

하동군 북천면 직전리에서 산출되는 티탄철석광상의 자원량 평가를 위한 광체 3D 모델링

3D Modeling For Resources Estimation of Ilmenite Deposits in Jikjeon-Ri, Hadong Korea

곽 지 영(Ji Young Kwak) · 최 진 범(Jin Beom Choi)* · 조 현 구(Hyen Goo Cho)

경상대학교 지구환경과학과 및 기초과학연구소
(Department of Earth Environmental Sciences and Research Institute of Natural Sciences,
Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

요약 : 하동군 북천면 직전리 일대에는 선캄브리아기 간극누적형 회장암체 내 티탄철석 광상이 발달하고 있다. 정밀 지질조사를 통한 노두 자료와 7개 공의 시추탐사 자료를 바탕으로 GOCAD S/W를 사용하여 티타늄의 자원량을 평가하였다. 티탄철석 광체의 지하 부존상태 및 규모를 예측하기 위해 3차원 모델링을 수행한 결과 5개 맥상 광체가 남북방향으로 발달하였으며, 지구통계학적 기법을 활용하여 평균품위 및 자원량을 산출한 결과 Ti 평균 품위 2.98 wt%, 티탄철석 광량 7,494,303톤 (Ti 223,330톤)이 산정되었다. 이번 연구에 수행된 3차원 모델링을 하동지역 회장암 내 티탄광상 전체에 적용함으로써 티타늄 광체의 3차원적 형태와 자원량 평가에 활용할 수 있을 것이다.

주요어 : 간극누적형 회장암, 티탄철석광상, 3차원 모델링, 평균품위, 자원량 평가

ABSTRACT : Ilmenite deposits are developed along the Precambrian intercumulated anorthosite body in Jikjeon-Ri, Bukcheon-Myeon, Hadong, Korea. Both detailed geological survey and drilling prospecting data for seven boreholes can be used to do resource estimation with GOCAD S/W. 3D modeling using geostatistics is applied to predict the shape and size of Ti ore bodies. As a result, 5 Ti ore veins occurred along N-S direction and average grade of Ti and ilmenite resources are calculated as 2.98 wt% Ti and 7,494,303 metric tons ilmenite ore reserves (Ti 223,330 t). This 3D modeling will be applied to the whole ilmenite deposits in Hadong-Sancheong area to predict the exact distribution and resources estimations of Ti ores.

Key words : Intercumulated anorthosite, Ilmenite deposit, 3D Modeling, average grade, Resource estimation

*Corresponding author: +82-10-4586-1180, E-mail: jbchoi@gnu.ac.kr

서 론

경남의 하동-산청 일대에서는 선캄브리아기 휘장암체가 분포하고 있으며, 휘장암체 내에 티탄철석광상 산출이 보고된 후(Jeong *et al.*, 1989), 한국 지질자원연구원에 의해 3년에 걸쳐 하동군 일대에 광산조사를 실시하여 8,668천톤(TiO_2 품위 3.36~4.04%)을 확보하였으나 경제성이 없는 것으로 평가하였다(Kim and Seo, 1990; Kim *et al.*, 1991; Seo *et al.*, 1992; Koh, 2010). 최근 자원문제가 국제적인 이슈가 되면서 우리나라 자원 확보 중장기 계획의 일환으로 국내자원 개발에 관한 사업이 추진되어 2010년부터 5년간 “국내 희유금속 광상탐사 및 활용기술 개발”사업이 한국지질자원연구원 주관 하에 추진되고 있다. 그 사업의 일환으로 하동지역 티탄철석 광화대에 관한 정밀조사와 시추탐사가 진행되었으며, 확보된 자료를 바탕으로 정확한 매장량의 산출과 경제성 평가를 실시하고자 한다.

효율적인 자원개발을 위해서는 무엇보다 광체의 형태를 정확히 표현하고, 정확한 자원량의 추정을 필요로 한다. 광체의 부존상태 및 크기를 표현하는 방법은 크게 2D표현법과 3D표현법으로 나눌 수 있는데 광체의 형태 및 크기를 2D 평면상에서 예측할 수는 있으나, 광체의 규모 및 형태를 이해하기 쉽게 가지적으로 나타내기 위해서는 3D 모델링이 더 효율적으로 활용된다. 3D 모델링은 광체의 형태를 예측하고 표현하는데 사용될 뿐만 아니라 지질구조와 같은 다양한 지질학적 대상의 모델을 구하는데도 활용되고 있다(Wang *et al.*, 2012; Naji and Khalil, 2012; Schetselaar, 2013; Esfahani and Asghari, 2013). 이러한 지질학적 대상의 3D 모델링을 위해 GOCAD, 3D GeoModeller, Lynx v4.99와 같은 다양한 S/W들이 개발되어 활용되고 있으며(Schneider *et al.*, 2011; Lee and Kim, 2002), 본 연구에서는 Paradigm사의 GOCAD S/W를 활용하여 광체모델링 및 자원량 평가를 수행하였다. GOCAD는 지질모델링(GeoModeling)을 위해 개발된 S/W로 현재까지도 ‘GOCAD 컨소시엄’에서 연구 및 응용이 되고 있다. 이 소프트웨어는 제한적인 데이터가 주어지더라도 지질요소를 이루는 면들(surface)을 자연스럽게 모델링할 수 있는 DSI(Discrete Smooth Interpolation) 도구를 제공하며, 이는 노드(node) 집합, 연결정보, 벡터함수, constraint로 구성된 자료를 이용해 입력된 자료에 영

향을 받지 않으면서도 그 값에 근접한 면을 구현하는 특징을 가진다(Caumon *et al.*, 2009; Mallet, 1989; 2002). 국내에서 GOCAD를 활용한 연구로는 지질 모델링을 통한 포항분지에 대해 정량적으로 특성화하고 가시화한 사례 및 3차원 탄성파자료들을 도출해 시각화한 사례 등으로 그 연구사례가 많지 않다(Ahn, 2013; Gwak and Lee, 2001). 그중에서 Kwak and Choi (2013)는 GOCAD를 활용하여 국외 금광상에 대해 모델링 및 매장량 평가를 시도한 바 있으며, 본 연구에서는 이와 같은 방법을 활용하여 국내의 티탄철석 광체를 대상으로 3D 모델링 및 자원량 평가를 수행하였다.

자원량(Resources 또는 Mineral Resources)은 지질학적인 조사를 통해 확인되거나 예상되는 광물의 총량으로 위치, 품위, 품질, 규모 등이 알려졌거나 추정되어진 상태이며, 이는 가체광량을 의미하는 매장량의 개념을 포괄한다(Hartman and Mutmansky, 2002). 연구지역인 하동군 북천면 직전리 일대는 과거 전통적인 평가방법에 의해 이러한 자원량이 평가된 바 있으며, 당시 자원량이 1,193,550톤(Ti 평균 2.44 wt%)으로 산출되었다(Seo *et al.*, 1992). 본 연구에서는 하동군 직전리 지역에 산출하는 티탄철석 광체의 형태를 가시화하여 예측하고, 기존의 연구에서 활용되지 않은 지구통계학적(geostatistics)인 방법을 이용해 이 지역의 자원량에 대한 재평가를 수행하였으며, 이러한 연구는 하동 일대에 산출되는 티탄철석 광체의 총 자원량 추정에 있어 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

배경 이론

본 연구에서는 지구통계학적인 방법을 활용하여 이 지역의 자원량에 대한 평가를 수행하였으며, 티탄철석 광체의 자원량평가를 위해 지구통계학적 기법 중 가장 일반적으로 활용되는 크리깅(Kriging) 기법이 사용되었다.

