

한국 포항시 남구 해도동 일대에 분포하는 포항분지의 삼차원 지질 모델링

안해성^{1,2} · 박재용¹ · 김준모^{1,*} · 김정찬³

¹서울대학교 지구환경과학부

²현대건설 연구개발본부

³한국지질자원연구원 지구환경연구본부

요 약

한국 포항시 남구 해도동에 분포하는 포항분지 내 지층 및 암상 분포를 정량적으로 특성화하고 사실적으로 가시화하기 위하여 삼차원 지질 모델링 기술을 이용한 일련의 삼차원 지질 모델링을 수행하였다. 첫 번째로 지표 지질도가 반영된 수치 표고 모델 자료 및 지층 경계면 정보 시추 자료 8개를 사용하여 불연속 평활 보간법을 이용한 삼차원 구조 모델링을 수행하였다. 두 번째로 삼차원 구조 모델의 지층 경계면에 기초하여 삼차원 격자 모델링을 수행하였다. 세 번째로 삼차원 구조 모델과 격자 모델을 중합하는 삼차원 지층 모델링을 수행하였다. 네 번째로 암상 정보 시추 자료 6개를 사용하여 사암과 이암이 혼재되어 있는 제3기(신생기 마이오세) 해성 퇴적층(학림층, 흥해층, 이동층, 두호층)에 대해서만 삼차원 암상 모델링을 수행하였다. 우선 베리오그램 분석을 통하여 최적의 이론적 베리오그램을 선정하였으며, 이를 사용하여 조건부 시뮬레이션 기법의 일종인 순차 지시 시뮬레이션 및 절단 가우시안 시뮬레이션을 각각 수행하였다. 실제 대심도 시추공 자료와 마찬가지로 조건부 시뮬레이션 결과에서도 이암이 사암에 비해서 압도적으로 많이 분포하며, 사암이 수직 방향보다는 주로 수평 방향으로 우수한 연장성을 가진다. 또한 순차 지시 시뮬레이션 결과에 비해서 절단 가우시안 시뮬레이션 결과에서 사암의 분포 및 수평 방향의 연장성이 시추공 주변에서만 국한된다. 한편 절단 가우시안 시뮬레이션 결과에 비해서 순차 지시 시뮬레이션 결과가 실제 대심도 시추공 자료의 통계 분석 결과와 보다 더 유사하다. 따라서 전반적으로 순차 지시 시뮬레이션을 사용한 삼차원 암상 모델이 절단 가우시안 시뮬레이션을 사용한 삼차원 암상 모델보다 통계학적 측면에서 좀 더 높은 신뢰성을 나타낸다. 마지막으로 삼차원 암상 모델링에 사용된 6개의 대심도 시추공 중에서 영향력이 가장 큰 시추공을 파악하기 위해서 교차 검증 수행하였다. 그 결과는 시추공 PY-2가 본 연구에서 수행된 삼차원 암상 모델링에서 가장 영향력이 큼을 보여준다. 이는 시추공 PY-2가 삼차원 지질 모델링 영역 중앙에 가장 가깝게 위치하기 때문이다. 이와 같이 본 연구를 통해서 제시된 삼차원 지질 모델링 기술과 삼차원 지질 모델링 결과들은 향후 에너지자원 탐사, 지열 에너지 개발, 방사성 폐기물 지층 처분 및 이산화탄소 지중 저장 등의 목적으로 심부 지층을 정량적으로 특성화하고 사실적으로 가시화하는 데에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 포항분지, 특성화, 가시화, 삼차원 지질 모델링, 교차 검증

Hae-Sung Ahn, Jai-Yong Park, Jun-Mo Kim and Jeong-Chan Kim, 2015, Three-dimensional geologic modeling of the Pohang Basin distributed in Haedo-Dong, Nam-Gu, Pohang-Si, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 1, p. 21-36

ABSTRACT: A series of three-dimensional geologic modeling is performed using a three-dimensional geologic model to characterize quantitatively and visualize realistically distributions of geologic formations and lithofacies in the Pohang Basin distributed in Haedo-Dong, Nam-Gu, Pohang-Si, Korea. First, three-dimensional structural modeling is performed using the digital elevation model (DEM) data with the geologic map, the eight borehole data with the geologic formation boundaries, and the discrete smooth interpolation (DSI) method. Second, three-dimensional grid modeling is performed based on the geologic formation boundaries of the three-dimensional structural model. Third, the three-dimensional geologic formation modeling is performed by integrating the three-dimensional structural model and three-dimensional grid model. Fourth, three-dimensional lithofacies

* Corresponding author: +82-2-880-8190, E-mail: junmokim@snu.ac.kr

modeling is performed for the Tertiary (Neogene Miocene) marine sediments (Hakrim Formation, Hunghae Formation, Idong Formation, Duho Formation) using the six borehole data with the lithofacies. An optimal theoretical variogram is selected through the variogram analyses, and the sequential indicator simulation (SIS) and truncated Gaussian simulation (TGS), which are kinds of conditional simulations, are then performed respectively. The results of the conditional simulations show that mudstone is overwhelmingly distributed compared with sandstone similarly to the actual deep borehole data, and sandstone has excellent extension (connectivity) in the horizontal direction rather than the vertical direction. In addition, the results of the truncated Gaussian simulation show that the distribution of sandstone and its extension in the horizontal direction is localized near the boreholes compared with those of the sequential indicator simulation. On the other hand, the results of the sequential indicator simulation are more similar to the statistical analyses results of the actual deep borehole data compared with those of the truncated Gaussian simulation. As a result, the three-dimensional lithofacies model using the sequential indicator simulation show higher reliability than that using the truncated Gaussian simulation in terms of statistics. Finally, cross validation is performed to identify the most influential borehole among the six deep boreholes. Its results show that the borehole PY-2 is most influential in the three-dimensional lithofacies modeling performed in this study. This arises because the borehole PY-2 is located closest at the center of the three-dimensional geologic modeling domain. The three-dimensional geologic modeling technology presented in this study and its results can be usefully applied in quantitative characterization and realistic visualization of deep geologic formations for energy and resources exploration, geothermal energy development, geologic radioactive waste disposal, and geologic carbon dioxide storage.

Key words: Pohang Basin, characterization, visualization, three-dimensional geologic modeling, cross validation

(Hae-Sung Ahn, Jai-Yong Park and Jun-Mo Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Republic of Korea; Hae-Sung Ahn, Research and Development Division, Hyundai Engineering & Construction, Yongin 446-912, Republic of Korea; Jeong-Chan Kim, Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea)

1. 서 론

최근 에너지자원 탐사, 지열 에너지 개발, 방사성 폐기물 지층 처분 그리고 이산화탄소 지중 저장 등으로 인해 심부 지층에 대한 필요성과 관심이 증대되고 있다. 이러한 심부 지층에 대한 조사 및 연구에서는 지층 분포, 암상 및 암반 물성을 정확하게 파악하는 것이 매우 중요한 과제이다. 따라서 이를 파악하는 데 가장 정확한 방법인 시추 조사에 주로 의존하게 된다. 그러나 비용, 인력 및 시간 등의 문제로 충분한 시추가 이루어지지 못하는 경우가 많이 발생하기 때문에 심부 지질 자료 획득에 한계성을 가진다(Koo *et al.*, 2006). 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서 지구통계학적 기법을 통해 심부 지질을 정량적으로 특성화하고 사실적으로 가시화하는 삼차원 지질 모델링(three-dimensional geologic modeling)이 널리 이루어지고 있다.

삼차원 지질 모델은 위성 사진, 지표 지질도 및 수치 지형도와 같은 지리 정보 시스템(geographic information system, GIS)과 지층 분포, 암상 및 암반 물성을 포함하는 물리 탐사 및 시추 자료 등을 종합적으로 분석하여 수립된다. 이러한 삼차원 지질 모델링

은 크게 네 단계로 구분된다. 첫째, 점이나 선 그리고 삼각망(triangulated surface) 등의 기본적인 자료 구조를 이용하여 지층 경계와 단층 등의 지질 구조 상향을 삼차원으로 표현하고 분석하는 과정을 삼차원 구조 모델링(three-dimensional structural modeling)이라고 한다. 이는 복잡한 층서 분석이나 지질 구조 해석 등이 가능하다. 둘째, 삼차원 구조 모델을 기반으로 육면체 형태의 격자(grid) 구조를 이용하여 체적(부피)을 가지는 공간적 분포를 완성하는 과정을 삼차원 격자 모델링(three-dimensional grid modeling)이라고 한다. 셋째, 삼차원 구조 모델과 삼차원 격자 모델을 중합한 모델에 지형이나 지층 특성 등을 반영하여 삼차원으로 가시화하는 과정을 삼차원 지층 모델링(three-dimensional geologic formation modeling)이라고 한다. 그리고 마지막으로 삼차원 지층 모델 내 암상과 공극률 및 고유투수계수와 같은 암반 물성의 공간적 분포를 추정하고 분석하는 과정을 삼차원 암상 모델링(three-dimensional lithofacies modeling) 및 삼차원 물성 모델링(three-dimensional property modeling)이라고 한다. 이 모든 과정이 삼차원 지질 모델링에 해당되며, 심부 지층을 대상으로 하는 연구

는 이러한 삼차원 지질 모델링 기술을 기반으로 한 다양한 연구들이 선행되어야만 한다.

