중력 및 자력자료를 이용한 황해 남서부해역의 지구물리학적 특성 및 광역 지구조 연구

김창환^{1,*} · 박찬홍²

¹한국해양연구원 동해연구소 독도전문연구센터, 767-813, 경상북도 울진군 죽변면 후정리 695-1

²한국해양연구원 동해연구소, 767-813, 경상북도 울진군 죽변면 후정리 695-1

A Study on Geophysical Characteristics and Regional Geological Structures of the Southwestern Yellow Sea of Korea using Gravity and Magnetic Data

Chang Hwan Kim^{1,*} and Chan Hong Park²

¹Dakdo Research Center, East Sea Research Institute, Korea Ocean Research and
Development Institute, Gyeongbuk 767-813, Korea

²East Sea Research Institute, Korea Ocean Research and Development Institute,
Gyeongbuk 767-813, Korea

Abstract: Gravity and Magnetic survey data were analyzed to investigate the geophysical characteristics and regional geological structures of the southwestern Yellow Sea. The set of data about the southwestern part of the Yellow Sea in Korea was one collected by the Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI) in 2003, 2004, and 2005. The Yellow Sea has a few basins and the study area also includes parts of the Heuksan Basin and the East China Sea Basin. The bathymetry of the study area ranges from about -40 m southwestward near China to about 150 m northeastward near Korea. The bathymetry has the gentle rise and fall and the smooth slope. The gravity anomalies, from sea surface gravity and satellite gravity data, reflect the basement rocks rather than the smooth bathymetry. The gravity anomalies are higher on Northeastern part of the study area and lower over the South of the Heuksan Basin. The analytic signal from the Bouguer anomaly shows higher anomalous zones near the boundaries of the basins. The magnetic anomalies and the analytic signal, from the magnetic data, suggest that the complex anomalies on the Northern part are attributed to the volcanic intrusions and that the smooth patterns in the Southern part are based on the lack of the intrusions. The power spectrum analysis of the Bouguer anomalies and the magnetic anomalies indicate that the depth to the Moho discontinuity varies from about 30.2 to 28.3 km and that the depths of the basement rocks and the Eocene discontinuity range from about 8.4 to 8 km and from about 1.5 to 1.7 km, respectively. The inversion of the Bouguer anomaly shows that the Moho depth to the Western part of the study area near China is slightly deeper than the Eastern part near Korea. The result of 2-D gravity modeling has a good coherence with the results of the analytic signal, the power spectrum analysis, and the inversion

Keywords: gravity, magnetic, analytic signal, power spectrum, inversion

요약: 황해 서남부 지역의 지구물리학적 특성을 연구하고 지구조를 분석하기 위하여 한국해양연구원에서는 2003, 2004과 2005년에 이 해역에 대하여 중력 및 자력탐사를 수행하였다. 황해는 몇 개의 분지를 가지고 있으며 연구지역 또한 흑산분지와 동중국해분지 일부분을 포함하고 있다. 연구지역의 해저지형은 남서쪽 중국쪽으로부터 북동쪽 한국쪽으로 가면서 깊어지며 약 -40 m에서 약 -150 m까지의 수심 범위를 나타내고 전반적으로 완만한 기복과 경사를 보인다. 중력이상은 완만한 해저지형의 변화보다는 기반암의 영향을 받는 것으로 판단된다. 해상중력자료 및 인공위성 중력자료를 함께 사용한 중력이상은 연구지역의 북동쪽으로 높은 값을 보이며 흑산분지 남쪽으로 원형의 낮은 이상대가 나타난

*Corresponding author: kimch@kordi.re.kr

Tel: 82-54-780-5340

Fax: 82-54-780-5349

다. 부계이상의 아날니틱신호는 분지경계면 부근에서 고이상대들이 나타난다. 자기이상과 자기이상의 아날니틱신호에서는 화성암체 관입에 기인한 복잡한 이상들이 북쪽에 분포하고 남쪽은 완만한 변화를 보이는 것으로 보아 화성암체 관입이 연구지역 북쪽에 비해 많이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 연구지역의 부계중력이상과 자기이상의 파워스펙트럼 분석은 모호면의 깊이를 약 30.2-28.3 km로 보여주며, 기반암은 약 8.4-8 km이며, 제 3기 에오세의 부정합면은 약 1.5-1.7 km 정도 인 것으로 나타난다. 부계중력이상의 역산에 의한 모호면의 깊이는 연구지역의 서쪽인 중국쪽이 동쪽인 한국쪽에 비해 약간 깊게 나타난다. 2차원 중력모델링에서 지각구조들의 깊이 및 화성암 관입체의 위치 등 결과가 아날니틱신호 분석, 파워스펙트럼 분석 및 역산의 결과와 잘 부합된다.

