

3차원 중력 모델링에 의해 예측된 황해 북부 서한만 분지 석유 저류층의 공간적 분포

최승찬 · 유인창[‡]

경북대학교 지질학과

요 약

북한의 서한만 분지 내에는 경제성이 있는 석유 자원이 존재할 것이라는 것이 여러 경로를 통해서 보고되고 있으나, 북한의 비밀주의 원칙에 의해서, 이 지역의 지질 및 지구물리학적 연구를 위한 데이터가 공개된 적은 극히 드물었다. 그렇기 때문에 인공위성으로부터 제공되는 중력장 데이터는 서한만 퇴적분지의 구조를 밝혀내고, 이를 통해서 서한만 퇴적분지 내의 석유 부존자원 연구를 위해서 차선택으로 매우 유용하게 이용될 수 있다. 본 연구는 인공위성 데이터를 기반으로 만들어진 TRIDENT 중력장 데이터의 해석과 더불어 서한만 분지 내에서 지금까지 수행된 지질 및 지구물리 데이터를 이용하여 서한만 퇴적분지의 3차원적인 밀도 구조를 밝혀내고자 수행되었다. 본 연구 결과, 서한만 분지 중, 2 군데의 지역에서 약 2,000 kg/m³의 매우 낮은 밀도를 특징으로 하는 저밀도 지층이 존재한다는 것을 확인하였으며, 이는 이 지역 퇴적분지 내에 석유 부존자원이 존재할 가능성이 매우 높다는 것을 시사한다. 한 곳은 서한만 중앙분지(Central basin) 남쪽 지역 약 3,000 m 깊이 백악기/쥐라기(Cretaceous/Jurassic) 층 속에 존재하며 그 부피는 약 250 km³으로 판단된다. 다른 곳은 중앙분지의 북쪽 지하 약 2,500 m에 위치하며, 그 부피는 약 300 km³으로 판단된다. 최근에 확보한 서한만 분지의 해상 측정 중력 데이터는 위의 연구 결과가 신빙성이 매우 높다는 것을 보여줌과 동시에 중앙분지 북서쪽 보하이만 방향으로 또 다른 저밀도 지층이 존재할 가능성이 매우 높다는 것을 보여준다.

주요어: 북한, 서한만 분지, 탄화수소, 인공위성 중력장, 3차원 중력 모델링

Sungchan Choi and In-Chang Ryu, 2018, Spatial distribution of hydrocarbon reservoirs in the West Korea Bay Basin in the northern part of the Yellow Sea, estimated by 3D gravity forward modeling. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 6, p. 641-656

ABSTRACT: Although an amount of hydrocarbon has been discovered in the West Korea Bay Basin (WKBB), located in the North Korean offshore area, geophysical investigations associated with these hydrocarbon reservoirs are not permitted because of the current geopolitical situation. Interpretation of satellite derived potential field data can be alternatively used to image three-dimensional (3D) density distribution in the sedimentary basin associated with hydrocarbon deposits. We interpreted the TRIDENT satellite-derived gravity field data to provide detailed insights into the spatial distribution of sedimentary density structures in the WKBB. We used 3D forward density modeling for the interpretation that incorporated constraints from existing geological and geophysical information. The gravity data interpretation and 3D forward modeling showed that there are two modeled areas in the central subbasin that are characterized by very low density structures, with a maximum density of about 2,000 kg/m³, indicating some type of hydrocarbon reservoir. One of the anticipated hydrocarbon reservoirs is located in the southern part of the central subbasin with a volume of about 250 km³ at a depth of about 3,000 m in the Cretaceous/Jurassic layer. The other hydrocarbon reservoir should exist in the northern part of the central subbasin, with an average volume of about 300 km³ at a depth of about 2,500 m. A comparison between the TRIDENT derived gravity field and the ship-based gravity field measured in 1980s shows us that our results are highly reliable and there is a very high probability to detect another low-density layer existings in the northwestern part of the central subbasin.

Key words: North Korea (DPRK), West Korea Bay Basin, hydrocarbon, Satellite derived gravity field, 3D gravity modeling

(Sungchan Choi and In-Chang Ryu, Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-53-950-5359, E-mail: inchang@knu.ac.kr

1. 서 론

서한만 분지(West Korea Bay Basin, 그림 1에서 WKBB)는 북황해분지의 동쪽 부분으로(North Yellow Sea Basin, 그림 1에서 NYSB), 그 총 면적은 약 36,000 km²이다. 서한만의 서쪽은 중국의 보하이만(Chinese Bohai Basin, 그림 1에서 CBB)으로 이어지며, 동쪽은 북한의 안주 분지와 연결되어 있다(참조 그림 1). 지금까지 밝혀진 바에 의하면, 서한만은 서해안에 발달한 중-신생대(Mesozoic and Cenozoic) 분지의 하나로서 고생대충과 선-캄브리아(Pre-Cambrian) 변성암이 기반암으로 형성되어 있고, 그 위를 중-신생대 퇴적층이 덮고 있는 것으로 파악되고 있다(Massoud *et al.*, 1991; Ryu *et al.*, 2000; Choi *et al.*, 2015; Son and Park, 2015). 시추 및 탄성파탐사 조사에 의하면 서한만에는 많은 양의 탄화수소(hydrocarbon)가 존재하는 것으로 보고되었으며(Massoud *et al.*, 1991, 1993), 이들 탄화수소는 주로 캄브리안 층(Cambrian strata)과 상부 쥐라기 층(Upper Jurassic strata) 사이에 위치하고 있는 것으로 파악되었다. 시추를 통해서 획득한 데이터에 의하면(예, 그림 2에서 Well 606; Massoud *et al.*, 1991, 1993), 두 가지의 파라핀 계열의 원유가 서로 다른 출처에서 생성된 것으로 나타난다. 그 중의 하나인 제 3기(Tertiary) 원유는 하상-삼각주 호수성(fluvial-deltaic lacustrine) 퇴적 시스템에서 파생될

수 있지만, 중-신생대 원유는 아마도 지각 호수에 퇴적된 심층수면에서 유래했을 것으로 판단되고 있다(Massoud *et al.*, 1991, 1993). 석유 시스템 모델은 상부 쥐라기 기반암에서 생성된 탄화수소가 상부 쥐라기 층과 캄브리아기 탄산염암층으로 이동되었음을 보여주었다(Son and Park, 2015). 그러나 서한만이 정치적으로 매우 민감한 중국과 북한의 국경에 위치하고 있다는 지정학적인 문제로, 탄화수소의 존재 유무 파악을 위한 3차원적인 퇴적분지 구조에 대한 연구가 지금까지 이루어지지 않고 있다. 이런 측면에서 정치 및 지정학적인 장애 요인으로부터 독립적인 인공위성에서 측정된 중력장 데이터는 서한만 퇴적분지의 수평 및 수직적인 구조를 파악하는데 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

본 연구는 인공위성 데이터를 기반으로 하는 중력장 데이터(TRIDENT gravity field)를 기존에 제공된 탄성파탐사 자료 등과의 통합 해석을 통해서 서한만 퇴적 분지 지역의 3차원적인 밀도 구조 모델링을 실시하고자 한다. 이를 통해서 그동안 시추에 의해서 확인된 1차 및 2차원적인 탄화수소의 존재 및 그 위치를 3차원적인 방식으로 해석하여, 서한만 분지 내부에서 탄화수소의 위치 및 그 추정 양을 평가하고자 한다. TRIDENT 중력장 데이터의 역산 해석을 위해서는 곡률분석 방식(curvature analysis)과 Euler deconvolution 방식을 사용하였으며, 퇴적분

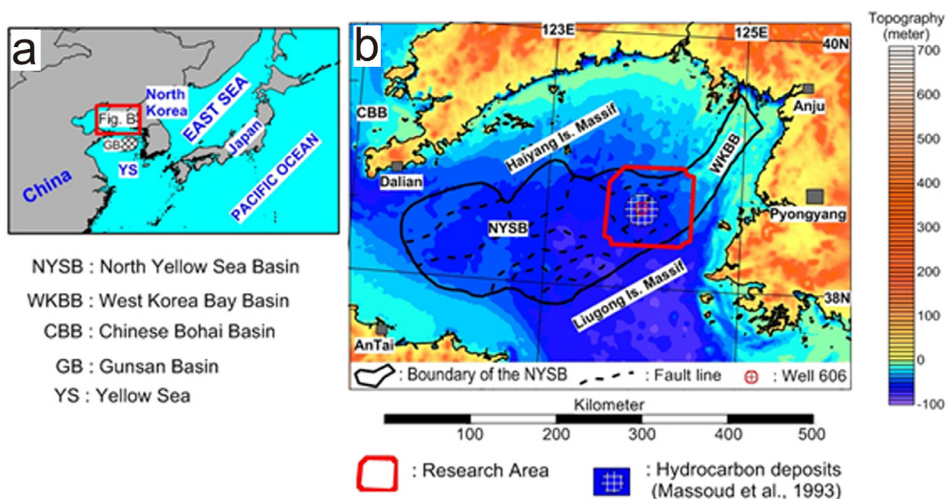
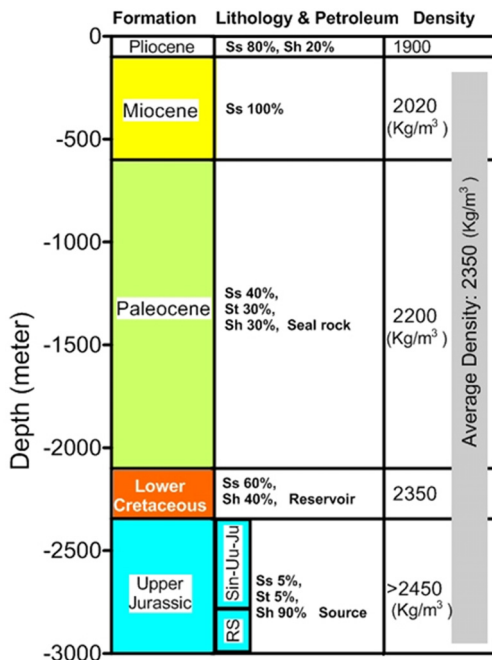


Fig. 1. A simplified map of the North-East Asia (a) and a topographical map of the northern part of the Yellow Sea and adjacent onshore area of North Korea (b). The location of the study area is marked with a red line in b. This area belongs to the West Korea Bay Basin (WKBB) and the eastern part of the North Yellow Sea Basin (NYSB).