최근 지구통계학적 기법을 사용하여 삼차원 지질 모델링에 대한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 먼저 퇴적분지의 구조적인 특성을 분석하기 위해 삼차원 구조 모델링이 수행된 바 있다(예, Guyonnet-Benaïze *et al.*, 2010; Vilain, 2010). 이 연구들은 시추공, 위성 사진, 지표 지질도, 그리고 수치 지형도 등을 일차적으로 분석하고 지층 및 지질 구조에 대해서 불연속 평활 보간법(discrete smooth interpolation, DSI method) (Mallet, 1989)을 이용한 삼차원 구조 모델링을 수행하였다. 그리고 지형 및 지층 특성 등을 반영하는 삼차원 격자 및 지층 모델링이 수행된 바 있다(예, Gwak and Lee, 2001; Kaufmann and Martin, 2008; Zanchi *et al.*, 2009). 이 연구들은 삼차원 격자 및 지층 모델링을 수행하기 위한 방법론을 제시하였다. 또한 광체 품위 및 지층에 대한 공간적 분포를 예측하고자 삼차원 물성 모델링이 수행된 바 있다(예, Kim and Park, 2009; Kim *et al.*, 2010; Wang and Huang, 2012). 이 연구는 보간(내삽)법(interpolation)인 역거리 가중(inverse distance weighting, IDW) (Shepard, 1968) 및 크리깅(kriging) (Matheron, 1963) 보간법 알고리즘을 사용하였다. 한편 보간법은 동일한 조건에 대하여 결정론적(deterministic)인 하나의 결과만을 예측하며, 예측의 불확실성에 대해서 다루지 못하는 단점이 있다. 따라서 이러한 보간법의 단점을 보완하기 위해서 추계론적(stochastic) 기법인 조건부 시뮬레이션(conditional simulation)이 제안되었다. 지금까지 지구통계학에서 이용되어 온 대표적인 조건부 시뮬레이션 기법으로는 순차 가우시안 시뮬레이션(sequential Gaussian simulation, SGS), 순차 지시 시뮬레이션(sequential indicator simulation, SIS), 절단 가우시안 시뮬레이션(truncated Gaussian simulation, TGS) 및 절단 지시 시뮬레이션(truncated indicator simulation, TIS)을 들 수 있다(Alabert, 1987; Matheron *et al.*, 1987; Deutsch and Journel, 1992). 이러한 조건부 시뮬레이션은 지층의 암상 및 암반 물성 분포를 예측하고 불확실성을 정량적으로 평가하기 위하여 수행된 바 있다(예, Koo and Jeon, 2005; de Almeida, 2010; Jeong and Jang, 2011). 한편 아직까지 국내에서는 삼차원 구조, 격자, 지층 그리고 암상 및 물성 모델링을 종합적으로 수행하여 삼차원 지질 모델을 수립한 연구는 아직 시도된 바가 없다.

본 연구의 목적은 삼차원 지질 모델링 기술을 이용하여 연구 지역에 분포하는 한국 포항분지 내 지층 및 암상 분포를 정량적으로 특성화하고 사실적으로 가시화하는 것이다. 이를 달성하기 위하여 먼저 연구 지역 내 수치 지형도 및 해도, 지표 지질도 및 대심도 시추 주상도와 같은 원시 자료를 수집하여 분석하였으며, 이를 사용하여 삼차원 지질 모델링을 위한 기본적인 입력 자료를 생성하였다. 생성된 입력 자료는 수치 표고 모델 자료, 지표 지질도가 반영된 수치 표고 모델 자료, 지층 경계면 정보 시추 자료 및 암상 정보 시추 자료이다. 그리고 이러한 입력 자료를 사용하여 삼차원 구조 모델링, 삼차원 격자 모델링, 삼차원 지층 모델링 및 삼차원 암상 모델링을 순차적으로 수행하였다.

2. 지구통계학

2.1 불연속 평활 보간법

불연속 평활 보간법(discrete smooth interpolation, DSI method)은 이산 모델에 대해서 주어진 인접한 값으로부터 가중치를 사용하여 새로운 지점에 미지 값을 결정하는 방법이며, 연속면의 특성을 가지는 공간 분포를 가시화하기 위해서 사용되는 공간 보간법 중 하나이다. 특히 이 방법은 선형 조합 및 선형 가중치를 통해 새로운 곳의 미지 값을 추정하는 역거리 가중(inverse distance weighting, IDW)이나 크리깅(kriging) 보간법과는 달리 주어진 인접한 값을 연결하는 삼각망을 생성하고 생성된 삼각망 내 무한한 점을 보간(내삽)하여 최소 단위의 삼각망을 생성하는 방법이다(Mallet, 1989).

2.2 베리오그램 분석

베리오그램(variogram)은 주어진 자료들의 공간적 상관 관계와 연속성을 나타내는 척도이다. 지구통계학적 기법을 이용하여 미조사 구간의 자료 값을 예측하기 위해서는 베리오그램이 중요한 역할을 한다. 그리고 계산의 편의상 또는 정통적으로 공간적 상관 관계와 연속성을 분석하기 위해 반베리오그램(semi-variogram)을 많이 사용한다. 따라서 반베리오그램을 구하기 위해서는 주어진 자료로부터 계산된 실험적 베리오그램(experimental variogram)을 가장 잘 대표할 수 있는 최적의 이론적 베리오그램(theoretical variogram)을 선정해야 한다. 이론적 베리오그램 모

텔로는 구형 모델(spherical model), 가우시안 모델(Gaussian model) 및 지수 모델(exponential model) 등이 가장 많이 사용된다. 그리고 선정된 모델은 너깃(nugget), 문턱(sill) 및 상관거리(range)를 이용하여 정의할 수 있다(Journel and Huijbregts, 1978; Cressie, 1993).

2.3 조건부 시물레이션

2.3.1 순차 지시 시물레이션

순차 지시 시물레이션(sequential indicator simulation, SIS)은 추계론적 결과를 여러 번 생성할 수 있는 조건부 시물레이션(conditional simulation) 기법 중 하나로 지시 변환(indicator transform)을 통해 변환된 값을 사용하여 베리오그램 분석과 크리깅을 통해 지시 변수 값(indicator variable)을 예측하고 이를 다시 주어진 자료 값으로 변환하여 본래의 자료 값을 예측하는 기법이다. 먼저 지시 변환이란 지시 경계 값(indicator threshold)을 이용하여 주어진 자료를 지시 변수 값으로 변환하는 것을 말한다. 다음으로 지시 변수 값을 이용한 베리오그램 분석이 이루어진다. 한편 순차 지시 시물레이션의 경우 특정한 분포를 따르는 전체 조건이 없기 때문에 지시 크리깅(indicator kriging)을 이용해서 구한 예측치를 누적 확률로 하는 조건부 누적 분포 함수를 얻게 된다. 이렇게 생성된 조건부 누적 분포 함수로부터 난수를 발생시켜 하나의 예측 값을 생성하고 생성된 예측 값을 다시 주어진 자료 값으로 가정해서 전체 공간에 대해 자료 생성을 완료한다(Alabert, 1987).

2.3.2 절단 가우시안 시물레이션

절단 가우시안 시물레이션(truncated Gaussian simulation, TGS)은 추계론적 결과를 여러 번 생성할 수 있는 조건부 시물레이션(conditional simulation) 기법 중 하나로 가우시안 랜덤 필드(Gaussian random field, GRF)에 기반하여 주어진 값의 가우시안 확률 밀도 함수(Gaussian probability density function, PDF)를 생성하고 절단 법칙(truncated law)을 따르는 지시 변수 값(indicator variable)을 분류하여 전체 공간에 대해 예측 값을 생성하는 기법이다(Matheron *et al.*, 1987).

3. 연구 지역

연구 지역은 경상북도 포항시 남구에 해당하는

지역이며, 동해안에 접해 있는 항구도시로서 경·위도 상 동경 129° 15'~129° 25'과 북위 36° 00'~36° 10'에 위치하고 있다(그림 1). 포항분지가 대부분을 차지하는 연구 지역의 지질은 백악기 석영반암(quartz porphyry) 및 석영조면암(liparite)을 기반암으로 하여 하부로부터 천북역암층, 학림층, 흥해층, 이동층, 두호층 및 여남층과 같은 제3기(신신생기 마이오세) 연일층군, 제3기 현무암 및 제4기 충적층으로 구성되어 있다(Um *et al.*, 1964) (그림 1). 석영조면암은 결정질 응회암으로서 고규산형 유문암(high-silica rhyolite)으로 분류된다(Kim, 1990). 연일층군의 지층들은 최하부에 육성 기원의 쇄설성 퇴적암을 일부 포함하나 주로 해성 기원의 쇄설성 퇴적암으로서 이암, 사암 및 역암으로 이루어져 있으며, 대부분의 경우 고화도가 낮아서 반고결층이나 미고결층이다(Um *et al.*, 1964). 연일층군의 전체 층후는 1,000 m 이상이다(Hwang, 1993; Sohn *et al.*, 2001; Sohn and Son, 2004). 그리고 연일층군의 지층들은 대략 남북 방향의 주향과 동쪽으로 5~10°의 경사를 이루며 분포한다(Lee *et al.*, 2009). 현무암은 연일층군의 지층들이 퇴적되는 동안에 일부 지역에서 이들을 관입하였다(Lee *et al.*, 1992). 충적층은 주로 자갈과 모래로 구성되어 있다. 한편 연구 지역에서는 단층 구조가 관찰되지 않는다. 이러한 포항분지는 최근에 지열 에너지 개발, 이산화탄소 지중 저장 등으로 주목받고 있는 퇴적분지이다.

4. 삼차원 지질 모델링 개요

4.1 삼차원 지질 모델

본 연구에서 삼차원 지질 모델링에 사용된 프로그램은 GOCAD Research Group에서 개발한 GOCAD (Geological Object Computer Aided Design) (Paradigm, 2012)로서 지질 구조 해석이나 격자 모델 생성 및 물성 분포 시물레이션 그리고 탄성과 탐사 자료 해석 등 다양한 기능을 제공하는 삼차원 지질 모델링 소프트웨어이다. 이 소프트웨어는 자원 탐사, 에너지 개발, 방사성 폐기물 지중 처분 그리고 이산화탄소 지중 저장 등의 매우 다양한 분야에서 활용되고 있다.