크리깅은 공간상 데이터들은 서로 연속적으로 분포하며 데이터 간에는 서로 상관성이 존재한다는 가정 하에 N개의 공간 데이터를 활용하여 미지의 값을 추정하는 기법이다. 크리깅 기법은 자료의 특성을 베리오그램(Variogram)으로 나타내며, 적절한 베리오그램 모형이 설정되어 있으면 예측을 효율적으로 할 수 있다. 따라서 크리깅 추정 시 거리에 따른 데이터의 상호관계를 나타내는 베리오그램이 계산된다. 크리깅의 추정식은 식 (1)과 같고,

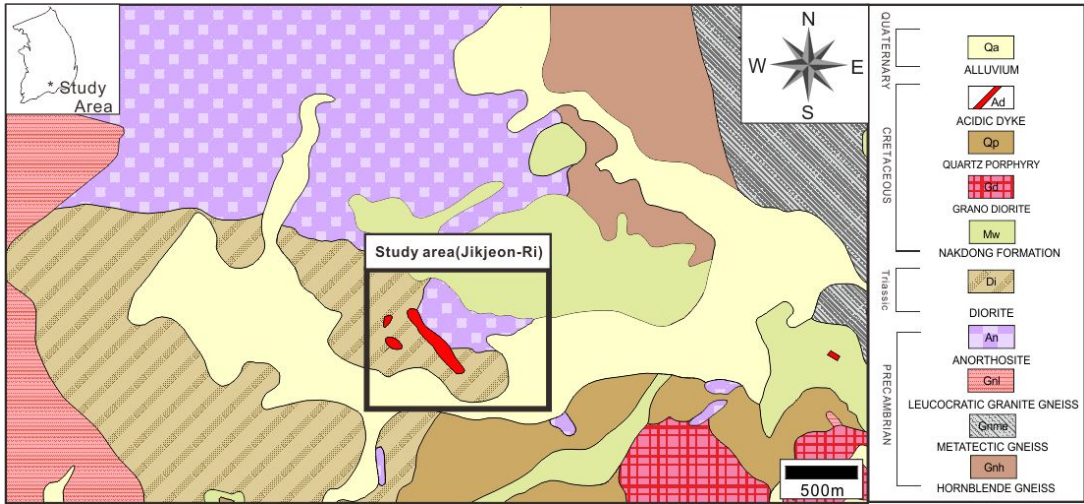


Fig. 1. Geological map of Jikjeon-Ri area, Korea (modified from 1 : 50,000 scale Geological map of Chingyo Sheet).

베리오그램의 추정식은 (2)와 같다.

$$z^*(x_0) = \sum_i^n \lambda_i Z(x_0) \quad (1)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(x_i) - Z(x_i + h))^2], \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

식 (1)에서 $z^*(x_0)$ 는 예측값, λ_i 는 i 번째 지점의 가중치, $Z(x_0)$ 는 i 번째 지점의 값이고, 식 (2)에서 h 는 자료 간의 거리 Z 는 위치에 대한 자료의 값을 나타낸다(Chun *et al.*, 2005; Choi, 2013; Jang *et al.*, 2003; Journel, 1986).

다양한 크리깅 기법 중 평균은 미지이나 일정하다는 가정을 가지는 정규크리깅(Ordinary Kriging) 기법이 본 연구의 자원량 추정에 활용되었다.

일반지질

연구지역인 하동군 북천면 직전리 일대는 영남 육괴의 남서부에 해당하는 지역으로 선캄브리아기의 지리산 편마암복합체를 기반으로 회장암과 섬록암이 관입하고, 동측으로 백악기 경상계 퇴적암의 최하위층인 낙동층이 부정합으로 피복하고 있다(그림 1). 연구지역의 기반암인 지리산 편마암복합체는 화강암질 편마암류와 결정질 편암으로 구성된 준 편마암류와 화강편마암과 반상변정편암으로 구성되는 정 편마암류로 이루어져 있으며,

정 편마암류가 준 편마암류를 관입 및 포획하고 있다. 이들 정 편마암류의 관입 및 정치 시기는 $2,230 \pm 50 \sim 1,950 \pm 50$ Ma로 보고되었다(Kim *et al.*, 1991). 지리산 편마암 복합체는 적어도 세 차례의 광역변성작용을 받았으며, 변성상은 1차 각섬암상, 2차 및 3차 녹염석-각섬암상으로 보고된 바 있다(Lee, 1980; Lee *et al.*, 1981). 회장암체는 산정회장암체와 하동회장암체로 구분되며 지리산 편마암복합체를 회장암체가 관입하였다. 연구지역인 하동지역의 회장암체는 남북방향의 대상분포를 보이고(Jeong *et al.*, 1989), 연령은 $1,678 \pm 90$ Ma (Kwon and Jeong, 1990), $1,792 \pm 90$ Ma (Park *et al.*, 2001)로 보고되었으며, 이들 회장암체는 괴상형, 간극누적형, 그리고 엽상형 회장암으로 구분된다(Lee *et al.*, 1999; Jeong *et al.*, 2010). 연구지역은 하동 회장암체 분포지역 중 최남단에 위치한 지역으로, 남서쪽에서 회장암체를 섬록암체가 관입을 하고 있으며(Jeong *et al.*, 1989), 진교 지질도폭(Kim and Kang, 1965)에서는 이 암체를 시대미상으로 기재하고 있으나, 최근 연대측정 결과 227.3 ± 1.9 Ma로 중생대 트라이아스기에 해당한다(Moon *et al.*, 2012). 하동 티탄철석 광체는 회장암체 중간극누적형 암체에 국한되어 폭 2~10 m, 연장 약 14 km 남북방향의 대상으로 발달하고 있다(Jeong *et al.*, 1989).

Table 1. Input Data of Drilling Details in Jikjeon-Ri, Hadong

Drilling hole	Depth (m)	Dip direction ^(o)	Dip angle ^(o)	
HD92-1	120	90	70	Seo <i>et al.</i> (1992)
HD92-2	170	90	70	
HD-1	150	120	80	This study
HD-3	100	120	80	
BC-1	78.5	200	70	
BC-1-1	81.5	270	70	
BC-2	130	250	65	

3D 모델링

광체 3D모델링은 광체의 형상을 3D로 표현해 광체의 정보를 가시화하여 나타내는 방법으로, 이를 활용해 연구지역 광체의 자원량을 산정하였다. 이와 같은 광체의 3D 모델 구축을 위해 지질학적 사물의 모델링에 사용되는 GOCAD S/W를 활용하여 광체의 3D 모델링을 수행하였으며, 본 연구의 광체 모델링을 수행하기 위해 데이터베이스를 구축하고, 이러한 데이터를 활용하여 광체의 모델을 구축하였다.

D/B 구축

광체 모델링을 위해서는 지질조사, 시추탐사 등의 데이터가 요구되며, 시추탐사를 통해 수집된 자료가 많을수록 그 정확도가 높아진다. 따라서 본 연구를 위해 기존에 발간된 학술논문, 연구보고서 등에서 모델링을 위해 필요한 입력자료들을 추출하고, 이를 본 연구의 자료들과 함께 적용하여 광체모델링을 수행하였다.