지의 3차원적인 구조 모델링을 위해서는 중력장의 순산 해석 방식 소프트웨어 프로그램인 IGMAS+가 사용되었다.

2. 서한만 분지의 지질

서한만 분지는 북황해분지의 일부로 북황해분지의 동쪽 지역에 해당된다(그림 1). 평균 수심은 약 75 m이며 육상으로는 북한 서부 안주 분지와 연결되어 있다. 서한만은 평균 지각 깊이가 약 30 km인 서해 안에서 지상 퇴적물에 의해서 형성된 분지이며(Choi *et al.*, 2015), 그의 생성 원인은 상부 지각의 확장과 함몰의 반복적인 결과에 의한 것으로 알려져 있다(Massoud *et al.*, 1991, 1993; Ryu *et al.*, 2000; Son and Park, 2015). 또한 서한만 분지는 고생대 퇴적암과 선캄브리아기의 변성암을 기반암으로 하며, 중생대층과 신생대층이 두껍게 퇴적되어 있는 대륙 내



Ss: Sandstone, St: Siltstone, Sh: Shale RS: Ryung-Sung Formation
Source for lithology : Massoud *et al.* (1991, 1993), Son & Park (2015)
Source for Density : Choi *et al.* (2015)

Fig. 2. Stratigraphy of Well 606 (for location refers to Fig. 3) modified from Massoud *et al.* (1991, 1993) and Son and Park (2015). Densities of each layer are estimated via layer thicknesses, which are provided from the petrophysical analysis of the Gunsan Basin (Choi *et al.*, 2015).

의 열개분지(intra-continental rift basin)라고 알려져 있다(Son and Park, 2015). 이 열개분지는 중국 동부와 서한만 일대에 발달해 있던 선캄브리아기와 고생대의 플랫폼(platform)이 맨틀물질의 상승과 이로 인해 발생한 인장력에 의해서 열개된 것으로, 정단층에 의한 북동-남서 방향의 함몰지구대(graben)가 생성되는 원인을 제공하기도 하였다. 대륙지각이 얇은 이런 지구대는 급속히 침강하게 되고, 침강된 곳으로 두꺼운 중생대와 신생대 퇴적물이 쌓이게 되었다. 특히 송림 조산운동이 일어난 이후, 후기 중생대와 전기 신생대에 침강이 급격히 일어나면서 현재의 형태를 갖추게 되었다. 즉 열개 이전에는 시생대와 고생대의 탄산염 암석이 우세한 플랫폼이었던 서한만 지역은, 지구조 활동에 의하여 후기 쥐라기와 초기 백악기 동안, 분지의 남쪽 경계부와 북쪽 경계부에서는 동서 방향 내지는 북동 방향의 정단층이 현저한 지구대 형태의 열개분지가 발달하게 되어 중생대 퇴적활동이 시작되었다. 이후 단층들은 고제3기에 오세와 올리고세 동안에 재 활성화되어 서한만 분지의 신생대 퇴적활동 형태를 규제하게 되었다. 이와 같은 서한만 분지는 2단계의 인장력에 의한 단층 규제에 의하여 발달하였으며, 신제3기 동안에는 열적 침강에 의하여 계속하여 깊이가 증가하였다. 이와 같은 인장력과 열적침강 등을 거치는 3단계의 분지형성과정 동안에 서한만 분지는 약 10 km에 이르는 두꺼운 중생대와 신생대 퇴적층이 증첩되어 퇴적된 형태를 갖추게 되었다(Massoud *et al.*, 1991, 1993; Ryu *et al.*, 2000; Son and Park, 2015).

서한만 분지의 층서는 석회암, 돌로마이트와 같은 탄산염암 및 점판암, 사암 등으로 이루어진 후기 원생대 내지는 고생대 전기의 지층을 기반암으로 하여, 그 위에 후기 쥐라기 퇴적층(Upper Jurassic strata)이 부정합으로 피복한다. 후기 쥐라기 퇴적층의 하부는 흑색 이질암층이 우세하며, 중부는 사암 내지는 이질 석회암층이 우세하고, 상부는 다시 흑색 이질암층이 우세하다. 그렇기 때문에 서한만 분지의 탄화수소 주 근원암(basement)은 이질암층이다. 후기 쥐라기 퇴적층(Upper Jurassic strata)의 위에는 전기 백악기 퇴적층(Lower Cretaceous strata)이 쌓여있다. 이 백악기층의 하부는 회색 또는 보라색을 띠는 이암, 사암, 역암의 호층이 발달하였으며, 중부는 석회질의 이암과 흑색을 띠는 이질암이 우세하다. 그

리고 상부에는 적자색의 석회질 이암과 사암이 우세하다. 전체적으로 하부 백악기 층은 붉은 자주색을 띠고 있어서 적자색 지층이라고 불린다. 하부 백악기 층은 건조기후의 하천성 퇴적물로 주로 구성되어 있는 것으로 생각되며, 그 두께는 최대 2,000 m에 이른다. 이후 5,000만년 동안에 퇴적활동이 중단되어 후기 백악기 및 팔레오세 지층은 결층이다. 따라서 하부 백악기층 위에는 에오세 퇴적층이 부정합 관계로 퇴적되어 있다. 에오세 층은 자주색 이암, 사암, 함역질 사암으로 이루어졌으며, 호수성 퇴적물로 그 두께는 최대 750 m에 이른다. 에오세층 위에는 에오세 층과 정합적으로 올리고세 층이 발달되었다. 올리고세 층은 강, 호수, 습지 등 다양한 퇴적환경 하에서 발달한 것으로 분지의 중앙부에서는 매우 두꺼워서 3,000 m에 달하는 곳도 있다. 서한만 분지 층서의 최상위는 마이오세, 플라이오세 및 플라이스토세 지층이 부정합 관계로 광역적으로 수평으로 발달한다. 하천성의 사암, 역암 및 이암으로 이루어져 있으며, 그 최대 깊이는 약 700 m에 달한다(Massoud *et al.*, 1991, 1993; Ryu *et al.*, 2000; Son and Park, 2015).

위에서 언급한 각 퇴적층의 밀도를 결정하는 것은 중력 모델링을 위해서 가장 중요한 작업 중의 하나이다. 그러나 서한만 분지 내에서 직접적으로 측정한 밀도 데이터가 없기 때문에, 차선택으로 서한만 분지와 비슷한 구조를 가진 군산 분지에서 실시된 각 깊이별 밀도 데이터를 채택하였다(Choi *et al.*, 2015). 그림 2에서 보이는 것처럼, 분지 내부의 평균 밀도는 Choi *et al.* (2015)이 제시한 바와 같이, $2,350 \text{ kg/m}^3$, 기반암(basement)의 밀도는 $2,650 \text{ kg/m}^3$ 로 각각 결정하였다. 이 밀도 데이터는 3차원 밀도 구조 모델링을 하는데 중요한 변수(constraint)로 사용될 것이다.

3. 서한만 분지의 음향기반암 분포

본 연구를 위해서 사용된 탄성파탐사 데이터는 1980년대 여러 탐사 회사(e.g., GECO-Prakla of Norway)가 수행한 기존의 다중 채널 탄성파탐사 라인을 조합하여 만들어졌다(Son and Park, 2015). 이 탄성파탐사 데이터는 에어건 어레이(airgun arrays)를 사용하여 약 5-6초 동안 기록되었으며 0.002-0.004 초 간격으로 샘플링 되었다.

탄성파탐사의 결과로서 만들어진 속도 구조 모델

(그림 3a)은 서한만에는 기반암 위에 위치하는 퇴적 분지들이 단층에 의해서 3군데의 소분지로 나누어진 것을 볼 수 있다. 동쪽 소분지(Eastern Subbasin, 그림 3b에서 EB)는 남쪽으로는 Liugong Massif와 맞대고 있는 반면, 서소분지(Western Subbasin, 그림 3b에서 WB)는 북쪽으로 Haiyang Massif와 맞대고 있다. 중앙소분지(Central Subbasin, 그림 3b에서 CB)는 북동 방향의 단층대를 따라서 동쪽과 서쪽이 고립된 구조이다. 또한 가장 깊은 음향 기반암(acoustic basement)은 약 3.5 초로 중앙소분지 내에 보이며, 동쪽 및 서쪽 소분지에서는 각각 1.5 초와 2.0 초로 기반암의 깊이가 중앙 소분지에 비해서 그 두께가 크지 않다(그림 3b). 또한 Liugong Massif와 Haiyang Massif에서는 음향 기반암이 최대 1.0 초로 나타나는데, 이는 이 지역에는 퇴적층이 없거나 얇은 퇴적암만 일부 분포하고 있다는 것을 의미한다.

이와 같은 음향 기반암의 분포는 서한만의 퇴적 분지에 대한 3차원적인 밀도 구조 모델링을 하는데 밀도와 더불어 가장 중요한 변수(constraint)인 분지의 규모를 결정하는데 매우 중요한 역할을 할 것이다. 그러나 서한만에서는 속도-깊이 관계식(V_p -Depth relationship)에 대한 연구가 발표된 것이 없는 관계로 서한만에서 약 200 km 남쪽에 위치하며, 생성과정 및 퇴적층의 분포가 서한만과 거의 유사한 군산 분지에서 실시된 속도-깊이 관계식($\text{Depth} = 1911 V_p + 965$; Choi *et al.*, 2015)을 이용하여 음향 기반암의 속도 분포를 깊이 분포로 계산하였다. 그 결과, 가장 깊은 곳은 중앙 소분지로서 최대 약 8,000 m에 다다르며, 동쪽 및 서쪽 소분지 내에서의 음향 기반암의 평균 깊이는 약 2,000 m와 4,500 m로 각각 계산되었다(그림 3b). 더불어 퇴적분지의 중력 효과 값을 계산하기 위해서, 군산 분지에 적용했던 중력값(BA)-깊이(Depth) 관계식($\text{BA-Depth relationship}$, $\text{BA} = 0.005 \times \text{Depth} + 25$; Choi *et al.*, 2015)이 사용되었다. 그림 3c에서 보이는 것처럼, 이 관계식에 의해서 계산된 동쪽 및 서쪽 소분지의 평균값은 약 5 mGal이며, 깊이가 상대적으로 깊은 중앙 소분지의 최대 중력효과 값은 약 -25 mGal이다.