4.2 삼차원 지질 모델링 영역

심부 지층을 대상으로 하는 삼차원 지질 모델링 연

구는 지층 분포나 암상 및 암반 물성을 정확하게 추정하는 것이 매우 중요하기 때문에 이를 파악하는 데 가장 정확한 방법인 시추 조사에 의존하게 된다. 따라서 삼차원 지질 모델링 영역(geologic modeling domain)을 설정하기 위해서 먼저 포항분지 내 조사된 대심도 시추 자료를 수집하였다. 수집된 대심도 시추 자료는 1960~70년대 포항분지 퇴적층 내 석유 부존 가능성 평가를 목적으로 수행된 제1차 석유탐사사업(1964년~1968년)과 제2차 석유탐사사업(1975년~1977년)(Korea National Oil Corporation, 2005)에서 시추한 각각 6개의 대심도 시추공(201, 301, 302, PY-1, PY-2, PY-3)(Lee *et al.*, 1967, 1968; Lee, 1968)과 12개의 대심도 시추공(A, B, C, D, E, F, G, H, DS-1, DS-2, DS-3, DS-4)(Cho, 1984; Han *et al.*, 1986, 1987)(Hong, 1991; Lee and Song, 1995; Yi and Yun, 1995; Lee *et al.*, 1997) 및 2000년대 포항시 흥해읍 일대의 암반 내 부존하는 심부 지열 탐사를 목적으로 수행된 심부지열에너지개발사업(2003년~2006년)에서 시추한 4개

의 대심도 시추공(BH-1, BH-2, BH-3, BH-4)(Song *et al.*, 2003, 2004, 2005, 2006)이다(그림 1). 이러한 총 22개의 대심도 시추공 중에서 지표면으로부터 연일층군의 심도가 남쪽에 위치하는 시추공 B에서 875 m로 최대이며, 북쪽에 위치하는 시추공 201에서 110 m로 최소이다(그림 2). 본 연구에서는 신뢰도 높은 삼차원 지질 모델을 수립하기 위하여 상기한 총 22개의 대심도 시추공 중에서 밀집되어 있는 8개의 대심도 시추공(A, B, C, DS-1, DS-2, PY-2, 301, 302)을 선정하여 삼차원 지질 모델링에 사용하였다. 따라서 삼차원 지질 모델링 영역은 이러한 8개의 대심도 시추공을 포함하는 포항시 남구 해동동 일대로서 경·위도 상 동경 129° 21'~129° 22'과 북위 36° 00'~36° 01'에 위치하며, 동서 1,200 m, 남북 2,200 m 그리고 해수면 기준 심도 2,176 m에 해당한다(그림 1).

4.3 삼차원 지질 모델링 작업흐름도

본 연구를 통해서 수행하고자 하는 삼차원 지질

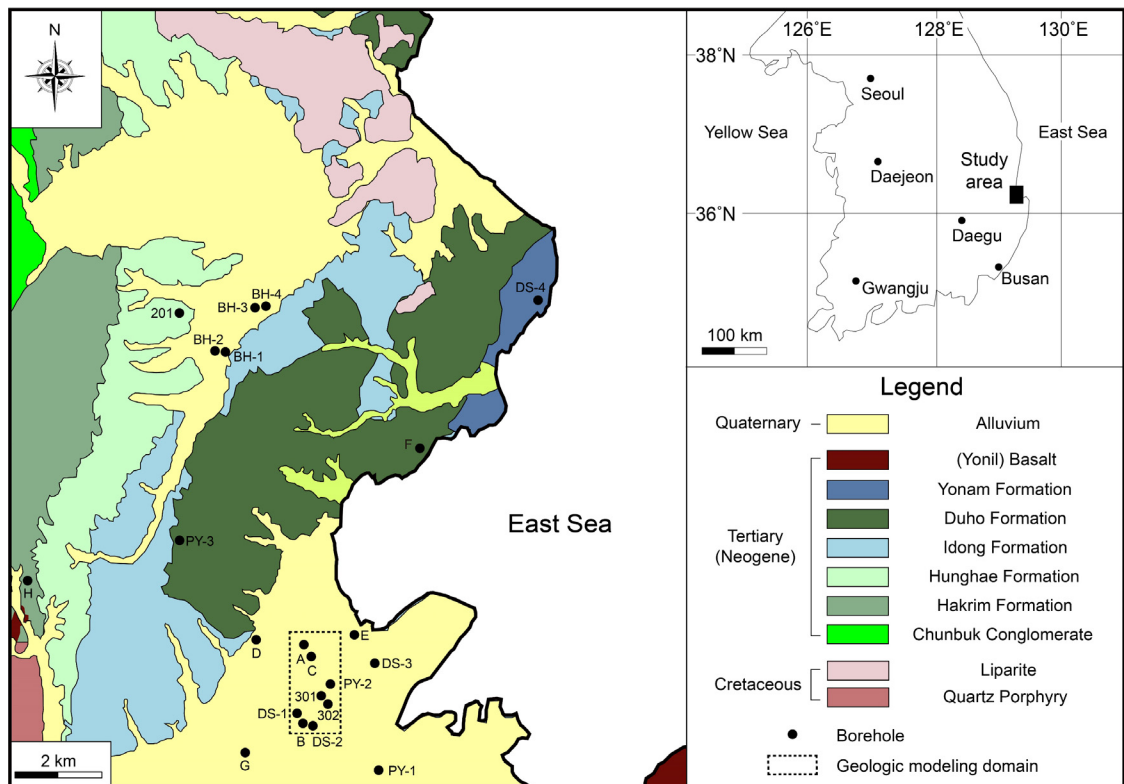


Fig. 1. Location and geologic maps of the Pohang Basin with 22 deep boreholes and geologic modeling domain. The geologic map is modified from Um *et al.* (1964).

모델링의 개념을 좀 더 명확하게 정립하기 위해서 작업흐름도로 방법론을 정의하였다(그림 3). 먼저 연구 지역 내 수치 지형도 및 해도(그림 3a), 지표 지질도(그림 3b) 및 대심도 시추 주상도 8개(A, B, C, DS-1, DS-2, PY-2, 301, 302) (그림 3c)와 같은 원시 자료를 수집하여 분석하였으며, 이를 사용하여 삼차

원 지질 모델링을 위한 기본적인 입력 자료를 생성 하였다. 생성된 입력 자료는 수치 표고 모델 자료(그림 3d), 지표 지질도가 반영된 수치 표고 모델 자료(그림 3e), 지층 경계면 정보 시추 자료 8개(그림 3f) 및 암상 정보 시추 자료 6개(그림 3g)이다. 암상 정보 시추 자료가 6개인 이유는 시추공 DS-1 및 DS-2에

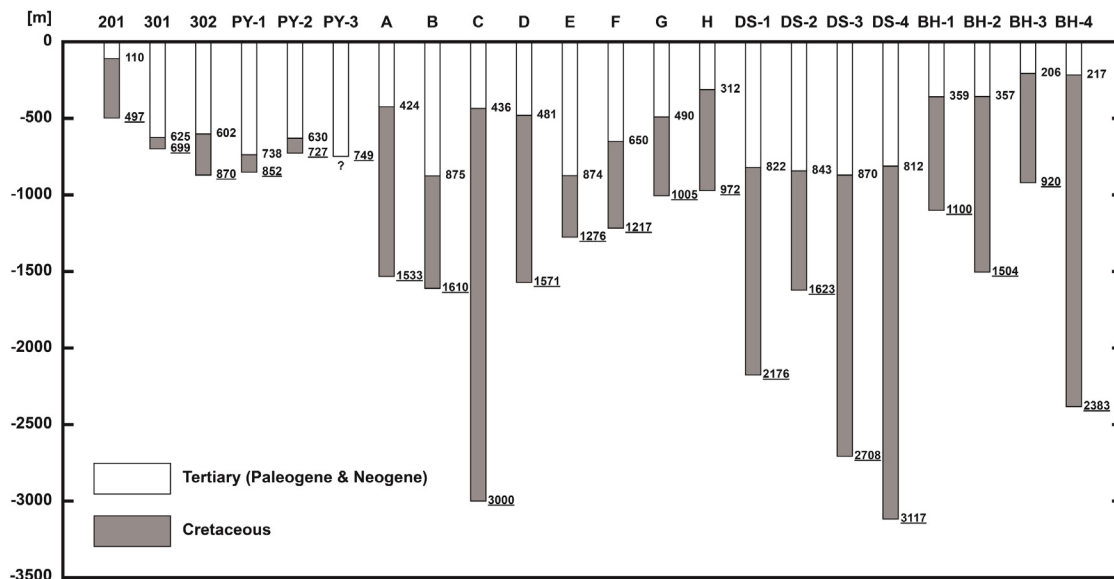


Fig. 2. Stratigraphic cross-sections of 22 deep boreholes in the Pohang Basin. The numbers without underlines indicate the Cretaceous and Tertiary (K-T) geologic boundaries, while the numbers with underlines indicate the drilling depths. The borehole PY-3 does not have the K-T boundary.

