

한반도 남부 모호면의 변형 구조

신영홍^{1,2,*} · 박종욱¹ · 박필호¹

¹한국천문연구원, 305-348 대전광역시 유성구 화암동
²부산대학교 과학교육연구소, 609-735 부산광역시 금정구

Deformation of Moho in the Southern Part of the Korean Peninsula

Young Hong Shin^{1,2,*}, Jong Uk Park¹ and Pil Ho Park¹

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²Research Institute for Science Education, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract: The Moho structure and its deformation in the southern part of the Korean Peninsula were estimated using gravity and topography data. Gravity signals from the upper and lower crust were separated using a filter that was computed from isostasy and elastic thickness. The result of this study shows three characteristic features of the Moho deformation. First, the Moho folding structure is parallel to SKTL (the South Korean Tectonic Line), which indicates positive association with the collision of the Yeongnam and Gyeonggi Massifs and repeated compression afterwards. In contrast, noticeable deformation of the Moho was not observed along the Imjingang Belt, which is interpreted as another continental collisional belt in the Korean Peninsula. Second, the Moho beneath the Gyeongsang Basin has remarkably risen; this seems to be the result from both the collisional compression and buoyancy caused by magmatic underplating. Third, the Moho deformation is shallowest in the east of the Taebaek Mountains and deepens toward the west, consistent with the topographic characteristic of the Korean Peninsula of "high east and low west". It can be interpreted as the results of the opening of the East Sea and Ulleung Basin. A tectonic explanation for this could be the ascent of the mantle induced by continental rifting and horizontal extension at the early stage of the opening of the East Sea. The Moho deformation model computed in this study correlates well with the earthquake distribution and crustal movement measured by GPS. We suggest that the compression along the SKTL is still exerted, consequently, the Moho deformation is active, although it may be weak.

Keywords: Moho deformation, gravity inversion, isostasy, continental collision, magmatic underplating

요약: 한반도 남부에서 중력과 지형 자료를 바탕으로 모호면구조와 이것의 변형을 계산하였다. 천부와 심부 지각의 중력효과를 분리하기 위해 지각 평형의 개념과 유효 탄성 두께를 이용하여 설계한 필터를 활용하였다. 모호면의 변형 구조에서 세 가지 특징을 발견하였다. 첫째, SKTL(South Korean Tectonic Line)과 나란한 모호면 습곡 구조가 발견되었는데, 이것은 영남 육괴와 경기 육괴의 충돌과 이후에도 반복된 횡압력 성분의 힘과 관련된 것으로 해석된다. 반면에 한반도에서 또 다른 대륙 충돌 경계로 알려진 임진강대를 따라서는 특별한 변형 구조가 발견되지 않았다. 둘째, 경상 분지 아래에서 모호면이 많이 상승되어 있는 것이 발견되는데, 이는 대륙 충돌에 의한 횡압력과 함께 마그마 물질의 하부점착에 의한 부력이 같이 작용한 것으로 설명할 수 있을 것이다. 셋째, 태백 산맥의 동쪽으로 모호면이 상승되고 서쪽으로는 침강된 것으로 보이는 구조가 발견되었는데, 이는 우리나라의 동고서저형 지형의 형성과 관련 있는 것으로 보이며, 동해와 울릉 분지의 열림이 그 원인으로 작용했을 것이다. 본 연구에서 계산된 모호면의 변형 구조는 지진의 분포나 GPS 측정에 의한 지각의 운동과도 부합하는 것으로 보인다. SKTL 을 경계로 횡압력이 비록 미약하나마 여전히 작용하고 있는 것으로 추정되기 때문에 모호면의 변형은 아직도 진행 중일 것이라 예상된다.

주요어: 모호면 변형, 중력 역산, 지각 평형, 대륙 충돌, 마그마 하부점착

*Corresponding author: yhshin@kasi.re.kr

Tel: 82-42-865-3240

Fax: 82-42-861-5610

서 론

실제 지구에 가장 유사한 회전하는 타원체를 가정하고 이론적으로 계산한 표준중력과 실제 관측한 지구중력과의 차이를 중력이상(gravity anomaly)라고 하는데, 이 값은 지구상의 위치에 따라서 다르게 나타난다. 이는 지구의 균질하지 않는 질량분포를 반영하는 것이기 때문에 역으로 이 중력이상을 통해 지구 내부의 질량 분포를 추정할 수 있게 되고, 또 다른 한편으로는 지구의 물리적인 형상인 지오이드를 결정할 수 있게 되는 것이다.

우리나라에서 심부 지각구조에 대한 연구는 크게 지진이나 중력탐사 등을 통해 수행하여 왔으며, 최근에 와서는 지각의 속도구조를 규명하기 위해 대규모 탄성과 탐사가 행해졌다. 지진자료를 이용한 선행연구로는 Lee(1979)를 비롯하여 김상조와 김소구(1983), 김성균과 정부흥(1985), Chung(1995), Kim and Li(1998), Song and Lee(2001), Yoo and Lee(2001), 박종찬 외(2003) 및 Chang and Baag(2005)가 있는데, 이들에 의한 평균적인 모호면은 Lee(1979)의 35 km를 제외하면 대체로 29-33 km 정도로 평가되었다.

중력과 지형자료를 이용한 연구로는 심운택(1971), Kim(1979), 권병두와 정중대(1985), Kwon and Yang(1985), 최광선(1986), 최광선 외(1987), 최광선 외(1993), 신영홍(1995), 민경덕과 이영재(2000), 최광선 외(2002), 유상훈 외(2002), 김정우 외(2003)가 있다. 이들에 의한 모호면의 평균 깊이는 작게는 26 km(Kim, 1979), 크게는 35 km(최광선, 1986)로 평가되었고, 그 외는 31.4-33 km 정도로 평가되었다. 이중 26 km는 지각평형이상을 최소로 하는 지각의 두께에 대한 것이므로 실제 지각두께와는 구별되는 것이다. 한편 김성균(1995)은 중력이상과 지진기록 등을 해석하여 모호면이 각각 32.6 km와 32.8 km로 잘 일치한다고 하였다.

우리나라 내륙지역을 대상으로 한 대규모의 탄성과 탐사 연구결과로는 김기영 외(2005)와 Cho et al.(2006)에 의한 것이 있는데, 김기영 외(2005)는 이 탐사를 바탕으로 연구지역의 모호면 깊이가 30.8-36.1 km의 범위를 보인다고 하였고, Cho et al.(2006)은 지각두께가 북중국의 35-40 km에 비해 약 6-7 km 작다고 하였다. 이들 탐사를 통해서 294 km의 서북서-동남동 축선과 335 km의 북북서-남남동 축선을 따른

이차원적인 지하구조가 제시되었으며, 이후 우리나라에서 지진파를 이용한 지각구조 연구의 발전을 위한 중요한 계기가 될 것으로 기대된다.

최근에는 신영홍(2006a)이 우리나라 중력자료와 지형자료를 각 지체구조별로 구분하여 분석하고 지각평형과 대륙충돌경계에 대해 논의하였고, 또 신영홍(2006b)은 부우게이상보다도 지각평형이상을 이용하는 것이 우리나라 지표지질을 더 잘 드러낼 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 이들 연구를 바탕으로 중력이상의 필터설계에 있어서 지각평형이상의 개념을 활용하였다. 또 중력역산을 통하여 한반도 남부의 모호면구조모형을 제시하였고, 이를 최근의 지각속도구조연구를 위해 수행된 대규모 탄성과 탐사와 지진파의 PmP 분석을 이용한 모호면구조모형 등과 비교 분석하였다. 또한 본 연구에서는 중력역산을 통한 모호면구조모형과 탄성과 지각평형모형(flexural isostasy)로부터 모호면의 변형을 평가하는 방법(Shin et al., 2006c)을 응용하여 한반도 남부지역의 모호면 변형구조를 구하고 대륙충돌과 마그마물질의 하부점착(magmatic underplating) 및 지형과 관련하여 해석하였다.

지형 및 중력 자료

연구지역과 주위의 육상 지형 자료는 미국 NIMA(National Imagery and Mapping Agency)의 DTED(Digital Terrain Elevation Data) 자료 중 3"×3" 평균 고도 지형 자료를 바탕으로 하였다. 연구지역 인근의 수심자료는 국립해양조사원의 자료를 활용하였는데, 주로 연안에 집중되고 동해 먼 바다까지 불규칙하게 분포하는 228,244개 수심자료와 해양 2000호에 의해 1996년과 1997년에 울릉분지 일원에서 측정된 562,861개 수심자료이다. 이들 자료들을 토대로 1 km 간격의 지형자료를 만들었고, 지형기복도를 Fig. 1에 나타내었다. 사용된 지형자료에 대한 구체적인 분포와 특징은 신영홍(2004)을 참고할 수 있다. 본 연구에 표현된 그림들은 동경 127도와 북위 38도를 중심으로 하는 횡축 메르카토르법(Transverse Mercator Projection)을 사용하였다.

우리나라에서 육상 지역의 중력 자료는 최광선 외(2002)와 Choi et al.(2003) 이후 약 13,000점에 이르는데, 여기에는 여타의 유관 연구기관에서 별도로 탐사하여 소장하고 있는 자료는 수집되지 않은 것이다.

제주도의 중력자료가 가장 밀도 높게 측정되었고, 제주도를 제외한 한반도 남부의 내륙에 대해서도 9 km² 당 1점이라는 비교적 양호한 양이지만, 각 지체 구조구별로도 편차가 심할 뿐만 아니라 일부 특정 탐사지역에 자료가 집중되는 문제가 여전히 남아있어서 추가적인 정밀중력탐사가 요구되고 있다(신영홍, 2006a).

중력 역산은 중력의 특성상 주위 지역의 영향까지 받게 되므로 중력자료는 연구지역 주변까지 넓게 포함하여야 하고, 지형보정이나 지각평형보정에 필요한 지형자료는 이보다 더 넓은 지역의 자료가 필요하다. 우리나라의 육상 지역에 대해서는 정밀 측정된 육상 중력자료를 사용하였다. 주위의 해양자료 중에서 동해의 울릉분지 일원에서는 국립해양조사원에 의해 1996년과 1997년에 측정된 선상중력자료를 처리하여 사용하였고, 나머지 해양지역은 Sandwell and Smith (1997, 2005)에 의한 해면고도계 인공위성의 중력자료를 이용하였다. 중력자료가 공개되지 않은 북한 지역은 Paek et al.(1996)에 의한 부우계이상도를 이용하였고, 일본 육상지역은 Geological Survey of Japan (2000)의 자료를 활용하였다. 본 연구에 사용된 여러 가지 종류의 중력자료에 대한 자세한 설명은 신영홍(2004)을 참고할 수 있는데, 인공위성 해면고도계 자료의 경우에는 최근의 새 버전(v15.2)이 공개되었기 때문에 이 부분을 교체하여 각종 중력 이상을 재계산하였다.

중력 이상의 계산은 GRS1980계를 기준계로 설정하여 수행되었다. 조석보정을 위한 기조력은 Tamura (1982)를 이용하여 계산하였으며, 이때 G-값은 1.18로 하였다. 하루 중 중력계 스프링의 변화 때문에 생기는 영향에 대해서도 선형변화를 한다는 가정 하에 보정이 이루어졌고, 최종적으로 최소자승법에 기초하여 망조정을 수행하여 관측중력을 계산하였다. 신영홍(2004)에 의해 개발된 중력 이상의 망조정 프로그램은 선상중력의 경우에는 4000개의 교점(cross-overs)에 대한 미지수를 8000개까지의 방정식을 만들어서 풀 수 있도록 설계 되어있으며, 가중치를 적용할 수 있고, 각 항차마다 중력 관측치 180,000개까지 배정도(double precision)로 계산할 수 있도록 하였다. 따라서 비록 탐사량이 방대한 경우라도 대부분의 선상중력탐사에 무난히 적용될 수 있으며, 상대적으로 관측량이 매우 적은 육상중력의 망조정 프로그램은 실제적으로 관측량의 개수에 제한 없이 활용가능하다. 육

상지역 중력측정 자료의 망조정결과, 준거표준편차(reference standard deviation)는 각 측정지역별로 0.013 mgal에서 0.054 mgal 사이의 값으로서 남한 육상지역의 중력자료가 상당히 양질의 것임을 보여준다. 선상중력의 망조정 결과, 1996년과 1997년의 각각의 자료의 준거표준오차는 1-2 mgal 정도이며, 이 두 탐사지역 자료를 병합하기 위해 망조정을 재차 실시하였는데, 이때의 준거표준오차는 약 0.5 mgal 정도였다.