4. 인공위성 중력장 데이터

서한만 연구지역의 완전 부계 이상(complete Bouguer

anomaly)을 계산해 내기 위해서 인공위성에서 관측된 TRIDENT 중력장 데이터를 이용하였다. 이 TRIDENT 데이터는 독립적으로 위성에서 측정된 세 종류의 순높이 이상(free air anomaly)을 조합하여 완성되었다. 첫째는 약 2.5 mGal의 해상도를 갖는 GETECH 회사(GETECH group)에서 제공하는 순높이 이상(free air anomaly)으로부터 제시된 altimetry 위성 데이터를 기반으로 한다. 둘째는 덴마크 위성센터에서 제공하는 DNSC08 (<ftp.spacecenter.pub/DNSC08>)이며, 셋째는 Sandwell and Smith (2009)가 처리해서 발표한 순높이 이상이다. 이들의 해상도는 각각 2.0과 4.0 mGal이다. 이들 순높이 이상들로부터 3차원 모델링에 필요한 부계이상(Bouguer anomaly)을 계산해 내기 위해서 주어진 부계판(Bouguer plate)의 평균 밀도 값은 $2,670 \text{ kg/m}^3$ 이다. 이 값은 지각 중에

서 대륙지각의 평균 밀도값(Christensen and Mooney, 1995)으로 널리 알려져 있다. 그렇기 때문에 대륙의 한 부분이었던 서한만 지역의 평균 밀도 값으로 아주 적절한 값이라고 판단되었다. 또한 순높이 이상에서 부계이상으로의 계산을 위해서는 해저의 깊이차(bathymetry)에 의한 중력 효과 값을 제하여 주어야 한다. 이를 위해서 사용된 해저 지형도는 NIMA (www.noaa.edu, 그림 1)에서 제공하는 데이터를 이용하였으며, 고도차에 의한 중력효과 값 계산을 위해서는 Hayford zone (167 km)을 이용한 terrain effect를 실시하였다. 이 계산된 terrain effect 값은 연구지역 내에서 표준 편차 약 2.5 mGal 이내에서 최대 6.5 mGal, 최소 1.2 mGal의 변이를 보여 주었다. Choi *et al.* (2015)은 TRIDENT 데이터의 해상도에 대한 신빙성을 알아보기 위해서 군산분지 내에서 실시된 선

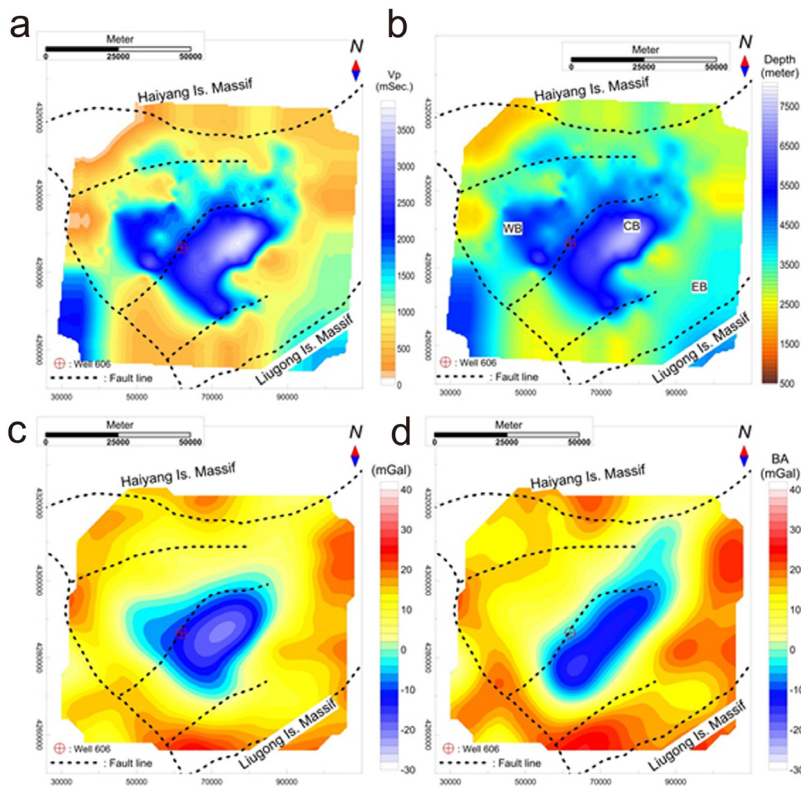


Fig. 3. A spatial distribution of the acoustic basement (a) and depths of the top of the basement (b), which is computed by using the V_p -Depth linear relationship ($\text{Depth} = 1911 \times V_p + 965$; Choi *et al.*, 2015). The gravity effect of that depth distribution (c) is calculated inversely using the BA -Depth relationship proposed by Choi *et al.* (2015). Figure D shows the satellite-derived complete Bouguer anomaly map of the WKBB with a range of -30 to $40 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$. The Bouguer anomalies less than $-5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ are generally found in the central subbasin and correlate well with the graben structures in the acoustic basement that are deeper than 5000 m (Fig. b). Black dotted lines are fault lines.

상 측정을 통해서 획득한 중력 데이터와 TRIDENT 데이터를 비교 분석하였다. 그 결과 TRIDENT 데이터의 96% 데이터가 약 2.5 mGal의 오차 범위 안에서 선상 측정 데이터와 일치하는 값을 보여준다. 이는 위성에서 측정된 중력 데이터가 선상에서 측정된 데이터와 거의 차이가 없는 해상도를 갖고 있음을 보여준다는 것을 지시한다.

그림 3d는 이런 일련의 과정을 거쳐 완성된 약 2,500 m의 해상도를 갖는 서한만 연구지역의 TRIDENT 부계이상 지도(Bouguer anomaly map)이며, 전체적으로 -30 mGal에서 40 mGal의 변이를 보이고 있다. -5 mGal 보다 낮은 부계이상 값들은 일반적으로 중앙 소분지에서 나타나고 있는데, 이는 음향 기반암의 깊이(그림 3c)가 5,000 m 보다 더 깊은 곳과 일치하는 경향을 보이고 있다. 이런 점에서 주변(2,670 kg/m³)에 비해서 상대적으로 낮은 평균 밀도 값(2,350 kg/m³)을 갖는 퇴적분지가 깊으면 깊을수록 부계이상 값이 낮아진다는 것으로 추측해 볼 수 있다. 10 mGal 보다 높은 부계이상 값들은 일반적으로 서한만 주변을 감싸고 있는 Massif zone들과 일치하는데, 특히 서한만의 남동쪽에 위치하는 Liugong Massif

에서는 부계이상의 값이 가장 높은 약 25 mGal이다. 이는 이 지역으로 밀도가 높은 기반암이 용기하였으며, 그렇기 때문에 밀도가 낮은 퇴적분지가 거의 없기 때문이라고 판단된다(Massoud *et al.*, 1991, 1993; Ryu *et al.*, 2000; Son and Park, 2015). 위성에서 측정된 데이터에서 유래된 부계이상(그림 3d)으로부터 오로지 음향 기반암의 깊이에 의해서만 계산된 중력 효과 값(그림 3c)을 제거해 주면, 분지 내에 존재하는 밀도 분포에 의한 중력 차이(gravity differential) 값을 구할 수 있다. 그림 4a에서 보이는 것처럼, 이렇게 계산된 중력 차이 값 중에서 양의 값을 나타내는 곳은 주로 동쪽 및 서쪽 소분지인데, 이는 TRIDENT 부계이상 값이 음향 기반암의 깊이에 의해서만 계산된 중력 효과 값보다 크다는 것을 의미한다. 좀 더 자세히 알아보기 위해서 탄성파탐사 라인들을 따라서 두 값을 비교하여 보았다: 서쪽 소분지의 중앙을 남북으로 가로지르는 SN02 라인(그림 4c)과 동쪽 소분지를 남북으로 가로지르는 SN04 라인(그림 4d)에서 보이는 것처럼, 파란색 선으로 표시된 부계이상 값들이 빨간색으로 표시된 중력 효과 값들보다 뚜렷하게 높다는 것을 알 수가 있다. 이는 동쪽 및 서쪽 소분

