

중력 및 자력탐사에 의한 옥천대 남서부의 지하 지질구조

Subsurface Geological Structure of the Southwestern Part of the Ogcheon Zone by Gravity and Magnetic Surveys

김 성 균 (Sung Kyun Kim)

오 진 용 (Jinyong Oh)

안 건 상 (Kun Sang Ahn)

김 용 준 (Yong Jun Kim)

전남대학교 지구환경과학부

충남대학교 기초과학연구소

조선대학교 지구과학과

전남대학교 지구환경과학부

요약/ABSTRACT

옥천대의 심부 지질구조를 규명하기 위한 연구의 일환으로 옥천대 서남단의 주요 구조선과 대체로 직교하는 70km의 측선을 따라 중력과 자력탐사를 수행하였다. 또한 측선을 포함하는 옥천대 서남부에 대한 최근의 암석학적 및 지화학적 연구성과를 요약하였다. 중력과 자력 측정치들을 보정하여 각각 부계이상과 총자기이상을 구했다.

중력과 자력이상은 옥천대 남쪽 경계인 장흥부근에서 급격히 변화한다. 이러한 부계이상의 급격한 증가는 선 캄브리아 편마암류와 상대적으로 밀도가 큰 중성 심성암류와의 사이에 상당히 큰 변위를 가진 심부의 정단층으로 설명이 가능하다. 이 단층은 옥천대의 형성과 진화에 중요한 역할을 한 단층으로 사료된다. 한편 중력이상과 자력이상의 근원이 같다는 가정아래 중력이상으로부터 가상의 자력이상을 계산하였다. 계산된 자력이상은 측선상의 50km 부근(장흥근처)까지는 대체로 중력이상과 일치하나, 그 이후에는 완전히 반대의 상관을 보여준다. 끝으로 잔여 부계이상을 만족하는 지하구조가 시행착오적인 순해법에 의하여 제시되었다. 여기서 초기모델은 지표지질과 역해법의 결과로부터 주어졌다.

주요어 : 옥천대 남서부, 중력이상, 총자기이상, 지하지질구조

As a part of the study for understanding the deep geological structure of the Ogcheon Zone, both gravity and geomagnetic surveys are performed. A 70km survey line of which direction is nearly perpendicular to major faults in the southern tip of the Zone. The observed data are corrected and transformed into Bouguer and total magnetic intensity anomalies, respectively. Recent studies for petrology and geochemistry in the southwestern Ogcheon Zone in the vicinity of the survey line are

reviewed for better interpretation.

Both gravity and geomagnetic anomalies abruptly change around Janghung area, the southern boundary of the Ogcheon Zone. This rapid increase of Bouguer anomaly around Janghung area can be explained by a deep seated normal fault with fairly large displacement between Precambrian gneisses and the denser intermediate plutonic rocks. It is believed that the fault acted an important role for the formation and evolution of the Ogcheon Zone. A pseudomagnetic intensity anomaly is calculated from the Bouguer anomaly assuming that the both anomalies are associated with the common source. From the origin of the survey line to the 50km point, the calculated anomaly coincides with observed magnetic anomaly. Whereas both anomalies show negative correlation in the outside 50km. From the residual Bouguer anomalies, the subterranean geological structure is provided through the iterative forward method. The initial model is obtained from informations about the surface geology as well as the results of the inverse method.

Key Words : Southwestern Part of Ogcheon Zone, Gravity Anomaly, Total Magnetic Intensity Anomaly, Subsurface Geological Structure

서 론

옥천대 남서부의 지질구조를 밝히기 위한 본 연구의 선행연구(김성균 외, 1997)에서는 Fig. 1에 나타난 중력측선 L1-L1'를 따라 측정된 중력자료를 해석하여 심부의 지질구조를 밝혔다. 이 중력측선은 여러개의 단층선들을 가로지르고 있으며, 이 연구에서는 이들 단층과 관련된 지체구조운동을 규명하였다. 즉 중생대 중기에 선 캄브리아기의 편마암류와 변성퇴적암류를 관입하는 수차례의 화성활동이 있었고, 압축장이 형성되어 역단층운동이 일어났으며, Fig. 1에서 F6로 표시된 단층이 활동하였다. 그후 중생대 말의 화산활동으로 화산암류가 널리 분출한 이후 장력장이 형성되어 정단층운동이 일어났으며, 이때 F1(광주단층으로 불리고 있음)과 F2가 활동한 것으로 해석하였다. 그러나 관측된 중력이상을 단순히 수치적으로 만족하는 지하구조 모델은 다수 존재할 수 있으며, 이러한 관점에서 선행연구에서의 해석은 유일한 것이라고 할 수 없다. 이러한 해석의 타당성을 입증하기 위해서는 다른 지역에서의 결과와 서로 일치하지 않으면 안 된다.

본 연구의 목적은 선행연구의 해석결과를 다른 지역에서 검토하여 옥천대 형성 및 진화와 관련된 기초자료를 제공하는 것이다. 이 목적을 달성하기 위하여 Fig. 1과 같이 옥천대 남단에서 주요 단층선을 가로지르는 측선 L2-L2'를 선정하였다. 이 측

선의 총 길이는 약 70km에 달하며, 평균 1km 간격으로 중력과 자력을 측정하여, 측정된 자료를 만족하는 심부의 지하구조를 결정하여 선행연구와 비교하였다. 또한 측선을 포함하여 광역적인 지역에 대한 지질학적 연구결과를 종합하였다.

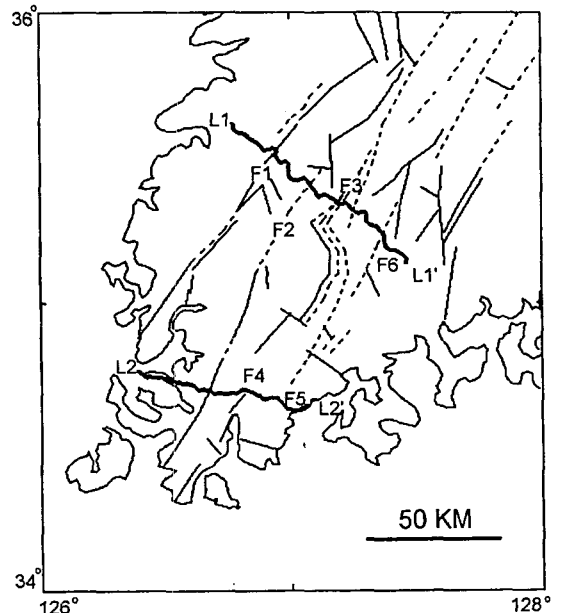


Fig. 1. Survey lines(L1-L1' and L2-L2') and geological structures for the study area. F1, F2, F3, F4, F5, and F6 denote faults.