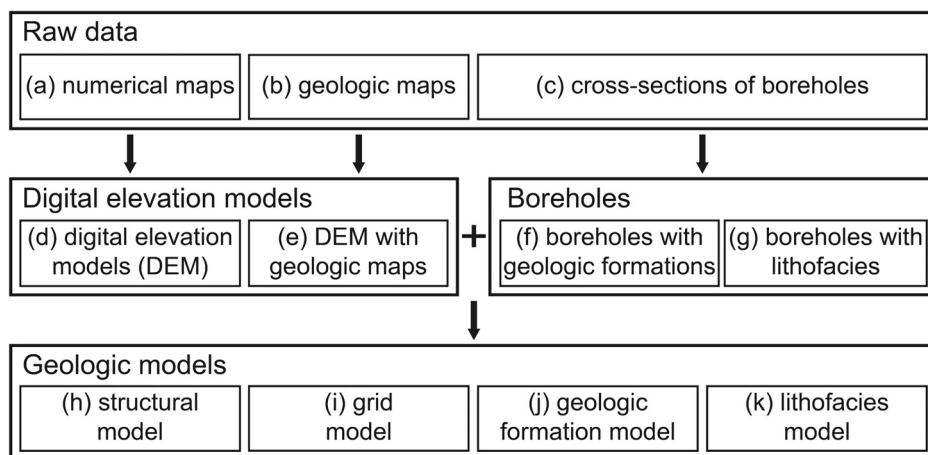


Fig. 3. Work flow chart of three-dimensional geologic modeling through (a) numerical maps, (b) geologic maps, (c) cross-sections of boreholes, (d) digital elevation models (DEM), (e) digital elevation models (DEM) with geologic maps, (f) boreholes with geologic formations, (g) boreholes with lithofacies, (h) structural model, (i) grid model, (j) geologic formation model, and (k) lithofacies model.

서는 암상에 대한 정보가 존재하지 않기 때문이다. 그리고 이러한 입력 자료를 사용하여 삼차원 구조 모델링(그림 3h), 삼차원 격자 모델링(그림 3i), 삼차원 지층 모델링(그림 3j) 및 삼차원 암상 모델링(그림 3k)을 순차적으로 수행하였다.

4.4 원시 자료 분석

원시 자료 분석은 상기한 수치 지형도, 해도, 지표 지질도 및 대심도 시추공 8개(A, B, C, DS-1, DS-2, PY-2, 301, 302) 자료(그림 3a, 3b, 3c)에 대해 수행되었다. 분석 결과 삼차원 지질 모델링 영역 내 지층은 백악기 화성암층, 제3기 육성퇴적층과 해성퇴적층 및 제4기 충적층인 것으로 확인되었다. 이때 백악기 화성암층은 심성암층 및 화산암층으로, 제3기 육성퇴적층은 천북역암층으로, 제3기 해성퇴적층은 하부로 부터 학림층, 홍해층, 이동층 및 두호층으로 구분되는 것으로 확인되었다. 그리고 삼차원 지질 모델링 영역 내 암상으로는 백악기 화성암층에서는 화강암과 응회암, 제3기 육성퇴적층에서는 역암, 제3기 해성퇴적층에서는 사암과 이암이 교호하며 분포하는 것으로 확인되었다.

5. 삼차원 지질 모델링 결과

5.1 삼차원 구조 모델링

삼차원 구조 모델링에는 앞서 수행된 원시 자료 분석을 통해 얻은 지표 지질도가 반영된 수치 표고 모델 자료(그림 3d, 3e) 및 지층 경계면 정보 시추 자료 8개(그림 3f)가 사용되었다. 먼저 지표 지질도가 반영된 수치 표고 모델 자료는 지표면에서의 지층 경계면

으로 사용되었고 지층 경계면 정보 시추 자료는 지하에서의 지층 경계면으로 사용되었다. 지층 경계면 정보 시추 자료 8개를 정리한 표 1에서 보다시피 대심도 시추공 8개(A, B, C, DS-1, DS-2, PY-2, 301, 302) 각각에서 8개의 모든 지층(심성암층, 화산암층, 육성퇴적층, 학림층, 홍해층, 이동층, 두호층, 충적층)의 경계면 정보가 존재하지는 않는다. 즉 심성암층 경계면 정보는 시추공 PY-2, 301, 302에서, 육성퇴적층 경계면 정보는 시추공 A, C, PY-2, 301, 302에서, 학림층 경계면 정보는 시추공 A, B, C, DS-1, DS-2에서, 홍해층 경계면 정보는 시추공 A, B, C, DS-1, DS-2에서, 그리고 이동층 경계면 정보는 시추공 A, C, DS-1, DS-2에서 존재하지 않는다. 이와 같이 8개의 모든 지층의 경계면 정보가 존재하지 않는 대심도 시추공 8개로부터 삼차원 지질 모델링 영역 전체에서 8개의 모든 지층의 연속적인 경계면 분포를 예측하기 위하여 불연속 평할 보간법을 이용하여 삼차원 구조 모델링을 수행하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다. 그림에서 보다시피 삼차원 지질 모델링 영역 전체에서 지표면을 기준으로 심성암층 상부면 심도는 1,174~1,706 m, 화산암층 상부면 심도는 408~941 m, 육성퇴적층 상부면 심도는 674~706 m, 학림층 상부면 심도는 589~612 m, 홍해층 상부면 심도는 412~472 m, 이동층 상부면 심도는 78~322 m, 두호층 상부면 심도는 31~50 m, 그리고 충적층 상부면(본 연구에서는 지표면) 심도는 0 m이다.

5.2 삼차원 격자 모델링

상기한 삼차원 구조 모델의 지층 경계면에 기초하여 삼차원 격자 모델링을 수행하였으며, 그 결과

Table 1. Depths to upper surfaces of geologic formations from ground surface at 8 deep boreholes.

Geologic formation	Borehole							
	A [m]	B [m]	C [m]	DS-1 [m]	DS-2 [m]	PY-2 [m]	301 [m]	302 [m]
Alluvium	0	0	0	0	0	0	0	0
Duho Formation	50	50	50	50	50	34	47	47
Idong Formation	-	120	-	-	-	293	264	270
Hunghae Formation	-	-	-	-	-	459	430	436
Hakrim Formation	-	-	-	-	-	610	590	590
Continental sediments	-	690	-	680	700	-	-	-
Volcanic rocks	424	875	436	822	843	630	625	602
Plutonic rocks	1,182	1,354	1,209	1,409	1,518	-	-	-

Note: The blanks with lines indicate either the absence of the geologic formations or the unknown depths to their upper surfaces.

는 그림 5와 같다. 그림에서 보다시피 삼차원 지질 모델링 영역 전체는 총 2,046,000개의 육면체 격자로 이산화되었으며, 생성된 삼차원 격자 모델은 동서 방향으로 60개, 남북 방향으로 110개, 수직 방향으로 310개의 육면체 격자로 구성되어 있다. 특히 삼차원 구조 모델링을 통해 생성된 지층 상부면 중 화산암층 상부면과 접하는 육성퇴적층, 학림층 및 홍해층 상부면 주변에서 육면체 격자가 세밀하게 제작되었으며, 이동층 및 두호층 상부면의 간격이 좁아지는 부분에서도 육면체 격자가 세밀하게 제작되었다. 그리고 생성된 삼차원 격자 모델은 삼차원 구조

모델링을 통해 수립된 8개의 지층 상부면을 경계로 8개의 지층 구역(block)으로 분리되어 있다. 한편 삼차원 지질 모델링 영역 내에서 이들 8개의 지층 구역별 격자수를 표 2에 정리하였다.

5.3 삼차원 지층 모델링

상기한 삼차원 구조 모델과 격자 모델을 중합하는 삼차원 지층 모델링을 수행하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 그림에서 보다시피 생성된 삼차원 지층 모델은 하부로부터 백악기 심성암층(그림 6a)과 화산암층(그림 6b), 이들 기반암을 피복하는 제3기 육성퇴적

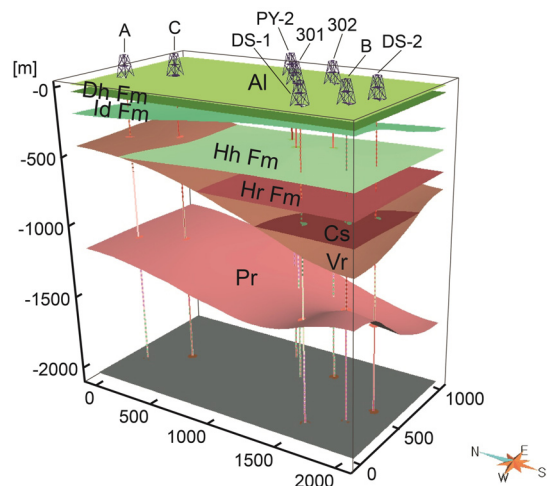


Fig. 4. Three-dimensional structural model of the study area with upper surfaces of plutonic rocks (Pr), volcanic rocks (Vr), continental sediments (Cs), Hakrim Formation (Hr Fm), Hunghae Formation (Hh Fm), Idong Formation (Id Fm), Duho Formation (Dh Fm), and alluvium (Al) using discrete smooth interpolation (DSI).

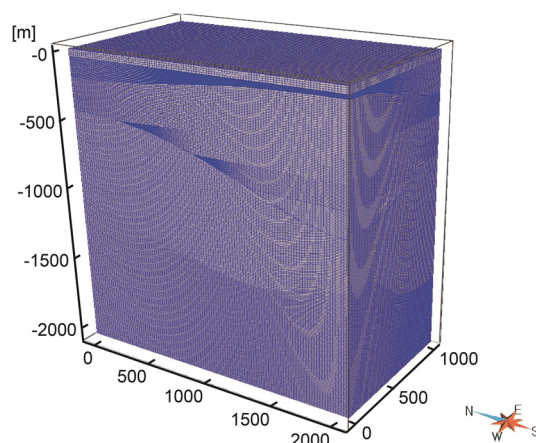


Fig. 5. Three-dimensional grid model of the study area with plutonic rocks (Pr), volcanic rocks (Vr), continental sediments (Cs), Hakrim Formation (Hr Fm), Hunghae Formation (Hh Fm), Idong Formation (Id Fm), Duho Formation (Dh Fm), and alluvium (Al).

Table 2. Number of grids, volumes, and volume fractions of geologic formations.