광체의 3D 모델링을 수행하기 위해 사용된 기본 자료는 수치지형도, 시추탐사자료, 지표지질조사자료, 품위 데이터 등 총 4가지이다. 이 중 수치지형도는 지표광체 및 시추공의 위치정보를 확인하기 위해 필요한 자료로서, 국토지리정보원에서 발간된 수치지형도(1 : 5,000)를 이용하였다.

광체의 모델링을 수행하기 위해서는 지표하부의 자료가 필요하므로, 이를 구축하기 위해 한국지질자원연구원에서 1992년 및 2011~2012년도 직전리 일대에서 수행한 시추탐사자료를 활용하였다.

시추탐사자료는 HD92-1, HD92-2, HD-1, HD-3, BC-1, BC-1-1, BC-2의 총 7개 공의 시추정보로 이루어져 있으며, 모두 경사시추가 수행되었고, 전체 탐사심도는 830m이다(표 1). 시추코어에서의 착맥 구간 및 품위 데이터는 그림 2와 같다. 시추코어 내의 착맥 구간은 0.1~11 m의 길이를 보이며, 광체는 간극누적형 또는 엽리형으로 나타난다. 착맥 구간 내는 산성 암맥의 관입이 관찰되는 구간이 존재한다(그림 3C). 품위 데이터는 Seo *et al.* (1992)에 의해 분석된 Ti 품위 데이터(1992년도 탐사된 시추코어에 해당) 및 휴대용 X-선 형광분석기(Portable XRF)를 사용하여 40~50 cm 등간격으로 측정된 데이터(2011~2012년도 탐사된 시추코어에 해당)가 활용되었으며, 품위 분포는 0.05~30.23 wt%를 보인다. HD-3 시추코어에 대해서는 품위 분석이 수행되지 않았는데, 이는 시추공 내 착맥구간이 거의 나타나지 않았기 때문이다(그림 2).

또한 광체 모델의 검증을 위해 지표지질조사를 통한 광체의 야외노두정보가 활용되었다. 직전리 일대에서 확인되는 광체는 폭이 약 3~10 m의 총 6매의 광체로 하동방향의 도로변에 노출되어 북측으로 연장되어 나타난다. 이들 광체는 지표상에서 단속적으로 나타나며, 일부가 심하게 풍화된 양상을 보인다.

이와 같이 구축된 정보들을 활용하여 광체의 모델링 및 자원량 평가를 수행하였다.

광체 모델링

광체 모델링에 앞서 수치지형도에서 등고선을

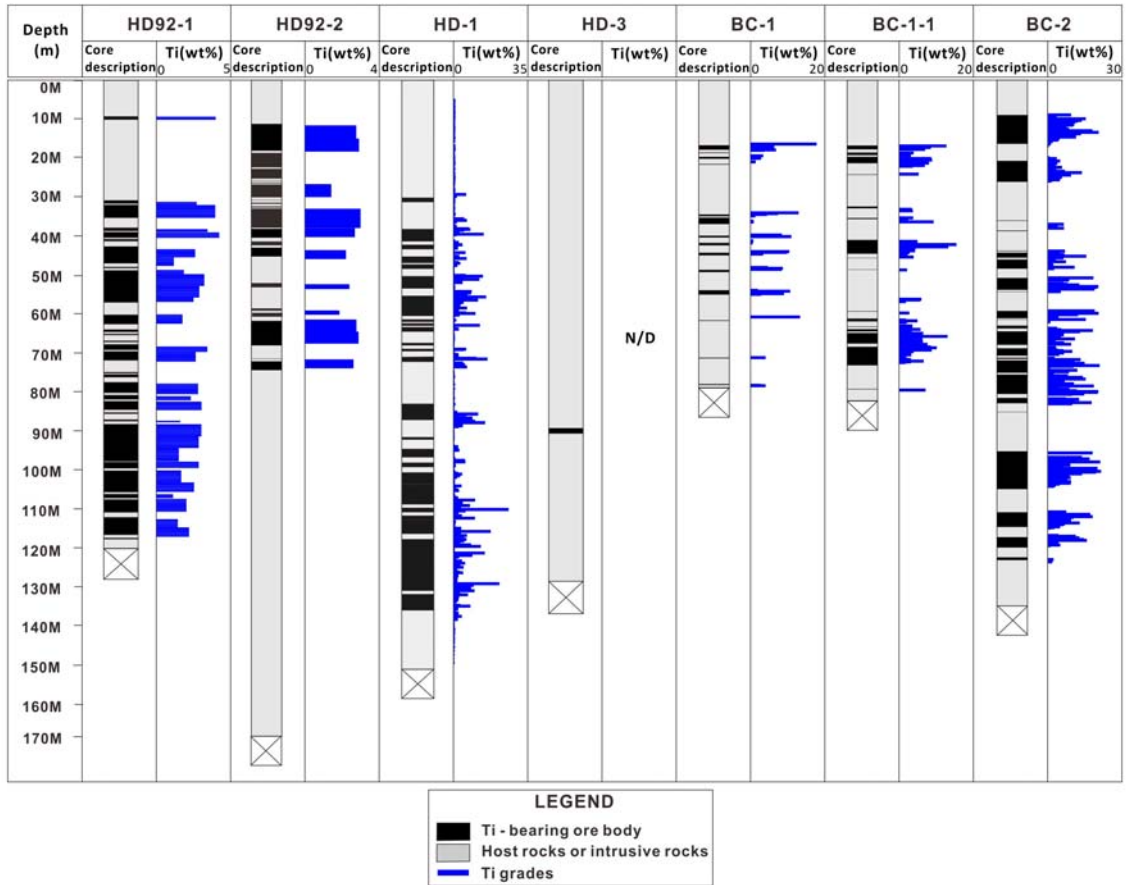


Fig. 2. Description and Ti grade (wt.%) of columnar sections of boreholes (core numbers are same as shown in Table 1) from Jikjeon-ri, Hadong.

추출하여 지형모델을 구축하고, 이를 통해 입력된 자료들의 위치정보가 확인된다. 광체 모델링은 구축된 정보 중 시추공정보로 분류된 데이터를 활용하여 수행되었다. 시추공정보는 시추공위치, 시추방향과 깊이 및 코어 로깅 자료로 구성되어 있으며, 이러한 자료들을 활용하여 광체구간을 분류하였고, 광체 모델링을 실시하였다. 지표광체노두의 정보는 표토로 덮여있거나 풍화가 많이 진행되었던 연구지역의 광체노두의 특성상 지표에서 관찰된 노두의 폭과 길이에 대한 정보가 정확한 광체의 특성을 담고 있다고 볼 수 없다. 따라서 모델링된 광체의 지표연장선과 실제 지표에 나타나는 광체와의 일치여부를 확인하여 광체 모델의 적합성을 판단하는데 사용되었을 뿐 광체 모델링에 활용되지는 않았다. 광체로 분류된 광맥구간 내에는 1

mm~수 mm의 석영맥과 수 cm의 관입암맥이 존재해 하나의 같은 광체를 절단하고 있음이 확인된다(그림 3C). 그러나 이러한 규모의 석영맥과 관입암맥은 m단위로 표현되는 모델 내에 표현하기에는 그 규모가 작음으로 광체 모델링에 있어서 고려하지 않았다. 따라서 소규모의 관입암이 존재하더라도 관입암구간까지 포함하여 광체구간으로 정의하였다.