지 질 개 요

본 연구지역은 옥천습곡대와 영남육괴의 경계부를 포함하며, 선캠브리아기의 편마암 복합체를 기저로하여, 이를 부정합으로 덮는 고생대 변성퇴적암류-변성편암누층과 이들을 관입하는 트라이아스

기-쥬라기 화강암류와 백악기 화산암류-화강암류 등의 다양한 암상으로 이루어져 있다. Fig. 2는 본 역의 지질을 1:25만 목포지질 도폭과 1:5만 해남, 강진, 능주, 장흥, 복내 및 보성 지질도폭을 참고하여 간략화한 것이다.

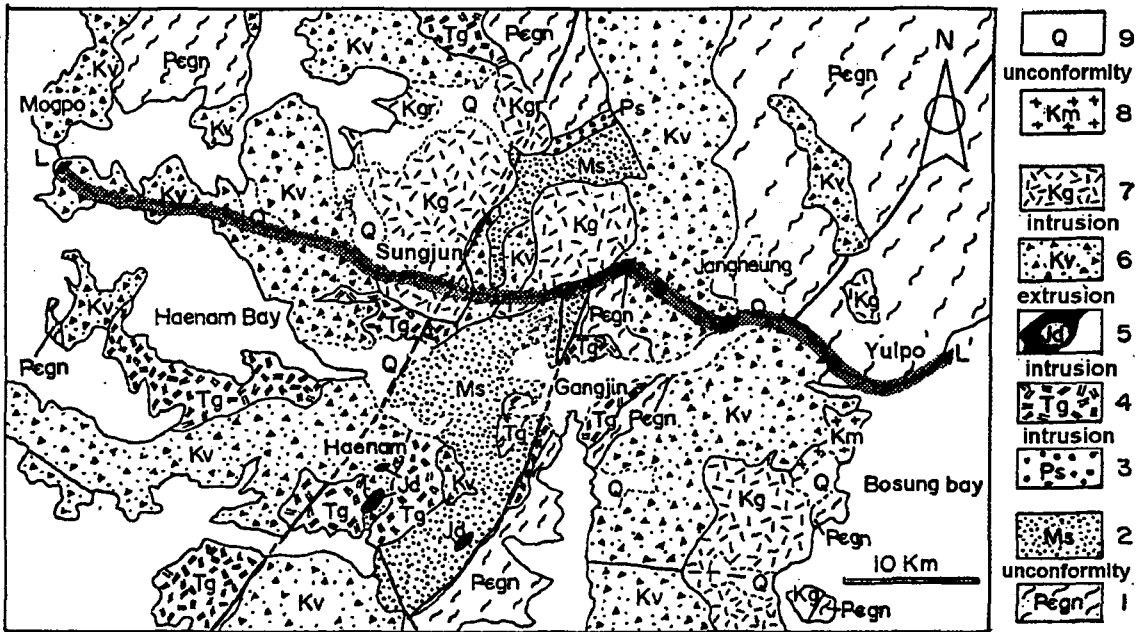


Fig. 2. Geological map of the study area. 1. Pre-cambrian gneiss complex, 2. Metasediments, 3. Meta-Pyeongang super group, 4. Triassic granites, 5. Jurassic diorite, 6. Kyoungsang volcanics, 7. Kyoungsang granites, 8. Cretaceous monzonite, 9. Alluvium.

편마암 복합체는 강진-남창-땅끝을 잇는 지역과 관산 동부 해안지역에 분포하며 화강편마암과 반상변정질 화강편마암으로 이루어진 정편마암류와 결정질 편암, 흑운모 편마암, 미그마타이트질 편마암과 화강암질 편마암으로된 준편마암으로 이루어져 있으며 준편마암류가 정편마암류 보다 우세하다. 정편마암류의 관입-정치-고결시기는 반상변정질 화강편마암이 1330~2090Ma(김용준, 1988; 주승환과 김성재, 1986), 그리고 화강편마암 2230±50Ma(김용준, 1988)로 선캠브리아기를 지시한다.

변성퇴적암류는 영남동부와 땅끝사이에서 북동-남서 방향으로 대상분포를 보이며 주로 규암으로 구성된 용암산층, 운모 편암과 얼마간의 규암과 석

회암을 협재하는 설옥리층, 그리고 이들 두 층을 부정합의 관계로 덮는 오산리층으로 구성되어 있다. 이들 변성퇴적암류는 층서상 또는 구조지질학적 층위로 보아 고생대로 추정되나 이 암류의 북측 연장부에서는 선캠브리아기로 알려져 있으며, 화강암류나 편마암류보다 밀도가 큰 편이다. 규암은 등갈색을 띠며 개략 N20°E의 주향과 50°NW의 경사를 갖는다. 구성광물 대부분은 석영이고 편리를 따라 견운모가 방향성있는 배열을 보인다. 운모편암은 주로 견운모편암으로 구성되며 얼마간의 흑색천매암과 반점상 녹니석편암 등이 협재한다. 흑색천매암과 반점상 녹니석편암은 견운모와 경녹니석을 주요암광물로 하며, 얼마간의 탄질물과 석영을 함

유한다.

트라이아스기-쥬라기 화강암류는 엽리상화강암류와 소위 광주화강암(김용준 외, 1993)으로 구분되며, 이들 두 암류는 변형 받았는지의 여부 즉 변형 화강암이나 비변형 화강암이나에 따라 구분된다. 엽리상 화강암류는 해남남부와 땅끝사이 지역에 소규모 저반상 관입체로 분포하며 구성암상은 변화가 큰 각섬석 양에 따라 엽리상 혹은모화강섬록암과 엽리상 각섬석흑운모화강섬록암상으로 구분되나 후자가 더 우세하다. 이 엽리상 화강암류는 호남전단대 (Yanai et al., 1985)에서 중온-중압(약 400°C와 3Kbar)하에서 압쇄작용을 받아 형성되었으며 (Kim, 1973), 관입-고결시기는 동일 암상을 보이는 장수-순창지역의 엽리상 각섬석화강섬록암이 보이는 198~222Ma로 미루어 트라이아스기 말에서 쥬라기 초(김용준, 1988 ; 주승환과 김성재, 1986)에 해당된다. 광주화강암은 광주-나주에 분포하는 저반상 관입체로 된 광주암체와 해남-산이반도에 분포하는 해남암체로 출현하나 두 암체 사이에는 백악기 화강암과 화산암이 분포하고 있어 양자를 분리하며 이는 후기 암체에 의해 관입되거나 부정합의 관계로 덮여 지표에서 분리된 것처럼 보이는 것으로 사료된다. 해남암체는 주로 각섬석 흑운모화강섬록암상으로 구성되며, 이 암상의 K-Ar 각섬석 연령은 $229.13 \pm 3.6\text{Ma}$ (김용준 외, 1993)으로 트라이아스기 중기에 해당한다.