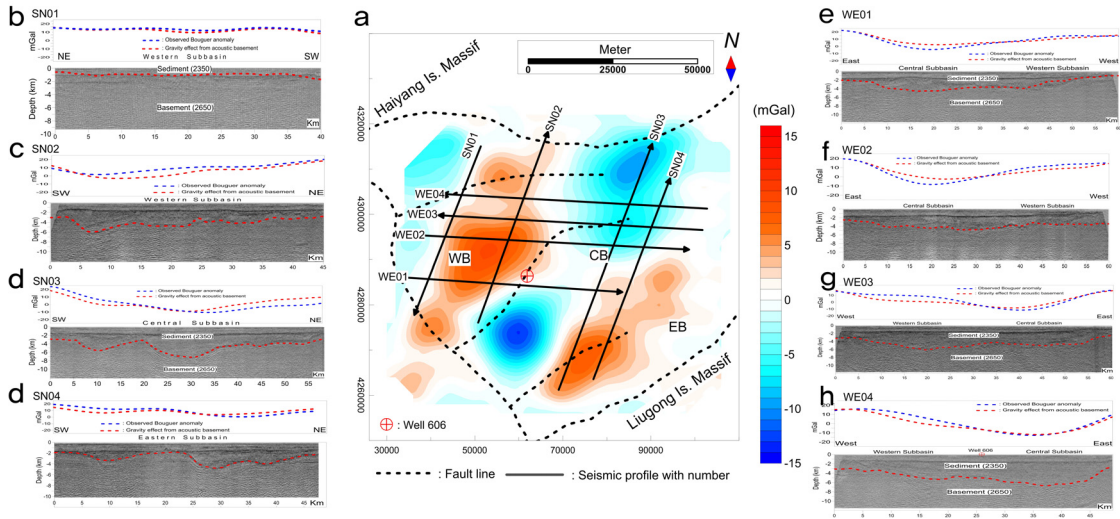


Fig. 4. (a) The gravity differential computed by subtracting the effects of the sedimentary thicknesses (Fig. 3c) from the Bouguer anomalies (Fig. 3d). The gravity differentials along all available seismic profiles are presented here (b-h). The western (WB) and eastern subbasins (EB) are characterized by a positive gravity differential, indicating that the TRIDENT derived Bouguer anomalies are generally higher than the gravity effects (Fig. 4a), which means that the average densities of the western and eastern sedimentary subbasins are higher than the average density of the entire sedimentary basin (2350 kg/m³; Fig. 2). The negative differential revealed in the central subbasin can be explained only by deposits of very low-density structures like salt diapir (2080 kg/m³; Choi *et al.*, 2011) or hydrocarbon reservoirs in the sedimentary graben, as mentioned by Massoud *et al.* (1991, 1993) and Son and Park (2015).

지 내의 밀도가 전체 평균 밀도 값인 $2,350 \text{ kg/m}^3$ 보다 뚜렷하게 높다는 것을 의미하며, 이는 곧 Haiyang Massif zone과 Liugong Massif zone을 따라서 유효한 밀도가 높은 지각 하부 물질이 퇴적분지 내에 많이 유입되었다는 것을 지시한다.

그와 반대로 -10 mGal 이상의 마이너스 중력 차이(negative gravity differential)를 보이는 곳은 주로 중앙 소분지이다. 그림 4e-h에서 보이는 것처럼, 동서 및 서동 탄성파탐사 라인들에서(WE01, WE02, WE03, WE04, 그림 4e-h) 중앙 소분지에서만 주로 마이너스 중력 차이가 나타남을 알 수가 있다. 이는 중앙 소분지에 다른 지역에 비해서 상대적으로 밀도가 낮은 물질이 존재하는데, 퇴적 분지 내에서 이렇게 밀도가 낮은 물질은 주로 암염층(salt diapir, $2,080 \text{ kg/m}^3$, Choi *et al.*, 2011)이거나 밀도가 최대 $2,000 \text{ kg/m}^3$ 정도를 특징으로 하는 탄화수소 저장물질(hydrocarbon reservoirs)이라고 추측할 수 있다. 위에서 분석한 내용들은 3차원 밀도 구조 모델링을 하는데 역시 중요한 요소로 사용되어 질 것이다.

지의 경계면 등의 밀도가 뚜렷하게 차이가 나는 곳을 찾기 위해서 곡률분석(curvature analysis) 방법을 이용하여 중력장을 해석하였다. 이론적으로 곡률분석 방법은 3차원 탄성파탐사의 해석을 목적으로 개발하였으나(Roberts, 2001), 밀도에 의한 중력장의 경계선 등을 찾아내기 위한 목적으로 이용되기 시작하였는데, 많은 논문에서 그 효율성을 입증하였다(예, Götze and Schmidt, 2002; Choi *et al.*, 2011, 2015). 중력장에 의한 곡률분석 방법을 좀 더 자세히 이해하기 위해서, 좌측으로부터 밀도 1, 2, 3(그림 5a에서 $\text{RHO1} > \text{RHO2} < \text{RHO3}$)으로 이루어진 간단한 2차원 밀도 구조에 의해서 나타난 중력 곡선을 가지고 곡률분석 방법의 이론적인 내용을 설명하고자 한다: 중력 곡선을 연속적으로 연결된 각 점에서의 특정 반지름을 가진 원으로 구성되어 있다고 생각한다면, 임의의 한 점에서 곡률 k 는 그 점에서 반지름(그림 5a에서 R)을 가진 원들의 arc segment 즉 반지름의 역수로서 정의되어진다. 그러므로 k 의 곡률(curvature, 그림에서 $d\omega/ds$)은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$k = \frac{dY^2}{dX^2} / \sqrt{\left(1 + \frac{dY^2}{dX^2}\right)^3} \quad (\text{Roberts, 2001})$$

5. 중력장의 분석

5.1 Curvature analysis

해저면 가까운 곳에 위치하는 단층선이나 퇴적분

좀 더 간단하게는 위의 식을 이차 미분식($k = \frac{dY^2}{dX^2}$)

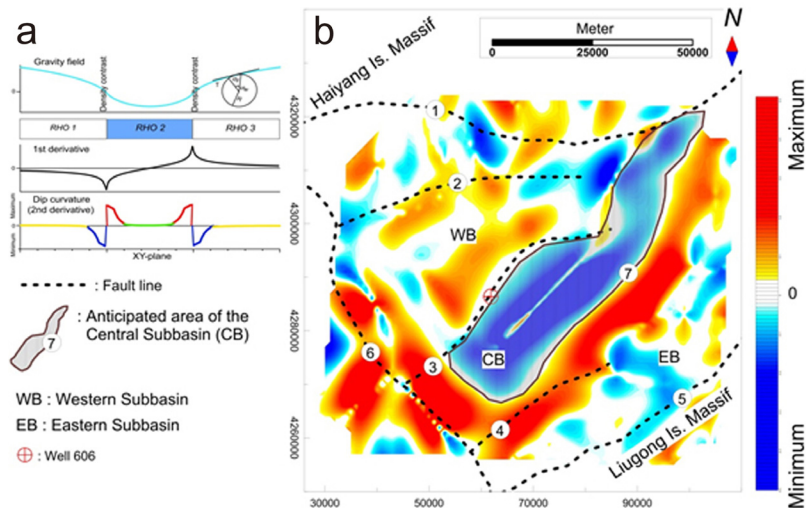


Fig. 5. (a) Basic concept of the dip curvature analysis (Roberts, 2001). (b) Results of the dip curvature analysis of the Bouguer anomaly field. The pairs of positive (red color) and negative values (blue color) of the “dip curvature” correlate well with the rim of the central subbasin (CB, solid black line numbered 7) and the tectonic fault lines (dashed lines numbered 1-6).

으로 표현할 수 있다. 이런 식으로부터 계산된 곡률의 형태에 따라서 곡률 값을 색깔로 구분할 수가 있는데, 첫째로 곡률이 평평하면 할수록, k 값은 0에 접근하고(그림 5a에서 노란색 및 초록색 부분), 위로 볼록한 형태의 곡선(anti-formal curve)에서는 양의 값(그림 5a에서 빨간색 부분)을, 아래로 볼록한 형태의 곡선(syn-formal curve)에서는 음의 값(그림 5a에서 파란색 부분)을 갖게 된다. 그러므로 중력장의 변화를 일으키는 지역은 빨간색과 파란색의 경계면이라고 판단할 수가 있다. 즉 지하 내부의 밀도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 변하는 곳은 빨간색에서 파란색으로 변하는 곳이며, 반대로 파란색과 빨간색의 경계면은 밀도가 낮은 곳에서 높은 곳으로 변하는 곳이라는 정보를 제공한다(Roberts, 2001).

그림 5b는 위에서 설명한 곡률분석(curvature analysis) 방식에 의해서 계산된 중력장으로부터 역산된 곡률 반경지도이다. 이 지도가 지시하는 것은 서쪽 소분지는 주로 ③과 ②로 표시된 2개의 단층선에 완전히 둘러싸인 위로 볼록한 형태(anti-formal curve)의 지층 구조를 특징으로 한다. 중앙 소분지는 ③과 ④로 표시된 단층선에 의해서 동과 서쪽으로는 둘러싸여 있지만, 북쪽은 열려있으며 아래로 볼록한 형태(syn-formal curve)의 특징을 보여주고 있다(그림 5a에서 밤색 선으로 표시된 부분). 중앙 소분지의 대략적인 면적은 약 100 km²이다. 동쪽 소분지는 서쪽 소분지와 마찬가지로 위로 볼록한 형태(anti-formal curve)의 지층 구조를 특징을 나타낸다.

5.2 Euler deconvolution method

중력장의 원인이 되는 지하 밀도의 깊이를 3차원적으로 계산하기 위해서 주로 사용되는 역산 방식 중에서 30년 전부터 주로 많이 사용되는 방식으로 Euler deconvolution method (Thomson, 1982; Reid *et al.*, 1990; Pašteka *et al.*, 2009)가 있다. 이 방식을 중력장에 적용하기 위해서는 structural index (SI) 개념을 이해해야만 한다. 즉 중력장을 변화시키는 근원물질의 깊이(source depth) 중에서 근원물질의 최대 깊이(maximum source depth)를 계산하기 위해서는 SI 값을 2로 주어야 하며, 지표면과 가장 가까운 깊이(minimum source depth)를 계산하기 위해서는 0에 가까운 값을, 그리고 단층면과 같은 곳을 찾아내기 위해서는 1의 값을 주어야 한다(Pašteka *et al.*, 2009).