광체 모델링에서 광체모델을 구축하는 방법으로는 구성된 자료를 직접적으로 활용하는 방법과 간접적으로 활용하는 방법이 있다. 자료를 직접적으로 활용하여 모델을 구하게 되면 주어진 자료에 완벽히 일치하는 광체모델을 구성할 수 있는 반면에 입력된 자료의 분포가 일정하지 않은 경우 광체모델의 면이 매끄럽지 못할 뿐 아니라 실제와 달리

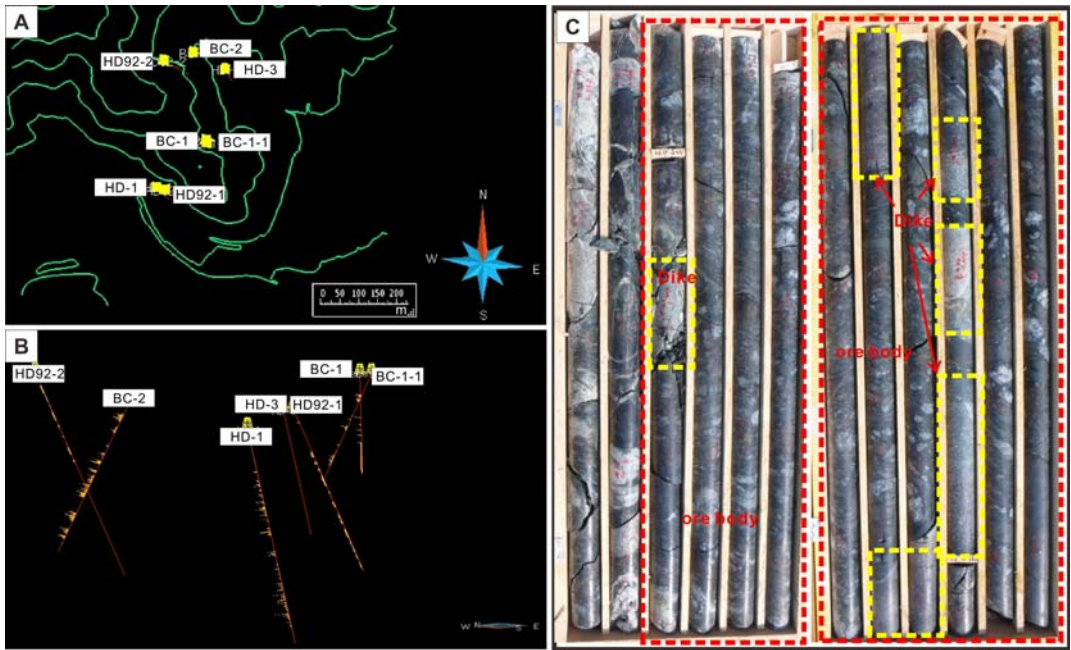


Fig. 3. Locations and properties of drilling cores (A) locations of boreholes, (B) dipping directions and angles of boreholes, (C) The selected cores showing dikes and ilmenite ore bodies in the intercumulated anorthosite.

그 형태가 왜곡되어 모델링되는 경우가 발생한다. 이와는 다른 방법인 자료의 간접적인 적용방법을 Discrete Smooth Interpolation (DSI)라 하며, 이는 Mallet (1989)에 의해 제안되었다. DSI는 주어진 자료와는 무관한 초기 광체모델의 면을 형성한 후 이를 주어진 자료에 보간법을 활용하여 보간(Interpolation)하는 방법으로 이러한 방법을 활용하게 되면 주어진 자료와는 가장 근접하면서도 형태가 자연스러운 광체모델을 구할 수 있다. 본 연구에서 활용된 자료들은 그 분포가 일정하지 않을 뿐만 아니라 자료의 수도 제한적이다. 따라서 수행된 3D 모델링에서는 매끄럽고 자연스러운 광체의 모델을 구하기 위하여 DSI를 이용한 모델링을 통해 광체 모델을 구축하였다.

광체의 3D 모델링 결과, 총 5개의 광체 모델이 모델링되었다. 맥상으로 나타나는 5개의 광체는 NS방향의 연장과 W방향의 경사를 보이며 발달하고 있음을 확인할 수 있다(그림 4D). 완성된 모델을 검증하기 위한 방법으로 연구지역에서 조사된 지표광체노두의 위치조건과 모델링을 통해 구한 광체 모델의 지표연장성과의 비교를 시도하였다. 광체 모델의 지표상 위치와 초기 입력된 실제 지표

광체노두의 위치 정보를 비교한 결과, 두 지점의 위치가 비교적 일치함을 확인하였다(그림 4E & 4F). 따라서 본 광체 모델링을 통해 구현된 광체의 모델이 적합하다고 판단할 수 있다. 그림 4E에서 광체 모델과 만나지 않는 한 개 지점의 노두위치를 확인할 수 있는데 이는 그림 4F에서 나타나는 것처럼 시추공 내에 광체를 모델링할 수 있는 착맥구간이 나타나지 않아 해당 광체의 모델링이 수행되지 않았기 때문이다. 이는 광체 모델링을 위한 초기자료로 불균등한 시추공의 분포자료를 활용하였기 때문으로 생각되는데, 이러한 점은 본 연구의 모델링이 가지는 한계로, 추가적인 시추탐사를 통한 자료를 추가함으로써 보완해 나가야 할 사항으로 판단된다.

자원량 평가

자원량 평가를 위해 자료를 분석하는 과정으로 프로퍼티(Property) 모델링이 수행된다. 프로퍼티 모델링은 자원량 산출에 요구되는 자료인 광체부피 및 평균 품위 산출을 위한 데이터 분석의 과정이다. 이러한 과정을 통해 수행되는 그리드 모델