섬록암과 몬조니암은 해남 동남부와 장흥 남부에 소규모 암주로서 분포하는 중성암류로서 유사한 암상을 보이는 광주-장수-함양지역의 섬록암류와 비교 할 때 189~190Ma로 쥬라기 중기에 해당하며, 치밀하여 밀도가 큰 편이다(김용준 외, 1988 ; 박재봉 외, 1990).

백악기 화산암류는 광주-영동 함몰대의 서남단에 위치하는 다수의 환상 화산암체들의 구성암으로서 중력탐사를 시작한 영암군 용당을 포함하여 목포에서 산이반도를 거쳐 월출산에 이르는 목포함몰체, 해남 대륜산 주변의 해남함몰체, 강진에서 장흥을 거쳐 천관산에 이르는 강진함몰체를 구성하는 암류이다. 본역의 화산암과 백악기 화강암류는 함몰체의 형성과 깊은 관련이 있으며, 함몰체에 관련된 작은 규모의 정단층들이 분포할 것으로 예상된

다. 축선의 기점인 영암군 삼호면 용당리를 중심으로 하여, 해남만 전역에는 백악기 말의 화산암류가 널리 분포한다. 이들 화산암류는 하부로부터 화원층, 우황리층, 황산옹회암과 이들을 관입·분출한 진도유문암으로 구성되어 있다(윤성효, 1990, 1992 ; 차문성과 윤성효, 1987). 화원층은 해남군 화원면에 주로 산출되며, 다양한 암상을 가진 안산암과 안산암질 화산쇄설암이 서로 교호·누층을 이룬다. 우황리층은 해남군 황산면 우황리를 중심으로 분포하며, 주로 미세한 엽층(lamina)을 갖는 흑색 셰일로 구성되어있다. 황산옹회암은 해남군 황산면과 문내면을 중심으로 발달하는 회류옹회암(ash-flow tuff)으로 구성되며 목포에서 강진지역 사이에서 자주 관찰된다. 이 암류는 주로 용결구조를 갖는 청회색-담록색 옹회암과 화산력옹회암으로 구성되며, 일부는 녹니석화작용을 받아 담녹색 내지 녹색을 띤다. 이 암류는 수 mm 크기의 결정편과 1cm 이상의 암편을 포함하는데, 암편은 주로 담홍색의 장석과 석영과 유문암, 안산암, 흑색셰일, 적색 실트암 등으로 이루어져 있다. 진도유문암은 주로 옹회암으로 구성되며 담홍색 유리질 석기에 화산력 크기의 흑색 화산암편을 함유한다.

Fig. 2에서 축선의 중간 부분에 해당하는 장흥-강진 지역에서 남북으로 길게 분포한 백악기 화산암류는 유치역암층을 정합으로 덮는 다도옹회암과 이를 정합으로 덮는 부용산분출암류으로 구성되어 있다. 다도옹회암은 장흥에서 화순에 걸쳐 넓게 분포하며 주로 자회색 옹회암으로 구성되나 암색의 변화가 심하다. 다도옹회암에 함유된 암편은 크기 0.5~2mm의 옹회질 각력으로 구성되나 반정은 장석과 석영으로 그리고 석기는 미정질 내지 유리질로 이루어져 있다. 유치역암층과 다도옹회암은 곳에 따라 암회색 내지 녹회색을 나타내는 치밀 견고한 안산암질용암으로 이루어진 무등산용암으로 덮여있다. 부용산분출암류는 주로 강진 서남부에 위치한 부용산을 중심으로 넓게 분포하며 암회색 조면안산암질 화산력옹회암이 가장 우세하고 옹회각력암, 용암류 및 약간의 현무암이 혼재한다. 화산력은 주로 모난 석질이나 간혹 구상으로도 산출되며 크기는 대략 10mm 내외이다.

백악기의 화강암은 강진, 산이반도와 영암군 지

역에 분포하며 단층대에서는 압쇄상엽리조직을 보이고 미문상화강암과 홍색장석 화강암으로 구성되어 있다. 전자는 장흥의 천관산을 중심으로 분포하며 정장석, 석영 및 얼마간의 흑운모 또는 각섬석으로 구성되며, 장석반정과 유색광물을 제외하고는 석기 전체가 정장석과 석영으로된 미문상조석을 이룬다. 홍색장석화강암의 Rb-Sr 전암연령은 71.7 ± 2.1 Ma(김희남외, 1997)이다. 그리고 후자는 월출산에 분포하는 담홍색 조립질 흑운모-알칼리장석 화강암으로 정동구조를 가지며 K-Ar 흑운모 연령은 93.6 ± 1.5 Ma 즉 백악기 중기에 해당한다(이창신과 김정빈, 1995).

중력 및 자력 측정과 자료처리

Fig. 1에는 옥천대의 남서부를 포함한 지역의 주요 지질구조선과 탐사측선 L1-L1'(김성균외, 1997), L2-L2'(본 연구)에서의 측선을 굵은 선으로 나타내었다. 이 지역의 지질구조선은 대체로 북북동-남남서의 주향이 우세하며, 측선들은 주요 구조선에 대체로 직교하도록 설정되었다. 본 연구에서 설정한 측선은 목포에서 성전, 병영, 장흥을 지나 울포에 이르는 동서 방향의 도로를 따라 총 연장 70km에 달한다. 이 측선상에서 대략 1km 간격으로 총 70여 점에서 중력과 자력을 측정하였다.

중력측정에 사용된 계기는 LaCoste & Romberg사의 Model G를 사용하였으며, 중력기점으로는 국립지리원이 1990년에 전남대학교에 설치한 중력보조기준점(중력치 : 979,746.838 mGal, 해발고도 : 38.690m)을 이용하였다. 야외에서 측정된 상대중력치는 보조기준점의 값을 참조하여 절대중력치로 환산한 후, 각종 보정을 거쳐 Bouguer 이상치를 얻게 되었다. 중력보정에 필요한 평균밀도는 2.60g/cm^3 으로 가정하여 계산하였다.

한편 자력은 원칙적으로 중력과 같은 장소에서 전자력 성분을 측정하였으나, 측정에 방해가 되는 전선과 같은 인공적인 물체를 피하기 위하여 장소가 약간 변경된 경우도 있다. 측정에 사용된 계기는 Geometrix사의 Proton Precession Magnetometer(Model G856)이며, 측정정도는 0.1γ 이다. 측정된 전자력으로부터 자력이상을 얻기 위해서는 보

통 측정치에서 IGRF에 의하여 계산된 값을 빼주게 된다. 그러나 IGRF는 지구전체에 대하여 근사한 전자력 값이므로 특정의 지역에서 잘 맞지 않을 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 김성균과 김민선(1995)이 한반도 남부의 전자력 측정치로부터 결정된 근사식을 IGRF 대신으로 사용하였다.