주요어: 중력, 자력, 아날니틱신호, 파워스펙트럼 분석, 역산

서 론

해상에서의 중력 및 자력탐사는 해수 아래에 있는 지각의 각종 암석 또는 광물의 분포, 지질구조에 따른 밀도차 및 자성차에 의해 나타나는 중력차 및 자력차를 통해 이상치를 측정하고 해석하는 탐사방법이다. 해수나 퇴적층과 같이 자성이 거의 없는 매질은 중력효과에는 영향을 주지만 자기적인 효과가 전혀 없기 때문에 지자기이상에는 영향을 주지 않는다. 이와 같이 해상자력탐사에서 획득된 지자기 이상은 해저 매질의 자성 변화와 관계있기 때문에 중력 이상과 근본적으로 다른 특성을 나타내며 매우 복잡한 형태를 갖는다. 따라서 지자기이상은 중력이상과 함께 해저 매질의 특성을 상호 보완적으로 해석할 수 있는 자료로서 활용될 때 더욱 효과적이며 신뢰도가 높아질 수 있다.

본 연구의 연구지역은 제주도 남쪽의 동중국해 북동해역에서부터 제주도 서부 및 황해 일부분까지 걸쳐 있다(Fig. 1). 위경도로는 위도 약 30°30'에서부터 약 34°30'까지와 경도 약 123°00'에서부터 약 127°00'까지의 구역이며 한국해양연구원에서 제작한 이어도 과학기지가 설치된 이어도 암초지역을 포함한다. 이 구역에 대하여 2003년부터 2005년까지 한국해양연구원에서는 중력, 자력탐사를 포함한 종합적인 지구물리조사를 수행하였다. 이 연구지역의 수심은 약 -40 m에서 약 -150 m까지로 비교적 완만한 경사를 가지며 전반적으로 제주도 부근이 깊고 중국쪽으로 가면 서 얕아진다(Fig. 1).

본 연구의 목적은 남해 제주도 남쪽에서부터 제주도 서부를 거쳐 황해 남부까지 이르는 배타적 경제수역내의 중력 및 자력자료 등의 지구물리 자료를 종합 분석하여 해저자원개발에 기반이 되는 연구지역의 지구조 특성을 연구하는 것이다.

Fig. 1. Bathymetry map of the study area. The black solid lines are survey tracks.

광역지질 및 지구조

황해는 중국대륙의 양자강과 제주도를 연결하는 선상의 북측지역으로 평균 수심이 약 -44 m인 천해의 대륙붕이며, 동중국해는 중국의 양자강-제주도-일본 구주 및 류큐 열도-대만을 연결하는 선 안쪽의 광범위한 해역으로 대륙붕, 오키나와 트러프(Okinawa Trough), 대륙사면, 류큐 해구(Ryukyu Uplift) 등 독특한 해저지형을 이루고 있다. 이와 같이 구분되는 황해 및 동중국해는 중국대륙의 황하강과 양자강, 그리고 한반도 서남해안의 강들을 통해 막대한 양의 육상기원 퇴적물이 유입되어 집적되고 있다(Milliman and Meade, 1983; Schubel and Carter, 1984).

Fig. 2. Structural elements in the East China Sea (Modified after Zhou et al., 1989). A: Hupijiao Rise, B: Changjiang Depression (Socotra Basin), C: Haijiao Rise, D: Quintang Depression, E: Yushan Rise.

동중국해분지(East China Sea Basin)는 몇 개의 고 구조 융기대들로 구분된 소분지들로 구성되어 있으며, 특히 우리나라 남해 지역의 제주도 남쪽지역에 발달한 신생대 대륙붕 주변분지(marginal-continental shelf basin)들은 타이완-신지 융기대(Taiwan-Sinzi Rise) 및 오키나와 트러플을 따라서 주로 북동-남서 방향으로 분포하고 있다(권영인 외, 1995). 제주분지(Jeju Basin) 및 소코트라분지(Socotra Basin)는 타이완분지(Taiwan Basin) 및 후쿠에분지(Hukue Basin) 등과 함께 동중국해분지에 속하며 북서방향의 한국대지와 남서방향의 타이완-신지 융기대에 의해 경계지워진다(Fig. 2). 체민 융기대(Zhemín Uplift) 및 동중국해분지의 기반암은 황해 남부 융기대를 경계로 한 준탁상지(Sub-

table land) 기반암(한중-양자준탁상지)과는 구분되며 원생대의 변성암류에서 백악기의 화성암류로 구성된 것으로 알려졌다(공영세 외, 1989; Zhou et al., 1989).