위의 과정을 통해 결정된 관측중력값으로부터 여러 가지 중력 이상을 산출하게 된다. 고도이상 산출을 위해 대기질량보정과 고도보정을 하였는데, 고도보정은 높이의 제공 향까지 고려하여 수행되었다. 본 연구에서는 고도이상도와 이에 대한 논의를 생략하였는데, 한반도 남부지역의 고도이상에 대한 특징은 신영홍(2006a, 2006b)의 토의를 참고할 수 있다. 고도이상 계산 후에 부우계 이상을 산출하는 과정에서 지형보정을 하게 되는데, 과거 지형도에서 경위도를 독취하였기 때문에 좌표값이 부정확한 1995년 이전 자료에서는 15"×15" 지형자료를 이용하였다. 이후 GPS를 이용한 중력측정방법(최광선 외, 1998)을 통해 얻어진 자료에 대해서는 정밀한 3"×3" 지형자료를 이용하여 적분반경 50 km까지 지형보정이 이루어졌다. 지형의 밀도는 2670 kg/m³로 하였다. 한편 해양지역의 부우계보정과 지형보정을 위해서는 신영홍(2004)에 의한 단순구모보정(simple spherical cap correction)과 이와 부합하도록 설계된 구면에서의 지형보정방식 및 프로그램을 이용하였다. 신영홍(2004)은 동해와 같은 지형기복이 심하거나 해산이 위치한 곳에서는 지형보정이 꼭 필요할 정도로 큰 값을 보인다고 하였다. 새 버전의 인공위성고도계 중력자료에 대해서도 이와 같은 방식으로 지형보정을 실시하였다. 이에 대한 자세한 논의는 신영홍(2004)을 참고할 수 있으며, 이런 과정을 거쳐 계산된 연구지역 일원의 부우계 이상도를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 지체구조구의 분류와 현생이연의 화강암 분포도는 Chough et al.(2000)을 따랐는데, 지체구조구는 경상분지(GB), 영남육괴(YM), 옥천습곡대(OFB), 경기육괴(GM)의 네 지역으로 나누었다.

지역적인 지각 평형을 가정하고, 지각의 뿌리(root) 및 반뿌리(anti-root)에 의한 중력효과를 보정하기 위해서는 1 km×1 km 지형자료를 사용하였고, 적분반경을 100 km로 하였으며, 적분공식은 Nagy(1966)의 식을 이용하였다. 지각평형설은 Airy-Heiskanen의 방

식을 채택하였고, 보상면에서의 등질량을 가정하였으며, 3차항 이후를 무시한 뿌리 및 반뿌리의 깊이 공식(Heiskanen and Vening Meinesz, 1958)을 이용하였다. 지각의 밀도는 2670 kg/m^3 , 해수는 1030 kg/m^3 , 지각과 맨틀의 밀도차는 500 kg/m^3 로 두었으며, 표준 지각두께(normal crustal thickness)는 30 km로 두었다. 이렇게 계산된 지각평형이상도는 Fig. 3에 나타내었고, 이때 지각평형보정량은 Fig. 4에 나타내었다. 비록 국지적지각평형을 가정하였지만, Fig. 4에서 보듯이 지각평형보정량이 지형의 장파장을 잘 반영하고 있으며, 반면 단파장들은 거의 사라졌음을 보여주고 있다.

지형 및 중력 이상도 분석

산맥들이 한반도의 조구조운동과 이에 따라 발달한 지질조건과 밀접하게 관련되어 있으므로(이동영, 1999),

이를 중력이상의 분포와 연관하여 해석하는 것이 바람직할 것이다. Fig. 1에서 연구지역의 지형은 동해안을 따라 발달한 태백산맥, 그리고 옥천습곡대와 영남육괴를 따라 발달한 소백산맥이 두드러지게 나타나고 있으며, 또 태백산맥에서 뻗어 내린 광주산맥, 차령산맥, 노령산맥 등이 드러난다. 권혁재(2000)에 의하면 태백산맥의 남단은 낙동강 하구까지 연장되어 울산과 밀양 사이의 가지산일대를 포함하지만, 대부분의 산맥도에서는 영일만 근처의 형산강지구대 위까지로 표현하고 있다(박수진과 손일, 2005). 소백산맥은 우리나라 지질구조의 주된 방향의 하나인 북동 방향을 가지고 있으며, 대륙충돌경계부에서 작용한 압력으로 형성되었을 가능성을 보여준다. 이는 엽리상 화강암의 분포가 옥천습곡대와 영남육괴를 따라 주로 발달하는 것과는 연관이 있을 것이다. 박수진과 손일(2005)은 소백산맥이 영남육괴와 옥천습곡대를 나누는 경계가 되며, 대보화강암의 관입과 그에 따른

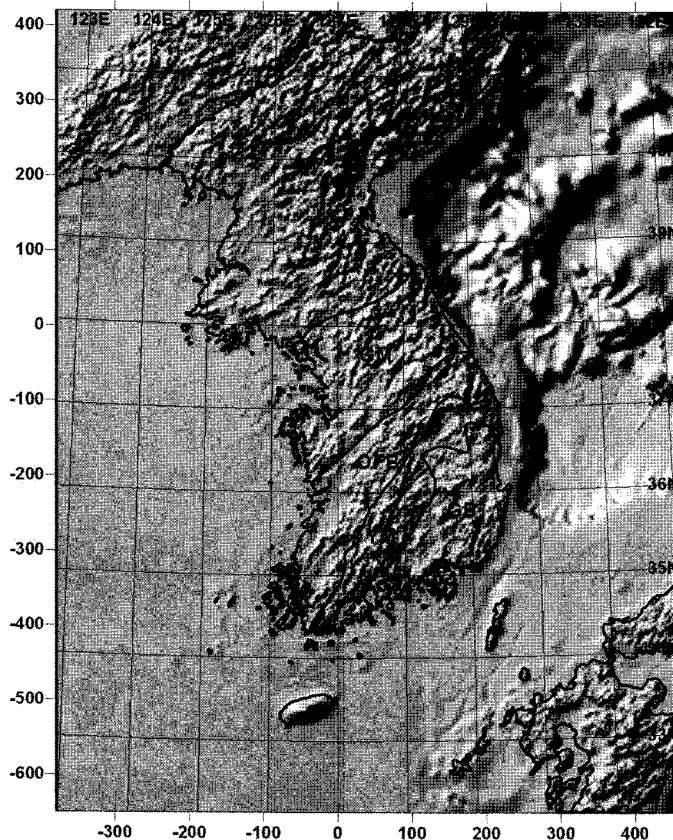


Fig. 1. The topographic relief map of the study area and its neighbor: Tectonic zoning is from Chough et al. (2000). GB = Gyeongsang Basin, YM = Yeongnam Massif, OFB = Okcheon Fold Belt, and GM = Gyeonggi Massif.

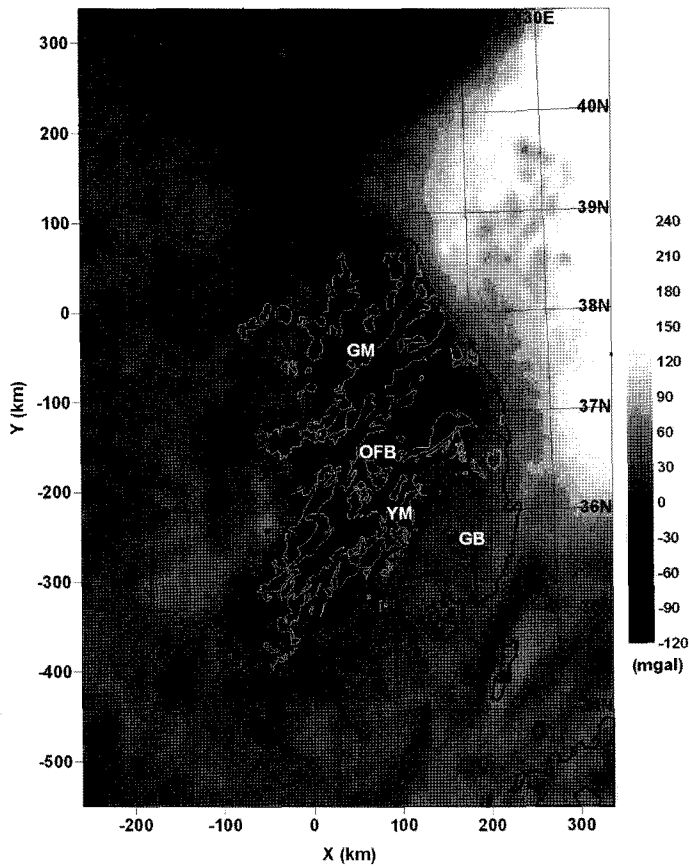


Fig. 2. Bouguer anomaly of the Korean Peninsula: Granitoids of Permian to Jurassic times are denoted by white lines.

습곡작용, 그리고 경상분지의 융기 등의 영향을 동시에 지시해 준다고 지적하는 한편, 이러한 성인 역시 지체구조구의 경계와 어떠한 인과관계를 가지는지를 명시적으로 설명하기에는 현재로서는 한계가 있다고 하였다. 이동영(1999)은 광주, 차령, 노령산맥의 형성이 대보운동과 관련된 것이라 하였다. 소백산맥이 지체구조구의 경계에서 형성된 것과는 달리 더 큰 규모로 발달한 태백산맥의 경우, 산맥이 습곡작용을 적게 받으면서 융기하였고 지체구조구의 경계와는 상관없이 발달하고 있다. 즉 산맥을 경계로 양쪽의 단층이나 지질구조가 연속되어 나타나고 있어서 산맥의 생성이 판의 경계부와는 직접적인 관련이 없었음을 보여준다. 한편 박수진과 손일(2005)은 한반도의 산맥 구조를 형성하는데 가장 결정적인 역할을 한 요인은 동해 형성이라고 하였으며, 이와 관련되어 형성된 융기산맥으로 태백산맥과 낭림산맥 및 함경산맥을 들었다. 지형에 대한 특징은 모호면의 변형구조와 관련하여 다시 논의될 것이다.

연구지역의 고도이상을 비롯하여 부우게이상, 지각평형이상이 관측지점의 높이와 어떤 관계를 가지고 있는지는 신영홍(2006a, 2006b)에서 자세히 논의된 바 있다. 부우게이상 (Fig. 2)은 지오이드면 이상의 지형효과를 제거한 것이므로 지하 밀도 분포를 반영하게 되는 중력이상이기 때문에 지하구조의 추정을 위해서는 보통 이것을 사용하고 있다. 지각평형의 관점에서 지형이 높은 지역일수록 모호면이 깊게 분포할 것이므로 부우게이상이 작아지는 경향, 즉 부우게이상이 지형과 음의 상관관계를 가지는 경향을 보인다. 부우게이상은 모호면의 기복에 크게 영향을 받지만, 다른 한편으로 천부의 밀도불연속면이나 지표지질에도 관련이 크므로 이들을 분리해서 해석하여야 하는 큰 어려움이 있다. 흔히 중력이상의 장파장을 심부의 영향으로 단파장을 천부 혹은 잡음의 영향으로 가정하고, 여러 종류의 필터, 즉 최소자승법에 기초한 다항식 적합법(Agocs, 1951)이나 이동평균법(瀬谷清, 1959a, 1959b), 푸리에분석법(e.g. Blakely, 1995), 최적필터

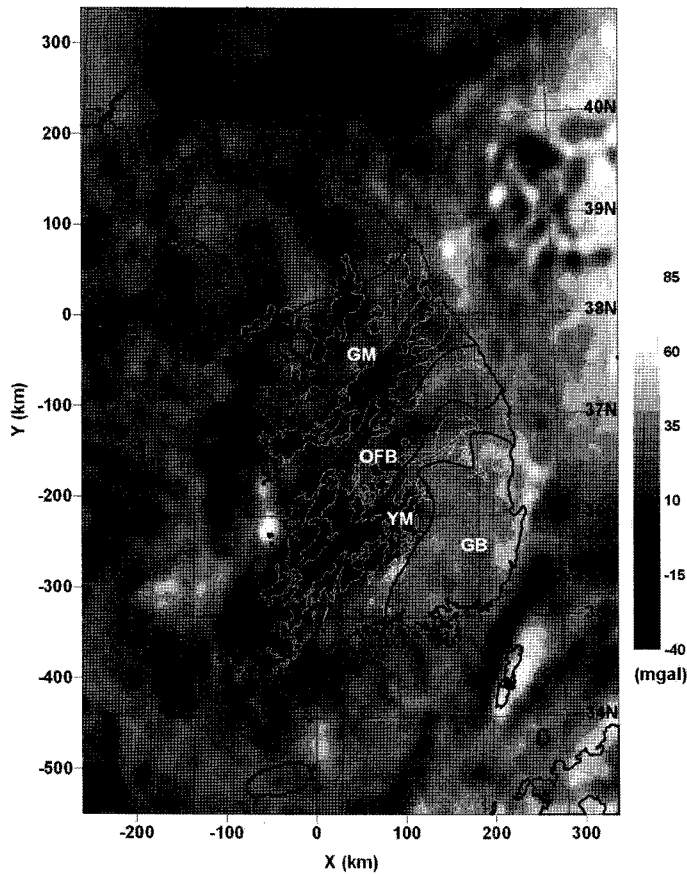


Fig. 3. Isostatic anomaly of the study area.