일반적으로 전자력을 비롯한 지자기의 3요소는 시간에 대하여 일정하지 않고 변화한다. 이러한 변화에는 보통 1일을 주기로 하는 일변화와 상대적으로 긴 시간을 주기로 하는 영년변화, 주기성이 없이 갑자기 나타나는 자기폭풍이 있다. 따라서 지자기 측정시는 시간에 대한 변화를 보정하기 위하여, 고정된 지점에서 별개의 자력계로 지자기의 변화를 측정하여 시간에 대한 변화를 보정하거나 되돌이 탐사를 하게 된다. 그러나 본 연구에서는 1대의 자력계만을 운용하였으므로 시간에 대한 변화의 보정은 불가능하여 자력 측정치에 대한 보정은 수행하지 않았다. 보통 중위도에서 전자력의 일변화의 최대치는 30γ 정도이므로(Dobrin and Savit, 1988), 본 연구에서 얻은 측정치에 대하여 일변화 보정을 하지 않는 경우의 오차는 최대 $\pm 60 \gamma$ 정도로 생각할 수 있다. 이러한 이유로 지하구조결정에 있어서 전자력 자료는 제한적으로 사용되었다.

중력과 자력측선은 도로를 따라 설정된 까닭에 직선이 아니므로 자료해석상 불편하다. 따라서 각각의 측정치들은 이 측선을 가장 잘 근사하는 직선상의 값으로 고쳤으며, 또한 주파수영역에서의 해석에 편하도록 적절한 보간법을 사용하여 등간격 자료로 변환하였다.

Fig. 3에 측선을 따른 해발고도(위), Bouguer 이상치(가운데), 전자력 이상치(아래)의 변화를 나타내었다. 측선상의 지형은 200m 이하로, 대체로 평탄하나 월출산 기슭을 지나가는 성전부근에서 약간의 기복을 보여 준다. Bouguer 이상은 측선의 출발점인 목포에서 50km 부근의 장흥까지는 $-3 \sim +5$ mGal 범위내에서 비교적 작은 변화를 보이나, 50km 부근을 지나며 급격히 증가하여 $+10$ mGal 정도에 이른다. 한편 자력 이상은 50km 부근까지는 대체로 중력이상과 같은 변화를 나타내고 있으나, 그 이후는 중력이상과 반대로 급격히 감소한다.

측정치로부터 보정을 통해 얻은 중력 및 자력이

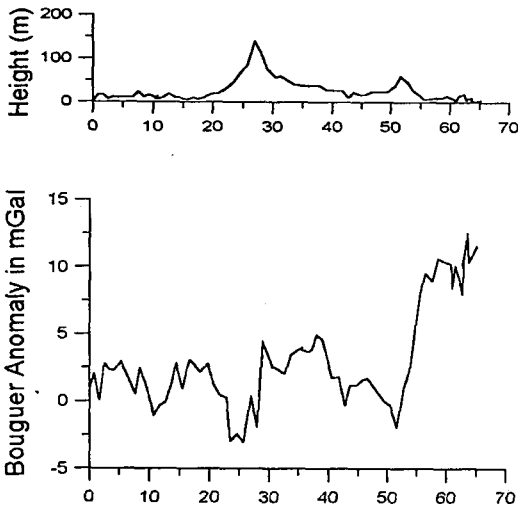


Fig. 3. Topography(upper), Bouguer anomaly (middle), and magnetic anomaly (lower) along the survey line.

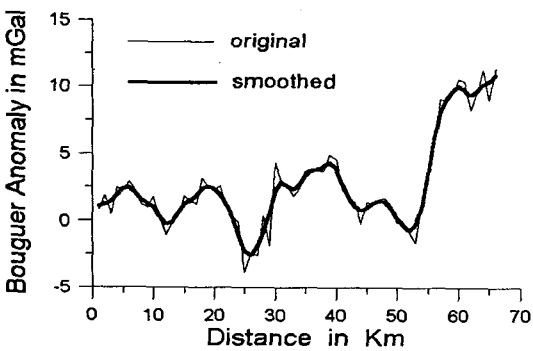


Fig. 4. Observed Bouguer anomaly(thin line) and smoothed anomaly(thick line).

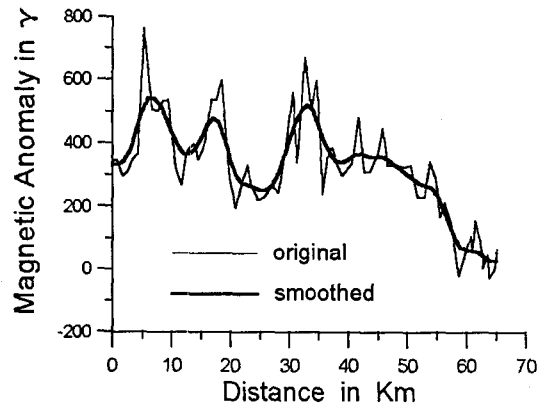


Fig. 5. Observed total intensity anomaly(thin line) and smoothed anomaly(thick line).

상에는 통상 측정오차를 비롯하여, 보정시의 오차를 포함하기 마련이다. 이러한 여러 요인에 의한 오차를 제거할 목적으로 본 연구에서는 원래의 자료를 평활화(smoothing)하여 해석에 사용하였다. 자료의 평활화에는 단순한 이동평균법을 사용하였다. Fig. 4와 Fig. 5에 평활화된 중력이상과 자력 이상을 각각 도시하였다. 그림에서 원래의 자료는 가는 선으로, 평활화된 자료는 굵은 선으로 표시되어 있다. 따라서 평활화된 자료를 사용할 때, 천부의 미세구조는 무시되는 셈이다.

파워스펙트럼법에 의한 지하구조

중력 이상을 해석하여 지하구조를 결정하는 방법은 크게 역해법(inverse method)과 순해법(forward method)으로 나눌 수 있다. 역해법은 지하구조와 중력 이상과의 관계를 수식화하여 중력 이상으로부터 직접적으로 지하구조를 구하는 방법이며, 이에 대하여 순해법은 초기에 가정한 지하구조에 대하여 계산한 중력 이상과 측정된 중력 이상이 거의 일치할 때까지 구조를 수정하는 방법이다. 두 방법은 각각 장단점이 있어, 어느 것이 더 우월한 방법이라고 단정적으로 말할 수 없다. 본 연구에서는 이 두 가지 방법을 다 사용하여 지하 지질구조를 추정하기로 한다.