한국측 동중국해 대륙붕 분지들은 초기 마이오세에 들어서면서 침강단계에 접어들었다. 이 결과 분지 전 지역에 퇴적물이 쌓이기 시작하였으며, 퇴적중심은 동쪽으로 이동되었다. 초기 마이오세 말 형성된 부정합면은 후피지아오 융기대(Hupijiao Rise) 동쪽의 경우 침식의 증거가 광범위하게 나타나지 않는 것으로 보아 구조운동의 영향보다는 퇴적작용의 일시 중단에 의한 것으로 판단된다. 중기 마이오세 기간에는 뚜렷한 구조운동이 없었으며, 분지의 침강에 따른 퇴적작용만이 이루어졌다. 이러한 침강과 퇴적작용은 후기 마이오세

까지 지속되었다(윤혜수 외, 1999; 정태진 외, 2001). 후기 마이오세 말 구조 역전이 일어나, 기존의 확장성 정단층이 역단층으로 활성화되었다. 이로 인해 단층의 상반(upthrown side)은 융기되었으며, 단층의 이동거리(offset)가 증가되었다. 또한 이 구조 역전에 의해 융기된 지역에서는 침식이 일어나 분지의 동부 대부분 지역에는 부정합면이 형성되었다. 분지의 서쪽에 위치한 후피지아오 융기대에는 구조 운동이 진행되지 않은 것으로 판단된다. 이 시기부터 후열도 분지(back-arc basin)인 오키나와 트러프가 형성되기 시작하였으며, 후기 마이오세 최상부에는 해성의 영향을 받은 퇴적층이 발달되었다(윤혜수 외, 1999; 정태진 외, 2001).

동중국해분지 중심부에 가까운 지역에서는 초기 마이오세 상부 부정합면까지도 절단하는 점으로 미루어 동중국해분지 중앙부에는 작은 규모이지만 초기 마이오세까지도 확장운동이 계속된 것을 알 수 있다. 후기 마이오세에 동쪽에서 transpression에 따른 압축운동이 일어나면서 확장운동이 끝나고 플라이오세에 이르러 침강작용이 가장 우세한 구조운동이 되면서 해침이 일어나고 현재와 같은 대륙붕 환경이 되면서 결과적으로 천해 해양 환경 하에서 퇴적층을 형성하게 되었다(정태진 외, 2001; 허식 외, 2004).

자료획득 및 자료처리

자료획득

본 연구에서는 한국해양연구원 종합 해양 연구선인 온누리호를 이용하여 2003년, 2004년 및 2005년에 걸쳐 남해 제주도 남쪽에서부터 제주도 서부를 거쳐 서해 남부까지 이르는 배타적 경제수역내에서 획득한 해상지자기자료 및 해상중력자료를 사용하였다. 또한 선상중력자료가 부족한 부분에 대해서는 인공위성 중력자료도 함께 사용하였다. 온누리호에 탑재되어 있는 해상자력계인 SeaSPY는 오버하우저형의 총성분 측정 자력계로써 이를 이용하여 해상지자기를 측정하였으며, 지자기 자료의 측정위치는 DGPS(Differential GPS)에서 획득하였다. 또한 위치에 따른 지질 및 지구조하여 20지자기변화가 아닌 지구 외부적인 요소하여 20시간적 변화를 관측하기 위하여 온누리호 선상 조사에 동안 거제도 장목의 한국해양연구원 남해분소하여지자기고정관측소를 설치하고 지자기 일변화를 연속 관측하였다. 또한 위치에 따른 지질 및 지구조에 의한 지자기변화가 아닌 지구 외부적인 요소에

의한 시간적 변화를 관측하기 위하여 온누리호 선상 조사기간 동안 거제도 장목의 한국해양연구원 남해분소에 지자기고정관측소를 설치하고 지자기 일변화를 연속 관측하였다.

온누리호에 설치된 중력계는 LaCoste and Romberg사의 선상중력계(모델 S-111)로써 이를 이용하여 선상중력을 획득하였다. 선상중력자료와 함께 사용한 인공위성 중력자료는 Smith and Sandwell(1995)에 의해서 공개된 것을 사용하였는데, 이것은 ERS-1, Geosat ERM과 Geosat-GM 인공위성고도자료부터 환산된 자료이다. 연구지역의 해저지형은 온누리호에 부착되어있는 정밀 수심측량기에서 획득된 자료와 해수면고도로부터 산출된 중력자료를 이용하여 변환한 해저지형 자료를 함께 이용하였다.

자료처리

중력자료 처리: 중력탐사의 목적은 탐사대상체와 주변암과의 밀도차에 의한 중력변화량을 구하고, 이로부터 지하 밀도 분포를 해석하는데 있다.