(Zurfluch, 1967, Press et al., 1986), 상향연속법 (Jacobsen, 1987), 휨강성필터(신영홍, 2004) 등을 설계하여 원하는 신호를 분리할 수 있다. 전단파장을 결정하기 위해서 중력이상의 파워스펙트럼분석(Kane and Godson, 1985, Spector and Grant, 1970)을 주로 활용하고 있는데, 휨강성필터(flexural rigidity filter)의 경우는 중력이상뿐만 아니라 지형까지 같이 분석하여 설계하는 것으로 휨강성을 가진 지각평형의 개념에 기초한 것이다. 심부구조의 경우는 비록 단파장 성분을 가지고 있더라도 표면의 중력에 미치는 영향이 매우 작기 때문에 주로 장파장으로 구성된다. 그러나 천부구조라 할지라도 장파장을 가질 수 있기 때문에 이러한 가정은 제한될 수밖에 없으며, 일의적인 해석을 만들 수 없는 중력만으로는 이를 구분할 수 있는 뚜렷한 방법은 없다.

본 연구에서는 지각평형이상과 화강암의 분포와의 관계를 통해서 지각평형의 개념을 필터설계에 활용하는 것이 천부와 심부의 중력신호를 보다 효과적으로

분리할 수 있음을 확인하였다. 화강암은 밀도가 낮아서 주위보다 낮은 중력이상을 나타내는데, 실제로 신회순과 권광수(1988)에 의해 측정된 우리나라 화강암의 평균 밀도는 $2610 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ 로 낮게 나타났다. 지형 혹은 지각뿌리의 영향에서 자유로울 수 없는 부우계이상도(Fig. 2)와는 달리, 지각평형이상도(Fig. 3)의 저이상대는 연구지역 화강암의 분포와 매우 잘 일치하고 있어서 천부지질효과 혹은 상부지각에 의한 중력신호를 분리하는데 훨씬 유리함을 보인다. Fig. 3에 나타난 지각평형이상에서 장파장 성분의 일부는 상부지각의 영향이었지만, 표면의 지질과 크게 차이는 영역, 특히 규모가 큰 장파장의 경우는 심부의 영향으로 보는 것이 더 합리적이기 때문에 이 성분을 분리할 필요가 있다. 어느 정도 파장에 대하여 필터를 설계할 것인가는 까다롭고 어려운 문제이다. 본 연구에서는 신영홍(1995, 2004)와 최광선 외(2002)에 의한 중력이상과 지형과의 코히어런스(coherence) 분석을 참고하여 필터를 설계하였다. 이는 신영홍(2004)

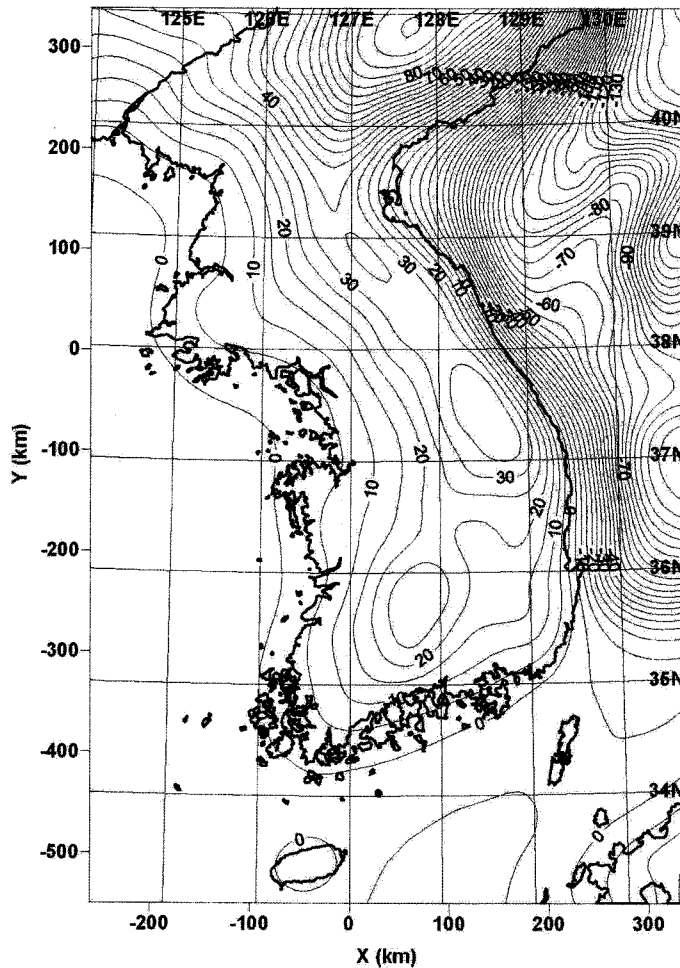


Fig. 4. Isostatic correction (in the unit of mgal).

의 횡강성필터를 적용하는 것인데, 이것은 티베트지역에서도 향상된 모호면모델(Shin et al., 2006b)을 바탕으로 모호면의 변형구조(Shin et al., 2006c)를 밝히는 열쇠가 되기도 한 필터이다. 연구지역에서 파장이 300 km 이상인 하중에 대해서는 지각의 횡강성으로 지지될 수 없으므로 수직변형으로 보상되고, 80 km 이하의 경우는 변형이 일어나지 않으며, 그 사이의 파장에 대해서는 부분적으로 변형이 일어나는데, 이때의 코히어런스가 식 $[\cos\pi(300 - \lambda)/220 - 1]/2$ 와 잘 일치한다. 이 필터를 통해 얻어진 잔여부우계이상과 잔여지각평형이상 및 광역지각평형이상을 각각 Fig. 5(A), (B)와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5의 잔여중력 이상을 지표 지질과 비교함으로써 필터설계의 타당성을 검증해 볼 수 있는데, 잔여부우계이상의 경우는 전체적으로 화강암의 분포를 잘 보여주고는 있지

만, 지형 혹은 지각뿌리의 효과가 태백산맥을 따라 많이 남아 있음이 확인된다. 반면 잔여지각평형이상은 이들의 효과가 상당히 효과적으로 제거되었을 뿐만 아니라 화강암의 분포와 상당부분 잘 일치하고 있음을 보여준다. 이는 지각평형이상을 이용하는 것이 부우계이상을 이용하는 것보다 지표지질 혹은 상부지각에 의한 중력효과를 분리하는데 더 효과적이며, 또 여기서 설계된 횡강성필터가 타당성이 있음을 보여주는 것이다.

중력의 해석에 있어서 우리가 알고 있는 지질이나 각종 지구물리적인 근거들을 가능한 많이 결합함으로써 더 나은 모델을 추구하고는 것이 바람직한데, 본 연구에서는 지각평형의 개념을 광역이상의 분리에 활용한 것이라 할 수 있고, 또 지표지질정보를 검증에 위한 비교 기준으로 활용한 것이다. 즉 단지 파장의 긴

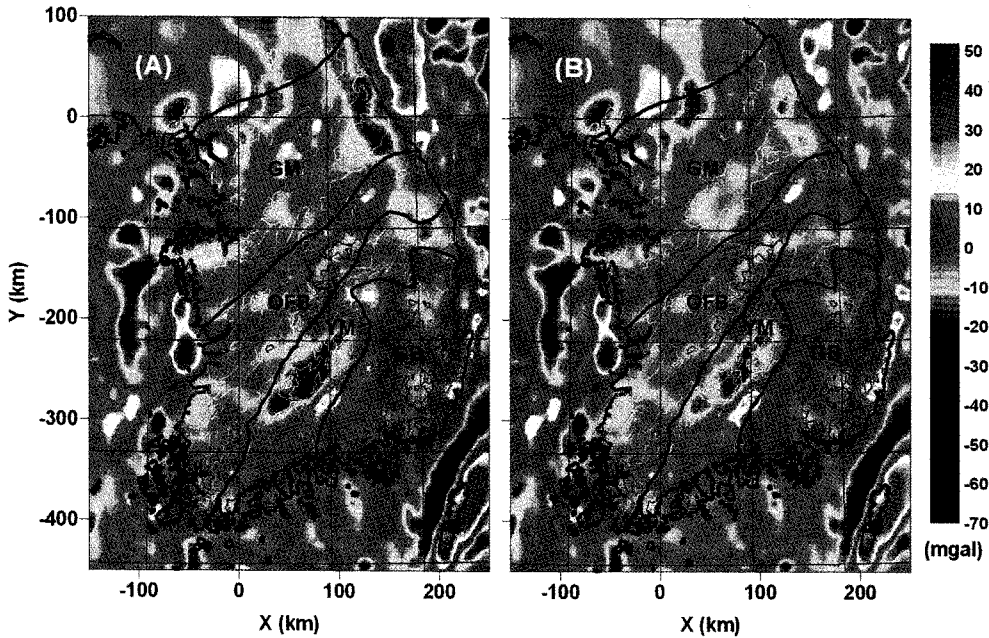


Fig. 5. Residual Bouguer anomaly and isostatic anomaly: The black and white lines represent the younger (Cretaceous to early Tertiary) and older granitoids (Permian to Jurassic), respectively.

정도로 심부지가 구조에 의한 중력이상을 분리하는 단순한 방식보다는 지각평형이라는 지구물리적 지식이 더 활용된 것으로서, 결과적으로도 지표지질과의 관계가 뚜렷이 개선되었음을 Fig. 2와 3, 그리고 Fig. 5의 (A)와 (B)의 비교를 통해 확인할 수 있다.

한편 그림들에 나타난 연구지역의 화강암은 연대에 있어서 고생대 페름기에서 신생대 3기에 분포하여 대부분 중생대에 속한다. 이들은 백악기-3기의 젊은 그룹과 페름기-쥐라기의 늙은 그룹으로 구성되고, 두 그룹 사이에는 160-100 Ma 정도의 간극이 있다(Kwon and Sagong, 1998). 한편 최근의 연구로서 Sagong and Kwon(2005)은 남한의 중생대화성활동을 트라이아스기(248-210 Ma)와 쥐라기(197-158 Ma) 및 백악기후기-고제3기(110-50 Ma)로 나누고, 쥐라기후기에서 백악기전기까지의 50 Ma의 간극이 있다고 하였다. 늙은 그룹은 경상분지를 제외한 넓은 지역에 분포하며, NE 혹은 NNE 주향의 저반으로 나타난다. 이들 중 엽리상 조직을 가지는 것들은 주로 영남육괴나 옥천습곡대의 전단대에 분포하고 있다. 젊은 그룹(Fig. 2와 3에는 표시하지 않았음)은 대부분 경상분지와 옥천습곡대의 중앙부에 나타나는데, 공통적으로 동시대의 화산암과 관련이 있다(Sagong and Kwon, 2005). 신영홍(2006b)은 표면의 지질에서 드러나지

않는 화강암의 깊이 규모를 중력이상을 통해 추정할 수 있어서 우리나라 화강암의 분포와 형성과정에 대한 연구에 중요하게 사용될 수 있다고 하였다.

모호면 구조

우리나라 육상 지역에서 10,000점 이상의 중력 자료를 확보하고 지구물리 연구에 활용한 것은 최광선 외(2002)와 Choi et al.(2003) 때부터 비로소 시작되었다. 이 자료는 한반도 남부의 내륙에 대해서 9 km² 당 1점이라는 비교적 양호한 자료이면서도 각 지체 구조구별로도 편차가 심할 뿐만 아니라 일부 특정 탐사지역에 자료가 집중되는 문제가 있기 때문에 표면의 지질이나 천부지각구조에 대한 연구를 위해서는 여러 지역에서 더 보충될 필요가 있는 자료로 판단되지만(신영홍, 2006a,b), 심부지각구조를 연구함에 있어서는 전혀 손색이 없는 훌륭한 자료이다. 본 연구에서는 이 자료를 이용하여 중력역산을 통한 모호면모델을 계산하였다.