Geologic formation	Number of grids	Volume [m^3]	Volume fraction [%]
Alluvium	26,400	1.2529×10^8	2.18
Duho Formation	184,800	4.2485×10^8	7.38
Idong Formation	211,200	6.0369×10^8	10.48
Hunghae Formation	112,200	2.7156×10^8	4.71
Hakrim Formation	118,800	1.3463×10^8	2.34
Continental sediments	118,800	4.0169×10^7	0.70
Volcanic rocks	620,400	1.9806×10^9	34.38
Plutonic rocks	653,400	2.1793×10^9	37.83
Sum	2,046,000	5.7601×10^9	100.00

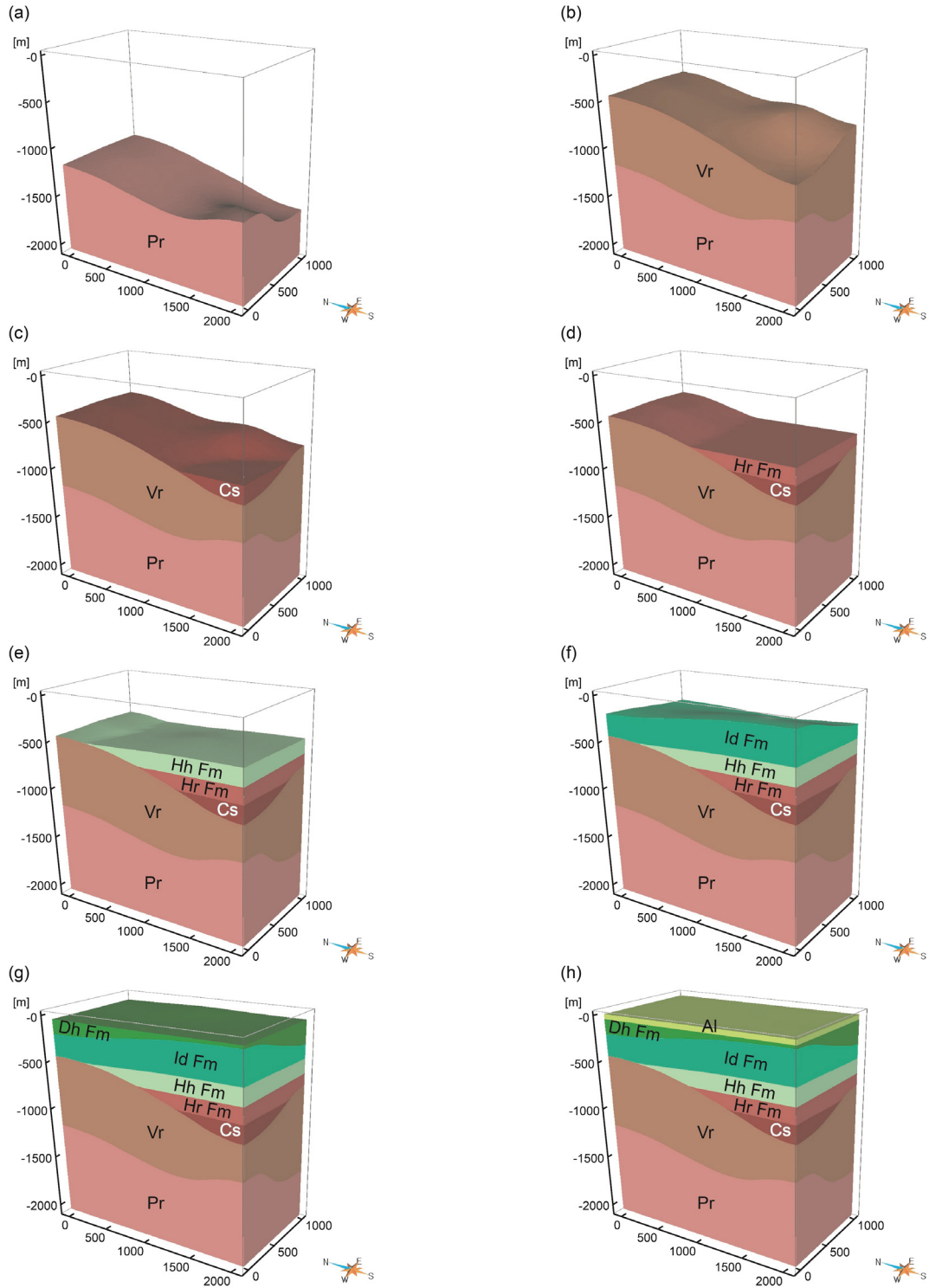


Fig. 6. Three-dimensional geologic formation models of the study area with (a) plutonic rocks (Pr), (b) volcanic rocks (Vr), (c) continental sediments (Cs), (d) Hakrim Formation (Hr Fm), (e) Hunghae Formation (Hh Fm), (f) Idong Formation (Id Fm), (g) Duho Formation (Dh Fm), and (h) alluvium (Al).

층(그림 6c)과 해성퇴적층인 학림층(그림 6d), 홍해층(그림 6e), 이동층(그림 6f), 두호층(그림 6g) 및 제4기 충적층(그림 6h) 순으로 구성되어 있다. 한편 삼차원 지질 모델링 영역 내에서 이들 8개의 지층 구역별 부피 및 백분율을 표 2에 정리하였다. 표에서 보다시피 8개 지층들 중에서는 백악기 심성암층이 가장 많이 분포하다. 그리고 제3기 지층들 중에서는 이동층이 가장 많이 분포하며, 학림층이 가장 적게 분포한다.

5.4 삼차원 암상 모델링

삼차원 암상 모델링에는 앞서 수행된 원시 자료 분석을 통해 얻은 암상 정보 시추 자료 6개(그림 3g)가 사용되었다. 그리고 백악기 심성암층과 화산암층 및 제3기 육성퇴적층은 각각 화강암과 응회암 및 역암의 단일 암상으로 구성되어 있기 때문에 삼차원 암상 모델링을 수행하지 않았으며, 사암과 이암이 혼재되어 있는 제3기 해성퇴적층(학림층, 홍해층, 이동층, 두호층)에 대해서만 삼차원 암상 모델링을 수행하였다. 따라서 대심도 시추공 6개(A, B, C, PY-2, 301, 302)에 존재하는 제3기 해성퇴적층(학림층, 홍해층, 이동층, 두호층)의 사암과 이암 암상 정보 자료에 대해서만 베리오그램 분석 후 조건부 시뮬레이션을 수행하였다. 한편 실제 대심도 시추공 6개로부터 얻어진 제3기 해성퇴적층 내 암상 정보 자료에 대해 통계 분석을 수행하였다. 그 결과는 이암이 96.40%, 사암이 3.60%로 이암이 사암에 비해서 압도적으로 많이 분포한다.

5.4.1 베리오그램 분석

6개의 대심도 시추공 자료에서 암상의 공간적 상관 관계를 파악하기 위해서 베리오그램 분석을 수행하였다. 먼저 한 기준점을 중심으로 30° 간격으로 암상의 주향(azimuth) 0°에서 180°까지, 경사(dip) 0°에서 90°까지 다양한 경우에 대해서 각각 실험적 베리오그램을 계산하였다. 다음으로 세 가지 이론적 베리오그램 모델(구형 모델, 가우시안 모델, 지수 모델)을 이용하여 이론적 베리오그램을 계산하였다. 그리고 계산된 실험적 베리오그램을 가장 잘 대표할 수 있는 따라서 삼차원 암상 모델링에 사용될 최적의 이론적 베리오그램을 선정하였다. 이때 이용된 상관 거리(range)는 그 값이 클수록, 회귀오차제곱합(sum of squares of regression error, SSR)은 추정 값과 자료 평균 값과의 차이의 제곱으로서 그 값이

작을수록, 결정계수(coefficient of determination, R^2)는 회귀식의 적합도로서 그 값이 1에 가까울수록 최적의 이론적 베리오그램을 의미한다. 이러한 베리오그램 분석 결과는 표 3에 정리되어 있다. 표에서 보다시피 주향 180°와 경사 0° 방향에서 가우시안 모델을 이용할 때에 상관 거리가 가장 길며, 회귀오차제곱합이 상대적으로 작으며, 결정계수도 1에 가장 가깝다. 따라서 주향 180°와 경사 0° 방향의 가우시안 모델을 삼차원 암상 모델링에 사용될 최적의 이론적 베리오그램으로 선정하였다. 이렇게 선정된 최적의 이론적 베리오그램은 삼차원 지질 모델링 영역 내에 분포하는 제3기 해성퇴적층의 특징을 잘 반영하고 있다고 판단된다.

5.4.2 조건부 시뮬레이션

베리오그램 분석을 통해 선정된 최적의 이론적 베리오그램을 사용하여 제3기 해성퇴적층 내 사암과 이암의 공간적 분포를 예측하기 위하여 조건부 시뮬레이션 기법의 일종인 순차 지시 시뮬레이션 및 절단 가우시안 시뮬레이션을 각각 100회씩 수행하였으며, 그 결과는 각각 그림 7 및 그림 8과 같다. 그림에서 보다시피 실제 6개의 대심도 시추공 자료와 마찬가지로 조건부 시뮬레이션 결과에서도 이암이 사암에 비해서 압도적으로 많이 분포하며, 사암이 수직 방향보다는 주로 수평 방향으로 우수한 연장성을 가진다. 또한 순차 지시 시뮬레이션 결과에 비해서 절단 가우시안 시뮬레이션 결과에서 사암의 분포 및 수평 방향의 연장성이 시추공 주변에서만 국한된다. 한편 각각 100회씩의 순차 지시 시뮬레이션 및 절단 가우시안 시뮬레이션 결과는 표 4에 정리되어 있다. 표에서 보다시피 평균값이 순차 지시 시뮬레이션 결과에서는 이암이 $1.3734 \times 10^9 \text{ m}^3$ (95.72%), 사암이 $6.1336 \times 10^7 \text{ m}^3$ (4.28%)이며, 절단 가우시안 시뮬레이션 결과에서는 이암이 $1.4341 \times 10^9 \text{ m}^3$ (99.96%), 사암이 $6.3964 \times 10^5 \text{ m}^3$ (0.04%)이다. 즉 절단 가우시안 시뮬레이션 결과에 비해서 순차 지시 시뮬레이션 결과가 실제 6개의 대심도 시추공 자료의 통계 분석 결과인 이암 96.40%, 사암 3.60%와 보다 더 유사하다. 따라서 전반적으로 순차 지시 시뮬레이션을 사용한 삼차원 암상 모델이 절단 가우시안 시뮬레이션을 사용한 삼차원 암상 모델보다 통계학적 측면에서 좀 더 높은 신뢰성을 나타낸다.