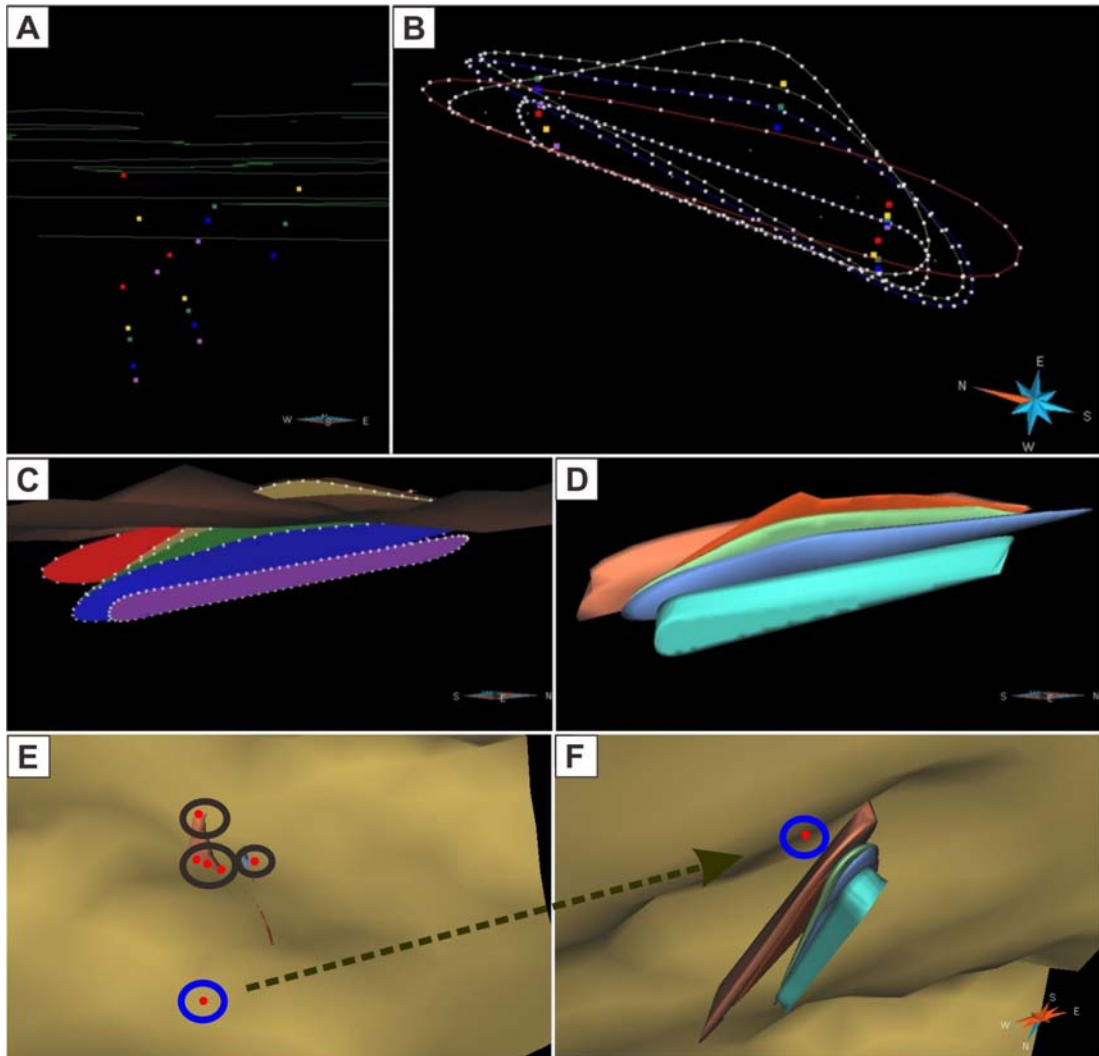


Fig. 4. Work-flow for ore bodies modeling. (A) Established top and bottom markers of ore bodies by different color pairs, (B) Initial curves for constructing ore body surfaces, (C) Initial surfaces of ore bodies from data set, (D) Final calculation of 3D modeling resulting in 5 veins of Ti ores along N-S in direction with westward dipping. (E) Locations of outcrops indicated by red dot. (F) Locations of ore bodies on surface by 3D modeling fit outcrop locations, except only one outcrop (blue circle) doesn't fit ore bodies model, because it doesn't have any subsurface data.

링, 데이터의 통계분석 및 품위추정의 절차를 거쳐 최종적으로 이 지역에서 모델링된 광체에 대해 자원량을 평가하였다.

그리드 모델링

3D 모델링을 통해 정의된 광체모델은 수학적 데

이터를 입력할 수 있는 공간정보를 포함하고 있지 않다. 그러므로 품위와 같은 수치 데이터를 입력해 주기 위해서 광체모델 내에 벡터를 가지는 격자를 형성해 데이터를 입력한다. 본 연구에서는 전체 광체들을 포함하는 $300(u) \times 300(v) \times 300(w)$ 개의 격자를 형성해주었고, 이러한 격자 내에 Ti 품위 정보를 할당하여 통계분석을 수행하였다.

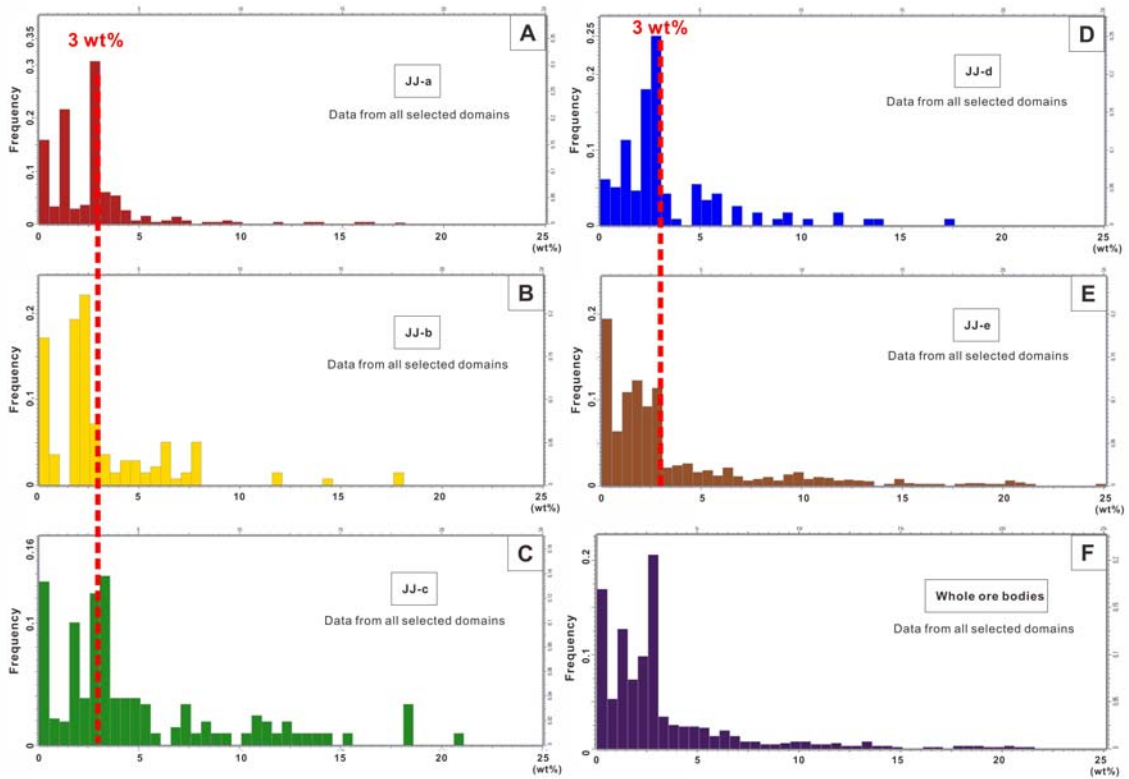


Fig. 5. Histograms of raw Ti grades data for each ore body, JJ-a (A) to JJ-e (E) are the ore bodies from top to bottom in sequence. JJ-f (F) is average Ti grade of whole ore bodies. Geostatistics analysis of raw data show correlation of Ti grades distribution among ore bodies would be used for kriging analysis.