모호면에 의한 중력 효과는 Fig. 4의 지각 평형 보정량과 Fig. 6의 광역지각평형이상으로부터 Fig. 7과 같이 구하였다. Fig. 7의 중력이상은 상부지각에 의한 중력효과인 Fig. 5(B)가 제거된 것으로 대부분 심

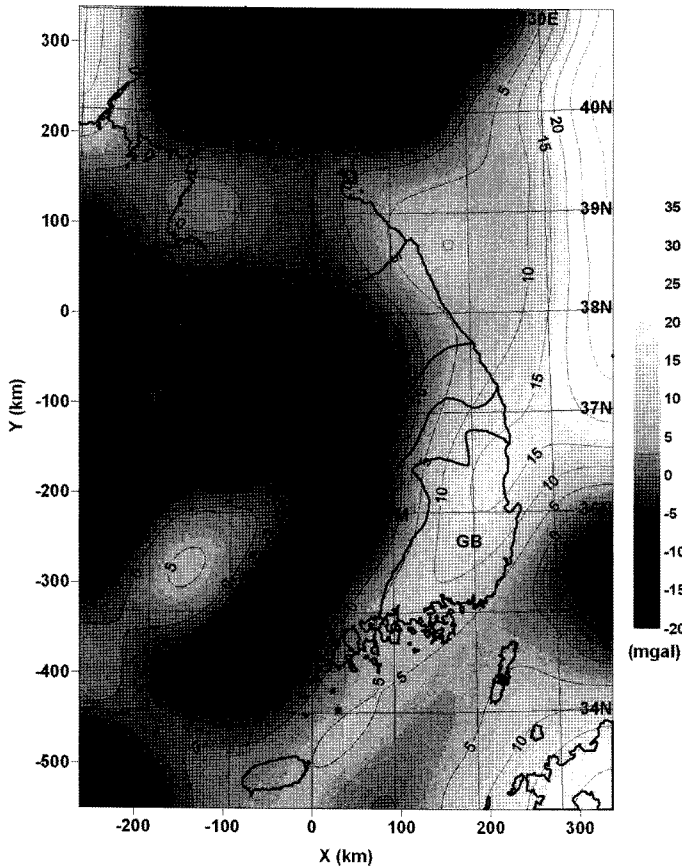


Fig. 6. Regional isostatic anomaly of the study area.

부지각에 의한 것이 되며, 이를 역산하여 Fig. 8의 모호면 구조를 계산하였다. Shin et al.(2006a)은 FFT (fast Fourier transform)를 이용한 3차원 중력 순산 및 역산 프로그램을 제시하였는데, 본 연구의 중력역산을 위해서는 이들 프로그램을 적용하였다. 다음의 두 가지 조건에 대하여 모호면구조를 계산하였다. 첫 번째는 모호면에서의 밀도차를 500 kg/m^3 로 하였고, 단파장 및 잡음의 증폭을 억제하기 위해 30 km 이하의 파장을 제거하고 30-150 km 범위의 파장을 부분적으로 제거하도록 필터를 설계하였다. 두 번째는 모호면에서의 밀도차를 350 kg/m^3 로 하였고, 단파장 및 잡음의 증폭을 억제하기 위해 80 km 이하의 파장을 제거하고 80-150 km 범위의 파장을 부분적으로 제거하도록 필터를 설계하였다. 후자의 경우가 최근의 탄성파탐사 결과(김기영 외, 2005, Cho et al., 2006)와 더 잘 맞으므로(Fig. 11(A),(B),(C)) Fig. 8 이후는 이를 택하여 표시한 것이다. 이는 지각과 맨틀의 밀도차가 비교적 크지 않음을 보여주는 것이다. Gibbs 현

상을 완화하기 위해서는 미러링(mirroring)방법을 이용하였다. 역산방법에 대해서는 Shin et al.(2006a)에 자세히 설명되어있다.

역산결과를 검증하기 위하여서 계산된 지하구조를 바탕으로 중력효과를 다시 계산하고 역산에 사용했던 Fig. 7의 중력이상과의 차이를 Fig. 9에 나타내었다. 이러한 순산과정을 위해서 Shin et al.(2006a)의 순산 프로그램을 사용하였다. Fig. 9에서 연구지역 대부분의 지역에서 오차는 $\pm 1 \text{ mgal}$ 이내의 아주 작은 값으로 나타나서 역산이 매우 성공적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다. 연구지역의 일부와 동해에서는 $\pm 1 \text{ mgal}$ 이 넘는 경우도 있는데(그림의 북동쪽 끝부분에서 최소 -5.8 mgal , 최대 $+5.0 \text{ mgal}$ 이 나타남), 이러한 지역은 공통적으로 지형과 중력이상의 단파장 기복이 크게 나타나는 곳으로서, 역산과정에서 잡음을 크게 일으키는 단파장을 억제하기 위해 저주파통과필터(lowpass filter)를 사용하기 때문이다. 따라서 실제 역산의 수렴정도를 파악하려면 저주파통과필터를 거

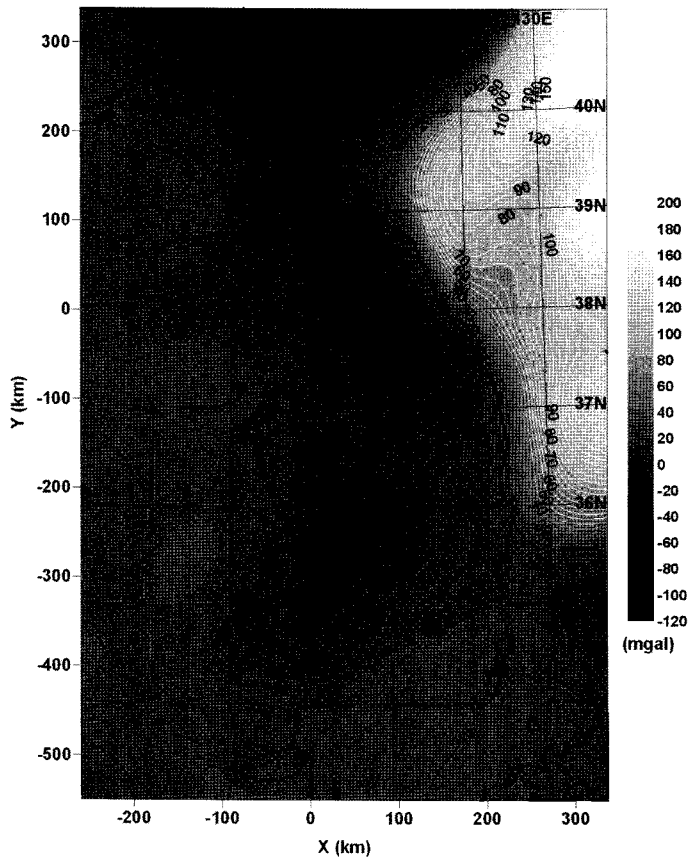


Fig. 7. Separated gravity effect for Moho estimation that is determined by eliminating the upper crustal effect (residual isostatic anomaly) from Bouguer anomaly.

쳐 단과장이 제거된 중력이상과 비교하게 되는데, 이 경우 오차가 너무 작아서 그림으로 표시하지 않았다 (강원도 일부 지역의 ± 0.8 mgal 정도를 제외하면 연구지역 대부분이 ± 0.5 mgal 이내이고, 동해에서 최소 -2.1 mgal에서 최대 $+3.1$ mgal의 범위 안에서 수렴하였다).

역산결과, 모호면의 깊이는 연구지역인 한반도 남부 내륙에 대하여 평균 31.92 km, 표준편차는 1.62 km로 나타났으며, 범위는 28.09-36.28 km이었다. 각 지체구조구별 모호면의 깊이에 대한 간단한 통계를 Table 1에 나타내었고, 지형과 모호면의 히스토그램을 Fig. 10에 나타내었다. 서론에서 언급한 것처럼 지진자료를 이용한 선행연구에서 평균적인 모호면은 대체로 29-33 km 정도로 평가되었고, 중력과 지형자료를 이용한 연구에서는 31.4-33 km 정도로 평가되었다. 한편 최근에 대규모의 탄성파탐사 연구결과로 김기영 외(2005)와 Cho et al.(2006)에 의한 것이 있는

데, 김기영 외(2005)는 이 탐사를 바탕으로 연구지역의 모호면 깊이가 30.8-36.1 km의 범위를 보인다고 하였고, Cho et al.(2006)은 지각두께가 북중국의 35-40 km에 비해 약 6-7 km 작다고 하였다. 이러한 다양한 탐사방법에 의해 수행된 연구 결과는 평균값이 약 ± 1.5 km 이내에서 본 연구의 모호면 구조와 대체로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 8에서 연구지역의 모호면 구조는 거시적인 측면에서 지형을 잘 반영하고 있음을 볼 수 있다. 태백산맥과 소백산맥을 따라서 모호면이 깊게 분포하고 있는데, 남서쪽으로 해남, 진도 쪽으로 뻗어나가고 있다. 서해안과 남해안의 서부를 따라서 모호면은 30.5-31 km 정도 깊이를 보이고, 주위의 모호면의 기복이 대체로 완만하다. 동해안을 따라서 모호면은 약 30 km 정도이고, 동해 방향으로 모호면이 급격히 높아지는데, 속초 인근에서 가장 급한 경사를 보인다. 경상분지를 둘러싼 해안을 따라서 모호면은 약 29.5-

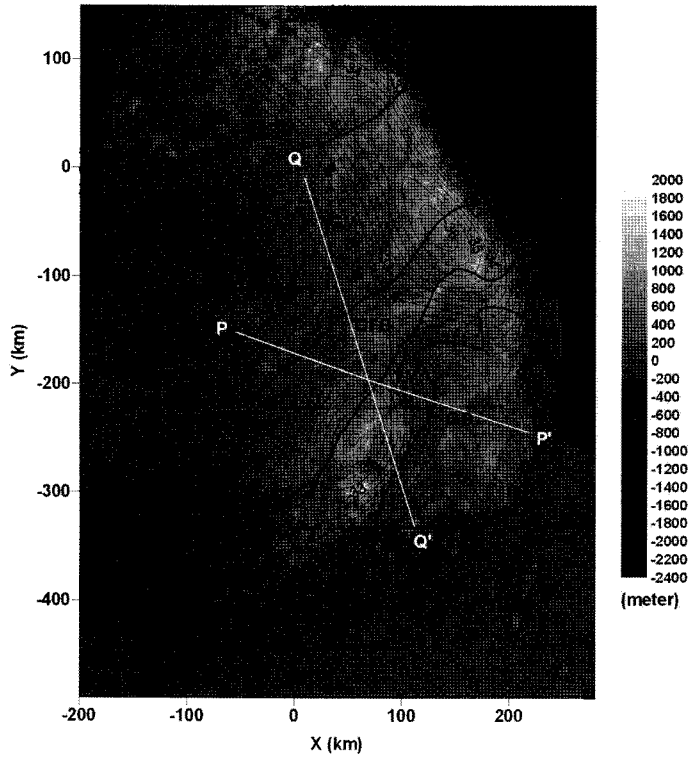


Fig. 8. Moho undulation by gravity inversion (contour lines in km unit) and topography (in gray background): PP' and QQ' represent the seismic experiments of 2002 and 2004, respectively.

30 km 정도로 가장 얇아지는데, 남해안의 부산-거제-여수 구간과 울산-포항-영덕 구간에서 모호면이 높아져 있음이 관찰된다. 이것은 경상분지 일원에서 전체적으로 모호면이 높아져 있는데, 태백산맥의 끝자락의 보현산 부근과 가지산 부근에서 지형의 영향으로 주위보다 약간 깊어진 것으로 보는 것이 좋을 것이다. Fig. 10에서도 이런 경향이 반영되고 있는데, 경상분지의 경우는 지형에 비해 모호면이 얇아졌음이 두드러지고, 옥천습곡대의 남서부와 경기 옥괴는 약간 깊어졌음을 볼 수 있다.

모호면이 전체적으로 지형의 영향을 잘 반영한다는 것은 지각평형이 잘 이루어졌음을 의미하는 것이다. 이것은 암석권의 유효탄성두께가 크지 않다는 것과도 관련이 있는데, 신영홍(1995)은 한반도 일원의 유효탄성두께가 약 16 km 정도이고, 한반도 남부에서는 10-16 km 정도로 나타난다고 하였다. 또 신영홍(2004)에 의하면, 울릉분지의 유효탄성두께는 5 km, 한반도 남부는 10 km 정도라고 하였다. 이는 연구지역인 한반도 남부에서 50 혹은 80 km 이하의 파장을 가지는 하중의 경우는 지각의 수직변형에 영향을 미칠 수

없고, 300 km 이상의 큰 하중은 지각의 수직변형으로 지각평형을 이루게 되며, 그 사이의 중간규모의 하중은 부분적으로 수직변형을 일으키게 된다는 것이다.