Tomoda(1960)는 특별한 가정없이 지하의 밀도

불연속까지의 깊이를 계산할 수 있는 파워스펙트럼법을 고안하였다. 중력이상이 $0 \leq x \leq L$ 의 범위에서 측정되어 있을 때, 중력이상의 Fourier계수를 A_n, B_n 이라 하자. 또한 지하 밀도 불연속면의 기록의 Fourier계수를 C_n, D_n 이라 하면, 이들 계수사이에는 다음 관계가 성립한다(김성균, 1996).

$$P_n = A_n^2 + B_n^2 = (2\pi G \Delta\rho) e^{-4n\pi D/L} (C_n^2 + D_n^2) \quad (1)$$

- 단 G : 만유인력상수
- $\Delta\rho$: 밀도차
- D : 밀도 불연속면의 평균깊이
- P_n : 파워스펙트럼

여기서 모호면과 같이 위 아래지층의 밀도차가 비교적 큰 심부 불연속면의 기록을 반복성이 없는 불규칙한 것으로 가정할 때, 불연속면의 기록의 파워스펙트럼인 $(C_n^2 + D_n^2)$ 은 주파수 n 에 관계없이 일정한 값을 갖는 백색스펙트럼으로 간주할 수 있다. 따라서 식 (1)의 양변에 자연대수를 취하면,

$$\ln P_n = c - 4n\pi D/L \quad (2)$$

단 c : 상수

의 형태가 된다. 이 식은 1차식이므로 주파수 n 을 가로축으로, 중력이상의 파워스펙트럼 P_n 을 세로축으로 좌표위에 나타내면 직선이 된다. 이 직선의 기울기 $4\pi D/L$ 로부터 밀도 불연속면까지의 평균깊이 D 를 구할 수 있다.

본 연구에서는 위에서 설명한 파워스펙트럼법을 이용하여 지하 밀도불연속면의 깊이를 개략적으로 계산하였다. 앞에서도 언급한 바와 같이, 중력이상 (Fig. 3 참조)은 축선의 기점으로부터 50km까지는 변화폭이 작으나, 50km 부근부터 급격히 증가한다. 이 변화는 50km를 전후하여 지하구조가 급변한다는 것을 지시한다고 볼 수 있다. 따라서 중력자료 전체와 축선 후반 1/3에 대한 자료에 대하여 파워

스펙트럼법을 따로 적용하였다(Fig. 6과 Fig. 7). Fig. 6은 중력축선 전체에 대한 결과로서, 주파수에 대한 파워의 선형상관이 좋지 않지만 대략 12.3km와 2.0km에 밀도 불연속면이 존재하는 것으로 보인다. 또한 Fig. 7은 중력축선 후반에 대한 결과로, 6.7km와 1.7km 부근에 밀도 불연속면이 있음을 지시한다. 여기서 얻어진 깊이 2.0km와 1.7km는 Fig. 6과 Fig. 7에서 볼 때, 너무 주관적 해석이라는 느낌을 가질 수 있다. 그러나 이 깊이는 이 지역의 지질학적 조사결과에 의한 화산암체의 깊이에 대응된다. Fig. 6과 Fig. 7에서 고주파에 대한 파워의

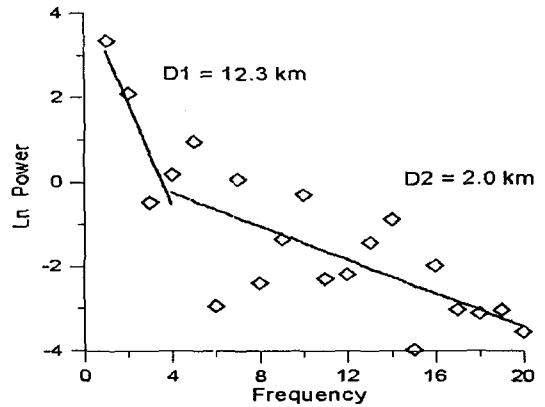


Fig. 6. Power spectrum for the Bouguer anomaly.

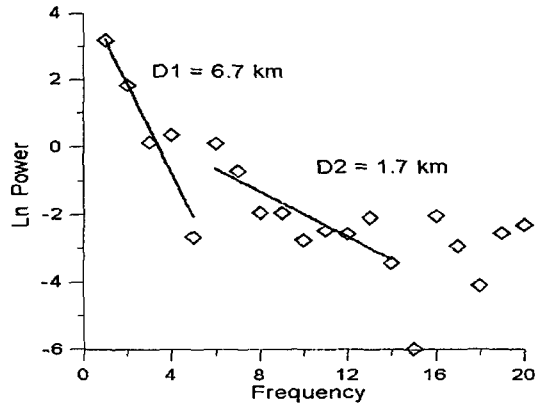


Fig. 7. Power spectrum for the Bouguer anomaly of latter part on the survey line.

기울기는 더욱 완만하게 잡을 수 있으며, 이때 얻어지는 깊이는 수 백m가 되므로 측선상의 측정간격보다 좁아지게 된다. 따라서 고주파부분의 파워의 경사로부터 구한 깊이는 잡음에 해당한다고 볼 수 있다. 위에서 얻어진 특정의 깊이가 무엇을 의미하는가는 이후에 검토한다.

중력이상에 의한 가상 총자기이상

위에서 지적한 바와 같이, 본 연구에서 측정된 시간에 따른 전자력의 일변화에 대한 보정을 하지 않아 어느 정도의 오차를 포함하고 있다. 그러므로 이 자료를 이용한 지하구조의 정량적인 평가보다는 정성적인 해석에 중점을 두기로 한다. 중력이상이 측선상의 50km 부근에서 급격히 증가하는 동시에, 총자기이상은 이 부근에서 급격히 감소하는 특징을 보여 준다(Fig. 3 참조). 일반적으로 중력이상과 자력이상은 정의 상관을 가지며, 이것은 중력과 자력의 근원이 동일하다는 가정아래에서 성립된다(Hagiwara, 1980). 이러한 가정에서 양자간의 전환에 관한 수학적인 방법이 다수 제안되어 있다. 본 연구에서는 Hagiwara(1980)의 방법론을 채택하여, 측정된 중력이상으로 자력이상이 설명 가능한가를 검토한다.