5.4.3 교차 검증

삼차원 암상 모델링에 사용된 6개의 대심도 시추공(A, B, C, PY-2, 301, 302) 중에서 영향력이 가장 큰 시추공을 파악하기 위해서 교차 검증(cross validation)을 수행하였다. 이를 위해서 6개의 시추공 중 1개의 시추공을 순차적으로 제외하면서 나머지 5개의 시추공 암상 자료를 이용한 삼차원 암상 모델링 결과를 비교·분석하였다. 즉 순차 지시 시물레이션에

서는 Case S-1 (시추공 A 제외), Case S-2 (시추공 B 제외), Case S-3 (시추공 C 제외), Case S-4 (시추공 PY-2 제외), Case S-5 (시추공 301 제외) 및 Case S-6 (시추공 302 제외)에 대해서, 절단 가우시안 시물레이션에서는 Case T-1 (시추공 A 제외), Case T-2 (시추공 B 제외), Case T-3 (시추공 C 제외), Case T-4 (시추공 PY-2 제외), Case T-5 (시추공 301 제외) 및 Case T-6 (시추공 302 제외)에 대해서 각각 100회씩

Table 3. Results of variogram analyses.

Azimuth [°]	Dip [°]	Variogram model								
		Spherical model			Gaussian model			Exponential model		
		Range [m]	SSR	R ²	Range [m]	SSR	R ²	Range [m]	SSR	R ²
0	0	356.5350	0.0074	0.4217	356.5350	0.0101	0.5769	356.5350	0.0055	0.3128
	30	334.4280	0.0063	0.4708	334.4280	0.0088	0.6540	334.4280	0.0050	0.3744
	60	332.6840	0.0063	0.4690	332.6840	0.0087	0.6512	332.6840	0.0045	0.3341
	90	338.5660	0.0082	0.3870	338.5660	0.0109	0.5149	338.5660	0.0062	0.2922
30	0	347.4070	0.0083	0.4730	347.4070	0.0115	0.6517	347.4070	0.0061	0.3469
	30	327.6750	0.0072	0.5409	327.6750	0.0101	0.7573	327.6750	0.0052	0.3886
	60	327.0480	0.0073	0.5523	327.0480	0.0102	0.7702	327.0480	0.0053	0.3998
	90	327.0480	0.0090	0.4224	327.0480	0.0120	0.5645	327.0480	0.0066	0.3110
60	0	327.6020	0.0078	0.4198	327.6020	0.0102	0.5464	327.6020	0.0059	0.3189
	30	329.0980	0.0071	0.4214	329.0980	0.0094	0.5563	329.0980	0.0052	0.3068
	60	328.1930	0.0105	0.4944	328.1930	0.0120	0.5673	328.1930	0.0072	0.3407
	90	335.8730	0.0167	0.4560	335.8730	0.0198	0.5411	335.8730	0.0138	0.3771
90	0	350.0340	0.0069	0.5371	350.0340	0.0100	0.7698	350.0340	0.0052	0.4010
	30	333.8600	0.0210	0.4540	333.8600	0.0239	0.5146	333.8600	0.0169	0.3643
	60	333.6770	0.0205	0.4414	333.6770	0.0238	0.5136	333.6770	0.0168	0.3633
	90	333.6770	0.0204	0.4459	333.6770	0.0238	0.5208	333.6770	0.0169	0.3697
120	0	334.4320	0.0064	0.4995	334.4320	0.0092	0.7187	334.4320	0.0046	0.3632
	30	333.2550	0.0096	0.3240	333.2550	0.0129	0.4340	333.2550	0.0072	0.2430
	60	333.0190	0.0201	0.4383	333.0190	0.0232	0.5073	333.0190	0.0162	0.3546
	90	332.3600	0.0201	0.4384	332.3600	0.0230	0.5025	332.3600	0.0160	0.3494
150	0	130.6940	0.0202	0.3072	130.6940	0.0223	0.3393	130.6940	0.0198	0.3013
	30	118.9300	0.0190	0.3311	118.9300	0.0207	0.3602	118.9300	0.0184	0.3200
	60	119.9010	0.0236	0.3150	119.9010	0.0246	0.3287	119.9010	0.0222	0.2955
	90	118.7860	0.0234	0.3119	118.7860	0.0246	0.3281	118.7860	0.0221	0.2951
180	0	363.6040	0.0042	0.5835	363.6040	0.0063	0.8624	363.6040	0.0031	0.4212
	30	329.3600	0.0088	0.2552	329.3600	0.0108	0.3144	329.3600	0.0064	0.1849
	60	328.5540	0.0094	0.2560	328.5540	0.0117	0.3209	328.5540	0.0072	0.1978
	90	327.0140	0.0068	0.3129	327.0140	0.0090	0.4128	327.0140	0.0050	0.2307

Note: SSR indicates the sum of squares of regression error, and R² indicates the coefficient of determination.

사암에 대해서만 수행하였으며, 그 결과는 표 5에 정리되어 있다. 표에서 보다시피 순차 지시 시뮬레이션 및 절단 가우시안 시뮬레이션 모두 시추공 PY-2를 제외한 경우(Case S-4, Case T-4)에 사암의 부피가 가장 작다. 이러한 교차 검증 결과는 시추공 PY-2가 본 연구에서 수행된 삼차원 암상 모델링에서 가장 영향력이 큼을 보여준다. 이는 시추공 PY-2가 삼차원 지질 모델링 영역 중앙에 가장 가깝게 위치하기 때문이다.

6. 결 론

한국 포항시 남구 해동동에 분포하는 포항분지 내 지층 및 암상 분포를 정량적으로 특성화하고 사실적으로 가시화하기 위하여 삼차원 지질 모델링 기술을 이용한 일련의 삼차원 지질 모델링을 수행하였다. 이를 달성하기 위하여 먼저 연구 지역 내 수치 지형도

및 해도, 지표 지질도 및 대심도 시추 주상도 8개(A, B, C, DS-1, DS-2, PY-2, 301, 302)와 같은 원시 자료를 수집하여 분석하였으며, 이를 사용하여 삼차원 지질 모델링을 위한 기본적인 입력 자료를 생성하였다. 생성된 입력 자료는 수치 표고 모델 자료, 지표 지질도가 반영된 수치 표고 모델 자료, 지층 경계면 정보 시추 자료 8개 및 암상 정보 시추 자료 6개이다. 암상 정보 시추 자료가 6개인 이유는 시추공 DS-1 및 DS-2에서는 암상에 대한 정보가 존재하지 않기 때문이다. 그리고 이러한 입력 자료를 사용하여 삼차원 구조 모델링, 삼차원 격자 모델링, 삼차원 지층 모델링 및 삼차원 암상 모델링을 순차적으로 수행하였다. 첫 번째로 지표 지질도가 반영된 수치 표고 모델 자료 및 지층 경계면 정보 시추 자료 8개를 사용하여 불연속 평활 보간법을 이용한 삼차원 구조 모델링을 수행하였다. 이렇게 수립된 삼차원 구조 모델은 8개의 지층 경

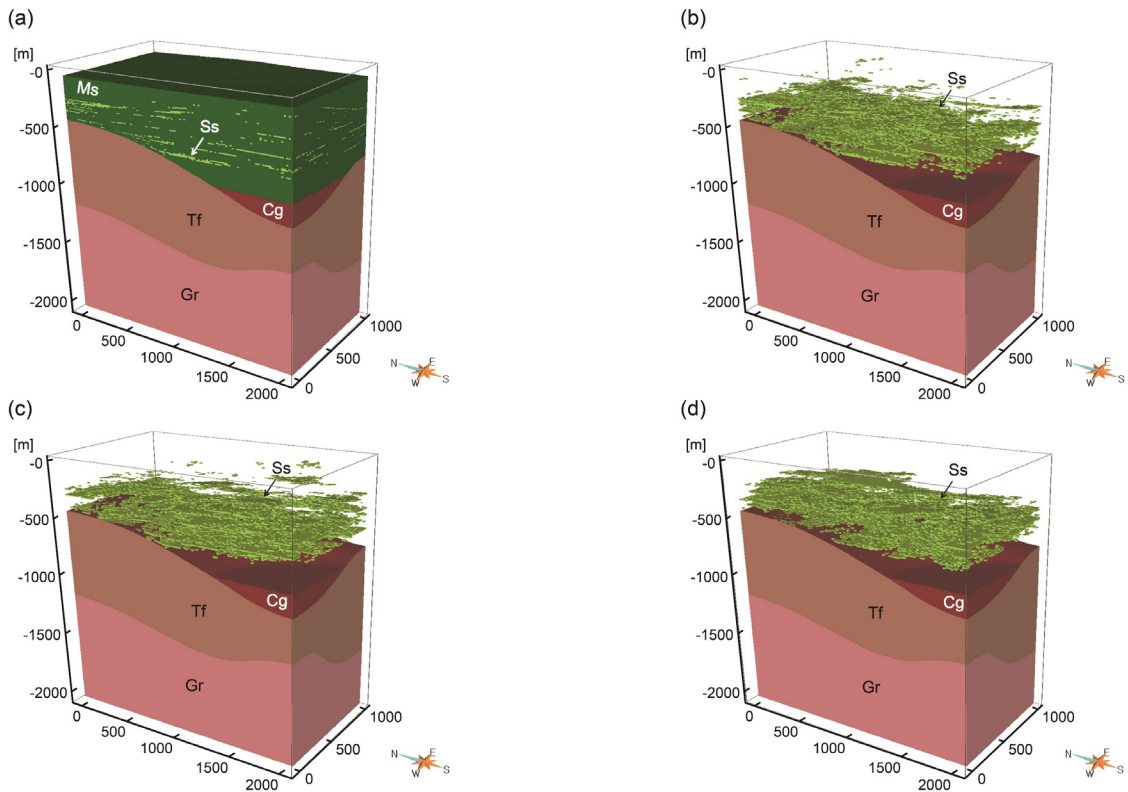


Fig. 7. Three-dimensional lithofacies models of the study area with granite (Gr), tuff (Tf), conglomerate (Cg), mudstone (Ms), and sandstone (Ss) using sequential indicator simulation (SIS) with (a) 1st realization (mudstone and sandstone), (b) 1st realization (sandstone only), (c) 50th realization (sandstone only), and (d) 100th realization (sandstone only).