Fig. 11에서는 본 연구의 모호면모델을 선행연구들과 비교한 것이다. 김기영 외(2005)에 의한 2002년과 2004년에 실시된 지각속도구조 탄성파탐사 축선 2개 (Fig. 11(A)와 (B))와 Cho et al.(2006)에 의한 2002년 축선 1개(Fig. 11(C))에서의 이차원 지각구조모델 및 박종찬 외(2003)에 의한 지진의 PmP 파 주행시간을 이용한 지각두께모델(Fig. 11(D))과 비교하였다. Fig. 11(A)는 2004년의 탄성파탐사 축선을 따라 해석한 것이며, 연구지역을 북북서-남남동으로 가로지르고 있다(Fig. 8의 QQ'). 또 Fig. 11(B)와 (C)는 2002년의 탐사 축선을 보여주는데, 연구지역을 서북서-동남동으로 가로지르고 있다(Fig. 8의 PP'). 본 연구의 중력역산 결과는 그림에서 하늘색과 붉은색 실선으로 그려져 있는데, 각각 밀도차를 500 kg/m³과 350 kg/m³으로 둔 경우이다. Fig. 11(A)와 (B)에서는 전체적으로 탄성파탐사 결과가 모호면을 더 깊게 계산하고 있으며, 중력역산에서 밀도차를 작게 두었을 때 가 탄

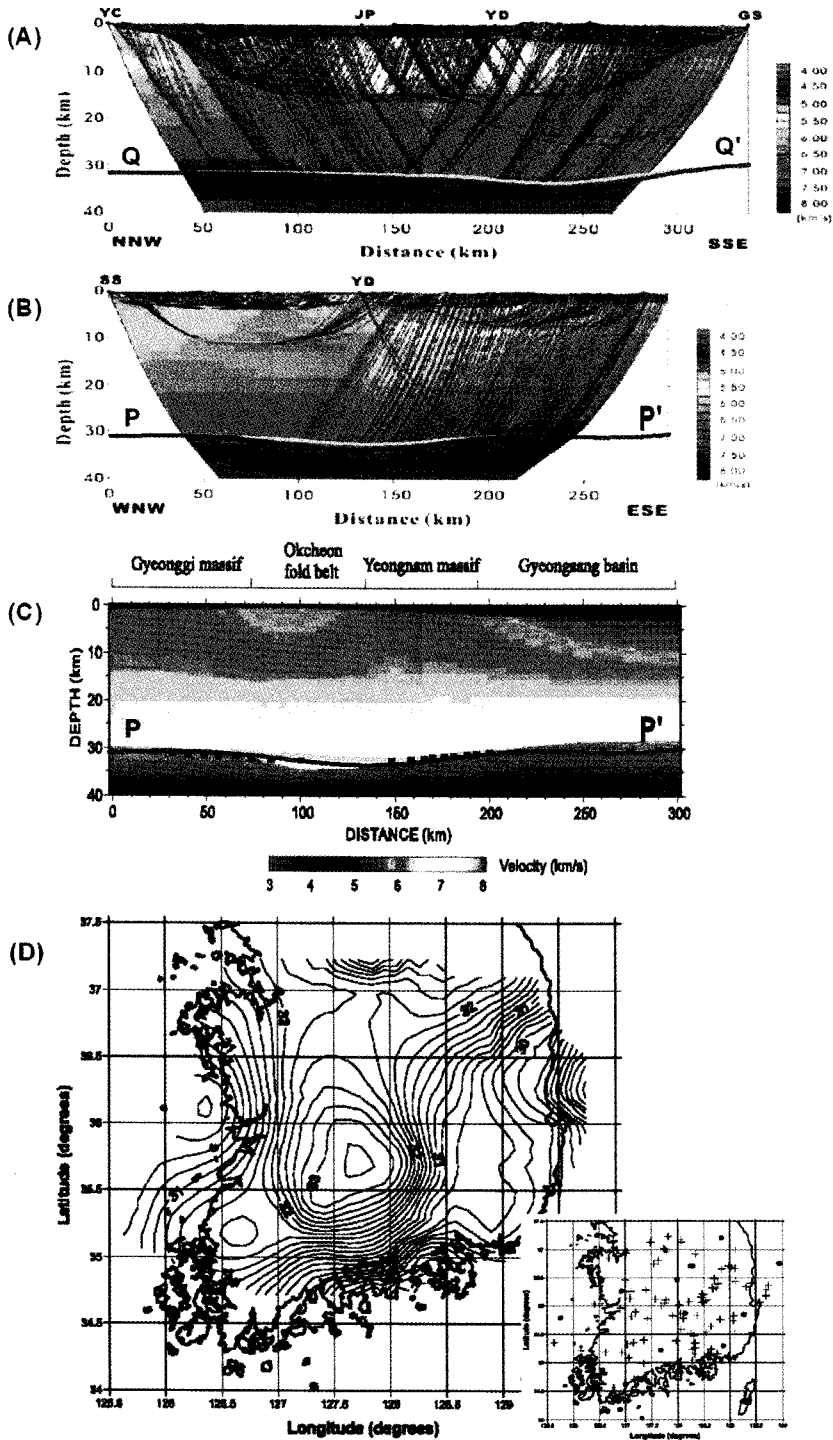


Fig. 11. Comparisons with seismic experiments and earthquake PmP analysis: (A) and (B) are the comparison with Kim et al. (2005)'s, (C) Cho et al. (2006)'s, and (D) Park et al. (2003)'s. Thick sky blue and red lines represent our Moho model with density contrast of 500 and 350 kg/m³, respectively. Black dots in (C) were digitized ones from the model (D).

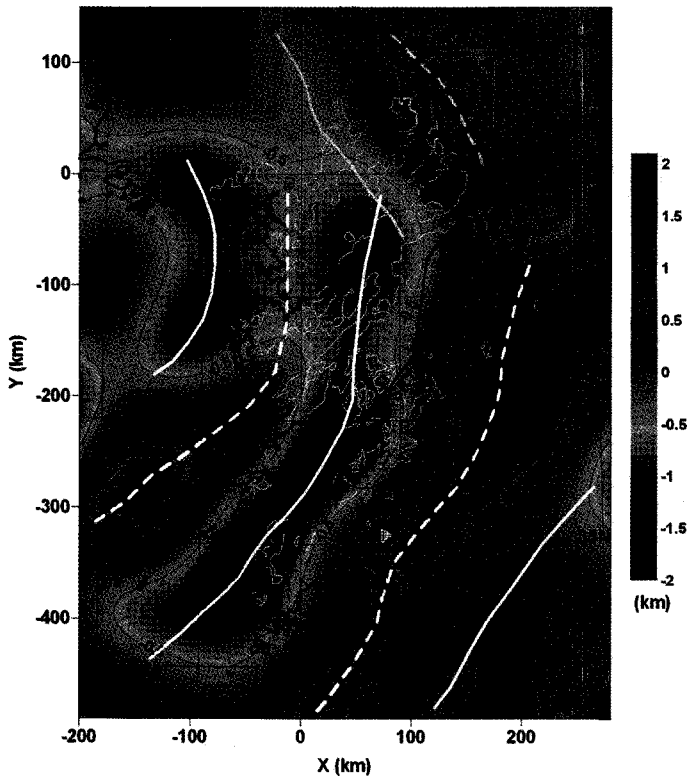


Fig. 12. Deformation of Moho with respect to isostasy: SKTL denotes South Korean Tectonic Line. Distribution of foliated granitoids is shown in red lines. White thick lines describe troughs of the deformation and white thick dashes ridges. Anomalous higher deformation is observed in the area surrounded by blue dashes.

이었으나, Shin et al.(2006c)은 구체적인 변형 구조를 계산할 수 있는 방법을 제시하고, 이를 티베트지역에서 적용하였다. 이는 탄성판 지각 평형 모델(flexural isostasy)과 중력 역산에 의한 모호면 모델에 바탕을 둔 것인데, 결과적으로 현대적인 GPS(Global Positioning System)로 측정된 지표 지각 운동과 거의 일치하는 모호면의 삼차원 변형구조를 계산할 수 있었다. 티베트지역에서 모호면 변형의 주된 파장은 선행연구들과는 달리 약 330 km 정도에서 형성되었고 진폭은 약 ± 7.5 km 정도인 것으로 평가하였다.

본 연구지역에서는 중생대에 영남 육괴와 경기 육괴사이의 호남 전단대를 지나는 SKTL(South Korean Tectonic Line)을 따라서 대륙 충돌을 경험한 것으로 알려져 있으며(Fig. 12와 Chough et al.(2000)), 이 경계와 주위에서 모호면의 변형이 발생했을 것으로 추정할 수 있다. 또 Shin et al.(2006b)에 의해 추정된 티베트지역의 유효탄성두께가 35 km 임에 비하여, 신영홍(1995)에 의해 추정된 본 연구지역의 유효탄성두

께는 이보다 훨씬 작은 10-16 km 정도이기 때문에 훨씬 작은 힘으로도 변형을 일으킬 수 있을 것이며, 변형의 주된 파장도 짧게 나타날 것이다. 본 연구에서는 Shin et al.(2006c)의 방식과 유사한 방식으로 이러한 변형구조를 파악하고자 하였다.

앞 절에서 다룬 Fig. 4의 지각평형보정은 비록 국지적인 지각평형설을 가정하고 계산한 중력이상이지만 심부의 지각뿌리의 단파장 성분에 의한 중력효과가 너무 미세하기 때문에 실제적으로는 광역적인 지각 평형 모델과 거의 같은 결과를 드러내게 된다. 따라서 이의 역산을 통해 광역적인 지각 평형을 가정할 때의 가상적인 모호면 모델을 계산할 수 있게 되는데, 국지적 지각 평형에 비해 더 실제에 가까운 모델이 된다. 또 Fig. 8은 본 연구에서 중력 역산으로 계산한 가장 실제에 가까울 것으로 추정된 모호면 모델이다. 따라서 두 모델간의 차이(Fig. 12)는 현재의 모호면이 가상적인 지각 평형 상태에 비해서 얼마나 변형되었는지를 지시해 줄 수 있게 된다.

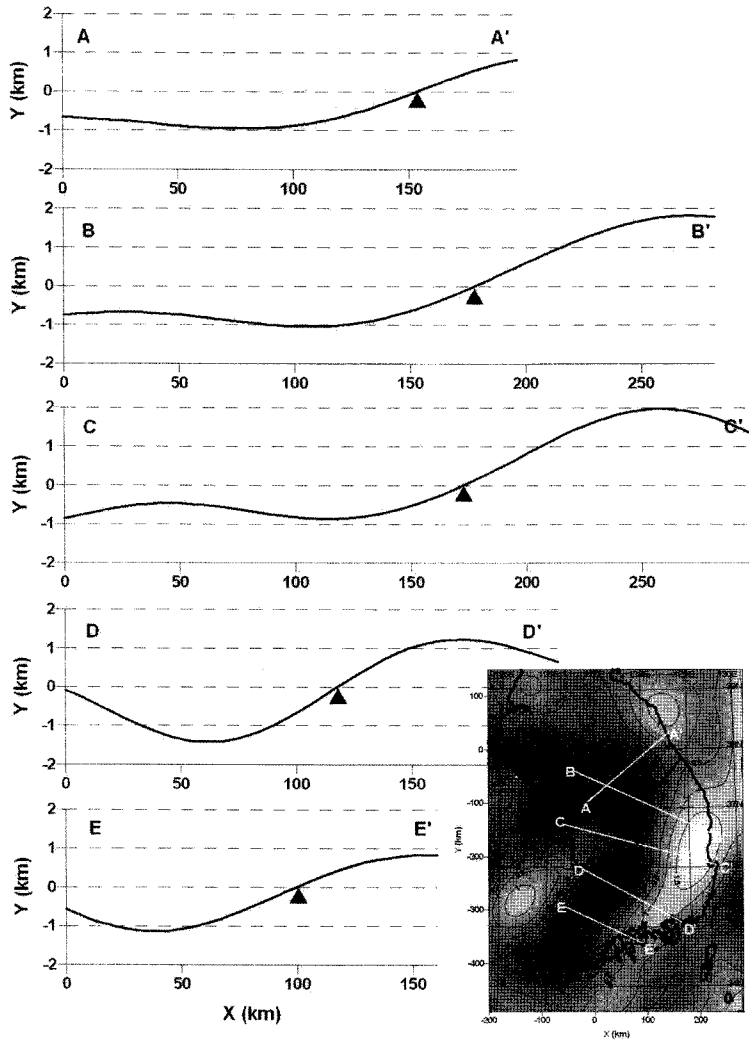


Fig. 13. Cross-sectional view of the deformation: Solid triangles denote the points where cross lines meet the zero-deformation contour.