그림 6은 위의 원리에 의해서 계산된 서한만 지역에서 중력장의 변화를 일으키는 근원 물질의 최대 깊이 분포이다. 4000 m 보다 깊은 근원 물질은 주로 ①, ⑤와 ⑥의 단층선이 있는 Haiyang Massif와 Liugong Massif 등의 용기 지역에 나타나는데(그림 6에서 빨간색 원들), 이는 높은 양의 중력 값의 원인이 되는 밀도가 매우 높은 물질이 이 지역에서는 4,000 m 정도의 깊이에 존재한다는 것을 지시한다. 이와는 반대로 중력장이 -10 mGal 보다 낮은 값을 특징으로 하는 중앙 소분지에는 3,000 m 깊이에 근원 물질이 존재한다는 것을 보여준다(그림 6에서 검은색 원). 이는 중앙 소분지에 밀도가 매우 낮은 물질들이 약 3,000 m 깊이에 분포하고 있다는 것을 지시한다. 또한 이 밀도가 낮은 물질들이 분포하는 지역은 부계 이상 지도(그림 3d)에서 근원암(basement)의 분포만 가지고 계산된 중력 효과지도(그림 3c)를 제하였을 때, 뚜렷하게 음의 값을 나타내는 지역과 일치하는 것을 볼 수가 있다. 이는 곧 퇴적분지의 평균 밀도(2,350 kg/m³, 참조 그림 2)보다 낮은 물질이 중앙 소분지 내에서 지하 3,000 m 지점에 분포하고 있다는 것을 의미한다.

6. 3차원 중력 모델링

6.1 모델링 방법

본 연구를 위해서 사용된 3차원 중력 순산 모델링 프로그램은 IGMAS라고 불리며, 후에 GIS 기능이 첨부되어 IGMAS+로 발전하였다(Götze and Schmidt, 2002; Schmidt *et al.*, 2004, 2010; Alvers *et al.*, 2014). IGMAS+는 지각 및 맨틀 내부의 밀도 및 대자율의 분포를 각 section 별로 계산한 후에, 각 section을 삼각측량 방식으로 연결하여 3차원적인 밀도 및 대자율 모델을 계산하는 소프트웨어(software)이다(Götze, 1984; Götze and Lahmeyer, 1988). IGMAS+는 또한 삼각측량 방식으로 계산된 3차원 밀도 및 대자율 분포에 의한 중력장 및 자기장 효과를 계산하여, 측정된 중력장 및 자기장과 일치할 때까지 밀도 및 대자율 분포를 변경함으로써 연구 지역의 밀도와 대자율을 갖고 있는 지하구조를 중력장과 자기장을 이용하여 3차원적으로 해석해 낼 수 있는 세계에서 유일한 프로그램이다. 서한만의 3차원 순산 모델링을 위해서 동서 방향으로 1.0 내지 20 km의 간격으로 총

32개의 section을 설정하여 수행하였다.

6.2 밀도 및 구조 설정을 위한 변수

최적의 지각구조 모델을 설정하기 위해서 다음과 같은 지질, 구조 및 지구물리화적인 데이터를 본 연구에서는 사용하였다:

- 1) NIMA (National Oceanic and Atmospheric Administration, www.noaa.gov)에서 제공하는 해저 지형도로서 2,000 m의 격자형 데이터이며, 그 해상도는 1 m 이내이다(그림 1 참조).
- 2) 해저면(bathymetry)과 하부 지각 사이의 깊이를 모델링하기 위해서 음향기반암(seismic acoustic basement)의 깊이와 각 라인별 탄성파탐사 자료(그림 4 b-h)를 이용하였다.
- 3) 퇴적암 분지의 평균 밀도 등 각 지각 구조별 밀도 데이터는 중력장 모델링을 하는데 매우 중요한 요소이다. 그러나 서한만 분지 내에서는 직접 측정된 밀도 정보가 없기 때문에 서한만

에서 매우 비슷한 퇴적분지 구조를 가지고 있는 서한만에서 남쪽으로 200 km 떨어진 군산 분지(Choi *et al.*, 2015)에서 얻어진 밀도 데이터를 모델링에 사용하였다. 이 중에서 가장 중요한 자료는 퇴적분지의 평균 밀도($2,350 \text{ kg/m}^3$)와 상부 지각의 기반암의 평균 밀도($2,650 \text{ kg/m}^3$)이다(그림 2 참조).

- 4) 그림 3d에서 제시한 인공위성 기반 TRIDENT 부계이상 데이터는 중력 순산 모델링의 최적화를 위해서 사용되었다.
- 5) 곡률 반경 계산에 의한 결과 값들(dip curvature calculations, 그림 5b 참조)는 해저에서 가장 가까운 지역의 모델링을 위한 데이터로 활용되었다.
- 6) Euler calculation 방식에 의해서 계산된 중력장을 변화시키는 밀도들의 깊이 분포 지도도 모델링의 기본 자료로 사용되었다(그림 6). 위에서 언급한 모델링을 위한 모든 입력 데이터

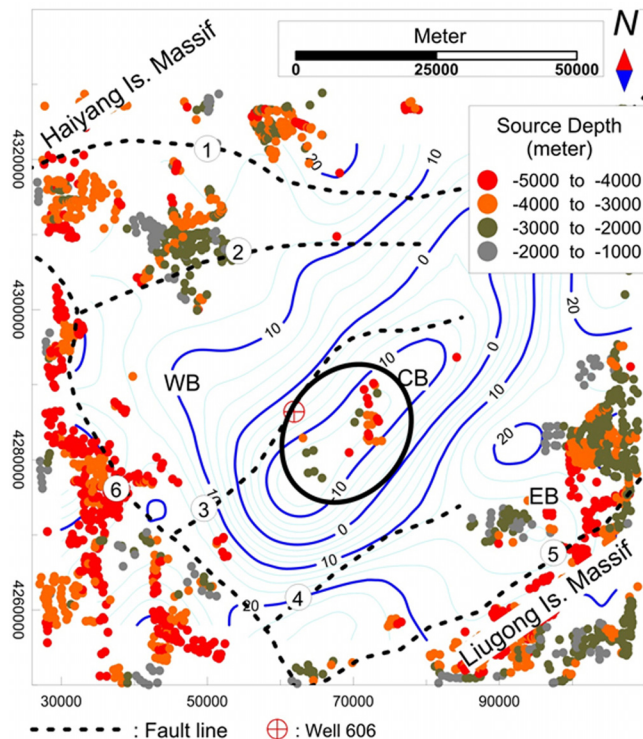


Fig. 6. Results of the Euler deconvolution method of the gravity field: the deepest mass points of more than 4,000 m (red filled circle) are mainly clustered along the tectonic fault lines and uplifted zones, like the Haiyang- and Liugong-Massif areas. The source depth of the most negative Bouguer anomaly shown in the central subs basin (CB) is at a depth of about 3,000 m (black solid circle).

들은 그림 7에서 함께 볼 수 있다.

6.3 완성된 3차원 모델의 해석 및 결과

그림 8은 서에서 동으로 연결된 탄성파탐사 라인인 WE01을 따라서 실시된 모델 단면도이다(이 탄성파탐사의 위치는 그림 4a와 그림 7을 참조). 이 라인에서의 부계이상 변화는 동쪽 및 서쪽 소분지에서는 약 15 mGal의 값을 가지고 있으며, 중앙 소분지에서는 -10 mGal의 값을 나타내고 있다(그림 8a에서 검은 색 실선). 음향 기반암과 군산분지에서 획득한 정보(Choi *et al.*, 2015) 등을 이용하여, 위는 약 2,350 kg/m³의 평균 밀도를 갖는 서한만 퇴적분지와 그 밑은 약 2,650 kg/m³의 평균 밀도를 갖는 기반암으로 이루어진 초기 밀도 모델을 완성하였다: 동쪽 및

서쪽 소분지에서 관측된 10 mGal의 부계이상 중력값은 중앙 소분지 약 6,000 m 지점으로 부터 동쪽 및 서쪽 소분지 쪽으로는 약 2,000 m까지 올라오는 기반암의 영향 때문이라고 해석할 수 있다. 2장에서 언급한 것처럼, 서한만 퇴적분지는 일반적으로 최상부 층은 평균 밀도 약 2,020 kg/m³, 평균 두께 약 500 m의 마이오세 층으로 덮여있다(그림 2; Massoud *et al.*, 1991; Son and Park, 2015). 중간 층은 평균 밀도 약 2,150 kg/m³, 평균 두께 약 2,000 m의 팔레오세이며, 2,000 m 보다 깊은 곳은 용성 및 신의주층으로 평균 밀도 약 2,450 kg/m³을 특징으로 하는 백악기/쥐라기 혼합 층에 해당된다(참조 그림 2; Massoud *et al.*, 1991; Son and Park, 2015). 그림 4에서 보여준 것처럼, 계산된 중력 차이 값들은(관측된 부계 이

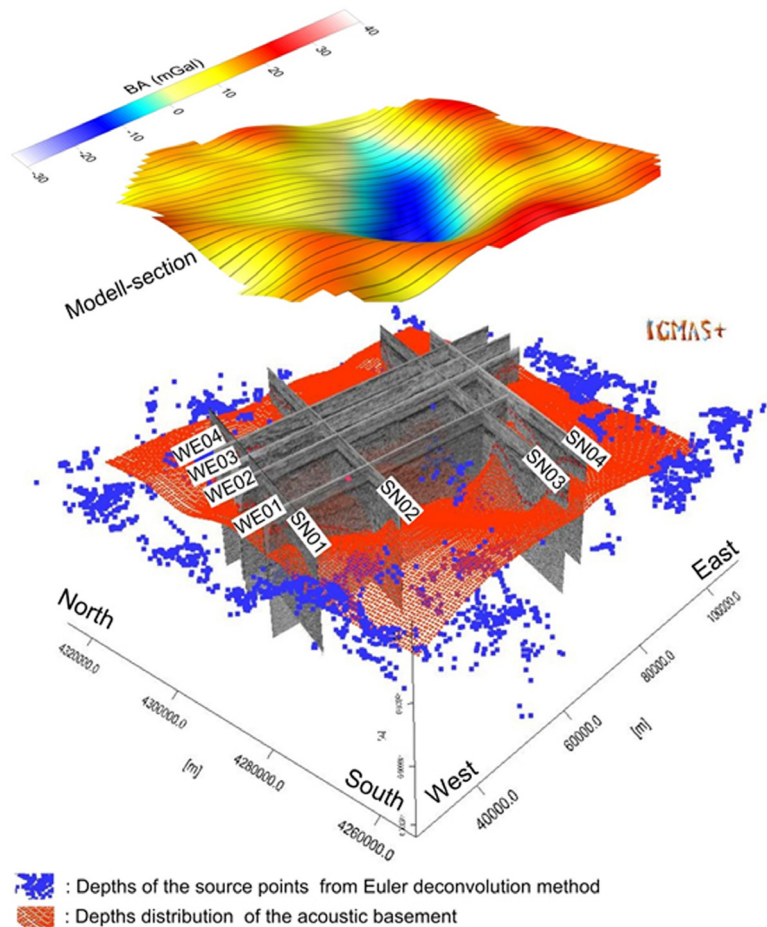


Fig. 7. All available constraints (gravity field, acoustic basement, seismic profiles, and results of the Euler deconvolution method) are presented for three-dimensional density modeling. Thirty-two vertical sections are used, with distances between 1 and 20 km, depending on the underground complexity.