데이터의 통계분석 및 품위추정

데이터의 통계분석을 위해서는 데이터를 광체 내 각각의 위치에 할당해 주어야 한다. 이때 광체 내의 격자에 할당되어지는 데이터는 Ti 품위 값이며, 이러한 품위 데이터는 1992년도 Seo *et al.*에 의해 분석된 Ti 품위 데이터(1992년도 탐사된 시추코어에 해당)와 휴대용 X-선 형광분석기를 사용하여 40~50 cm 간격으로 일정하게 측정된 데이터(2011~2012년도 탐사된 시추코어에 해당)를 활용하였고, 이러한 데이터를 광체모델 내 시추공이 지나는 지점 또는 그에 근접한 격자 내에 블럭킹(Blocking)하였다. 그 결과, 블럭킹이 완료된 데이터의 분포 및 평균값을 히스토그램(Histogram)으로 나타내었다(그림 5). 각각의 광체모델에 따른 데이터의 히스토그램을 보면, 5개의 광체 모두에서 Ti 품위 값이 3 wt%를 기준으로 분포하고 있음이 확인된다(그림 5A-E). 따라서 광체는 5개로 분리

되어 모델링되었지만 Ti 품위 데이터의 분포가 유사하므로 모두 동일한 광체일 것으로 판단하였다. 이러한 결과는 이 지역의 광체가 후기 관입암체에 의해 하나의 동일 광체가 세맥상의 별개의 광체로 나타난다는 기존의 연구와도 일치한다(Seo *et al.*, 1992). 따라서 시추공 내의 모든 Ti 함량 데이터를 한 개의 그룹으로 분류해 품위추정을 위한 분석에 활용하였다. Ti 함량 데이터 중 225개의 초기 데이터가 블럭킹에 활용되었고, 각각의 격자에 입력된 데이터는 최소값 0.05 wt%, 최대값 21.16 wt%의 범위를 가지며(그림 5F), 블럭킹된 데이터의 평균값은 약 3.23 wt%를 나타낸다. 초기 데이터의 블럭킹 결과, 총 683개의 데이터가 광체 내 격자에 입력되었다.

품위추정을 위한 품위분포도의 작성을 위해서는 데이터의 통계분석을 필요로 한다. 통계분석에 활용되는 데이터는 광체의 품위 데이터로 이들은 공간상에 분포하고 있다. 따라서 공간상에 분포하고

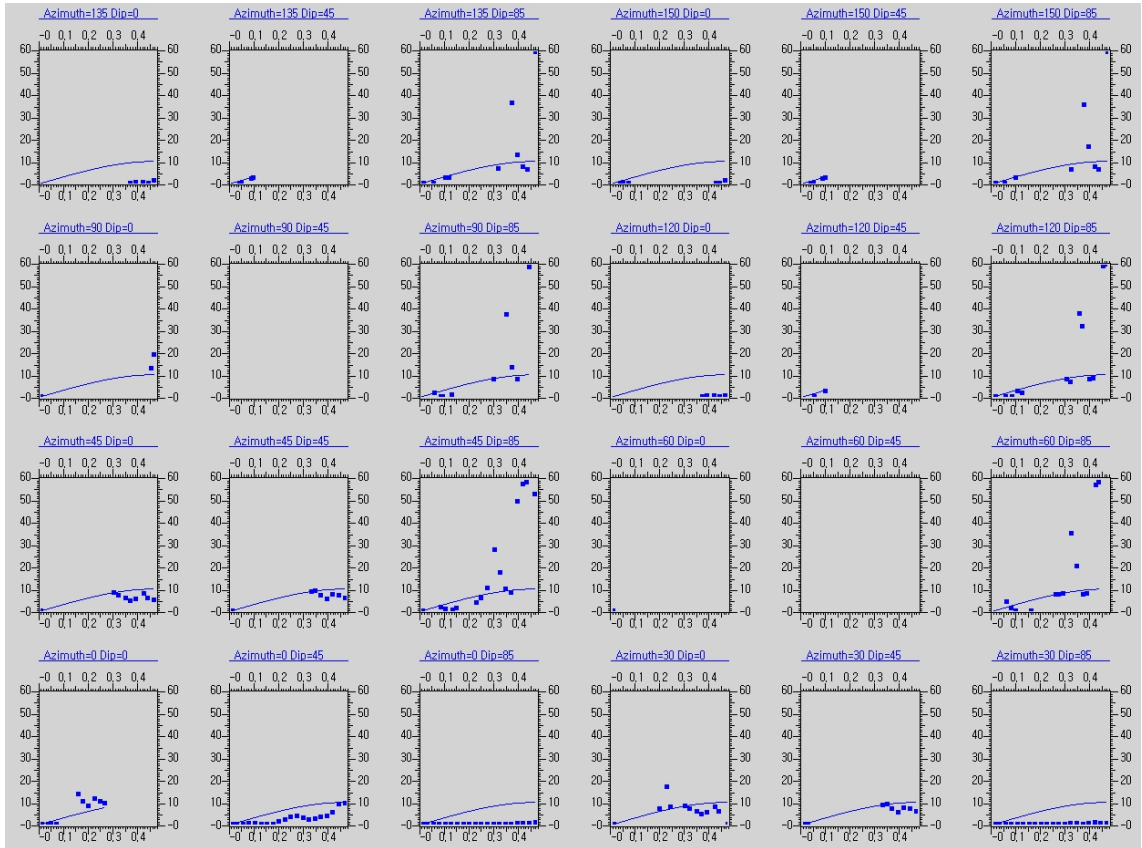


Fig. 6. Experimental variogram and 3D semi-variogram (spherical model), using Kriging method for Ti ore bodies in Jikjeon-Ri, Hadong.

Table 2. Resource estimations of Ti ore bodies in Jikjeon-Ri, Hadong

Ore body	Grade (wt.%)			Volume (MT)	Standard deviation	Variance
	Mean	Min.	Max.			
JJ-a	2.67	0.05	17.74	1,393,720	0.96	0.93
JJ-b	2.22	0.10	7.70	181,278	1.27	1.62
JJ-c	4.39	0.07	18.17	186,404	2.20	4.86
JJ-d	3.06	0.07	13.28	209,254	0.39	0.15
JJ-e	3.53	0.06	21.16	527,145	2.70	7.27
Whole ore	2.98	0.05	21.16	2,497,801	1.69	2.85

있는 Ti 품위 값을 추정하기 위해 지구통계학적 기법인 크리깅을 활용하였고, 공간상의 데이터를 분석하기 위해 3D 반베리오그램(Semi-variogram)이 계산되었다. 계산된 실험적 베리오그램을 활용하여 이론적 베리오그램을 정의해 주었으며, 베리오그램

의 모델유형 중 spherical 모델을 적용하였다. 베리오그램에서 두 자료 간의 거리(분리거리)가 일정한 거리 이상일 때 대부분의 자료들은 아무런 유사성을 나타내지 않게 되는데, 이때 데이터가 상관관계를 보이는 최대 분리거리를 상관거리라고 하며, 이