해상에서 중력을 측정할 때 영향을 주는 요소와 그 크기는 매우 다양하게 나타난다. 특히 육상에서의 중력측정과는 달리 선상중력 측정은 해상상태에 따라 흔들리면서 이동하는 선박 내에 고정된 중력계를 이용하여 측정하기 때문에 중력가속도의 변화가 크다. 이것은 회전하는 지구상에서 선박이 이동함에 따라 상대적인 중력가속도가 더해지거나 감해지는데 가장 큰 원인이 있다. 그 외의 요소들은 상대적으로 작은 영향을 미친다. 지각내 암석의 밀도변화나 지질구조 및 해저지형 변화 등에 기인하는 중력치를 관측치로부터 분리하기 위해서는 이러한 외적인 요인에 의한 중력변화를 되도록 정확히 산출하여 소거하는 것이 필요하다. 이러한 과정을 중력보정이라하며 중력보정에는 계기보정, 조석보정, 에트비스보정, 후리에어보정 및 부계보정 등의 처리과정을 거친다.

일반적으로 후리에어보정을 할 때는 측정점과 해수 기준면과의 사이에 물질이 없는 것으로 생각하고 보정을 한다. 그러나 실제로는 물질(퇴적층, 암석 등)이 있기 때문에 그것에 의한 인력이 측정치에는 포함되어 있다. 측정점의 고도를 경계로 위쪽의 물질은 측정점에 대해서 위 방향의 인력을 미치고 있고 아래쪽 물질은 아래 방향의 인력이 미치고 있다. 따라서 측정점에 미치는 주위 물질의 인력은 지형에 관계하고 있는 것이 된다. 측정치를 수준면의 값에 보정할

때는, 측정치로부터 측정점보다 밑에 있는 물질에 의한 인력을 빼고, 위쪽의 물질에 의한 인력을 더해 줄 필요가 있다. 이 보정을 부계보정이라고 한다. 일반적으로 부계보정시 치환되는 밀도는 지각의 암석 평균 밀도인 2.67 g/cm^3 , 해수의 밀도는 1.03 g/cm^3 이지만 밀도가 낮은 해저 퇴적층이 두껍게 쌓여 있을 경우에는 보정을 위하여 보다 낮은 밀도를 적용하기도 한다. 본 연구에서는 일반적인 지각 암석 밀도인 2.67 g/cm^3 를 적용하였으며, 그 결과는 부계중력이상도로 나타내었다.

지자기자료 처리: 지자기조사는 연구지역에서 선상 중력 탐사와 동시에 같은 측선상에서 실시되었다. 이와 같이 서로 다른 물성을 이용하는 지구물리탐사가 동시에 이루어짐으로써 해저구조 해석시 상호 보완적인 해석이 가능해지며 보다 많은 정보를 얻을 수 있다. 이 관측자료치에는 해저지질구조와 관계있는 자기장의 시간적 변화량이 포함되어 있으므로 이를 측정치에서 소거해야 한다. 이를 위해서 육상고정관측점에서 측정한 지자기자료에서 시간적 변화량을 산출하여 보정하였다. 이와 같이 지자기 일변화를 보정한 후에 전자력분포도를 산출하였다. 측정위치와 지자기 일변화가 보정된 지자기자료로부터 지구의 지지장을 표현하는 국제표준지자장(IGRF: International Geomagnetic Reference Field)을 이용하여 자기이상을 산출하였다.

자력탐사는 분지 연구에 유용하게 사용되는 방법으로, 특히 다른 지구물리 탐사보다 분지의 구조적 특성, 천부에 존재하는 화산암이나 기반암에 관한 정보를 제공한다. 그러나 자력탐사 자료는 자성암체의 대자율의 횡적인 변화가 심하고, 잔류자기의 크기나 자화방향에 따라 강도의 변화가 심하여 자료 해석시 세심한 주의를 요한다. 1970년대 이후 자력이상의 수평/수직 미분에 근거한 암체의 경계 및 심도를 효과적으로 결정하기 위한 여러 기법들이 개발되면서 이러한 해석상의 제약들이 많이 해소되었다(Nabighian, 1972, 1974; Roest et al., 1992; Hsu et al., 1996).

Nabighian(1972, 1974)은 아날니틱 신호를 이용한 자력이상의 해석 기법을 제안하였다. 이 기법의 가장 큰 장점은 잔류자기의 크기, 자화방향 또는 지자기장 요소에 대한 어떠한 가정없이 자성암체의 경계 및 심도를 구할 수 있다는 점이다(Thurston and Brown, 1994; Hsu et al., 1996).

스펙트럼 분석, 중력역산 및 2-D 중력 모델링: 파워스펙트럼분석은 모든 주파수에서 일정한 파워를 갖는 백색광의 스펙트럼원리를 이용하여 자료의 일부 혹은 전체를 푸리에 급수로 전개하여 파워스펙트럼을 구한 후, 자료의 주파수 특성을 분석하여 지하 물성변화가 존재하는 경계면의 평균심도를 구하는 방법이다. 이 방법은 지하를 구성하는 매질의 밀도 및 대자율 값을 가정하지 않고도 심도 계산을 할 수 있다. 지하에 존재하는 경계면이 하나인 이상적인 경우에는 하나의 직선 형태로 나타나나, 실제 경우 스펙트럼에는 심도가 다른 경계면의 영향으로 주파수에 대한 파워의 변화율이 상이한 부분을 관찰 할 수 있다.