모호면의 습곡 구조: Fig. 12에 제시된 모호면의 변형구조와 Fig. 13의 단면도로부터 과거에 연구지역에서 일어난 큰 지질학적인 사건을 3가지 정도 유추해 볼 수 있다. 가장 두드러진 것은 대륙충돌로 형성된 SKTL 과 나란하게 북동-남서 방향으로 발달하는 일련의 모호면 습곡 구조인데, Fig. 12에 흰색의 굵은 파선(Moho ridges)과 실선(Moho troughs)으로 표시되었다. 충돌 경계를 기준으로 북서쪽 지역은 아래로 휘었고 남동쪽은 위로 휘어졌음이 관찰된다. 티베트 고원의 경우는 모호면 습곡 구조의 진폭이 ± 7.5 km 정도임(Shin et al., 2006c)에 비해 본 연구지역은 ± 1.5 km에 미치지 못하는 작은 값일 것으로 평가되었다. 또 모호면 습곡의 주된 파장은 티베트 고원에

서 330 km 정도인데, 본 연구 지역은 약 150-250 km 정도인 것으로 보인다. SKTL을 경계로 북서쪽은 경기육괴와 옥천 습곡대의 남서부로 이루어진 하나의 판을 이루고, 그리고 SKTL의 남동쪽은 옥천습곡대의 북동부와 영남육괴 및 경상분지로 구성된 또 하나의 판으로 구분되어서 옥천습곡대가 두 개로 나누어지는데, Fig. 12에서 보듯이 본 연구결과에서 드러난 모호면의 변형 구조도 옥천 습곡대를 남서부와 북동부의 두 개 지역으로 나누는 SKTL과 다소 일치하는 것으로 보인다. Fig. 12에 엽리상 화강암(foliated granites)의 분포도 같이 표시하였는데, SKTL의 주변으로 분포함을 볼 수 있다. 연구지역의 대륙충돌의 증거는 최근의 지각속도 구조 연구에서도 드러나고

있는데, 김기영 외(2005)는 2004년 탄성파탐사측선에서 옥천 습곡대에서 지표부근의 고속도층 하부에 두께 8 km의 저속도층이 100 km 이상 연장되어 나타남을 발견하고, 이것을 영남 육괴와 경기 육괴의 충돌 때문에 형성된 것이라 생각하였다. 또 Cho et al.(2006)은 옥천습곡대의 남서부를 지나는 탄성파탐사 2002년 측선에서 옥천 습곡대가 판구조론적인 측면에서 영남 육괴보다는 경기 육괴에 더 가까우며, 두 개의 지판이 서로 다른 기원과 진화 과정을 거쳤을 것이라 하였다. 대륙충돌 때문에 형성된 것으로 알려진 소백산맥은 SKTL과 나란하게 놓여 있어서 그 성인이 대륙충돌과 깊이 관련되어 있음을 짐작케 한다. 그러나 소백산맥이 모호면 습곡의 저부나 정부를 따라서 놓여 있는 것은 아니어서 모호면의 습곡 구조와 직접적으로 관련되었다기보다는 천부 지각과 퇴적층의 습곡 및 지각 평형에 의한 수직 변형과 관련된 것으로 생각된다. 즉 횡압력 환경에서 질량체가 판의 충돌 경계면을 따라서 부가되어 높은 지형을 형성하고, 하부의 모호면은 지각평형을 이루기 위해 깊어지게 된 것으로 해석된다. 고생대 후기 이후로 한반도는 송림 조산운동, 대보 조산운동, 불국사 조산운동 등과 같은 주된 조산운동들이 있었는데, 연구 지역에서 발견된 모호면 습곡 구조 형성의 주된 원인은 이들 조산운동 시기에서 작용한 힘의 횡압력 성분일 것으로 보인다.

경상분지 하부의 모호면 구조: Fig. 12와 13에서 두 번째로 주목되는 특징은 경상분지에 넓게 퍼져있는 양(+)의 이상영역인데, Fig. 12에서 파란색 파선으로 둘러싸인 부분이다. 이 부분은 경상분지에 광범위하게 분포하고 있으며, 동해안의 울산-영일만-울진 사이를 포함하면서 북동쪽으로 뻗어나가서 울릉분지 북부의 수심이 깊은 곳으로 이어지고 있다. Fig. 13의 단면도 중에서 DD'와 EE'는 저부와 정부의 진폭이 크지만, BB'와 CC'는 정부의 진폭이 훨씬 크게 솟아올라 있고, 파장도 늘어난 것을 볼 수 있다. 더욱이 이곳은 엽리상 화강암과 전단대의 분포 및 GPS로 측정된 지각운동 등을 고려할 때, DD'와 EE'보다 더 작은 횡압력이 작용했을 것으로 보이기 때문에 이 부분을 설명하기 위해서는 대륙충돌 이외에 다른 어떤 원인을 더 찾아야 할 것이다.

가장 단순하게는 경상분지, 특히 북동부 지역의 암석권의 유효탄성두께가 상대적으로 훨씬 작았을 것이

라고 생각하는 것이다. 암석권의 유효탄성두께는 한반도 남부에서 10-16 km 정도이고(신영홍, 1995, 신영홍, 2004), 울릉분지에서 5 km 정도로 추정되었으며(신영홍 2004), 울릉분지의 가장자리를 따라서 8-10 km 정도로 추정된 바 있다(Lee et al, 2003). 이것은 큰 변형이 관찰된 지역에서보다는 더 동쪽에서 오히려 약한 지각을 가지고 있음을 드러내는 것이다. 또 다른 문제는 암석권이 약하면 변형된 습곡구조의 파장이 작아질 것인데, 이 지역은 오히려 더 넓게 나타났다는 점이다.

또 다른 설명으로는 대륙 충돌에 의한 습곡 외에 추가적인 모호면 상승을 일으키는 부력이 작용했을 것으로 추측해 볼 수 있다. 그림에서 파란색 파선은 남동쪽으로 더 넓게 그려져 있는데, 이는 모호면의 습곡구조 부분을 배제하면 이 영역이 남동쪽으로 좀 더 넓게 퍼져있을 것이라 추측할 수 있기 때문이다. 게다가 낮은 밀도를 가지는 동해 쪽의 퇴적층에 의한 밀도차를 보정해 준다면 높은 이상을 가지는 이 영역은 동쪽으로 더 확장되게 될 것이지만, 본 연구에서 그 영역을 예측할 수 없으므로 그림에 표시되지는 않았다. 이곳의 모호면 상승의 원인에 대해서는 최근에 제시되고 있는 마그마물질의 하부점착으로 설명될 수도 있을 것이다. 마그마물질의 하부점착은 동해의 형성 당시 한반도의 대륙주변부에서 대륙이 리프트(rift)되고 해양지각의 생성에 의해 울릉분지가 형성될 때 맨틀의 온도가 정상보다 더 뜨거웠음을 지시한다(Kim et al., 1998, 김한준, 1999). 이 때 리프트된 대륙지각의 아래에 점착된 마그마물질은 동해안과 울릉분지 사이에서 약 15 km 정도의 두께에 이르고 있다(Kim et al., 2003, Cho et al., 2004). 최근 김기영 외(2005)에 의해서는 경상분지 하부에서도 이의 존재가 추정되었는데, 이들은 지각속도구조 탐사측선 2002의 동남동 지역과 측선 2004의 남남동 지역에서는 지각과 맨틀 사이의 경계가 뚜렷한 모호불연속면보다는 점이적인 층들로 이루어져 있을 가능성을 제시하였다. 또 측선 2002의 경상분지 하부의 깊이 30.8 km와 36 km 사이에서 5 km 정도의 층을 발견하고, 이를 통해 대륙연변부의 대륙유기가 일어나는 동안에 마그마 성분이 지각하부에 녹아 붙어 형성되었을 가능성을 제기하였다.

Fig. 11(B)를 볼 때, 김기영 외(2005)에 의해 제시된 마그마물질의 하부점착 규모는 P에서 약 180 km 떨어진 경상분지가 시작되는 곳에서 동남동 방향으로

약 250 km에 이르는 분지의 중심부분까지는 규모가 커지고 있음이 관찰된다. 또 이 접이층의 위쪽 경계는 본 연구에서 추정된 모호면보다 높고, 아래쪽 경계는 더 깊으면서 비교적 평평하다. 보통의 경우 횡압력의 영향을 받지 않은 상태에서 맨틀 심부에서 올라온 마그마 물질이 지각하부에 점착되면 초기의 모호면에 비해서 아래로 볼록한 모양을 가지게 되고, 부력에 의해서 위로도 볼록하게 밀어 올리겠지만 지각의 휨강성 때문에 충분히 많이 밀어 올리지는 못한다. 이럴 경우 마그마물질의 하부점착의 결과로 지각은 두꺼워지게 되며, 중력은 작아지게 된다. 그러나 경상분지 하부에서 관찰된 형태는 아래로 볼록한 부분이 별로 나타나지 않기 때문에 이 지역이 횡압력에 의해 지각이 위로 습곡 되었고, 이 자리를 맨틀보다 밀도가 작은 마그마 물질이 채워나가면서 부력이 작용해서 더 위로 밀어 올렸을 것이다. 이는 또한 모호면의 휨이 더 쉽게 일어나도록 만들었을 것으로 추측할 수 있다. 이 경우는 빈 공간이 지각보다는 밀도가 큰 마그마물질로 채워졌기 때문에 중력이상은 크게 될 것이다. 따라서 경상분지 아래의 모호면이 주위보다 크게 휘어져 올라가고 중력이상이 높게 관찰된 것은 횡압력에 의한 습곡과 마그마 물질의 하부점착에 의한 부력의 영향이 같이 작용한 것으로 설명될 수 있을 것이다. 이는 경상분지의 융기의 원인으로 작용했을 것으로도 생각된다.

초기의 모호면의 습곡 작용 외에 마그마 물질의 하부점착의 영향으로 경상분지 모호면의 더 높은 상승은 설명 가능하지만, 이 구조가 측면으로 넓게 확장된 부분에 대한 설명으로는 미흡하다. 따라서 대륙 충돌로 인한 모호면 습곡구조의 형성 이후, 장력에 의한 수평방향의 확장(시계방향의 회전을 동반한)과 지각의 얇아짐을 경험한 것으로 설정하면 이 구조에 대한 해석이 쉬워질 것이다. 그럴 경우 마그마 하부점착의 부력에 의한 지각의 상승도 더 쉬웠을 것이라 생각된다.

Fig. 13의 BB'와 CC' 단면을 볼 때, 모호면의 습곡 변형을 제외한 마그마의 하부점착에 의한 부분은 1 km 정도로 추측해 볼 수 있는데, 이는 김기영 외(2006)에 비해 매우 작은 규모가 된다. 이는 본 연구에서 경상분지의 퇴적층의 밀도차를 보정해 주지 못하였고, 또 중력역산을 위해 사용한 밀도차를 전체 연구지역에 대하여 일정하게 적용했기 때문이다. 실제로 마그마하부점착 물질은 맨틀과 지각의 중간정도

밀도를 가지기 때문에 맨틀과의 밀도차를 보다 작게 하여 이를 추가적으로 따로 모델링 하여야 하며, 그렇게 할 경우에는 마그마하부점착의 두께는 상당히 크게 계산 될 것이다.

이 지역에서 대량의 마그마의 공급은 불국사조산운동과 이후의 동해와 울릉분지의 열림 과정과 관련된 것으로 설명하는 것이 타당한 것으로 생각된다. 이들 마그마물질의 기원은 보통 맨틀의 아주 깊은 곳에서 생성되어 부력에 의해 상승해서 점착되었을 것으로 생각되지만, 본 연구 지역에서는 판구조환경을 고려할 때에, 이보다는 다른 원인이 작용했다고 생각하는 것이 더 타당해 보인다. 대륙충돌 및 이후의 동해 열림과 관련된 횡압력이 작용하였고, 이로 인해 융기된 모호면 하부에 압력감소가 있었다는 점, 그리고 일본 열도의 남동부에서 섭입해 들어온 판의 슬랩(Slab)이 연구지역 하부로 유입되면서 일어나는 부분융융이 작용했었을 가능성을 같이 생각해 볼 필요가 있을 것이다. 한편, 울릉분지의 형성과 관련하여 대륙지각의 리프팅은 대륙사면 안쪽에서 시작되었고 대륙지각의 분리는 포항-울진 사이의 대륙사면 기저저부를 따라서 발생하였으며 이것이 해지면 확장의 중심이 되어 점차 현재 울릉분지의 중심부분으로 이동한 것으로 생각할 경우(김한준 외, 2006), Fig. 12의 모호면 변형구조에서 포항-울진 사이의 높은 변형을 보이는 것과 관련이 있어 보인다.

동해 모호면의 융기와 서해의 침강: 연구지역 모호면 변형구조의 세 번째 특징은 동해의 융기와 서해의 침강으로 인한 우리나라 지형의 동고서저형 특징과 관련된 것이다. Fig. 12와 Fig. 13의 AA' 단면도에서 태백산맥을 기준으로 동쪽으로는 융기(회색의 파선), 서쪽으로는 침강(회색의 실선과 서해안의 광범위한 침강)이 관찰된다. 이것은 습곡의 파형과는 달리 오른쪽이 들려올라간 것으로 나타난다. 태백산맥 동쪽의 융기는 금강산을 중심으로 크게 나타나고 아래쪽으로 뺀 맥은 SKTL에 의해 강릉부근에서 단절되는데, SKTL의 동해 방향으로 연장된 지형의 선구조를 Fig. 1에서도 발견할 수 있다.