계면으로 구성되어 있다. 두 번째로 삼차원 구조 모델의 지층 경계면에 기초하여 삼차원 격자 모델링을 수행하였다. 이렇게 수립된 삼차원 격자 모델은 총 2,046,000개의 육면체 격자로 이산화되어 있다. 세 번째로 삼차원 구조 모델과 격자 모델을 중첩하는 삼차원 지층 모델링을 수행하였다. 이렇게 수립된 삼차원 지층 모델은 하부로부터 백악기 심성암층과 화산암층, 이들 기반암을 피복하는 제3기 육성퇴적층과 해성퇴적층인 학림층, 홍해층, 이동층, 두호층 및 제4기 층적층 순으로 구성되어 있다. 네 번째로 백악기 심성암층과 화산암층 및 제3기 육성퇴적층은 각각 화강암과 응회암 및 역암의 단일 암상으로 구성되어 있기 때문에 암상 정보 시추 자료 6개를 사용하여 사암과 이암이 혼재되어 있는 제3기 해성퇴적층(학림층, 홍해층, 이동층, 두호층)에 대해서만 삼차원 암상 모델링을 수행하였다. 우선 베리오그램 분석을 통하여 주향

180°와 경사 0° 방향의 가우시안 모델을 최적의 이론적 베리오그램으로 선정하였으며, 이를 사용하여 조건부 시뮬레이션 기법의 일종인 순차 지시 시뮬레이션 및 절단 가우시안 시뮬레이션을 각각 100회씩 수행하였다. 실제 6개의 대심도 시추공 자료와 마찬가지로 조건부 시뮬레이션 결과에서도 이암이 사암에 비해서 압도적으로 많이 분포하며, 사암이 수직 방향보다는 주로 수평 방향으로 우수한 연장성을 가진다. 또한 순차 지시 시뮬레이션 결과에 비해서 절단 가우시안 시뮬레이션 결과에서 사암의 분포 및 수평 방향의 연장성이 시추공 주변에서만 국한된다. 한편 절단 가우시안 시뮬레이션 결과에 비해서 순차 지시 시뮬레이션 결과가 실제 6개의 대심도 시추공 자료의 통계 분석 결과인 이암 96.40%, 사암 3.60%와 보다 더 유사하다. 따라서 전반적으로 순차 지시 시뮬레이션을 사용한 삼차원 암상 모델이 절단 가우시안 시뮬레

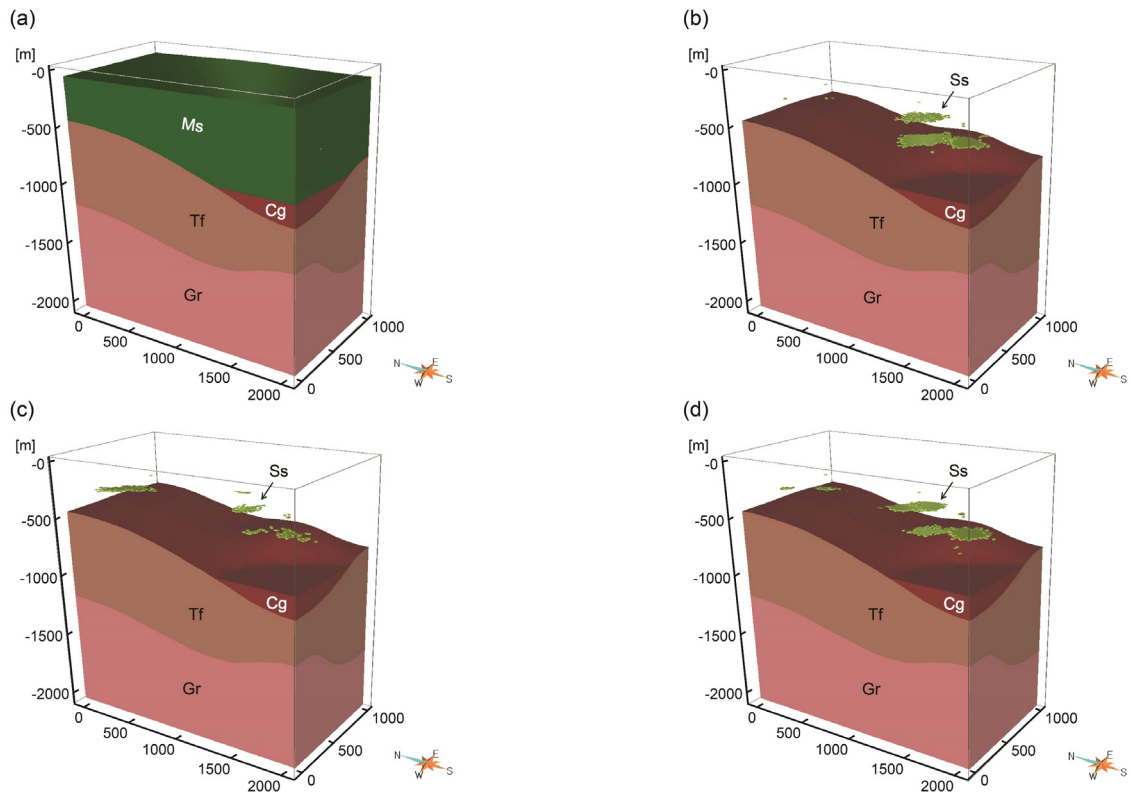


Fig. 8. Three-dimensional lithofacies models of the study area with granite (Gr), tuff (Tf), conglomerate (Cg), mudstone (Ms), and sandstone (Ss) using truncated Gaussian simulation (TGS) with (a) 1st realization (mudstone and sandstone), (b) 1st realization (sandstone only), (c) 50th realization (sandstone only), and (d) 100th realization (sandstone only).

이전을 사용한 삼차원 암상 모델보다 통계학적 측면에서 좀 더 높은 신뢰성을 나타낸다. 마지막으로 삼차원 암상 모델링에 사용된 6개의 대심도 시추공 중에서 영향력이 가장 큰 시추공을 파악하기 위해서 교차검증을 수행하였다. 그 결과는 시추공 PY-2가 본 연구에서 수행된 삼차원 암상 모델링에서 가장 영향력이 큼을 보여준다. 이는 시추공 PY-2가 삼차원 지질

모델링 영역 중앙에 가장 가깝게 위치하기 때문이다. 이와 같이 본 연구를 통해서 제시된 삼차원 지질 모델링 기술과 삼차원 지질 모델링 결과들은 향후 에너지 자원 탐사, 지열 에너지 개발, 방사성 폐기물 지층 처분 및 이산화탄소 지중 저장 등의 목적으로 심부 지층을 정량적으로 특성화하고 사실적으로 가시화하는데에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Table 4. Results of conditional simulations.

Conditional simulation	Statistical value	Volume of mudstone [m^3]	Volume of sandstone [m^3]
Sequential indicator simulation (SIS)	Minimum	1.3556×10^9	4.2071×10^7
	25th percentile	1.3688×10^9	5.6579×10^7
	Median	1.3737×10^9	6.0628×10^7
	75th percentile	1.3781×10^9	6.5718×10^7
	Maximum	1.3932×10^9	7.9092×10^7
	Mean	1.3734×10^9	6.1336×10^7
	Standard deviation	6.9845×10^6	6.9839×10^6
Truncated Gaussian simulation (TGS)	Minimum	1.4329×10^9	1.5029×10^5
	25th percentile	1.4339×10^9	3.5939×10^5
	Median	1.4342×10^9	5.3893×10^5
	75th percentile	1.4343×10^9	8.4941×10^5
	Maximum	1.4346×10^9	1.8485×10^6
	Mean	1.4341×10^9	6.3964×10^5
	Standard deviation	6.0180×10^5	6.0191×10^5

Table 5. Results of cross validation.