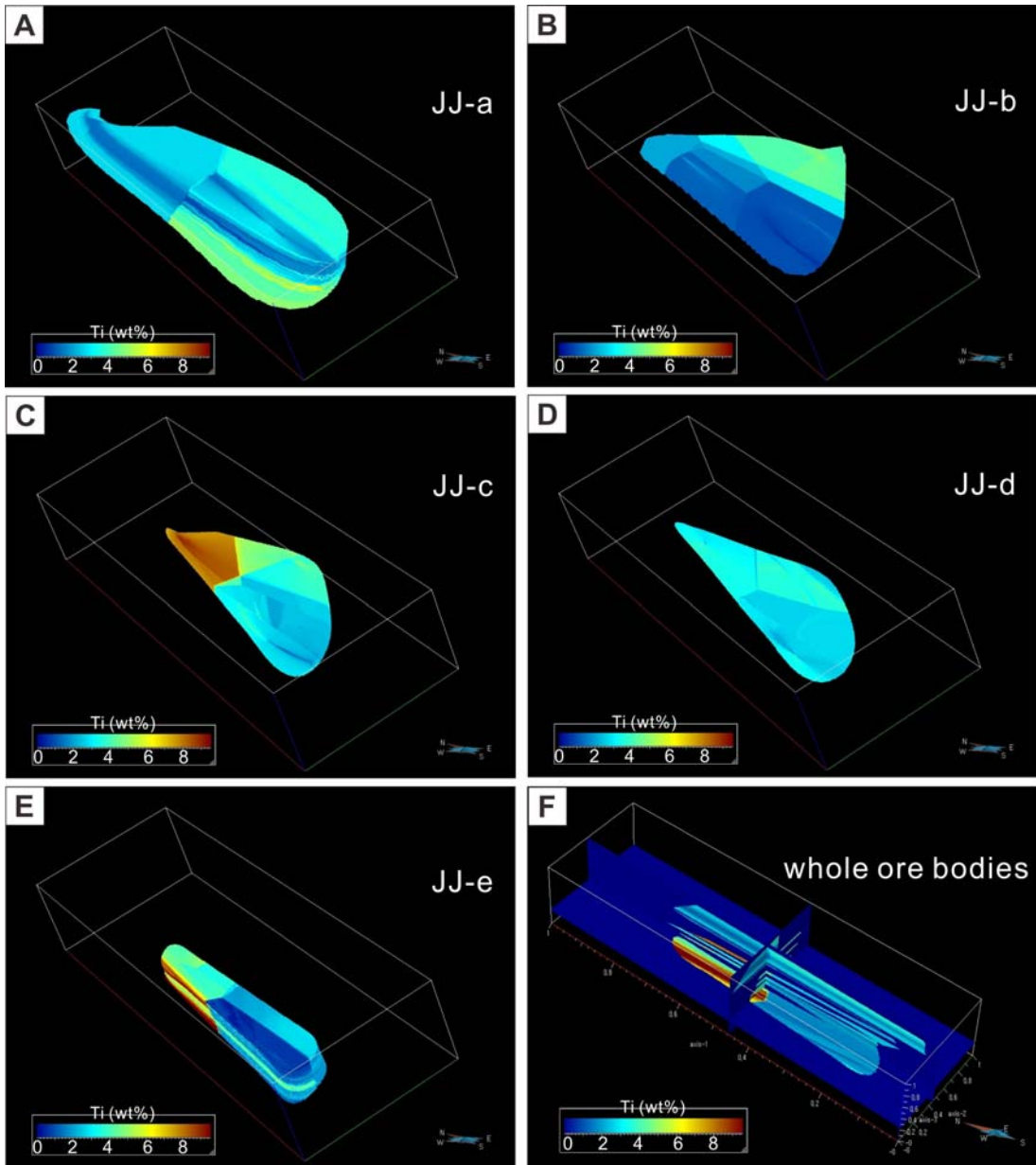


Fig. 7. Ti concentration maps for each ore bodies (A-E) and whole ore bodies (F). Average values of Ti-grade are 2.67 wt% (JJ-a), 2.22 wt% (JJ-b), 4.39 wt% (JJ-c), 3.06 wt% (JJ-d) and 3.53 wt% (JJ-e), respectively.

때의 베리오그램값은 문턱값이라는 일정한 값을 나타낸다(Choi, 2013). 본 연구에서 실험적 베리오그램으로부터 정의한 이론적 베리오그램에서 나타내는 상관거리는 0.471이며, 문턱값은 10.14의 값을 가진다(그림 6). 이때의 상관거리 값은 중심으

로부터 거리의 비율을 나타내는데, 중심에서부터 0.471까지 데이터가 상관성을 나타내고 있으며, 이는 전체 거리를 1로 가정하였을 때의 범위이다.

정의된 베리오그램을 활용하여 크리깅기법을 통한 전체 광체의 품위추정을 수행하였다. 계산된

각 광체의 평균품위는 표 2와 같고, 그림 7에서 각 광체의 Ti 품위 분포를 나타낸다. 가장 높은 품위를 보이는 광체는 JJ-c 광체로 평균품위 Ti 4.39 wt%가 산출되었으며, 가장 낮은 품위를 보이는 광체는 JJ-b 광체로 평균품위 Ti 2.22 wt%의 값을 나타낸다. 5매 광체 전체에 대한 Ti 평균 품위는 2.98 wt%로 초기 데이터의 평균값과 유사한 값을 나타낸다.

자원량 산정

3D 모델링을 통해 구한 광체 모델들의 부피 및 지구통계학적 기법을 활용하여 추정된 광체 내 티타늄의 평균품위를 활용하여 자원량을 산출하였다. 광체 모델을 통해 계산된 전체 광체의 부피는 2,498,101 m³이고, 티타늄의 평균품위는 2.98 wt%이다(표 2). 광체의 암석밀도는 이전 연구(Seo *et al.*, 1992)의 직전리 지역 자원량 평가에서 사용된 암석밀도 3 t/m³을 적용하였다. 3D 모델링을 통한 연구지역의 티탄철석 광체의 자원량을 산출하였다. 그 결과 티탄철석 광체의 광석량은 7,494,303톤이며, 티타늄의 평균품위를 적용하여 Ti의 자원량을 산출한 결과, 223,330톤의 Ti가 산정되었다. 이는 과거 이 지역에서 계산된 매장량 1,193,550톤(Ti 평균 2.44 wt%)보다 약 8배 정도 많은 자원량으로, 이는 모델링을 통해 탐사가 불가능한 구간의 예측이 가능했고, 데이터의 통계분석을 통하여 품위 데이터의 분포도 작정을 통한 평균품위 추정이 가능했기 때문으로 판단된다.

결 론

연구지역은 하동의 회장암 분포지역 중 최남단에 위치한 지역으로, 분포된 회장암체 중 주로 간극누적형 회장암체에 내에 함티탄 광물인 티탄철석광체가 발달하고 있다. 이러한 광체의 노두는 연구지역의 도로변 및 계곡을 따라 불연속적으로 노출되어 있다. 하동군 북천면 직전리에 발달하는 티탄철석 광체의 지하 부존상태 및 크기를 예측하기 위하여 이 지역에서 수행된 시추탐사 자료 및 지질 조사를 통한 지표노두 정보를 활용하여 3D 모델링을 수행한 결과, 5매의 맥상 광체가 남북방향으로 발달하며, 이들 광체는 서측방향으로 경사져 있음이 확인되었다.