이 부분의 융기는 동해와 울릉분지의 열림과 관련이 있을 것으로 생각된다. 동해 열림 과정의 초기에 발생한 대륙지각내 인장력에 의한 리프팅과 관련된 맨틀의 상승 혹은 그리고 이 때 형성된 마그마 물질의 하부점착에 의한 부력이 작용하였을 것이고, 이후 리프팅의 중심이 이동하면서 동해가 열리는 동안 대

륙연안을 따라 작용한 내륙쪽에서의 횡압력과 지각하부로의 지속적인 마그마의 공급이 이런 구조를 만들었을 것이라 해석할 수 있을 것이다. 이 지역은 대륙 충돌과 같은 큰 규모의 횡압력에 의한 변형보다는 리프팅 이면에서의 보다 부드러운 횡압력과 함께 부력을 받아서 천천히 융기한 것으로 생각되며, 이 같은 부드러운 융기는 소백산맥과는 달리 태백산맥을 따라서 지질구조의 단절이 발견되지 않는 점도 잘 설명할 수 있을 것으로 생각된다.

결론 및 토의

중력과 지형 자료를 바탕으로 한반도 남부의 모호면구조를 계산하고 중력, 지진, 탄성과 탐사 등을 이용한 선행 연구들과 비교하였다. 또 모호면의 변형구조를 추정하고, 변형의 원인을 대륙 충돌과 마그마 물질의 하부점착, 및 동해와 울릉분지의 열림과 관련하여 해석하였다.

중력 역산에서 가장 어려운 점은 관측 중력에는 여러 가지 질량 이상체의 중력 영향이 합쳐져 있기 때문에, 목적인 깊이의 질량이상체에 의한 중력 이상을 분리해 낼 필터를 어떻게 설계하는가에 대한 문제이다. 본 연구에서는 지각 평형의 개념을 필터의 설계에 활용하였다. 결과적으로 계산된 지각 평형 이상과 잔여 지각 평형 이상은 표면지질분포와 잘 일치함으로써 천부지각의 밀도 불연속면의 영향을 비교적 잘 분리해 낼 수 있음을 확인 했다. 본 연구는 광역적인 심부 지각 구조에 대한 연구로서 천부 지각의 영향을 지역별로 일일이 다르게 설계하여 적용하기는 매우 어렵기 때문에 전체 연구 지역에 대해 단일 필터를 적용하였다. 그러나 지역적인 천부 지각에 초점을 맞춘 연구에서는 지각 평형 보정으로 심부의 지각뿌리효과를 제거한 후에, 그 연구 지역의 지질과 지형에 맞는 파장 분석이 추가로 행해지는 것이 바람직할 것이다. 향후 지역별로 이러한 연구를 더 진행한 후에, 광역적인 심부지각의 중력 효과를 재평가 한다면, 미세하나마 본 연구보다 좀 더 향상된 구조를 계산할 수 있을 것이다. 또 현재 연구지역 지각의 밀도 분포에 대한 정보가 거의 없는 상태이기 때문에, 본 연구에서는 균질한 단일층을 가진 평균적인 지각 구조를 가정하여 역산을 실시하였는데, 모호면에서 밀도차의 측면변화가 별로 크지 않기 때문에 실제로는 이러한 평균적인 지각 모델을 설정하더라도

아주 좋은 결과를 얻고 있다. 연구지역 주변의 중력 자료 중에서 고도계위성의 자료가 사용된 서해지역, 특히 해안선에 가까운 지역은 자료의 신뢰도가 떨어지며, 연구지역 주변 해양의 퇴적층의 두께나 밀도에 대한 정보가 없어서 보정하지 못했다는 한계를 가지고 있다.

박종찬 외(2003)에 의한 지각 두께 연구는 한반도에 대한 지각 속도구조 규명을 위한 대규모 탄성과 실험이 진행되기 이전의 연구이며, 지각 속도의 지역별 분포를 따로 설정하지 못하고 평균적인 수직 지각 모델만으로 지각두께를 계산한 것으로, 본 연구결과와 아주 유사한 결과를 보인다. 최근의 지각 속도구조 연구(김기영 외, 2005, Cho et al., 2006)는 지역별로 다르게 나타나는 탄성과의 속도를 고려할 수 있고, 균일하지 않은 지각의 수직 구조에 대해서도 계산할 수 있지만, 현재까지 단지 2개의 탐사 측선에 대해서 행해진 것이기 때문에 삼차원 지각 구조 모델을 제시하지는 못하고 있다. 본 연구 결과를 이들의 모호면 모델과 비교할 때, 지각-맨틀의 밀도차 크지 않을 것으로 추정된다. 또 모호면 기복이 전체적으로 서로 잘 일치하면서도 옥천습곡대의 모호면의 깊이는 탄성과 탐사결과가 좀 더 깊게 계산되고 경상 분지지역에서는 더 높게 솟은 것으로 평가되었다. 이 차이는 본 연구가 지역적인 밀도 변화를 고려하지 못하는 한계를 가지고 있기 때문인 것으로 생각된다. 향후 지역별 중력 연구나 기타의 지구물리 연구를 통해 천부 지각 구조에 대한 데이터베이스가 축적되면서 이러한 문제가 개선될 것이며, 특히 경상 분지에 대한 모델이 중요할 것으로 생각된다. 최근의 지각 속도 구조가 이 문제를 향상시킬 수 있는 여지를 제공하기는 하지만, 현재로서는 측선 간격이 너무 크다는 문제가 있다.

지각 평형 이상에서 장파장은 모호면의 신호로 파악하고, 단파장은 천부지각구조의 신호로 파악하였는데, 이는 세 가지 측면에서 정당화 될 수 있다. 첫째는 잔여 지각 평형 이상이 표면지질과 잘 일치한다는 점이고, 둘째는 연구 지역 암석권의 유효 탄성 두께를 고려하여 필터가 설계되었는데, 이때에 해당 파장대의 중력 이상을 일으키는 장파장의 질량체는 지각의 수직적 변형으로 평형을 이루는 것으로 평가되기 때문이다. 또 결과적으로도 중력 역산으로 계산한 모호면 구조가 다른 지구물리탐사 결과에 비교적 잘 부합된다는 점을 들 수 있다. 지진의 PmP파를 이용

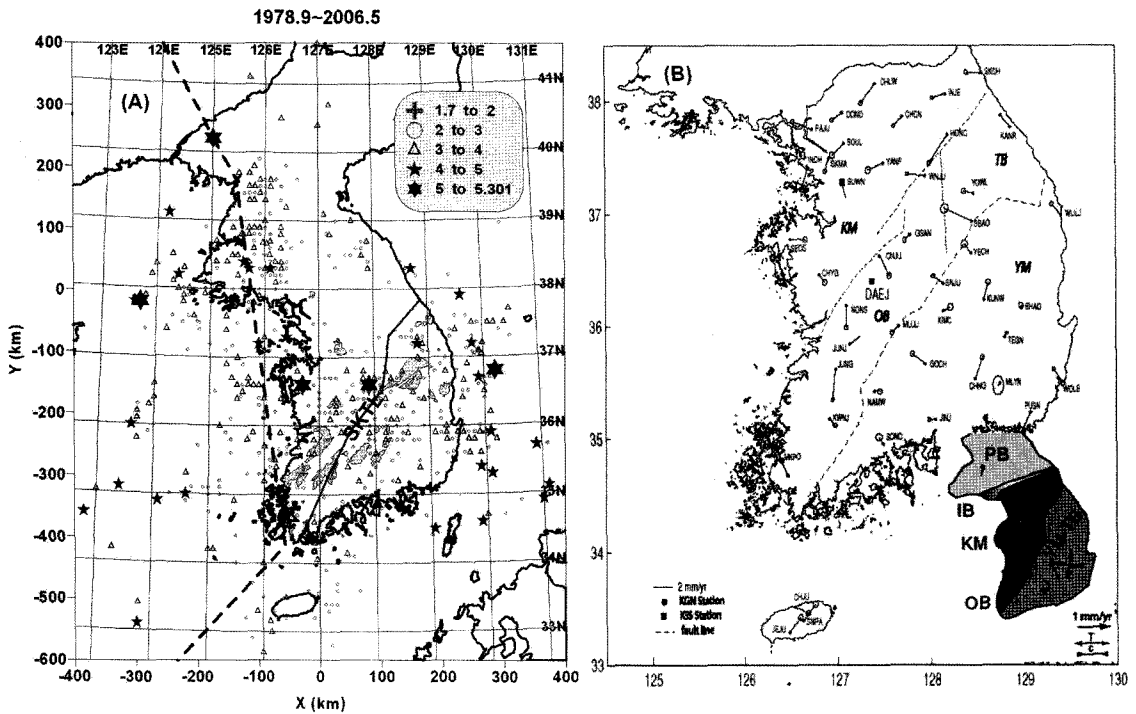


Fig. 14. (A) Earthquake events and (B) crustal movements from GPS observations: Earthquakes data for (A) is from Korea Meteorological Administration. Thick dash line in (A) denotes the boundary of Amur Plate by Bird (2003). Crustal movement estimation (B) is from Hamdy et al. (2005).

한 연구와 지각 속도 구조 연구를 위한 탄성과 실험 결과는 서해보다 동해쪽으로 모호면이 상승해 있고, 특히 경상분지 쪽으로 상승이 많이 되었음을 보여주고 있는데, 이는 본 연구결과와 일치하는 부분이다.

지각 평형 이상의 광역 성분으로부터 현재의 모호면이 지각평형에 비하여 얼마나 변형되었는지를 계산하였다. 연구 결과 SKTL과 나란한 모호면 습곡구조가 발견되었고, 태백산맥의 동쪽으로 모호면이 상승되고 서쪽으로는 침강된 것으로 보이는 구조, 그리고 경상분지 모호면이 많이 상승되어 있는 것이 발견되었다. 전자의 습곡 구조는 영남육괴와 경기육괴의 충돌로 인한 횡압력 때문에 형성된 것으로 설명할 수 있으며, 후자의 동해안을 따른 융기와 경상분지의 융기는 횡압력에 의한 모호면의 변형과 함께 마그마물질의 하부점착에 의한 부력이 같이 작용한 것 설명할 수 있을 것이다. 이 연구결과는 SKTL을 경계로 하는 대륙 충돌과 경상분지 하부에서 울릉분지로 연결되는 지역에서의 마그마물질의 하부점착에 대한 중력학적 근거를 처음으로 제시한다는 의미를 가지는 것이고, 또 연구지역의 동고서저형 지형과 산맥들의

생성과도 연관되어 해석되어질 수 있는 것들이다.

마그마물질의 하부점착의 경우는 규모면에서는 탄성과 탐사 결과와 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 마그마물질의 하부점착 물질은 지각과 맨틀의 중간 정도의 밀도를 가지고 있어서 본 연구에서 가정한 단일지각구조와 다르기 때문이다. 따라서 마그마 하부점착의 규모에 대해서 더 정확한 계산을 위해서는 추가적인 모델링 작업이 필요하며, 경상분지의 경우는 분지의 퇴적규모와 밀도에 대한 모델링도 함께 필요할 것이다. 그러나 현재의 연구결과 만으로도 동해와 울릉분지의 열림 과정 속에서 마그마 물질의 하부점착이 일어났을 것이라는 최근의 연구들을 지지할 수 있는 중력학적 근거가 제공된다는 의의를 가질 것이다.

