Lee, J. (2020) Processes and challenges for the production of Korean active faults map. *J. Geol. Soc. Korea*, v.56, p.113-134. doi: 10.14770/jgsk.2020.56.2.113
- Korea institute of Geoscience and mineral resources (KIGAM) (2002) Tectonic Map of Korea (1:1,000,000)
- Korea institute of Geoscience and mineral resources (KIGAM) (2014) Regional Geophysical Anomaly Mapping, GP2013-010-2014(2). (in Korean with English abstract)
- Korean statistical information service : kosis.kr/index/index.do
- Kwon, S., Kim, S.K., Lee, S.H. and Park, K.G. (2012) Identification of the Singal Fault Zone in the Kiheung Reservoir Area by Geotechnical Investigations. *Econ. Environ. Geol.*, v.45, p.295-306. doi: 10.9719/EEG2012.45.3.295
- LaFehr, T.R. (1991) Standardization in gravity reduction. *Geophysics*, v.56, p.1140-1295. doi.org/10.1190/1.1443137
- Lahmeyer, B. (1990) Anwendung der schnellen Fourier transformation und der Quadratischen Programmierung bei der interpretation von Schwellefeldern, Dissertation, FU-Berlin, Berlin.
- Li, X. and Götze, H.J. (2001) Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics. *Geophysics*, v.66, p.1660-1959. doi.org/10.1190/1.1487109
- Nationa; earthquake comprehensive information system : necis.kma.go.kr
- Park, J., Kim, H.C., Lee, Y., Shim, B.O. and Song, M.Y. (2009) Thermal properties of rocks in the republic of Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v.42, p.591-598.
- Pašteka, R., Richter, F.P., Karcol, R., Brazda, K. and Hajach, M. (2009) Regularized derivatives of potential fields and their role in semi-automated interpretation methods. *Geophys. Prospect.*, v.57, p.507-516. doi: 10.1111/j.1365-2478.2008.00780.x
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J. and Somerton, I.W. (1990) Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, v.55, p.80-91. doi: 10.1190/1.1442774
- Roberts, A. (2001) Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. *First Break*, v.19, p.85-99. doi: 10.1046/j.0263-5046.2001.00142.x
- Shin, Y.H. (2006) Gravity anomaly and the distribution of granitoids in the southern part of the Korean Peninsula. *J. Geol. Soc. Korea*, v.42, p.383-396.
- Sohn, Y., Choi, S.C. and Ryu, I.-C. (2020) Gravity Field Interpretation for the Deep Geological Structure Analysis in Pohang-Ulsan, Southeastern Korean Peninsula. *Econ. Environ. Geol.*, v.53, p.597-608. doi: 10.9719/EEG2020.53.5.597
- Tamura, Y. (1982) A computer program for calculating the tide generating force. *Publications of the international latitude observatory, Mizusawa*, v.16, p.1-19.
- Thomson, D. T. (1982) EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, v.47, p.31-37. doi: 10.1190/1.1441278