중력역산은 지표에서 측정된 탐사자료로부터 지하를 구성하는 매질의 물성분포를 구하는데 있다. 일반적인 역산과정은 지하구조를 최대한 반영하는 초기모델을 설정하고 이 모델로부터 계산된 계산치와 측정치간의 차이가 최소가 되도록 개선된 모델을 통계적으로 만족할 때까지 반복 계산하여 지하구조를 밝히는데 있다(전정수, 1995). 여기서는 부계중력이상자료를 이용하여 모호면의 심도에 대한 역산을 실시하였다. 본 역산에서는 모호면의 심도를 구하기 위하여 부계중력이상의 파워스펙트럼 분석을 이용하여 맨틀 하부에 의한 중력이상값을 분리하고 역산 초기에 주어지는 지하구조모형을 밀도가 다른 두 개층(맨틀, 지각)으로 가정하였다(전정수, 1995). 또한 맨틀과 지각의 밀도값을 각각 3.3 g/cm^3 과 2.67 g/cm^3 로 가정하여 맨틀과 지각의 경계면인 모호면의 심도를 역산하였다.

또한, 후리에어중력이상, 해저지형자료, 멀티채널 탄성과 해석자료(유해수 외, 2008), 모호면 역산 심도 및 Crust 2.0(Bassin et al., 2000)의 자료를 이용하여 중력이상단면에 대한 2-D 순차 모델링을 실시하여 연구지역의 지구조 단면 및 화성관입체의 존재 가능성 유무를 비교분석하였다.

결과 및 토의

연구지역의 중력 및 자력 특성

황해와 동중국해는 몇 개의 퇴적분지(North Yellow Sea Basin, South Yellow Sea Basin and East China Sea Basin)를 포함한다. 본 연구지역은 남서황해 해역으로써 대규모 퇴적분지들의 소규모 분류인 흑산분지(Heuksan Basin)와 제주분지를 포함한다. 본 연구

Fig. 3. Free-air gravity anomaly map (a) and Bouguer gravity anomaly map (b) of the study area.

지역의 해저지형은 수심 변화는 크지 않으며 완만한 기복을 이루고 있으며, 제주도에서 멀어지며 중국쪽으로 갈수록 얕은 수심을 보이며 제주도에 가까워지면서 깊은 수심을 나타낸다. 수심은 약 -40 m에서 약 -150 m의 변화를 나타내며 전반적으로 연구지역의 서쪽이 수심이 얕고 동쪽의 수심이 깊은 모습을 보인다(Fig. 1).

연구지역의 중력연구를 위하여 선상중력자료와 인공위성중력자료를 함께 사용하여 후리에어중력이상을 산출하였고, 그 중력이상은 전반적으로 -10 mGal에서 40 mGal 정도의 범위를 갖으며 변화의 폭이 크지 않은 편이다(Fig. 3). 후리에어중력이상은 일반적으로 해저지형의 변화를 잘 반영하지만 본 연구지역에서는 해저지형 변화와의 상관성이 비교적 적게 나타나고 있다. 이는 해저지형 변화에 비해서 중력이상 변화의 기복이 복잡하고 서로에 대한 연관성은 많지 않음을 의미한다. 연구지역은 흑산분지 동부와 제주분지 북부를 포함하는데 이 두 지역을 중심으로 주변보다 고이상대들이 분포한다. 또한 제주도 서북쪽의 흑산분지 경계쪽에도 고이상대들이 분포하고 있다. 이같은 고이상대들은 본 연구지역의 퇴적층으로 피복되어 있는 하부 기반암 구조변화나 곳곳에 분출 혹은 관입되어 있는 화성암의 존재와도 관련이 있는 것으로 생각된

다. 제주도 북서쪽 지역은 제주도를 중심으로 연장되는 밀도가 높은 화성기반암이 얹혀 위치하고 있기 때문에 후리에어중력이상이 높게 분포하는 것으로 판단된다. 반면, 제주분지 경계 북쪽과 흑산분지 경계 남쪽에는 저중력이상대들이 분포하고 있다. 연구지역에서 발달하고 있는 저중력이상대들은 대부분 상대적으로 깊은 퇴적기반암구조 지역과 관련이 있는 것으로 해석된다. 특히 흑산분지 경계 남쪽 지역의 큰 규모의 저중력이상대는 탄성과 탐사에서 단층의 연장선이 존재하는 것으로 해석되고 있으며 이 저중력이상대를 보이는 기반암 분지형태는 단층의 영향으로 기반암이 다른 지역에 비해 침강한 것으로 판단된다(유해수 외, 2008). 이와 같은 중력이상의 변화는 후리에어이상분포와 부계이상분포 모두에서 유사하게 나타나는데(Fig. 3), 이는 연구지역의 수심이 비교적 얕고 완만하여 해수층의 영향을 제외한 성분인 부계이상분포가 후리에어이상 분포와 크게 다르지 않은 경향성을 보이기 때문이다.