현재에도 SKTL을 따라서 횡압력이 작용하거나 모호면의 습곡 구조가 커지고 있을까? 또 현재에도 경상분지 하부에 점착된 마그마 물질의 부력에 의한 융기가 진행되고 있을까? 한반도에서 대표적인 대륙 충돌 경계의 하나로 알려진 임진강대를 따라서는 지진활동이 별로 감지되지 않는데 비해서 옥천습곡대를

따라서는 비록 규모는 작지만 현재에도 비교적 많은 지진이 감지되고 있다(Fig. 14(A)). 또 Fig. 12의 모호면 변형 구조에서도 임진강대를 따라서는 변형이 별로 없는 것으로 나타났다. 최근의 GPS 측량의 성과(Hamdy et al., 2005)는 비록 매우 느린 속도이긴 하지만 경기육괴와 영남육괴가 현재에도 좌수향 주향이동성분과 함께 서로 가까워지고 있는 것으로 평가되어서 횡압력과 습곡 작용에 의한 변형도 계속되는 것으로 생각 된다. 또 경기육괴의 반시계방향 회전과 영남육괴의 시계방향 회전에 SKTL의 남서쪽에 더 큰 횡압력이 작용할 것으로 보인다(Fig. 14(B)). 경상 분지 하부의 마그마 물질의 유입이 계속되는지는 알 수 없으나, 비록 이것이 중단 되었다고 하더라도 과거에 점착되었던 물질에 의한 부력이 동시에 소멸되는 것이 아니라 암석권의 휨강성에 의해 지지되고 있는 것이다. 따라서 지각평형에 도달하지 않은 부력에 의한 변형이 좀 더 진행되고 있을 것이지만 시간이 지남에 따라서 그 힘은 훨씬 더 작아졌을 것이다. 이러한 변형들은 매우 느린 속도로 일어나고 있기 때문에 한반도가 지각 변동에 대해 상대적으로 안정된 것으로 평가되는 것이며, 지진이나 화산 활동이 활발할 것으로 여기는 판의 경계와는 직접적으로 연관 지어 해석하는 일이 드문 이유일 것이다. 그러나 최근 Bird (2003)는 아무르판(Amur Plate)의 경계가 한반도의 서해안을 따라 지나는 것으로 설정하고 있는데(Fig. 14(A)), 남해 쪽으로의 경계선은 별다른 근거를 찾지 못하고 단순히 선을 잇기 위한 것으로 보인다. 아무르판이 과연 한반도의 서해안을 지난다고 하면, 남해 쪽을 지나는 경계선보다는 뚜렷한 지각변동의 흔적을 담고 있는 SKTL과 대한해협을 지나 울릉분지의 서쪽경계를 지나는 단층대 및 동해의 북동쪽의 일본분지를 지나는 지진활동과 연관 지어 연구할 필요가 있을 것이다. 현재 지각의 상대적 운동이 매우 작기는 하지만, 과연 한반도에 판의 경계가 지나는지 아니면 판의 경계로 분리되기 이전의 단계인지, 또 존재한다면 그 위치는 어디고 어느 정도의 활동을 하는지에 대한 연구는 더 진행되어야 할 과제일 것으로 생각된다.

사 사

본 논문을 검토해 주시고 다듬어주신 한국해양연구원 김한준 박사님, 김성렬 박사님, 그리고 지질자원

연구원의 박영수 박사님께 깊이 감사드리며, 박사후 연수를 지원해 주신 한국천문연구원에 감사드립니다.

참고문헌

- 권병두, 정중대, 1985, 중력탐사에 의한 경상충군내 왜관-포항간의 지하구조 연구. 광산지질, 18(4), 321-329.
- 권혁재, 2000, 한국의 산맥. 대한지리학회지, 35(3), 389-400.
- 김기영, 홍명호, 이정모, 문우일, 박창업, 정희욱, 2005, 대규모 발파자료 초동주시 역산을 통한 한반도 지각 속도 구조 연구. 지구물리, 8(1), 45-48.
- 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 광산지질, 16(1), 51-61.
- 김성균, 1995, 한반도의 지각구조에 관한 연구. 지질학회지, 31(4), 393-403.
- 김성균, 정부흥, 1985, 한국 남부지역의 지각구조. 광산지질, 18(2), 151-157.
- 김정우, 조진동, 김원균, 민경덕, 황재하, 이윤수, 박찬홍, 권재현, 황중선, 2003, 중력이상을 이용한 한반도 모호면 추출에 관한 연구. 자원환경지질, 36(3), 213-223.
- 김한준, 1999, 탄성과 탐사를 통해 본 울릉분지의 지각특성과 동해형성에 있어서의 의미. 지구물리, 2(1), 9-26.
- 김한준, 주형태, 이광훈, 유해수, 박건태, 2006, 한국 동쪽 대륙주변부의 구조적 진화와 동해의 형성. 자원환경지질, 39(3), 235-253.
- 민경덕, 이영재, 2000, 중력탐사에 의한 포항~공주~만리포간의 지각구조 연구. 자원환경지질, 33(2), 101-109.
- 박수진, 손일, 2005, 한국산맥론(1): DEM을 이용한 산맥의 확인과 현행 산맥도의 문제점 및 대안모색. 대한지리학회지, 40(1), 126-152.
- 박종찬, 함인경, 김우한, 최광선, 2003, PmP파의 주행시간을 이용한 한반도 남부지역의 지각두께 연구. 지질학회지, 39(2), 225-234.
- 신영홍, 1995, 중력자료와 지형자료의 해석에 의한 한반도 일원의 지각구형. 부산대학교 이학석사 학위 논문, 40 p.
- 신영홍, 2004, 동해 울릉분지의 중력이상과 지각구조, 지각평형 및 유효탄성두께에 대한 종합 분석. 부산대학교 이학박사 학위 논문, 179 p.
- 신영홍, 2006a, 한반도 남부의 지체구조구별 중력특성 연구. 지질학회지, 42(3), 397-412.
- 신영홍, 2006b, 한반도 남부의 중력이상과 화강암의 분포. 지질학회지, 42(3), 383-396.
- 신회순, 권광수, 1988, 국내 화강암의 역학적 성질간의 상관성. 광산지질, 21(4), 359-365.
- 심운택, 1971, 중력이상에 의한 한국의 지각구조. 성균관대학교논문집, 16, 21-40.
- 유상훈, 민경덕, 박찬홍, 원중선, 2002, 중력자료를 이용한 한반도 중부 대륙-해양 지역의 지각구조 연구. 자원환경지질, 35(5), 455-463.
- 이동영, 1999, 한국의 지형. 대한지질학회편, 한국의 지질. 시그마프레스, 서울, 14-31.

- 최광선, 1986, 한반도 남부의 중력에 대한 연구. 서울대학교 대학원 이학박사 학위논문, 110 p.
- 최광선, 공영세, 이화경, 1993, 중력자료해석에 의한 한반도 일원의 지각구조. 한국지구과학회지, 14(2), 225-230.
- 최광선, 김정희, 신영홍, 2002, 한반도 남부 지각평형과 압석권의 유효탄성두께. 지구물리, 5(4), 293-303.
- 최광선, 박필호, 신영홍, 1998, GPS를 이용한 중력측정. 한국지구과학회지, 19(2), 120-126.
- 최광선, 이준동, 김광호, 허남철, 1987, 중력에 의한 경상분지 남부의 지각구조에 대한 연구. 한국지구과학회지, 8(2), 87-98.
- 瀬谷清, 1959a, 重力探査における新解析法(移動平均法) 第1報. 物理探査, 12, 65-73.
- 瀬谷清, 1959b, 重力探査における新解析法(移動平均法) 第2報. 物理探査, 12, 116-177.
- Agocs, W.B., 1951, Least squares residual anomaly determination. Geophysics, 16, 686-696.
- Bird, P., 2003, An updated digital model of plate boundaries. Geochemistry Geophysics Geosystems, 4 (3), 1027.
- Blakely, R.J., 1995, Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, 441 p.
- Caporali, A., 2000, Buckling of the lithosphere in western Himalaya: Constraints from gravity and topography data. Journal of Geophysical Research, 105, 3103-3113.
- Chang, S.-J. and Baag, C.-E., 2005, Crustal Structure in Southern Korea from Joint Analysis of Teleseismic Receiver Functions and Surface-Wave Dispersion. Bulletin of the Seismological Society of America, 95 (4), 1516-1534.
- Cho, H.M., Baag, C.E., Lee, J.M., Moon, W.M, Jung, H., Kim, K.Y., and Asudeh, I., 2006, Crustal velocity structure across the southern Korean Peninsula from seismic refraction survey. Geophysical Research Letter, 33, L06307.
- Cho, H.M., Kim, H.J., Jou, H.T., Hong, J.K. and Baag, C.E., 2004, Transition from rifted continental to oceanic crust at the southeastern Korean margin in the East Sea (Japan Sea). Geophysical Research Letter, 31, L07606.
- 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. Journal of the Korean Earth Science Society, 24 (3), 205-215.
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H., and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula. Earth-Science Reviews, 52, 175-235.
- Chung, T.W., 1995, A Quantitative study on the crustal structure of the Korean Peninsula based on the Earthquakes from 1991 to 1994. Journal of the Korean Earth Science Society, 16 (2), 152-157.
- Geological Survey of Japan (ed.), 2000, Gravity CD-ROM of Japan, Digital Geoscience Map P-2, Geological Survey of Japan.
- Hamdy, A., Park, P.H., and Lim, H.C., 2005, Horizontal deformation in South Korea from permanent GPS network data, 2000-2003. Earth Planets Space, 57, 77-82.
- Heiskanen, W.A. and Vening Meinesz, F.A., 1958, The earth and its gravity field. McGraw-Hill Book Co., Inc., 470 p.
- Jacobson, B.H., 1987, A case for upward continuation as a standard filter for potential maps. Geophysics, 52, 1138-1148.
- Jin, Y., McNutt, M.K., and Zhu, Y.-S., 1994, Evidence from gravity and topography data for folding of Tibet. Science, 371, 669-674.
- Kane, M.F. and Godson, R.H., 1985, Features of a pair of long-wavelength (>250 km) and short-wavelength (<250 km) Bouguer gravity maps of the United States, In Hinze, W.J., (ed.), The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps: Society of Exploration Geophysicists, 46-61.
- Kim, H.J., Han, S.J., Lee, G.H., and Huh, S., 1998, Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea (Japan Sea). Marine Geophysical Researches, 20, 219-237.
- Kim, H.J., Jou, H.T., Cho, H.M, Bijwaard, H., Sato, T., Hong, J.K., Yoo, H.S., and Baag, C.E., 2003, Crustal structure of the continental margin of Korea in the East Sea (Japan Sea) from deep seismic sounding data: evidence for rifting affected by the hotter than normal mantle. Tectonophysics, 364, 25-42.
- Kim, S.K., 1979, Geodetic and geophysical analyses of gravity data in Korea. Journal of Korean Institute of Mining and Geology, 12, 17-28.
- Kim, S.K. and Li, Q., 1998, 3-D Crustal velocity tomography in the southern part of the Korean Peninsula. Economy Environment Geology, 31 (2), 127-139.
- Kwon, B.D. and Yang, S.Y., 1985, A Study on the crustal structure of the southern Korean peninsula through gravity analysis. Journal of Korean Institute of Mining and Geology, 18 (4), 309-320.
- Kwon, S.T. and Sagong, H., 1998, Geochemical and Sr-Nd isotopic study of Phanerozoic granites in South Korea: Temporal and spatial differences. paper presented at SRG/SEG Joint Symposium on Granite Types and Mineralization, Society of Resource Geology, Tokyo.
- Lee, K., 1979, On crustal structure of the Korean Peninsula. Journal of Geological Society of Korea, 15 (4), 253-258.
- Lee, S.M., Kim, J.W., Baag, C.E., 2003, 2-D flexural analysis of the Ulleung back-arc basin, East Sea (Japan Sea). Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 14 (4), 1-14.
- Nagy, D., 1966, The gravitational attraction of a right rectangular prism. Geophysics, 31 (2), 362-371.

- Paek, R., Kang H., and Jon, G., 1996, Geology of Korea. the Foreign Language Books Publishing House, 631 p.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., and Flannery, B.P., 1986, Numerical recipes (2nd ed.). Cambridge University Press. 702 p.
- Sagong, H. and Kwon, S.T., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics* 24, TC5002, doi:10.1029/2004TC001720.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F., 1997, Marine gravity anomaly from Geosat and ERS-1 satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 102, 10039-10054.
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F., 2005, Retracking ERS-1 altimeter waveforms for optimal gravity field recovery. *Geophysical Journal International*, 163, 79-89.
- Shin, Y.H., Choi, K.S., and Xu, H., 2006a, Three-dimensional forward and inverse models for gravity fields based on the Fast Fourier Transform. *Computers and Geosciences*, 32, 727-738
- Shin, Y.H., Xu, H., Braitenberg, C., Fang, J., and Wang, Y., 2006b, Moho undulations beneath Tibet from GRACE-integrated gravity signal. *Geophysical Journal International*, in revision
- Shin, Y.H., Xu, H., Park, P.H., and Park, J.U., 2006c, Folding of Moho and GPS survey in Tibet. *Proceedings of 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering & 12th FIG Symposium on Deformation Measurement*, Baden, Austria. 7 p.
- Song, S. and Lee, K., 2001, Crustal Structure of the Korean Peninsula by Travel time inversion of local Earthquakes. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 4 (1), 21-33.
- Tamura, Y., 1982, A computer program for calculating the tide generating force. *The publications of the international latitude observatory of Mizusawa*, 16, 1-19.
- Yoo, H. and K. Lee, 2001, Crustal Structure under the Taejon (TJN) station by receiver function methods. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 4 (1), 35-46.
- Zurflueh, E.G., 1967, Applications of two dimensional linear wavelength filtering. *Geophysics*, 32 (6), 1015-1035.

2006년 8월 10일 접수
2006년 10월 16일 수정원고 접수
2006년 10월 23일 채택