주위와의 밀도차가 $\Delta\rho$, 부피 v 인 이상질량체에 의한 점 $p(x,y)$ 에서의 중력포텐셜 U 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$U = G\Delta\rho \int \int \int_v \frac{dv}{r} \quad (3)$$

단 G : 만유인력상수
 r : 거리

한편, 자기포텐셜 V 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = J \int \int \int_v \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dv \quad (4)$$

여기서 ∇ 는 gradient, J 는 물체내부에서 크기와 방향이 동일한 자화벡터를 나타낸다. 중력과 자력

의 근원이 동일하다는 가정하에서 다음과 같은 Poisson 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{J}{G\Delta\rho} \text{grad } U \\ &= \frac{J}{G\Delta\rho} \left(\alpha \frac{\partial U}{\partial x} + \beta \frac{\partial U}{\partial y} + \gamma \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } \alpha &= \cos I \cos D \\ \beta &= \cos I \sin D \\ \gamma &= \sin I \end{aligned}$$

위 식에서 D 와 I 는 각각 편각과 북각을 나타낸다. 식 (5)를 x, y, z 에 대하여 편미분하면, 자력이상의 성분 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 는 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \frac{J}{G\Delta\rho} \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (6)$$

이때 총자기이상 ΔF 는 고차항을 생략할 때 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\Delta F \approx \alpha \Delta x + \beta \Delta y + \gamma \Delta z \quad (7)$$

식(5)의 양변을 주파수영역으로 변환하여 정리한 후, 다시 역변환하여 다음 식을 얻을 수 있다(Hagiwara, 1980).

$$\Delta F(x, y) = \frac{J}{2\pi G\Delta\rho} \int \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x-x', y-y') \Delta g(x', y') dx' dy'$$

$$\Psi(x, y) = \frac{1}{(x^2 + y^2)^{3/2}} \left\{ \frac{2(ax + \beta y)^2}{x^2 + y^2} - 1 \right\} \quad (8)$$

단, $\Delta g(x, y)$: 점 $p(x, y)$ 에서의 중력이상

결국 위 식을 수치적분하여 중력이상으로부터 가상의 자력이상을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 측선을 따른 1차원의 중력이상을 자료로 하여 가상의 총자기이상을 위의 방법으로 계산하였다. 이 계산에서 편각 D 와 복각 I 는 김성균(1996)을 참조하여 각각 6.5° , $49^\circ 45'$ 을 사용하였다. 또한 (6)에서의 밀도에 대한 자화강도의 비 $J/\Delta\rho$ 는 김성균 외(1995)의 결과로부터 0.02 emu/g 를 채택하였다. Fig. 8에 측정된 총자기이상을 실선으로, 중력이상으로부터 계산된 가상의 총자기이상을 점선으로 도시하였다. 두 이상은 50km 부근까지는 대체로 서로 잘 조화된다. 그러나 50km 이후부터는 서로 완전히 반대의 경향을 보여주고 있다. 이 결과는 50km이후의 지역(장흥-울포사이)에 널리 분포하고 있는 화산암류가 현재의 지자기의 방향과 반대방향으로 자화되어 있을 가능성을 시사한다.

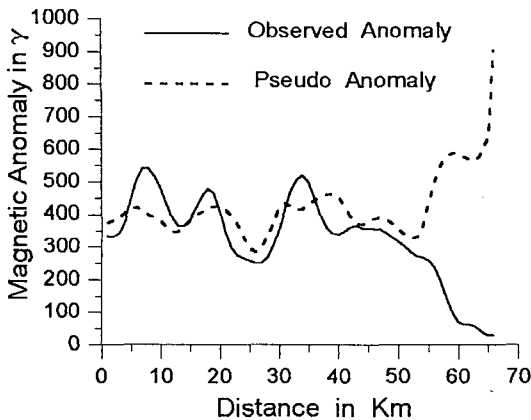


Fig. 8. Observed and calculated magnetic anomalies.

지하 지질구조 모델

위에서는 중력이상 자료에 파워스펙트럼법을 적용하여 지하밀도 불연속면의 평균깊이를 구했다. 그러나 실제 지하구조는 수평방향으로도 밀도변화

가 있고, 밀도불연속면의 경계가 기록을 갖고 있다고 생각함이 좀 더 합리적이다. 그러나 이러한 실제에 가까운 지하구조를 역해법에 의하여 구하기는 어렵다. 따라서 이러한 복잡한 구조는 통상 초기에 설정한 지하구조모델에 의한 중력이상의 이론치와 측정치가 일치하도록 구조를 수정하는 반복적인 시행착오법으로 구하게 된다. 보통 초기의 지하구조 모델은 지표지질과 역해법의 결과를 참조하여 가정하게 된다. 본 연구에서는 영국 지질조사소의 Pedley(1991)가 작성한 컴퓨터 프로그램 "GRAVMAG"을 사용하여 지하지질구조를 결정하였다.

본 연구에서의 초기모델은 지표지질과 파워스펙트럼법으로 구한 밀도 불연속면의 깊이를 참고로 하여 설정하였다. 비교적 얇은 깊이의 경계면인 2.0, 1.7km의 깊이는 지표지질을 참조할 때, 화산암류 및 관입암류가 이 지역의 기반암으로 볼 수 있는 편마암류와 만드는 경계면인 것으로 판단된다. 또한 12.3과 6.7km의 심부 경계는 편마암류와 이보다 밀도가 상대적으로 큰 중성심성암류와의 경계인 것으로 해석할 때, 측정된 중력이상자료를 잘 만족한다. 앞서서도 지적한 바와 같이 중력이상은 측선상의 50km 부근에서 갑자기 증가한다. 이 변화는 천부 암석의 밀도차로 설명이 어려우며, Fig. 9와 같이 심부의 가상단층을 가정한 모델로 잘 설명된다. 여기서 편마암류(U)와 중성심성암류(L)의 밀도차는 0.1 g/cm^3 로 가정하였다. 그림에서 이 모델에 의하여 광역이상에 속하는 대부분의 중력이상과 50km 부근의 급격한 증가가 잘 설명된다. Fig. 9에서 가정한 가상단층은 Fig. 1에 표시한 단층 F5에 대응되며, 야외에서 화산암에 의하여 덮여 있는 것으로 보아 이 화산암류의 분출 이전에 생성된 단층으로 볼 수 있다. 이 단층(F5)은 1 : 1,000,000 지질도(한국자원연구소, 1995)에서 남남서-북북동 방향으로 연장성이 좋으며, 대체로 영남육괴와 옥천대와의 경계를 만들고 있다. 따라서 옥천대의 형성초기에 대규모의 정단층운동에 의한 합몰대의 생성을 가정하는 Reedman and Um(1975)의 가설과 잘 조화된다. 지하 심부구조 모델에서 가정한 중성심성암류는 본 논문의 지질개요에서 설명한 바와 같이, 소규모의 암체로서 광범위하게 분포하며, 이 사실은 심부에 중성심성암류의 존재 가능성을 시사한