연구지역의 자기이상은 약 -300 nT에서 약 600 nT의 범위를 나타내고 광역적인 저이상대 내에 소규모의 쌍극자 자기이상대들이 산발적으로 분포하고 있는 양상이다(Fig. 4). 이와 같은 자기이상분포는 해저지형 분포나 중력이상 분포와는 그 특징을 달리한다.

Fig. 4. Magnetic anomaly map of the study area.

자기이상의 분포 경향은 흑산분지 및 제주도 서부의 대규모 쌍극자 자기이상대, 제주분지 남쪽 일부에 치우쳐 발달하고 있는 소규모 쌍극자 자기이상대와 연구지역 중남부의 완만한 변화를 보이는 저자기이상대

로 크게 구분할 수 있다. 자기이상분포는 퇴적분지 존재보다는 기반암 용기나 화성암 관입 등 지역적인 구조변화나 자성이 상대적으로 높은 화성암의 존재와 관련있는 것으로 해석된다. 기반암의 존재와 관계없이 전반적으로 연구지역 중남부의 자기이상치가 낮은 것은 두꺼운 퇴적층 및 그 기반암들이 대부분 자성이 약한 고기 변성암으로 이루어져 있는 것과 관련 있다. 대부분의 산발적인 고자기이상대들은 저자기이상대와 쌍을 이루어 나타나고 있는 쌍극자 자기이상의 특징을 보이고 있는데, 이것은 퇴적분지내 혹은 기반암내 분출 혹은 관입된 화성암에 의한 것으로 판단된다.

중력자료 및 자력자료를 이용한 지하 지질 및 지질구조 분석을 위하여 아날네틱신호 분석법을 이용하였다(Nabighian, 1972, 1974, 1984). 아날네틱 신호의 절대값은 Energy envelope이라고도 불리며, 하나의 수직 미분과 두 개의 수평 미분값을 각각 제공시킨 후 더한 값의 제곱근으로 정의된다. 아날네틱 신호법은 중력 및 자력이상의 수평 및 수직 미분치를 이용한 분석방법으로 암체나 구조의 경계에서 아날네틱 신호의 절대값이 최대값을 보인다. 이 분석방법을 이용하면 효과적으로 이상체의 경계를 구할 수 있다. Fig. 5는 부계중력이상과 자기이상의 아날네틱신호

Fig. 5. (a) Analytic signals from Bouguer anomaly and (b) analytic signals from magnetic anomaly.

Fig. 6. (a) Power spectrum from Bouguer anomaly and (b) power spectrum from magnetic anomaly.

분포를 보여준다. 중력이상의 아날니틱신호는 밀도 또는 지구구조의 경계면에서 이상치 변화에 의하여 고이상대가 나타나고 자기이상에 의한 아날니틱신호는 지역적으로 나타나는 화성체 관입 등 자성체 존재에 따른 이상치의 변화에 의한 고이상대를 보여준다. 부계이상의 아날니틱신호는 분지경계면 부근에서 고이상들이 분지경계선과 비슷하게 분포하는 것으로 미루어 볼 때 기반암과 퇴적층 사이의 밀도 경계면을 보여주는 것으로 생각된다. 자기이상의 아날니틱신호 분포에서는 고이상대들이 대부분 화성암관입체나 고자기성 기반암 용기부 등 해저 자성체의 위치에서 나타나는 것으로 판단되며, 자기이상에서보다 아날니틱신호에서 그 분포를 보다 뚜렷이 보여준다. 제주도 서쪽의 아날니틱신호의 고이상들은 제주도로부터 연장된 화성암기원의 기반암에 의한 영향이 클 것으로 판단되며, 흑산분지와 제주분지내의 고이상들은 기반암의 영향뿐만 아니라 분지내 퇴적층에 관입된 화성암에 의해 나타나는 것으로 생각된다. 이 결과를 보면 화성암 관입체들이 제주분지 보다는 북서쪽의 흑산분지에 많이 분포하는 것으로 판단된다.

파워스펙트럼, 중력역산 및 2-D 중력모델링 분석

연구지역의 퇴적층, 기반암 및 모호면의 심도를 구하기 위하여 부계중력이상과 자기이상을 이용하여 파워스펙트럼 분석을 실시하였다(Fig. 6). 연구지역의 부계중력이상과 자기이상의 파워스펙트럼 분석에서

Fig. 7. Moho depth inversion of Bouguer anomaly.