상-계산된 기반암의 중력 효과값) 동쪽 및 서쪽 소분지의 밀도 값이 분지 전체의 평균 값($2,350 \text{ kg/m}^3$) 보다 높다는 것을 보여준다. 이런 이유를 고려하여, 측정된 중력 값과 초기 모델링으로부터 계산된 중력 값을 일치시키기 위해서 각 분지 마다 백악기/쥐라기 혼합 층의 밀도를 변경하였다. 그 결과 서쪽 소분지와 동쪽 소분지의 평균 밀도 값들은 약 $2,500 \text{ kg/m}^3$ (그림 8c에서 CJW로 표시된 파란색 polygon)와 $2,550 \text{ kg/m}^3$ (그림 8c에서 CJE로 표시된 초록색 polygon)로 각각 전체 평균 값 보다 높게 변경하였으며, 중앙 소분지는 원래 제시된 평균 값($2,450 \text{ kg/m}^3$)을 유지

하였다(그림 8c에서 CJC로 표시된 polygon). 이와 같은 밀도 값의 변동과 분지 내 더 현실화된 모델로 인해서 계산된 중력 값들은 Euler deconvolution 방식에 의해서 계산된 깊이 분포(그림 8c에서 E1-E3)와도 잘 부합하며, 서쪽과 동쪽 소분지에서의 개선된 모델로부터 계산된 중력 값들(그림 8a에서 오렌지색 파선)도 초기 모델(그림 8B)에서 계산된 중력 값들(그림 8a에서 파란색 파선)보다 관측된 중력 값들(그림 8a에서 검은색 실선)과 더 잘 일치하나 아직도 중앙 소분지 내에서는 관측된 중력 값과 계산된 중력 값 사이에 약 5 mGal 정도의 차이가 있는 것이 보

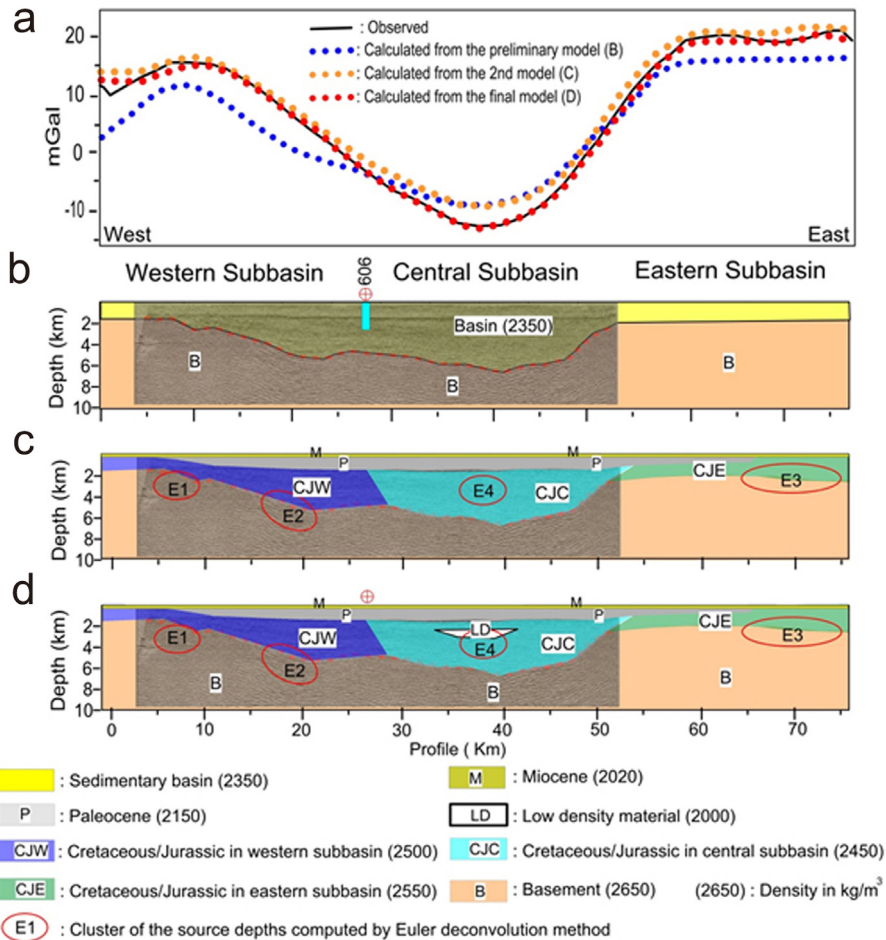


Fig. 8. A West-East model section along the seismic profile numbered WE01 (for the location refers to Figs. 4a and 7). (a) Measured and calculated gravity fields along the section are presented. (b) The preliminary model is modified with a sedimentary basin and a basement. (c) The 2nd model is modified by changing the petrophysical properties of the Cretaceous/Jurassic layer. (d) The final density model indicates the necessity of a very low-density structure (LD) at a depth of 3,000 m for the best fit between the measured (solid line in Fig. a) and computed anomalies (red dotted line in a).

인다. 이와 같은 중력 값의 차이를 개선하기 위해서는 중앙 소분지 내에 밀도가 주변에 비해서 현저하게 낮은 물질이 존재해야 하는데, 중앙 소분지 내 약 2,000-4,000 m 부근에 밀도가 약 $2,000 \text{ kg/m}^3$ 정도의 다각형 구역(그림 8d에서 LD로 표시된 곳)을 모델링하였더니, 위에서 언급한 5 mGal 정도의 중력 차이가 없어지고, 측정된 값(그림 8a에서 검은색 실선)과 계산된 값(그림 8a에서 빨간색 파선)이 거의 일치하는 결과를 얻었다. 이렇게 만들어진 약 $2,000 \text{ kg/m}^3$ 정도의 밀도가 뚜렷하게 낮은 물질 층은 분지 내에 존재하는 원유 혹은 가스를 포함한 탄화수소물(hydrocarbon reservoir)을 포함한 층 이외의 다른 층으로 추측할 수가 없다.

그림 9는 남-북 탄성파탐사 라인(SN03)을 따라서 실시된 모델 section을 보여준다(위치는 그림 4a와 그림 7을 참조). 이 라인에서의 부계이상 변화는 동쪽 소분지에서는 약 25 mGal의 매우 높은 값과, 중앙 소분지에서는 약 -5 mGal의 값을 특징으로 하고 있다(그림 9a에서 검은 색 실선). 위의 서-동 section(WE01)에서 언급한 모델링 방식을 이 남-북 section에서도 동일하게 적용하여, 서한만 퇴적분지를 세

층으로 모델링하였다. 최상부 층은 평균 밀도 약 $2,020 \text{ kg/m}^3$ 의 Miocene층, 중간층은 평균 밀도 약 $2,150 \text{ kg/m}^3$ 의 팔레오세 층, 하부 층은 백악기/쥐라기 혼합층(평균 밀도 약 $2,450 \text{ kg/m}^3$). 백악기/쥐라기 층의 하부 층은 밀도 $2,650 \text{ kg/m}^3$ 을 특징으로 하는 기반암(basement)으로 설정하였다. 또한 위의 서-동 section에서 적용한 것처럼, 각 분지마다 백악기/쥐라기 혼합층의 밀도를 변경하였다. 그 결과 동쪽 소분지의 평균 밀도 값들은 약 $2,550 \text{ kg/m}^3$ (그림 9b에서 CJE로 표시된 초록색 polygon)으로 전체 평균 값 보다 높게 변경하였으며, 중앙 소분지는 원래 제시된 평균 값($2,450 \text{ kg/m}^3$)을 유지하였다(그림 9b에서 CJC로 표시된 파란색 polygon). 이와 같은 모델링의 결과, 동쪽 소분지에서 보이는 매우 높은 부계이상 값은 약 8,000 m에서 약 2,000 m까지 급격하게 올라오는 기반암의 분포에 의한 중력 값의 변화라고 해석할 수 있다. 반대로 중앙 소분지에서 관측된 매우 낮은 부계이상 값은 이 지역의 퇴적분지가 약 8,000 m로 매우 깊은 이유에 의한 것으로 해석할 수 있다. 이 모델로 인해서 계산된 중력 값(그림 9a에서 파란색 파선)은 전체적으로 측정된 중력 값과 거의 일치하지

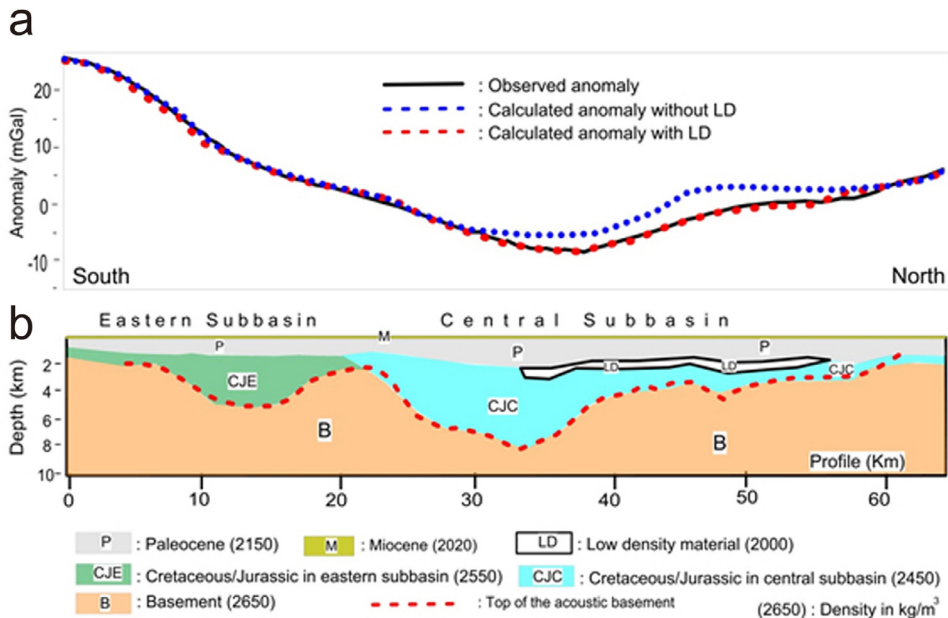


Fig. 9. A South-North model section along the seismic profile numbered SN03 (for the location refers to Figs. 4a and 7). (a) Measured and calculated gravity fields along the section are presented. (b) The final density model indicates necessity of a very low-density structure (LD) at a depth of 2500 m for the best fit between measured (solid line in Fig. a) and computed anomalies (red dotted line in a).