Case (excluding borehole)	Volume of sandstone [m^3]				
	Minimum	Median	Maximum	Mean	Standard deviation
Case S-1 (A)	4.6000×10^7	6.0576×10^7	7.9800×10^7	6.0265×10^7	7.1522×10^6
Case S-2 (B)	2.1000×10^6	6.3268×10^7	8.7500×10^7	6.3792×10^7	9.3155×10^6
Case S-3 (C)	4.3000×10^7	5.7068×10^7	7.3500×10^7	5.7216×10^7	6.5337×10^6
Case S-4 (PY-2)	6.5500×10^6	4.7516×10^7	6.6500×10^7	4.7384×10^7	8.1026×10^6
Case S-5 (301)	4.8100×10^7	6.7399×10^7	9.0400×10^7	6.7399×10^7	8.1507×10^6
Case S-6 (302)	4.7800×10^7	7.0789×10^7	9.9900×10^7	7.0617×10^7	7.8092×10^6
Case T-1 (A)	1.0896×10^5	4.8085×10^5	1.4800×10^6	5.8134×10^5	3.1140×10^5
Case T-2 (B)	1.3453×10^5	5.3688×10^5	1.6600×10^6	6.1042×10^5	3.0148×10^5
Case T-3 (C)	1.1391×10^5	4.8072×10^5	1.4600×10^6	5.8154×10^5	3.1331×10^5
Case T-4 (PY-2)	4.4461×10^4	1.5650×10^5	8.3071×10^5	1.9349×10^5	1.4632×10^5
Case T-5 (301)	9.6160×10^4	4.5221×10^5	1.6400×10^6	5.1973×10^5	2.8022×10^5
Case T-6 (302)	1.2535×10^5	4.9069×10^5	1.6800×10^6	5.3812×10^5	2.9341×10^5

Note: The sequential indicator simulation (SIS) is used in Cases S-1 to S-6, and the truncated Gaussian simulation (TGS) is used in Cases T-1 to T-6.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 산하 한국에너지기술평가원의 에너지자원융합원천기술개발사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 부분적으로 미래창조과학부 산하 한국연구재단의 Brain Korea 21 사업 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 장수범 박사님과 임현수 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Alabert, F., 1987, The practice of fast conditional simulations through the LU decomposition of the covariance matrix. *Mathematical Geology*, 19, 369-386.
- Cho, G.J., 1984, The truth of the fabrication of the Pohang oil. *Monthly Chosun*, 5, 328-344 (in Korean).
- Cressie, N.A.C., 1993, *Statistics for Spatial Data*, revised edition. John Wiley and Sons, New York, USA, 900 p.
- de Almeida, J.A., 2010, Stochastic simulation methods for characterization of lithoclasses in carbonate reservoirs. *Earth-Science Reviews*, 101, 250-270.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G., 1992, *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, USA, 340 p.
- Guyonnet-Benaize, C., Lamarche, J., Masse, J.P., Villeneuve, M. and Viseur, S., 2010, 3D structural modelling of small-deformations in poly-phase fault pattern: Application to the Mid-Cretaceous Durance uplift, Provence (SE France). *Journal of Geodynamics*, 50, 81-93.
- Gwak, S.H. and Lee, D.S., 2001, 3-D visualization of reservoir characteristics through GOCAD. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 4, 80-83 (in Korean with English abstract).
- Han, J.H., Kwak, Y.H. and Son, J.D., 1986, Tectonic evolution and depositional environments of the Tertiary sedimentary basin, southeastern part of Korea. Technical Report KR-86-(B)-8, Korea Institute of Energy and Resources (KIER), Seoul, Korea, 76 p (in Korean with English summary).
- Han, J.H., Kwak, Y.H., Son, J.D. and Son, B.K., 1987, Tectonic evolution and depositional environments of the Tertiary sedimentary basin, southeastern part of Korea. Technical Report KR-86-2-(B)-4, Korea Institute of Energy and Resources (KIER), Seoul, Korea, 109 p (in Korean with English summary).
- Hong, Y.K., 1991, Petrogenetic modelling of the vertically zoned Cretaceous Pohang epizonal intrusive rocks, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 64-86 (in English with Korean abstract).
- Hwang, I.G., 1993, Fan-delta systems in the Pohang Basin (Miocene), SE Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 923 p (in Korean with English abstract).
- Jeong, J. and Jang, W.I., 2011, Estimation of distribution of the weak soil layer for using geostatistics. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 35, 1132-1140 (in Korean with English abstract).
- Journel, A.G. and Huijbregts, Ch.J., 1978, *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, UK, 600 p.
- Kaufmann, O. and Martin, T., 2008, 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers and Geosciences*, 34, 278-290 (reprinted in 2009, 35, 70-82).
- Kim, D.H., Ryu, D.W., Lee, J.H., Choi, I.G., Kim, J.K. and Lee, W.J., 2010, Comparative studies of kriging methods for estimation of geo-layer distribution of Songdo International City in Incheon. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 26, 57-64 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.M., 1990, Petrological and geochemical study on the Jigyeongri high-silica rhyolites in the Yeongdeok and Yeongil area, the northeastern corner of the Kyeongsang Basin, Korea. M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 108 p (in English with Korean abstract).
- Kim, S. and Park, H.D., 2009, Development of software for mineral resource estimation and 3D modeling using variogram. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 46, 151-159 (in Korean with English abstract).
- Koo, C.M., Hong, C.W. and Jeon, S.W., 2006, Estimation of rock mass rating (RMR) and assessment of its uncertainty using conditional simulations. *Tunnel and Underground Space*, Journal of the Korean Society for Rock Mechanics, 16, 135-145 (in Korean with English abstract).
- Koo, C.M. and Jeon, S.W., 2005, Using conditional simulation to estimate rock mass properties and assess the uncertainty. *Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics Spring Conference*, Seoul, Korea, March 31, 81-95 (in Korean).
- Korea National Oil Corporation, 2005, *KNOC 25th Anniversary*. Korea National Oil Corporation (KNOC), Anyang, Korea, 719 p (in Korean).
- Lee, B.J. and Song, K.Y., 1995, Interpretation of geologic structure in Tertiary Pohang basin, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 28, 69-77 (in Korean with English abstract).
- Lee, C., Kim, T.K. and Park, D.W., 2009, *Geology and geo-*

- chemistry of volcanic and sedimentary rocks from deep borehole in the Heunghae area, North Kyungang Province. *Journal of Engineering Geology*, 19, 459-474 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.K., Moon, H.S., Min, K.D., Kim, I.S., Yun, H. and Itaya, T., 1992, Paleomagnetism, stratigraphy and geologic structure of the Tertiary Pohang and Changgi Basins; K-Ar ages for the volcanic rocks. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 25, 337-349 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.H., 1968, Genesis of the native copper deposits in Mesozoic basalt flows in the Yongyang Basin, Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, various pages (in English and Korean).
- Lee, J.W., Um, S.H. and Kim, C.S., 1967, Report of exploration for natural gas in the Pohang area, Korea. In: *Geological Report on Coal Fields of Korea*, No. 8. Technical Report KR-58 No. 8, Geological Survey of Korea (GSK), Seoul, Korea, 1-22 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.W., Um, S.H. and Kim, C.S., 1968, Summary of report of exploration for natural gas in the Pohang area, Korea. In: *Geology and Ore Deposit*, No. 4. Technical Report KR-66 No. 4, Geological Survey of Korea (GSK), Seoul, Korea, 23-32 (in Korean).
- Lee, Y., Kwak, Y.H., Yun, H.S., Cheong, T.J., Oh, J.H., Kim, H. and Kang, M., 1997, Petroleum geochemistry of organic matter from the core samples in the Tertiary Pohang Basin. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 5, 48-58 (in Korean with English abstract).
- Mallet, J.L., 1989, Discrete smooth interpolation. *Association for Computing Machinery (ACM) Transactions on Graphics (TOG)*, 8, 121-144.
- Matheron, G., 1963, Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246-1266.
- Matheron, G., Beucher, H., de Fouquet, C., Galli, A., Guerillot, D. and Ravenne, C., 1987, Conditional simulation of the geometry of fluvio-deltaic reservoirs. *Proceedings of the Sixty-Second Society of Petroleum Engineers (SPE) Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, Texas, USA, September 27-30, 591-599.
- Paradigm, 2012, GOCAD user guide. Paradigm, Houston, Texas, USA, various pages.
- Shepard, D., 1968, A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the Twenty-Third Association for Computing Machinery (ACM) National Conference*, Las Vegas, Nevada, USA, August 27-29, 517-524.
- Sohn, Y.K., Rhee, C.W. and Shon, H., 2001, Revised stratigraphy and reinterpretation of the Miocene Pohang basinfill, SE Korea: Sequence development in response to tectonism and eustasy in a back-arc basin margin. *Sedimentary Geology*, 143, 265-285.
- Sohn, Y.K. and Son, M., 2004, Synrift stratigraphic geometry in a transfer zone coarse-grained delta complex, Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Sedimentology*, 51, 1387-1408.
- Song, Y.H., *et al.*, 2003, Development of deep, low-enthalpy geothermal energy. Technical Report KR-03-01, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea, 87 p (in Korean with English summary).
- Song, Y.H., *et al.*, 2004, Development of deep, low-enthalpy geothermal energy. Technical Report KR-04-01, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea, 226 p (in Korean with English summary).
- Song, Y.H., *et al.*, 2005, Development of deep, low-enthalpy geothermal energy. Technical Report OAA2003001-2005(3), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea, 147 p (in Korean with English summary).
- Song, Y.H., *et al.*, 2006, Development of deep, low-enthalpy geothermal energy. Technical Report OAA2003001-2006(4), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea, 190 p (in Korean with English summary).
- Um, S.H., Lee, D.W. and Bak, B.S., 1964, Explanatory text of the geological map of Pohang sheet, Scale 1:50000. Technical Report Sheet-7022-II, Geological Survey of Korea (GSK), Seoul, Korea, 37 p and a map sheet (in Korean and English).
- Vilain, D., 2010, 3D modelling and restoration of the Vargfors Basin, Central Skellefte District, Northern Sweden, using gOcad and MOVE software. M.S. Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 19 p.
- Wang, G. and Huang, L., 2012, 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China. *Geoscience Frontiers*, 3, 483-491.
- Yi, S. and Yun, H., 1995, Miocene calcareous nannoplankton from the Pohang Basin, Korea. *Palaeontographica (B)*, 237, 113-158.
- Zanchi, A., Francesca, S., Stefano, Z., Simone, S. and Graziano, G., 2009, 3D reconstruction of complex geological bodies: Examples from the Alps. *Computers and Geosciences*, 35, 49-69.

Received : October 28, 2014

Revised : January 28, 2015

Accepted : January 28, 2015