모호면의 깊이는 약 30.2-28.3 km로, 지각은 약 8.4-8 km이며, 제 3기 에오세의 부정합면은 약 1.5-1.7 km 정도로 나타났다. Bassin et al.(2000)의 Crust 2.0 모델과 최승찬(2005)은 황해에서 음향기반암의 깊이를 약 4 km 이하라고 주장하였다. 파워스펙트럼 분석을 4단계로 나누어 보면 음향기반암 즉 분지의 기반암의 깊이는 약 5.3-4.5 km로 생각되는데, 이는 앞서 주장

Fig. 8. 2-D gravity modeling. D is density (g/cm^3). The location of profile is shown in the upper left figure (free-air anomaly).

한 음향기반암의 깊이와 유사한 결과로 판단된다. 이 분지기반암을 지각과 같이 판단해야 하는 것인지 아니면 분지기반암과 지각의 밀도차이가 존재하여 본 연구의 파워스펙트럼과 같이 4단계로 구분해야 하는 지에 대하여 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이 파워스펙트럼 분석에서 부계중력이상에 저주파 필터를 적용하여 맨틀하부에 의한 부계중력값을 구하였다. 이를 이용하여 맨틀과 지각의 경계면인 모호면의 심도를 역산한 결과 연구지역의 모호면 깊이는 약 31-29 km 정도의 심도를 보인다(Fig. 7). 이 결과

는 파워스펙트럼 분석과 유사한 모호면의 심도를 보이며, 이 모호면의 깊이는 연구지역의 서쪽인 중국쪽으로 가면서 동쪽인 한국쪽에 비해 점점 깊어진다. 이 역산에 의해 얻어진 결과는 Bassin et al.(2000)의 Crust 2.0의 결과와 같이 중국쪽으로 가면서 모호면의 심도가 깊어지는 광역적인 결과와 일치하는 경향을 보인다. 추후 황해 북쪽지역의 자료와 함께 통합하여 처리하면 황해에 대한 광역적인 구조가 더 잘 규명될 것으로 판단된다.

후리에어중력이상을 이용하여 2차원 모델링을 실

시하였는데 해저지형자료, 멀티채널 탄성과 해석자료(유해수 외, 2008), 파워스펙트럼 분석, 모호면 역산 심도 및 Crust 2.0(Bassin et al., 2000)의 자료를 기반으로 해수층(1.03 g/cm^3), 연약퇴적층(2.1 g/cm^3), 고화퇴적층(2.4 g/cm^3), 기반암(2.67 g/cm^3) 및 맨틀(3.3 g/cm^3)로 각 층의 밀도 및 두께를 가정하여 지각구조의 심도 및 변화를 계산하였다(Fig. 8). 2-D 모델링 측선은 흑산분지 일부와 그 남쪽 경계면을 지나는 측선으로 설정하였다. 이 중력 모델링 측선은 자기이상에 의한 아날니틱신호에서 고이상들이 많이 분포하고 중력이상의 아날니틱신호에서는 분지 경계부에서 나타나는 고이상대를 지나간다(Fig. 5). 분지경계면, 저중력 이상대 및 탄성과결과를 고려하여 모델링을 실시하였으며, 또한 중력의 고이상과 자기이상에 의한 아날니틱신호의 고이상대가 만나는 지역은 화성암 관입체가 존재한다고 가정하고 이를 고려하여 모델링을 실시하였다. 그 모델결과는 아날니틱신호에서 나타난 관입체의 위치, 파워스펙트럼 분석 및 역산의 경계면 결과 등과 잘 부합되며 단층 연장선(유해수 외, 2008)의 영향으로 나타나는 저중력이상대의 위치도 잘 일치하는 것으로 판단된다. 향후 이 지역에 대한 탄성과 층구분 결과 분석 및 층별 역산이 효율적으로 실시할 수 있는 역산법을 이용하여 각 지각층별 3차원 역산을 실시한다면 본 2차원 중력 모델링 결과와 좋은 비교를 이룰 수 있을 것으로 생각되며 이 황해 연구지역의 지각구조에 대한 더 좋은 정보를 제공할수 있으리라 판단된다.

결 론

연구지역인 황해 서남부 지역은 흑산분지와 동중국해분지 일부분을 포함하고 있으며 이 지역에 대한 중력 및 자력 특성을 분석하였다. 연구지역의 해저지형은 남서쪽 중국쪽으로 약 -40m부터 북동쪽 한국쪽으로 약 -150m까지 깊어지는 수심 범위를 나타내며 전반적으로 완만한 기복과 경사를 보인다. 중력이상은 완만한 해저지형의 변화보다는 기반암의 영향을 받는 것으로 판단된다. 중력이상은 연구지역의 북동쪽으로 높은 값을 보이며 흑산분지 남쪽으로 원형의 낮은 이상대가 나타난다. 부계이상의 아날니틱신호는 분지경계면 부근에서 고이상대들이 나타난다. 자기이상과 자기이상의 아날니틱신호에서는 화성암체 관입에 기인한 복잡한 이상들이 북쪽에 분포하고 남쪽은