만, 중앙 소분지의 북쪽 지역은 약 5 mGal 정도의 차이를 여전히 보여주고 있다. 이런 차이를 없애기 위해서 위에서 언급한 밀도가 매우 낮은 물질이(그림 9b에서 LD로 표시된 곳) 이 지역에 존재한다는 것을 추측할 수 있으며, 밀도 약 $2,000 \text{ kg/m}^3$ 을 가진 model polygon을 약 3,000 m 깊이의 백악기/쥐라기 층에 추가한 결과 계산된 중력 값(그림 9a에서 빨간색 파선)이 측정된 중력 값과 더 잘 일치함을 볼 수가 있다. 이렇게 만들어진 밀도가 매우 낮은 물질은 분지 내에 존재하는 원유 혹은 가스를 포함한 탄화수소물(hydrocarbon reservoir) 일 것으로 추측할 수 있다.

그림 10은 남-북 탄성파탐사 라인(SN02)를 따라서 위에서 언급한 같은 모델링 방식에 의해서 실시된 section이다(위치는 그림 4a와 그림 7을 참조). 그 결과 서쪽 분지 내에서 보이는 중력 값의 변화는 남쪽에는 약 6,000 m의 두께를 가진 퇴적 분지의 깊이가 북쪽으로 갈수록 얕아지는 지각구조로 설명할 수가 있다. 또한 이와 같은 모델로 인해서 계산된 중력 값(그림 10a에서 빨간색 파선)은 이 라인에서 관측된 중력 값(그림 10a에서 검은색 실선)과 매우 일치하는 결과를 보여준다. 이는 서쪽 소분지에서는 위

에서 언급한 다른 section 들에서 존재하는 밀도가 낮은 저밀도 층이 없다는 것을 지시한다. 즉 서쪽 소분지에는 분지 내에 존재하는 원유 혹은 가스를 포함한 탄화수소물(hydrocarbon reservoir)이 없다는 것을 암시한다.

그림 11은 지금까지 실시했던 서한만 퇴적분지 모델링 결과 중에서 밀도가 특별히 낮은 물질의 3차원적인 분포와 중력차이 지도(TRIDENT 부계이상 값-계산된 퇴적분지의 중력 효과 값, 그림 3c 및 3d 참조)를 비교하였다: 중앙 소분지 남쪽 지역에 나타난 약 10 mGal의 중력 차이(그림 11에서 a로 표시된 지역)는 이 지역 분지 내에 약 3,000 m 깊이에 분포하고 있는 밀도가 매우 낮은 물질에 의해서 설명되어질 수 있다(그림 11에서 LD_A). 이렇게 모델로 인해서 밝혀진 저밀도 층의 총 면적은 약 250 km^2 정도이다. 더불어 중앙 소분지 북쪽 지역에 나타난 약 5 mGal의 다른 중력 차이(그림 11에서 b로 표시된 지역)는 이 지역 분지 내에 약 3,000 m 깊이에 분포하고 있는 밀도가 매우 낮은 또 다른 물질에 의해서 설명되어지며(그림 11에서 LD_B) 이 저밀도 층의 총 면적은 약 300 km^2 정도이다.

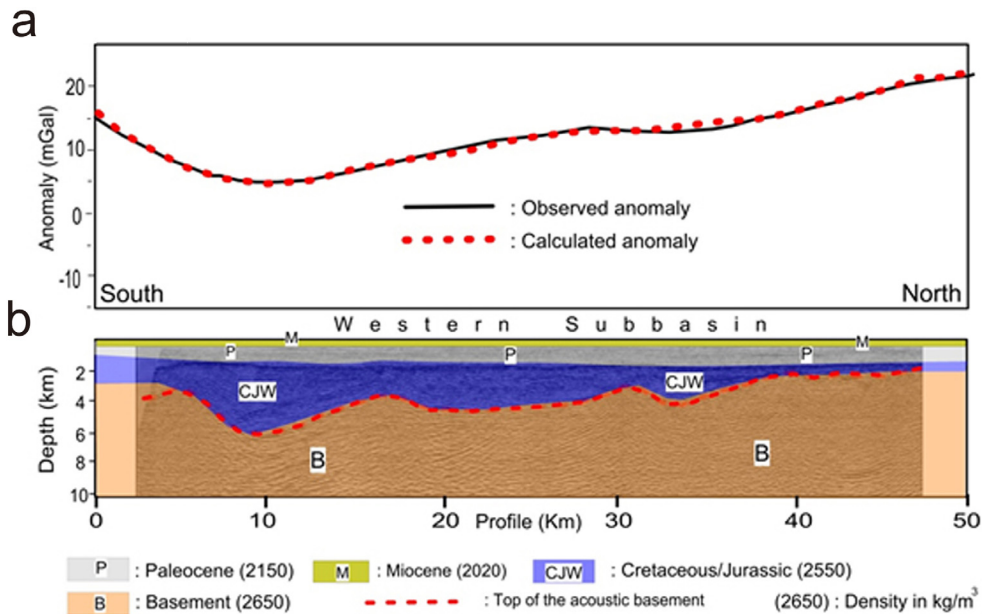


Fig. 10. A South-North model section along the seismic profile numbered SN02 (for the location refers to Figs. 4a and 7). (a) Measured and calculated gravity fields along the section are presented. (b) The final density model indicates the modified geometrical properties (e.g., layer boundary between the basin and the basement) and are supported well by the seismic velocity structures along the profile (red dotted line in Fig. b).

7. 해상 측정 부계이상 지도

최근에 노르웨이의 GECO-Prakla 회사가 1980년대 음향 기반암 조사를 서한만에서 실시할 때, 측량선 위해서 측량했던 중력장을 이용한 부계이상 지도(ship-based gravity field)를 입수하였다. 그림 1과 같이 만들어진 부계이상 지도를 약 100 m 격자 간격으로 디지털화한 후에 TRIDENT 위성 기반 부계이상 지도(그림 3d 및 그림 12a 참조)와 비교하여 보았다. 그 결과, 그림 12b에서 보이는 것처럼, 디지털화한 부계이상 분포는 위성 기반 부계이상 분포와 매우 유사하다는 것을 확인하였다. 좀 더 정확한 비교를 위해서, 해상측정 기반 부계이상에서 TRIDENT 위성 기반 부계이상을 제한 차이 값들의 분포(그림 12c)를 확인한 결과, 이 두 데이터는 표준 편차 약 4 mGal 안에서 95% 일치하는 것으로 나타났다. 이는 두 데이터가 신뢰범위 안에서 거의 같다는 것을 의미함과 동시에 본 연구를 위해서 사용했던 TRIDENT 위성 기반 부계이상 지도(그림 12a)가 매우 신뢰성이 높다는 것을 입증한다. 그림 11에서 언급한 저밀

도 지역들(그림 11과 그림 12d에서 LD-A와 LD-B)은 해상측정 기반 부계이상과 거의 차이가 없는 것으로 나타난다. 이는 이 두 지역에 존재한다고 예상한 저밀도 층들의 존재가 매우 신빙성이 있다는 것을 시사한다. 그러나 두 데이터의 차이가 뚜렷하게 나타나는 분지의 서쪽 지역(그림 12d에서 빨간색 파선으로 표시한 LD-C)은 해상에서 측정한 부계이상이 위성에서 측정한 중력 이상보다 뚜렷하게 낮다는 것을 보여준다. 이는 이 부분에 본 연구에서 확인할 수 없었던 또 다른 저밀도 층이 존재할 가능성이 있다는 것을 의미한다. 그러므로 서한만 연구 지역에서 저밀도 층의 분포를 좀 더 정확하게 파악하기 위해서는 최근에 획득한 해상 측정 중력 데이터를 활용한 분지 구조 해석 및 3차원 모델링이 필요하다고 판단된다.