지구통계학적 기법을 활용하여 광체의 평균품위

및 자원량을 산출한 결과 광체는 Ti 평균품위 2.98 wt%, 광체의 부피는 약 250만 m³를 나타내며, 223,330톤의 Ti 자원량이 산정되었다. 산정된 자원량만을 가지고 이 지역에 발달하고 있는 티탄철석 광체의 경제성을 평가 할 수는 없다. 하지만 향후 기술적, 환경적, 경제적인 평가까지 수행된다면 산정된 자원량을 활용하여 광체의 경제성 평가가 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 시추자료가 비교적 많이 분포되어 있는 직전리 지역에서만 3차원 광체 모델링이 수행되었으나, 본 연구에서 수행된 3D 모델링방법을 하동지역의 회장암체 내 발달하는 티타늄광체 전체에 적용함으로써 과거부터 논의되어온 하동의 티타늄광체에 대한 가시화 및 자원량 평가에 활용 할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 에너지기술평가원의 에너지·자원기술개발사업-전략응용기술사업 중 ‘국내 희유금속 탐사 및 활용기술개발’과제(1단계: 2012.1.1.~2014.12.31.)의 2차년도 사업의 일부로서 수행되었다. 심사해주고 교열해주신 익명의 심사위원에게 감사드린다.

REFERENCES

- Ahn, H.S. (2013) Three-Dimensional geologic modeling of the pohang basin distributed in Haedo-Dong, Nam-Gu, Pohang-Si, Korea. M.S. thesis, Seoul National University, Seoul, 75p.
- Caumon, G., Collon-Drouaillet, P., Le Carlier de Veslud, D., Viseur, S., and Sausse, J. (2009) Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures. *Mathematical Geosciences* 2009, 41, 927-945.
- Choi, J.G. (2013) *Geostatistics*. Sigma Press, 413p (in Korean).
- Chun, S.H., Sun, C.G., and Chung, C.K. (2005) Application of geostatistical method for geo-layer information. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 25, 103-115 (in Korean with English abstract).
- Esfahani, N.M. and Asghari, O. (2013) Fault detection in 3D by sequential Gaussian simulation of Rock Quality Designation (RQD) Case study: Gazestan phosphate ore deposit, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 3737-3747.

- Gwak, S.H. and Lee, D.S. (2001) 3-D Visualization of reservoir characteristics through GOCAD. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 4, 80-83 (in Korean with English abstract).
- Hartman, H.L. and Mutmanský, J.L. (2002) *Introductory Mining Engineering* (2nd Ed). John Wiley & Sons, 570p.
- Jang, J.H., Hong, T.K., and Pyong, N.K., (2003) Spatial Data Analysis using the Kriging Method. *The Korean Communications in Statistics*, 10, 432-432 (in Korean with English abstract).
- Jeong, J.G., Kim, W.S., and Watkinson, D.H. (1989) Geologic structure of Hadong anorthositic rocks and associated titanium orebody. *Journal of The Geological Society of Korea*, 25, 98-111 (in Korean with English abstract).
- Journel, A.G. (1986) *Geostatistics: Models and Tools for the Earth Sciences*. *Mathematical Geology*, 18, 119-140.
- Jung, J.S., Kim, J.S., Cho, H.S., Song, C.W., Son, M., Ryoo, C.R., Chi, S.J., and Kim, I.S. (2010) Occurrence and deformation of Fe-Ti ores from the Proterozoic Hadong anorthosites, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 31-49 (in Korean with English abstract).
- Kim, N.J. and Kang, P.C. (1965) Geological map of Korea(Chingyo sheet scale 1:50,000). Geological survey of Korea.
- Kim, S.Y. and Seo, J.R. (1990) Study on geology and ore deposits for rare metals in Korea. KIER-Research report, KR-90-2D-1, 82p (in Korean with English abstract).
- Kim, S.Y., Seo, J.R., Yang, J.I., and Kim, S.B. (1991) Geology and ore deposits of rare elements in Hadong and Uljin Area, Korea. KIGAM research report, KR-91-2D-1, 78p (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.J., Lee, C.S., and Kang, S.W. (1991) Petrochemistry on intermediated-basic plutons in Jirisan area of the Ryongnam massif. *Journal of Korean Earth Science Society*, 12, 100-122 (in Korean with English abstract).
- Koh, M.S. (2010) Occurrences of ilmenite deposits in Hadong-Sancheong Area. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 23, 25-37 (in Korean with English abstract).
- Kwak, J.Y. and Choi, J.B. (2013) 3D Modeling and resource estimation of the Archean greenstone belt gold deposits in Australia by using GOCAD. *Proceedings of the Annual Joint Conference*, the Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea, 3-5 (in Korean).
- Kwon, S.T and Jeong, J.G. (1990) Preliminary Sr-Nd isotope study of the Hadong-Sancheong anorthositic rocks in Korea: Implication for their origin and for the precambrian tectonics. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 341-349 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.S. and Kim, H.G. (2002) A case study on 3-D modeling of the orebody by using the 3D modeler. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 5, 93-98 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.M., Jeong, J.G., and Kim, W.S. (1999) The preliminary study on the evolution of Hadong anorthositic rocks and their genetic relations with ilmenite-bearing ore bodies. *Journal of The Geological Society of Korea*, 35, 321-336 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.M. (1980) Some metamorphic aspects of the Meta-pelites in Jirisan(Hadong-Sancheong) Region. *Journal of The Geological Society of Korea*, 16, 1-15 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.M., Na, K.C., Lee, S.H., Park, B.Y., and Lee, S.W. (1981) Regional metamorphism of the metamorphic rock complex in the southeastern region of the Sobaegsan massif. *Journal of The Geological Society of Korea*, 17, 169-188 (in Korean with English abstract).
- Mallet, J.L. (1989) Discrete Smooth Interpolation. *ACM Transactions on Graphics*, 8, 121-144.
- Mallet, J.L. (2002) *Geomodeling*. OXFORD University Press, 599p.
- Moon, J.J., Moon, S.W., and Jwa, Y.J. (2012) SHRIMP zircon ages of the dioritic rocks from the Hadong area in the southeastern Yeongnam massif. *Fall Conference of the Association of Korean Geoscience Societies*, The Geological Society of Korea, 211 (in Korean).
- Naji, H.S. and Khalil, M.K. (2012) 3D geomodeling of the Lower Cretaceous oil reservoir Masila oil field, Yemen. *Arabian Journal of Geosciences*, 5, 723-746.
- Park, K.H., Kim, D.Y., and Song, Y.S. (2001) Sm-Nd mineral ages of charnockites and ilmenite-bearing anorthositic rocks of Jirisan area and their generic relationship. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 10, 27-35 (in Korean with English abstract).
- Schetselaar, E.M. (2013) Mapping the 3D lithofacies architecture of a VMS ore system on a curvilinear-faulted grid: A case study from the Flin Flon mining camp, Canada. *Ore Geology Reviews*, 53, 261-

- 275.
- Schneider, A., Gerke, H.H., and Maurer, T. (2011) 3D initial sediment distribution and quantification of mass balances of an artificially-created hydrological catchment based on DEMs from aerial photographs using GOCAD. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 87-100.
- Seo, J.R., Park, S.W., Lee, P.G., Oh, M.S., and Lee, B.J. (1992) Study of rare metal mineral resources in the Hadong area. KIGAM research report. KR-92-1C-2, 72p (in Korean with English abstract).
- Wang, G., Zhu, Y., Zhang, S., Yan, C., Ma, Z., Hong, D., and Chen, T. (2012) 3D geological modeling based on gravitational and magnetic data inversion in the Luanchuan ore region, Henan Province, China. *Journal of Applied Geophysics*, 80, 1-11.

접수일(2013년 11월 30일), 수정일(1차 : 2013년 12월 16일),
게재확정일(2013년 12월 30일), 책임편집위원 : 김순오