완만한 변화를 보이는 것으로 보아 관입이 북쪽에 비해 많이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 연구지역의 부계중력이상과 자기이상의 파워스펙트럼 분석은 모호면의 깊이를 약 30.2-28.3 km로, 기반암은 약 8.4-8 km이며, 제 3기 에오세의 부정합면은 약 1.5-1.7 km 정도로 보여준다. 부계중력이상의 역산에 의한 모호면의 깊이는 연구지역의 서쪽인 중국쪽이 동쪽인 한국쪽에 비해 약간 깊게 나타난다. 2차원 중력 모델링은 아날니틱신호, 파워스펙트럼 분석 및 역산의 결과에 잘 부합된다. 본 연구지역은 황해 대륙붕 석유개발광구 해당되는 지역으로써 이와 같은 퇴적분지의 발달은 가스나 석유 등 탄화수소 자원 부존과 관련 있으므로 타 지구물리조사 자료 및 지질자료와의 통합정밀 분석이 추후에 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2010년 한국해양연구원의 '동해 중부연안환경 변동성 연구(PE98444)' 사업 및 2010년 국토해양부의 '해저열수광상의 지구물리탐사 및 자료 해석(PM55685)' 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이 연구를 수행할 수 있도록 도와주신 한국해양연구원 및 국토해양부 관계자분들께 깊은 감사를 드리며 온누리호 탐사시 도움을 주신 승조원분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 공영세, 박영훈, 김기석, 김승우, 김용환 외 25인, 1989, 대륙붕자원연구. 한국동력자원연구소, 402 p.
- 권영인, 박관순, 유강민, 손진담, 1995, 제주분지 제삼기 육성층의 층서 및 퇴적물 기원. 석유지질학회지, 3, 1-15.
- 유해수, 강길모, 강돈혁, 강성호, 강소라 외 109인, 2008, 배타적경제수역 해양광물자원조사. 한국해양연구원, 712 p.
- 윤해수, 이성숙, 이상현, 김재호, 변현숙, 김기현, 박동배, 1999, 제주분지 거북-1공과 옥돔-1공의 생층서 및 고환경. 고생물학회지, 15, 43-94.
- 전정수, 1995, 경상분지 남부지역(밀양소분지)의 지질구조에 관한 지구물리학적 연구. 연세대학교 지질학과 박사학위 논문, 139 p.
- 정태진, 손진담, 박관순, 김원식, 서상용 외 32인, 2001, 남해 대륙붕 석유자원 평가 연구. 한국지질자원연구원, 82 p.
- 최승찬, 2005, CHAMP-GRACE 인공위성 데이터와 해상 측정 중력 데이터에 나타난 황해안 지역의 남중국과 북

- 중국판의 대륙 충돌대 위치. 대한지구물리학회지, 8, 89-92.
- 허식, 최동립, 유해수, 민동주, 홍종국, 이광자, 2004, 남해 제주분지 해역의 퇴적환경 및 지질구조 예비 해석. 지구물리, 7, 225-232.
- Bassin, C., Laske, G., and Masters, G., 2000, The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America. EOS Transactions American Geophysical Union, 81, F897.
- Hsu, S.K., Sibuet, J.C., and Shyu, C.T., 1996, High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies, An enhanced analytic signal technique. Geophysics, 61, 373-386.
- Milliman, J.D. and Meade, R.H., 1983, World-wide delivery of river sediment to the oceans. Journal of Geology, 100, 525-544.
- Nabighian, M.N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. Geophysics, 37, 507-517.
- Nabighian, M.N., 1974, Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. Geophysics, 39, 85-92.
- Nabighian, M.N., 1984, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential-field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. Geophysics, 49, 780-786.
- Roest, W.R., Verhoef, J., and Pillington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. Geophysics, 57, 116-125.
- Smith, W.H.F. and Sandwell, D.T., 1995, Marine gravity field from declassified Geosat and ERS-1 altimetry. EOS Transactions American Geophysical Union, 76, G42A-2.
- Schubel, J.R. and Carter, H.H., 1984, The estuary as a filter for fine-grained suspended sediment. In Kennedy, V.S. (ed.), The Estuary as a Filter. Academic Press, NY, USA, 81-105.
- Thurston, J.B. and Brown R.J., 1994, Automated source-edge location with a new variable pass-band horizontal-gradient operator. Geophysics, 59, 546-554.
- Zhou, Z., Zhao, J., and Yin, P., 1989, Characteristics and tectonic evolution of the East China Sea. In Zhu, X. (ed.), Chinese Sedimentary Basins: Sedimentary Basins of the World 1. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, USA, 165-179.

2010년 4월 9일 접수
 2010년 5월 21일 수정원고 접수
 2010년 6월 10일 채택