8. 결 론

북한 서한만 분지 내 탄화수소의 존재 여부를 확인하기 위해, 인공위성 기반 TRIDENT 중력장 데이

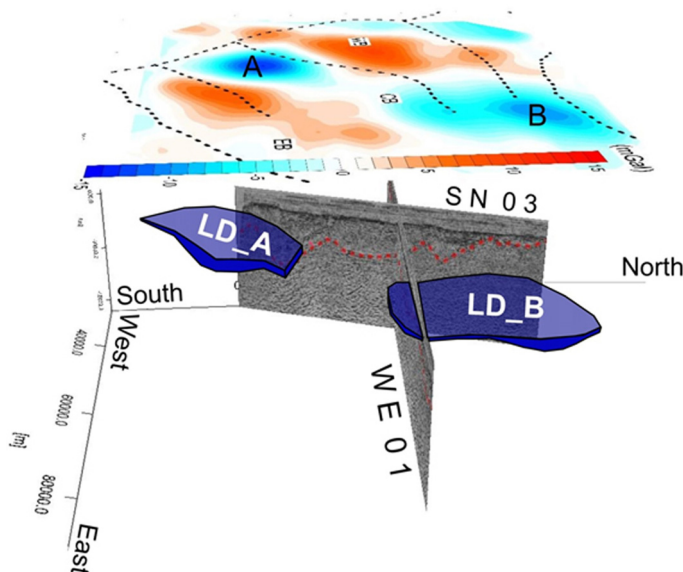


Fig. 11. A comparison between the gravity differential (Fig. 4a) and the spatial distribution of modeled low-density structures. As shown in Figs. 4A and 11, there are two prominent gravity differentials in the central subbasin, which are calculated by subtracting the effects of the sedimentary thicknesses (Fig. 3c) from the TRIDENT derived Bouguer anomalies (Fig. 3d). The cause of the negative differential revealed in the southern part of the central subbasin (marked A) can be explained by the spatial distribution of a low-density material (LD_A) with an average volume of about 250 km³. The other negative differential shown in the northern part of the central subbasin (marked B) is caused by another low-density material (LD_B) with an average volume of about 300 km³.

터를 이용한 3차원 지각구조 모델링을 실시하였다. 중력장 역산 방식의 해석과 모델링을 위해서 기존에 발표된 다양한 지질 및 지구물리 자료를 활용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다:

- 1) 서한만 연구 지역에서 인공위성 기반 TRIDENT 부계이상 데이터는 최소 약 -30 mGal에서 최대 40 mGal의 변화를 보인다. -5 mGal 보다 낮은 중력 값들은 일반적으로 중앙 소분지에서 관측되었으며, 이렇게 낮은 값들은 음향 기반암이 약 5,000 m 보다 깊은 곳들과 일반적으로 일치하는 것으로 분석되었다.
- 2) 퇴적분지와 그 밑에 위치하는 기반암(basement)의 평균 밀도는 각각 $2,350 \text{ kg/m}^3$ 와 $2,650 \text{ kg/m}^3$ 으로 파악되었다.
- 3) 동쪽 및 서쪽 소분지의 평균 깊이는 각각 5,000 m와 3,000 m로 해석되었다.
- 4) 곡률 분석(dip curvature) 방식에 의한 중력장

의 역산 분석 결과, 중앙 소분지는 동쪽과 서쪽 방향으로 단층 구조선에 의해서 닫혀진 형태로 있으나, 북쪽은 열려 있는 구조인 것을 확인하였으며, 중앙 소분지의 총 면적은 약 $1,000 \text{ km}^2$ 정도로 계산되었다.

- 5) 관측된 부계이상으로 부터 음향 기반암(acoustic basement)에 의해서 밝혀진 퇴적분지의 깊이 분포에 의한 중력효과 값들을 제거하여 두 중력 값들의 차이(gravity differential)를 분석한 결과, 중앙 소분지 내에 뚜렷하게 음의 차이가 나는 곳을 발견하였다. 3차원 지각 구조 모델링의 결과 이 두 지역에는 약 $2,000 \text{ kg/m}^3$ 정도의 밀도가 매우 낮은 저밀도 층에 의해서 이와 같은 중력 차이가 생긴다는 것으로 해석하였다. 이런 저밀도 층에는 주로 원유와 가스 등 밀도가 낮은 탄화수소가 포함되었다는 것을 지시한다.
- 6) Euler deconvolution 방식에 의해서 파악된 중

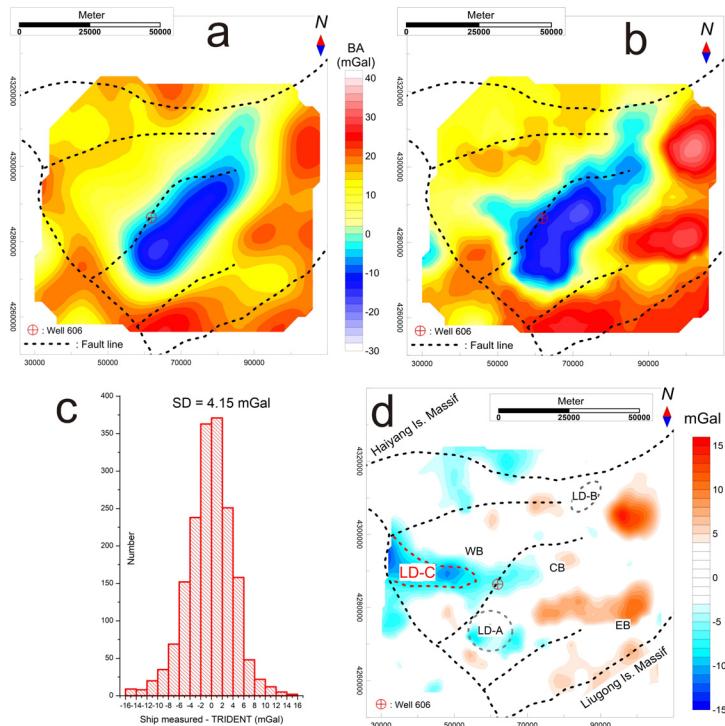


Fig. 12. The TRIDENT derived Bouguer anomaly map (a) is compared with the ship-based Bouguer anomaly map (b). The histogram of the gravity differential (c) shows that 95% of two dataset are consistent within a standard deviation of about 4 mGal. The spatial distribution of the gravity differentials is presented in Fig. d. An area (LD-C) characterized by prominent negative differentials inform us that there may be another low-density layer in this area that was not identified in this study.

력장의 원인이 되는 밀도 구조 깊이는 중앙 소분지 내에 존재한다고 추측되는 탄화수소의 깊이가 약 2,000-3,000 m 사이에 위치하고 있다는 것을 강하게 시사하고 있다.

7) 3차원 순산 모델링의 결과 중앙 소분지 남쪽과 북쪽에 지하 약 2000-3000 m 깊이에 존재하는 탄화수소의 양을 약 250 km³와 300 km³로 결정하였다.

8) 좀 더 정확한 저밀도 층의 분포 파악을 위해서는 해상 측정 중력장 데이터를 이용한 3차원 분지 구조 모델링이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 ‘기상·지진 See-At 기술개발연구(KMI 2017-9090)’의 지원으로 수행되었다.

REFERENCES

- Alvers, M.R., Götze, H.J., Barrio-Alvers, L., Schmidt, S., Lahmeyer, B. and Plonka, C., 2014, A novel warped-space-concept for interactive 3D-geometry-inversion to improve seismic imaging. *First Break*, 32(4), 81-87.
- Choi, S., Götze, H.J., Meyer, U. and DESIRE Group, 2011, 3-D density modelling of underground structures and spatial distribution of salt diapirism in the Dead Sea Basin. *Geophysical Journal International*, 184(3), 1131-1146, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.04939.x.
- Choi, S., Ryu, I. and Götze, H.J., 2015, Depth distribution of the sedimentary basin and Moho undulation in the Yellow Sea, NE Asia interpreted by using satellite-derived gravity field. *Geophysical Journal International*, 202, 41-53, doi:10.1093/gji/ggv108.
- Christensen, N.I. and Mooney, W.D., 1995, Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global review. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B6), 9761-9788.
- Götze, H.J., 1984, Über den Einsatz interaktiver Computergraphik im Rahmen 3-dimensionaler Interpretationstechniken in Gravimetrie und Magnetik. Ph.D. thesis, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Germany, 236 p (in German).
- Götze, H.J. and Lahmeyer, B., 1988, Application of three-dimensional interactive modeling in gravity magnetics. *Geophysics*, 53(8), 1096-1108.
- Götze, H.J. and Schmidt, S., 2002, Geophysical 3D modeling using GIS-Functions. 8th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, Terra Nostra, 87-92, ISSN:0946-8978.
- Massoud, M.S., Kinops, S.D., Scott, A.C. and Matthey, D., 1991, Oil source rock potential of the lacustrine Jurassic Sim Unju Formation, West Korea Bay Basin: part I: oil source rock correlation and environment of deposition. *Journal of Petroleum Geology*, 14(4), 365-385.
- Massoud, M.S., Scott, A.C., Matthey, D. and Keeley, M.L., 1993, Oil source rock potential of the lacustrine Jurassic Sim Unju Formation, West Korea Bay Basin: part II: nature of the organic and hydrocarbon-generation history. *Journal of Petroleum Geology*, 16(3), 265-284.
- 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. *Geophysical Prospecting*, 57(4), 507-516, doi:10.1111/j.1365-2478.2008.00780.x.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.T. and Somerton, I.W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55(1), 80-91.
- Roberts, A., 2001, Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. *First Break*, 19(2), 85-100.
- Ryu, I.C., Kim, B.Y., Kwak, W.J., Kim, G.H. and Park, S.J., 2000, Stratigraphic response to tectonic evolution of sedimentary basins in the Yellow Sea and adjacent seas. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 8, 1-43 (in Korean with English abstract).
- Sandwell, D.T. and Smith, W.H.F., 2009, Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B1), doi:10.1029/2008JB006008.
- Schmidt, S., Götze, H.J., Fichler, C. and Alvers, M., 2010, IGMAS+ a new 3D gravity and magnetic modeling software. In: Zipf, A., Behncke, K., Hillen, F. and Schefermeyer, J. (eds.), *GEO-INFORMATIK Die Welt im Netz*. Akademische Verlagsgesellschaft AKA GmbH, Heidelberg, Germany, 57-63, ISBN: 978-3-89838-335-6.
- Schmidt, S., Götze, H.J., Siehl, A. and Tasárová, Z., 2004, 3D gravity and magnetic modelling and integration of constraints using open GIS: the IGMAS software package. (in) *Proceedings of the ASEG 17th Geophysical Conference and Exhibition*, Sydney.
- Son, B. and Park, M., 2015, Petroleum system analysis of West Korea Bay Basin, North Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(5), 433-449 (in Korean with English abstract).
- Thomson, D.T., 1982, EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47(1), 31-37.

Received : November 20, 2018

Revised : December 14, 2018

Accepted : December 17, 2018