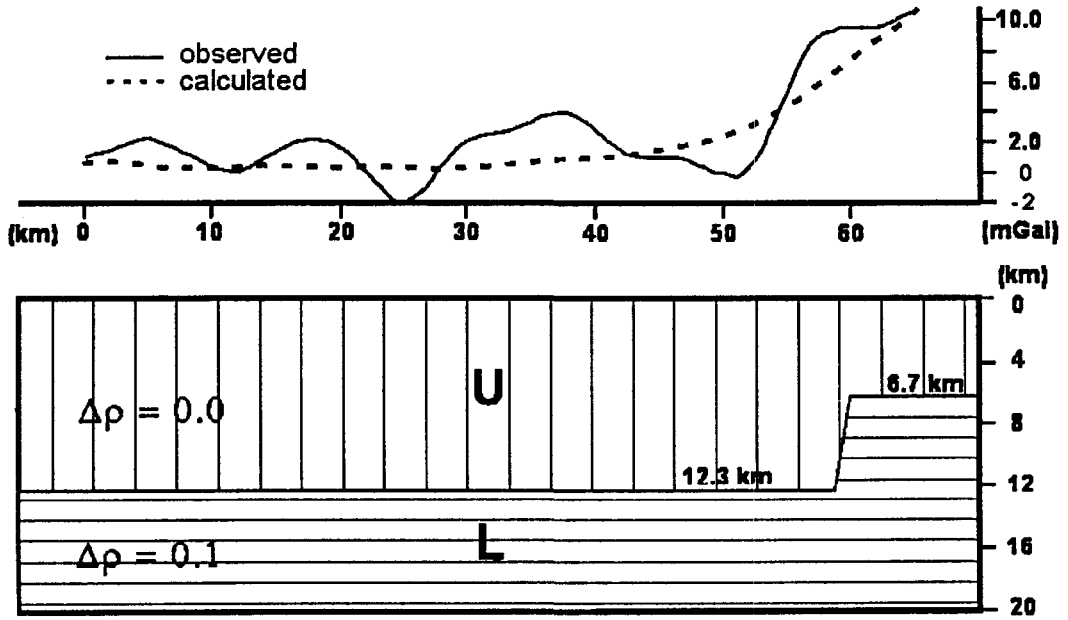


Fig. 9. Deep geological structure to explain regional Bouguer anomaly. U: Pre-cambrian gneiss complex, L: Intermediate plutonic rocks.

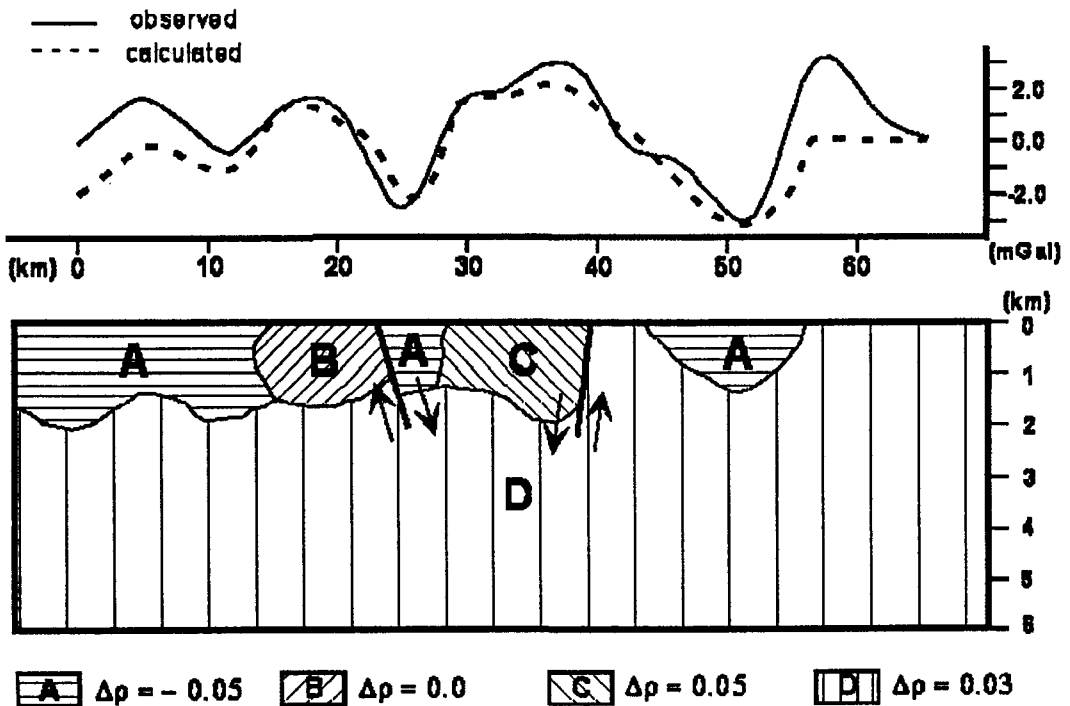


Fig. 10. Subsurface geological structure to explain residual Bouguer anomaly.
 A: Kyoungsang volcanics B: Kyoungsang granites
 C: Meta-sediments D: Precambrian gneiss

다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이, 중력이상의 측정치에서 계산치를 뺀 잔류이상은 ± 4 mGal 범위에 있으며, 밀도가 상대적으로 작은 화산암류와 밀도가 큰 관입암류에 의하여 설명이 가능하다. 본 논문에서의 밀도차는 Kwon et al.(1993)과 민경덕과 조광은(1995)을 참조하여 값을 부여하였다. 즉 화강암류(Fig. 10의 B)의 밀도를 기준으로 하여, 화산암류(Fig. 10의 A)의 밀도차는 -0.05g/cm^3 로, 변성퇴적암류(Fig. 6의 C)의 밀도차는 $+0.05\text{g/cm}^3$ 로, 편마암류(Fig. 6의 D)의 밀도차는 $+0.03\text{g/cm}^3$ 로 가정하였다. 이와 같은 밀도차를 가정하여 최종적으로 얻은 지하구조 모델을 Fig. 10에 제시한다. 그림에서 중력이상의 측정치(실선)와 지하구조로부터 이론적으로 계산한 중력이상(파선)이 대체로 일치함을 알 수 있다. 물론 중력이상의 측정치와 계산치의 일치하는 본 연구에서 채택한 밀도차를 가정할 때 성립된다고 할 수 있다.

지하구조 모델에 나타난 2개의 단층들은 한반도에서 우세한 방향인 북북동-남남서 주향의 구조선(Fig. 1 참조)이며, 그 연장은 수십-수백 km에 달한다. 축선상에서 25km 부근의 단층은 Fig. 1에서 F2로 표시된 단층이며, 40km(Fig. 1의 F4) 근처의 단층과 함께 정단층으로 가정할 때 중력측정치가 잘 설명된다. 이 결과는 본 연구의 선행연구로 수행된 연구(김성균외, 1997)에서의 결과와 대체로 잘 조화된다. 즉 선행연구에서의 단층 F2는 본 연구에서도 고각도의 정단층으로 나타나지만, 그 경사방향이 반대이다. 또한 축선 L1-L1'를 가로지르는 단층 F3(Fig. 1참조)가 북쪽에서는 심하게 파쇄되어 나타나지만, 남단에서는 정단층의 성격을 보여 주고 있다.

결 론

본 연구에서는 옥천대의 심부구조를 밝히기 위한 연구의 일환으로 옥천대 남단의 주요 구조선을 가로 지르는 축선을 설정하여 중력과 자력을 측정, 해석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 중력의 파워스펙트럼법으로 계산한 지하 밀도

불연속면의 평균깊이는 12.3, 6.7, 2.0, 1.7km에서 나타났다. 여기서 천부의 1.7, 2.0km의 깊이는 화산암류 및 관입암류가 기반암인 편마암류와 만드는 경계에 대응되며, 심부의 6.7, 12.3km의 깊이는 편마암류와 이보다 밀도가 큰 중성 심성암류의 경계를 지시하는 것으로 추정된다.

2. 중력이상은 축선상의 50km 부근에서 급격히 증가하며, 이 급격한 변화는 상대적으로 무거운 중성심성암이 편마암류보다 서쪽으로 떨어진 정단층 운동으로 설명이 가능하다. 이 단층을 경계로 옥천대와 영남육괴가 나누어 지며, 옥천대의 형성과 관련된 주요한 의미의 단층으로 생각된다.

3. 광역이상을 제거한 잔류이상은 밀도가 낮은 화산암류와 비교적 밀도가 큰 변성퇴적암류의 분포로 대부분 설명되며, 측정된 중력이상을 만족하는 지하구조 모델이 제시되었다.

4. 중력과 자력의 근원이 같다는 가정아래, 중력이상으로부터 계산한 자력이상은 측정된 자력과 대체로 잘 일치한다. 그러나 장흥-울포사이에서는 서로 완전히 반대의 경향을 보여주고 있다. 이 결과는 50km이후의 지역(장흥-울포사이)에 널리 분포하고 있는 화산암류가 현재의 지자기의 방향과 반대방향으로 자화되어 있을 가능성을 시사한다.

사 사

이 연구는 1997년도 한국과학재단의 특정연구(옥천대 중앙대 중-남서부지역에서의 지각진화에 관한 연구(과제번호 : 96-0703-06-01-3))의 연구비 지원에 의하여 수행되었다. 본 연구에서의 중력 및 자력측정과 보정에 협력한 전남대학교 지질학과 98학년도 지구물리 논문조원 김명은, 김수경, 문희정, 박상희, 장영화양에게 감사드린다. 또한 본 논문의 오류를 지적하여 질을 높여 주신 충북대학교 김지수교수와 익명의 심사자에게 감사드린다.

참 고 문 헌

- 김성균, 김민선, 1995, 한반도 남부의 전자력이상, 한국지구과학회지, 16, 30-37.
 김성균, 1996, 고체지구물리학. 교학연구사, p. 250.

- 김성균, 안건상, 오진용, 1997, 중력탐사에 의한 옥천대 남서부의 지하 지질구조(1), 자원환경지질, 30, 363-369.
- 김용준, 1988, 보성-순천지역에 분포하는 정편마암류의 지질시대와 성인에 대한 연구, 광산 지질, 21, 69-83.
- 김용준, 오민수, 박재봉, 1993, 광주화강암체에 대한 암석화학적 연구, 광산지질, 26, 83-96.
- 김희남, 신인현, 안건상, 박운선, 이창신, 1997, 강진-장흥지역 화강암류의 암석화학 및 Sr-Nd 동위원소, 지구과학회지, 18, 433-442.
- 민경덕, 조광은, 1995, 중력탐사에 의한 삼척-태백간의 지하지질 및 지질구조 연구, 자원환경지질, 28, 79-88.
- 박재봉, 김용준, 김정빈, 1990, 경남 함양지역에 분포하는 화성암류에 대한 암석지화학적 연구, 광산지질, 23, 105-123.
- 윤성효, 1990, 해남-목포의 백악기 화산활동에 관한 연구, 부산대학교 사대논문집, 제21집, 275-291.
- 윤성효, 1992, 한반도 남서부 해남-목포 일원의 백악기 산성화산암류의 암석화학적 연구, 부산대학교 사대논문집, 제25집, 261-278.
- 이창신, 김정빈, 1995, 월출산 지역에 분포하는 중생대 화강암류에 대한 미량원소와 희토류 원소의 특성, 자원환경지질, 29, 293-304.
- 주승환, 김성재, 1986, 영남육괴의 연대측정연구 2 (지리산 서남부 일대 화강암질 편마암 및 화강암류), 한국동력자원연구소, KR-85-24, 7-33.
- 차문성, 윤성효, 1987, 한반도 서남부 영동-광주합몰대의 화산암물체(II) -강진콜드론의 지질과형성과정-, 부산대학교 사대논문집, 제15집, 215-226.
- 한국자원연구소, 1995, 한국지질도(1 : 1,000,000), 한국자원연구소.
- Dobrin, M.B. and Savit, C.H., 1988, Introduction to geophysical prospecting, McGraw-Hill International Edition, 4th Ed., pp. 867.
- Hagiwara, Y., 1980, Pseudomagnetic anomaly derived from gravity observations in Central Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 55, 27-41.
- Kim, H.S., 1973, On migmatite in the Jeonju-Mogpo area, Korea, J. Geol. Soc. Korea, 9, 207-234.
- Kwon, B.D., Joo, J.A. and Kwon, J.H., 1993, Geophysical studies on major faults in the Ogcheon Belt : Gravity survey on the faults at Muan and Haenam Areas. Jour. Geol. Soc. Korea, 29, 281-290.
- Pedley, R.C., 1991, GRAVMAG-Interactive 2.5D gravity and magnetic modelling program- User manual, British Geological Survey.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, Geology of Korea, Korea Institute of Energy and Resources, pp.139.
- Tomoda, Y., 1960, Thickness of the earth's crust from Bouguer anomaly statistics. Jour. Geod. Soc. Japan, 6, 47-56.
- Yanai, S., Park, B. S., and Otoh, S., 1985, The Honam shear zone(South Korea) : Deformation and tectonic implication in the Far East, Scientific papers Collage Arts and Sciences, Univ. of Tokyo, 35, 181-210.

김성균, 김용준
 전남대학교 자연과학대학 지구환경과학부
 (Department of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea)
 오진용
 충남대학교 기초과학연구소
 (Basic Science Research Institute, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea)
 안건상
 조선대학교 사범대학 지구과학과
 (Department of Earth Sciences Education, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea)