철광산의 광체 평가를 위한 지구통계학적 복합 모델링

안태규 · 오석훈* · 김기연 · 서백수

강원대학교 에너지 · 자원공학과

Geostatistical Approach to Integrated Modeling of Iron Mine for Evaluation of Ore Body

Taegyu Ahn, Seokhoon Oh*, Kiyeon Kim, and Baeksoo Suh

Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University

요 약: 복합 물리탐사(전기비저항, MT)와 지질(시추 자료 및 코어 물성)정보에 대해 지구통계학적 복합해석 기법을 적용하여 3차원 광체 모델링 평가를 수행하였다. 우선, 복합 물리탐사를 통해 시추공 및 그 외의 전체적인 지역에 대한 비저항대 분포를 파악할 수 있었으며, 코어 물성 시험을 통해 연구지역의 자철석(광체)이 코어 내부의 밀도가 높은 전도성 성분(Fe)에 의해 밀도의 증가에 따라 비저항이 감소하는 상관관계를 나타냄을 파악하였다. 3차원 광체 모델링을 수행하기 위해 사용된 자료는 전기비저항 탐사, MT 탐사, 물성 자료와 시추 자료 등이며, 전체 획득 자료 및 시추 자료에서 추출한 광체의 품위 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 자료의 복합 해석을 위해 지구통계학적 기법 중에서, 부족한 실제 측정 자료의 평균 및 분산을 잘 재생시키는 실현 값을 통해 지역적으로 변화하는 불균질성을 잘 묘사하는 순차 가우시안 시뮬레이션(sequential Gaussian simulation)을 사용하였다. 획득된 전체 자료와 품위 자료만을 이용하여 도출한 시뮬레이션 결과, 광체가 기존에 연구되어 존재하는 잔광체의 일정 부분에서 유사한 분포를 나타냈으며, 추가적으로 하부 깊은 심도에 대해 광체의 분포 양상을 추정할 수 있었다.

주요어: 복합 물리탐사, 지질 정보, 물성 시험, 지구통계학적 시뮬레이션

Abstract: Evaluation of three-dimensional ore body modeling has been performed by applying the geostatistical integration technique to multiple geophysical (electrical resistivity, MT) and geological (borehole data, physical properties of core) information. It was available to analyze the resistivity range in borehole and other area through multiple geophysical data. A correlation between resistivity and density from physical properties test of core was also analyzed. In the case study results, the resistivity value of ore body is decreased contrast to increase of the density, which seems to be related to a reason that the ore body (magnetite) includes heavy conductive component (Fe) in itself. Based on the lab test of physical properties in iron mine region, various geophysical, geological and borehole data were used to provide ore body modeling, that is electrical resistivity, MT, physical properties data, borehole data and grade data obtained from borehole data. Of the various geostatistical techniques for the integrated data analysis, in this study, the SGS (sequential Gaussian simulation) method was applied to describe the varying non-homogeneity depending on region through the realization that maintains the mean and variance. With the geostatistical simulation results of geophysical, geological and grade data, the location of residual ore body and ore body which is previously reported was confirmed. In addition, another highly probable region of iron ore bodies was estimated deeper depth in study area through integrated modeling.

Keywords: multiple geophysical data, geological information, physical properties test, geostatistical simulation

서 론

최근 광물 자원 가격 상승으로 80년대 이후 폐쇄되었던 국내 광산들에 대한 관심이 증가하고 있으며, 일부 광산들에 대한 재평가 및 재생산이 이루어지고 있는 실정이다. 하지만 우

리나라의 경우, 지난 20여 년간 국내 광물 자원 개발 분야에 대한 장기적인 침체로 인하여 자원 개발 분야의 인력 및 기술력이 선진국에 비해 부족한 실정이다. 또한, 과거의 시추 및 지질 자료만으로는 공간적 분포가 너무 좁고, 제한적이어서 정확성이 다소 떨어진다고 파악이 되었으며(오석훈, 2005), 연구지역의 3차원 광체 모델링을 수행할 때 자료가 부족하거나 없는 부분에 대한 불확실성을 줄이고, 보다 정확한 결과를 도출하기 위한 방안이 불가피한 실정이다.

따라서 자원 확보 경쟁에서 성공하기 위해서는 광산 생산 계획 및 관리 기술이 요구되며, 또한 본 연구에서 언급하고자

2012년 10월 18일 접수; 2012년 11월 07일 수정; 2012년 11월 14일 채택;
*Corresponding author

E-mail: gimul@kangwon.ac.kr

Address: Dept. Energy and Resources Eng., Kangwon National Univ.,
Hyoja 2-dong, Chuncheon, Gangwon 200-701, Korea

하는 개발 이전의 광체 탐사 및 개발 기술이 필수적이다(김성중, 2009). 이를 위해서는 우선적으로 광체의 분포 위치 및 양상을 정확히 평가하는 것이 가장 중요한 문제 사항이므로, 지표·지하 구조의 성질, 공간적 특성을 나타내는 양질의 자료 획득 및 이를 활용할 수 있는 새로운 평가 기법이 마련되어야 할 것이다.

본 연구에서는 이 평가 기법으로 측정 자료의 공간 특성을 고려하여 미 측정지점에 대한 대상 값을 추정하는 지구통계학을 이용하였다. 지구통계학은 확률함수 모델(random function modeling)에 기반한 공간분석 기술로서, 측정되지 않은 지점의 값들이 공간적으로 의존하는 확률함수의 집합이라는 가정을 통해 대상 지역의 관심 변수에 대해 추정하는 방법이다(Goovaerts, 1997). 기존의 경우 일반적으로 지질 및 시추 자료만을 가지고 광체의 분포 위치와 특성을 분석하는 경우가 많았으며, 이는 시추 자료의 특성상 그 정보의 분포가 좁고, 제한적이어서 시추공 이외의 지역에 대한 양상을 파악하기가 매우 어렵기 때문에 빈 공간에 대한 상대적인 자료의 부족에 따른 불확실성이 높아진다. 결과적으로 이에 지구통계학적 크리깅을 적용하는 것은 오해석을 유발하거나 부족한 자료에 근거하여 추정 분석하는 과정에서 실제 현상과 거리가 먼 결과를 내놓을 가능성이 많고(오석훈, 2005), 최종적인 모델링 결과에서도 약간의 오차가 발생할 수 있을 것이라는 판단을 하였다. 따라서 시추 자료의 한계를 해결하기 위해 복합 물리탐사 자료 및 코어 물성시험 상관성 자료(비중, 밀도, 공극률, 전기비저항, P파 속도)를 추가적으로 분석·적용하였다. 물리탐사 자료의 경우, 시추 자료와는 달리 자료의 해상도는 다소 떨어지지만 넓은 영향 범위의 특성을 지니고 있어 시추 자료만을 적용시키는 것 보다는 넓은 영역에 대해 신뢰성이 높을 것으로 판단되었다.

전기비저항 탐사의 경우 상대적인 해석 심도가 알아 깊은

위치에 분포하는 광체의 영향을 볼 수 없어서 이를 보완하고자 주파수에 따라 원하는 깊이에 대한 비저항 양상 및 지하 구조 단면 결과를 파악할 수 있는 MT (Magnetotelluric) 탐사를 수행하였다. 즉, 복합 탐사는 단일 탐사에 의해 발생할 수 있는 불확실성에 의한 위험 부담을 최소화 하고, 탐사 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 장점을 가지고 있다(박계순 외, 2007).

전기비저항은 주로 비중, 밀도, 공극률, P파 속도 등에 따라 좌우되기 때문에 탐사에 의해 얻어진 비저항 분포가 올바른 지질학적 의미를 가지기 위해서는 탐사 대상 지역에 대한 지질정보 외에도 조사지역 구성암석에 대한 암석 비저항적 물성 연구가 뒷받침되어야 한다(김영화, 1999). 따라서 물성 시험을 통한 연구 지역의 암석 물성과 전기비저항의 관계를 밝힘으로써 해당 물성에 따른 전기비저항 값의 변화를 분석하고, 광체 품위와의 연관성에 대한 파악이 가능하였다.

최종적으로는 정보의 부족으로 유발되는 크리깅의 한계 및 불확실성의 증가를 해결하기 위한 방안으로서 지구통계학적 순차 가우시안 시뮬레이션(sequential Gaussian simulation) 기법을 적용하여 모델링을 수행하였다. 이용된 자료는 획득한 전체 자료 및 시추공 자료를 통해 추출된 품위 자료이며, 3차원 광체 모델링 결과를 통해 연구 지역의 천부 및 심부에서의 광체 분포 위치 및 양상을 평가하였고, 기존에 연구되어 존재하는 잔광체와의 비교 분석을 수행하였다.

연구 지역

양양철광산은 강원도 양양군 양양읍에서 북서쪽 방향 외곽지에 위치하며 지리 좌표상으로는 동경 128° 33' 10.405" ~ 128° 34' 10.405", 북위 38° 04' 00" ~ 38° 06' 00"에 해당된다. 행정구역상으로는 강원도 양양군 서면 일대에 위치한다. 1933년 개발을 시작해 62년 간 자철광을 개발·생산하였던 국내

Fig. 1. Pictures of the study area. (a) Satellite picture around the study area (the red box indicates the study area) (b) Picture of the mining area (115, 116) at large scale.

최대의 철광산이었으나, 채산성 악화 및 값싼 철광석 수입으로 인한 경제성 하락으로 1995년에 폐광되었다. 2007년 이후 광물 가격의 상승 및 수요의 증가로 인해 재개광 및 재개발을 준비하여 현재는 채굴단계까지 진행하고 있다(최동호 외, 2010). 본 연구에서는 양양철광산 전체인 양양 115, 116, 125 광구(Fig. 1) 중에서 115, 116 광구의 일부에 대하여 연구를 수행하였고, 이후부터 연구 지역은 두 광구의 일부분을 의미한다. 두 광구의 일부를 선정한 것은 신뢰도가 높은 시추 자료가 많이 분포하고 있고, 목적 자료를 획득하기 위한 접근 가능성이 높아 광체의 분포 위치 및 경향성을 추정하기가 가장 용이한 곳으로 판단된 것이 그 이유이다.

연구 지역의 지질은 대표적으로 선캄브리아 이연 편마암류와 변성퇴적암류, 시대미상 섬장암(반정질 엽리상, 반정질 괴상, 엽리상, 괴상)(Lee and Kim, 1968), 그리고 쥐라기 흑운모

화강암과 반화강암질/페그마타이트질 화성암이 관입하고 있으며, 단층대 및 수직/경사 시추 자료(검은색 점 및 파란색 선)의 분포를 확인할 수 있다(Fig. 2). 철 광체는 변성퇴적암류/변성화산암류내 변성염기성암류에 속한 각섬암과 각섬석-흑운모 편암을 따라 배타되고 있으며, 광체 하반을 따라 변성퇴적암류/변성화산암류, 변성염기성암류 및 섬장암이 전반적으로 조화적인 관계로 보고되고 있다(Lee, 1979).

광상은 각섬석, 각섬석-흑운모 편암, 변성사암 등의 엽리에 평행하게 렌즈상 또는 호상으로 산출하는 것이 일반적이거나, 후기 섬장암의 관입과 변성작용 등으로 교란되었다. 섬장암과의 접촉부와 포획된 부분에서는 괴상의 고품위 결정질 자철석(magnetite, Fe_3O_4)이 산출된다. 본 연구 지역에 존재하는 잔광체는 남쪽으로부터 양논광체 일부, 양양광체, 수갱광체(남향/중앙/북향), 7구신광체이며, 대체로 변성퇴적암 내에 엽리와 평행하게 동일층군에 배타되고 있다(김재동 외, 2009).

공간자료 획득

시추 자료

연구지역에는 과거 개발시에 작업한 60 ~ 80년대(이하, 과거) 시추공 및 재개발에 착수하면서 새로 작업한 10, 11년도

Fig. 2. Geological map of study area (115, 116).

Table 1. Grouping of rocks by geological similarity.

Number	Rock type
0	Magnetite (ore body), mineralized zone
1	Syenite
2	Metasediments
3	Gneiss
4	Other rocks (quartz porphyry, feldspar porphyry etc.)

Fig. 3. Grouping of rocks of borehole data in the study area by SGeMS. (a) top view (b) side view

(이하, 최근) 시추공이 곳곳에 밀집되어 있다. 과거 자료는 주로 양양 116광구에 많이 밀집해 있는 깊은 심도의 수직 시추공이며, 새로 작업한 자료는 양양 115광구 하단 및 우측 상단에 얕은 심도의 경사 시추공으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 과거 시추공(31개공) 및 최근 시추공(10개공), 총 41개의 시추 주상도 정보를 이용하여 연구를 수행하였다.

시추 자료는 우선적으로, 각 시추공에 대한 시추 주상도 결과 및 연구 지역의 지질 및 암석 개요를 바탕으로 유사한 암종별로 그룹화하고 각각의 그룹 번호를 지정해 주었다(Table 1). 그룹화 수행 및 번호 지정은 비슷한 성인에 따른 각 암종들의 분포 위치를 파악하고, 또한 그룹화된 정보를 기준으로 암종별 전기비저항 값(ohm-m)을 지정해주어 이후의 지구통계학적 시뮬레이션 적용 시에 편의상 광체의 구분을 보다 수월히 하기 위하여 수행된 작업이다.

연구 지역의 시추 자료를 지구통계학적으로 분석하기 위해 지구통계모델링 소프트웨어SGeMS(Stanford Geostatistical Modeling Software)를 사용하여 공간적 좌표를 생성하였고, 0번(파란색-광체 및 광화대), 1번(하늘색-섬장암), 2번(녹색-변성퇴적암류), 3번(주황색-편마암류), 4번(빨간색-석영반암, 장석반암 등의 기타 암종)으로 그룹화하여 표현하였다(Fig. 3).

시추 자료는 직접 시추해서 추출한 정보를 바탕으로 작성한 자료이기 때문에 신뢰성이 높다는 장점을 지니지만, 연구지역의 3차원 모델링을 수행하는데 있어서 시추공 자료 자체의 정보로는 공간적 분포가 너무 좁고, 제한적이어서 본 시추공 자료 이외의 지역에 대한 광체 및 광화대 양상을 파악하기가 어렵다는 한계점을 지니고 있다(오석훈, 2005).

따라서, 시추 및 지질 자료만으로는 광체 모델링의 정확성이 다소 떨어진다고 파악이 되었으며 연구 지역의 3차원 광체 모델링을 수행할 때 자료가 부족하거나 없는 부분에 대한 불확실성을 줄이고, 보다 정확한 결과를 도출하기 위한 방안이 불가피하다. 이에 추가적으로 해상도는 떨어지지만 넓은 범위의 지하 구조 양상을 파악할 수 있는 물리탐사(전기비저항, MT) 자료 및 연구지역의 암석 비저항대 분포와 품위를 정확히 비교·분석하기 위한 코어 물성시험 자료를 추가적으로 확보하였다.

물리탐사 자료

본 연구지역의 광체를 모델링하고 분포 양상을 파악하기 위해서는 공간적 범위가 좁지만 해상도가 우수한 시추공 자료뿐만 아니라, 광체의 양상을 간접적으로 파악할 수 있는 넓은 범위의 양질의 물리탐사 자료를 획득하여 복합 해석을 수행하는 것이 필수적이라 파악하였다. 연구지역의 목적 광물은 철(Fe) 성분이 주를 이루는 자철석으로, 전기전도도에 가장 민감한 반응을 보이는 특성을 지니고 있다. 이에 여러 종류의 탐사 중에서 측정 결과로 전기비저항(전기전도도의 역수)을 산출하는 전기비저항 탐사 및 MT 탐사를 수행하였다.

(1) 전기비저항 탐사

전기비저항 탐사는 천부의 지하 구조 및 광체의 부존 양상을 파악하기 위해 총 9개 측선을 측정하였다. 이 중, 4개의 측선은 연구 지역의 양양 115광구와 116광구의 접하는 곳으로 과거 개발 후의 붕락에 의한 천부 폐석 더미의 영향을 파악할 수 있었고, 나머지 측선들은 시추공 위치에 근접 설계하여 교

Fig. 4. Measurement lines of electrical resistivity survey (yellow lines), borehole data (blue lines and points)

Fig. 5. Inversion results of electrical resistivity survey through SGeMS.

차 시킴으로써 접하는 부분에서 비저항대 범위의 유사성을 파악하여 자료의 신뢰성 및 3차원적인 지하 구조 분석을 가능하게 하였다(Figs. 4, 5).

Fig. 4는 연구 지역의 수직/경사 시추 자료(파란색 점 및 선)와 9개의 전기비저항 탐사 축선(노란색 선)이며, 각 축선에 대해서 21채널의 쌍극자 배열법을 이용하여 측정하였다.

전기비저항 탐사 9개 축선에 대한 역산 결과를 SGeMS 파일 형식으로 변환하여 표현하면, Fig. 5와 같이 각 축선의 공간적 위치 및 교차하는 지점에 대한 비저항대 분포의 유사함을 확인할 수 있고, 전체적인 로그스케일 단위의 전기비저항(ohm-m) 분포 양상(파란색으로 갈수록 저비저항대)을 파악할 수 있다.

(2) MT 탐사

전기비저항 탐사는 철광석의 분포 양상을 파악하는데 효율적이지만, 상대적인 해석 심도가 얕아 깊은 위치에 분포하고 있는 광체에 대한 영향을 파악하는데 문제가 따른다. 따라서 이러한 한계점을 보완하기 위해 자연적 또는 인공적인 전자기장을 이용하여 심부의 비저항 양상을 확인 할 수 있는 MT탐사를 수행하였다.

Fig. 6. Measurement location of MT survey (red points). Two yellow arrows mean representative borehole.

Table 2. Information of representative borehole.

Borehole number	Depth (m)	Strike/Dip	Range of ore body		Vertical depth (m)	Grade	Type
			From	To		Fe (%)	
(a) 10-3	250	N85W/70	231.3 240.0	240.0 240.5	217.4-226.0	19.7 55.9	Mineralized zone Ore body
(b) 70-2	360	90 (Verticality)	218.0 322.5	226.2 344.8	Same to range	38-65	Ore body

Fig. 7. One-dimensional inversion results of MT survey. (a) 10-3 (b) 70-2.

탐사 측정 설계는, 연구지역에서 시추공 및 전기비저항 탐사 측선과 근접한 부분에 주안점을 두어 위치를 설정하였다. 이는 시추공의 광체 부존 위치에 상응하는 MT탐사의 비저항대 분포를 통해 서로의 상관성을 규명할 수 있으며, 전기비저항 탐사 결과와는 측정 심도를 보완하는 동시에 천부에서의 비저항대 일치 여부의 파악이 가능하기 때문이다. 이에 근거한 탐사 설계를 바탕으로 총 39개의 측정에서 탐사를 수행하였으며 (Fig. 6), 1차원 역산 프로그램을 이용하여 자료를 처리하였다. 역산 결과들 중에서 대표 결과를 추출하여 이에 해당하는 각 제원을 나타냈으며, 수직 심도는 경사 시추를 고려하여 실제 지표에서부터의 광체 위치까지의 수직 거리를 나타낸 것이다 (Table 2).

Fig. 7(a)는 10-3공 위치에서의 MT 자료의 1D 역산 결과이며, Fig. 7(b)는 70-2공 위치에서의 MT 자료의 1D 역산 결과이다. 본 연구에서 수행된 MT 1차원 역산 결과는 일반적으로 (a)와 같은 비저항 값 변화 양상을 많이 나타내었다. 대표적인 두 결과 모두에서 비저항 값이 Table 2에 표기된 착맥 구간의 수직 심도와 각각 일치하는 부근에서 급격히 작아지는 양상을 보이고 있다. 이를 통해, 시추 자료의 착맥 구간에 대한 상관성 분석이 가능하며, 역산 결과의 타당성을 검증할 수 있다.

암석코어 물성시험

연구지역에서 전기비저항이 어떠한 물성에 의해 좌우되는지를 규명하기 위해 총 5개의 물성 (비중, 밀도, 공극률, 전기비저항, P파속도)을 측정하여 각각의 상관관계를 분석하였다.

우선적으로, 연구 지역에서 노란색 점으로 표시한 노두 코어 (22개)와 파란색 점으로 표시한 10년도 및 11년도 총 10공의 시추 코어 (39개), 총 61개의 암석 코어를 취득하였으며 (Fig. 8), 노두 코어의 경우 실내 코어링 과정을 통해 코어 시료를 성형하였다. 코어 시료는 40~110 mm의 길이로 제작하였으며, 노두에서 획득한 코어의 직경은 약 52.3~56.1 mm이고, 시추 코어의 직경은 36~47.5 mm로 다양하다. 이후, 모든 암석 코어에 대하여 수돗물에 일정시간 침전시킨 간극수에 담가서 42시간 동안 진공상태에서 포화를 시킨 후 탄성과 속도 측정 장

비와 샘플홀더, 중량 측정 장비를 이용하여 P파 속도, 전기비저항, 포화단위중량, 수중단위중량을 측정하였다. 그리고 다시 건조 오븐에서 42시간 동안 건조를 시킨 후 건조단위중량을 측정하였다. 측정된 단위중량 자료들을 기초로 각 코어에 대한 비중, 밀도, 공극률의 값을 산출하였다.

코어비저항 측정을 위해서 샘플홀더의 측정 장치 모식도(박삼규, 2004)를 이용하여 사전에 샘플홀더를 제작하였다 (Fig. 9(a)). 그리고, 코어 시료 전체에 일정한 전류를 흘려주기 위해 코어 시료의 단면적과 크기가 같은 직경의 전극판이 필요하였으며, 이에 전기전도도가 우수한 구리 재질의 판을 이용하여 전극판을 제작하였다. 또한, 전극판과 코어 시료의 접지비저항을 낮추어 주기 위해서 전해질 용액으로 NaCl 용액과 함께 필터용지(Filter paper)를 준비하여 코어 비저항 측정 시에는 필터용지를 NaCl 용액에 포화시켜서 사용을 하였다. 측정 방식은 샘플홀더 중앙부에 완전 포화시킨 코어 시료를 놓고, 한 쌍

Fig. 8. Acquisition location of sample cores (outcrop and borehole).

Fig. 9. Pictures of sample holder for measuring core resistivity. (a) Schematic of sample holder (b) Manufactured sample holder and its measurement picture.

의 전위전극과 또 다른 한 쌍의 전류전극이 각각 독립하여 시료 전체의 비저항을 측정하는 방식인 4전극법 GS식 샘플홀더(Katsube, 1969)에 따라 전류전극(C) 및 전위전극(P)과 전해질 용액을 포함한 여과지(F)를 PFCF-시료-FCFP의 순서로 나란히 놓는 방법이다(김영화, 1999).

코어 전기비저항 측정 장비로는 ABEM(社)의 SAS-1000을 이용하였고, SAS-1000에 전류전극(C)과 전위전극(P) 선을 연결하여 코어 시료의 전기비저항 측정을 수행하였다(Fig. 9(b)). 이 때, 장비에서 사용되는 중합(Stack) 및 오차율에 주안점을 두고, 신뢰성이 높은 양질의 자료를 획득하고자 주의하였다.

획득된 자료들의 물성 값을 이용하여 각 암석코어들을 자철석(광체)과 기타 암종(섬장암, 편마암, 편암, 암맥, 안산암)으로 그룹을 분류하여 상관관계를 분석하였다.

Fig. 10(a)는 코어의 밀도와 비중과의 관계를 나타낸 것으로, 일정하게 비례하는 상관관계를 나타내고 있어 일반적인 이론 결과와 동일함을 확인하였다. Fig. 10(b)는 보라색 원으로 표시된 것이 자철석, 검은색 원으로 표시된 것이 기타 암종이다.

자철석이 기타 암종에 비해 밀도가 상대적으로 크게 측정되었으며, 일반적으로 밀도가 증가하면 비저항도 증가하지만 반대의 경향성을 보였다. 이는 자철석 코어 내부의 전도성 물질인 철(Fe) 성분 때문에 밀도와 전기전도도가 증가한 것으로 보인다. 따라서, 연구 결과 자철석은 밀도가 증가함에 따라 비저항 값은 감소하는 반비례의 관계를 나타내었다. 코어의 밀도에 따른 전기비저항 값의 상관관계 분석을 통해, 광체 품위와의 연관성 및 비저항대의 유추가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 자철석 코어의 비저항 값 범위는 이후의 3차원 광체 모델링 시, 광체 분포를 구현하기 위한 기준 문턱값으로 사용하였다.

전체 획득 자료의 공간적 표현

Fig. 11(a)는 연구지역에서 획득한 전체 자료를 SGeMS를 이용하여 나타낸 결과이다. 먼저, 검은색은 시추공(41개공)이고, 하늘색은 전기비저항 탐사(9개 측선), 녹색은 MT탐사(39개 측정점), 마지막으로 빨간색이 암석코어 물성자료(61개)를 표현한 것이다. 연구지역에 대해 공간적으로 모든 양질의 자료를 보유

Fig. 10. Correlation results of physical properties. (a) Specific gravity-density (b) Density-resistivity.

Fig. 11. Spatial expression results of total acquisition data in study area. (a) top view (b) side view. Black means borehole data, cyan means electrical resistivity survey data, green means MT survey data, red means physical properties data of cores.

하면 좋지만, 획득 자료의 경우 측정되지 않은 빈 공간이 많기 때문에 지구통계학적 기법을 이용하여 3차원 광체 모델링을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 방안이 모색되어야 한다. Fig. 11(b)는 (a)의 측면도로서, 전체 자료의 공간적 위치 및 심도를 상호 비교하기 위해 나타냈다.

지구통계학 이론

지구통계학적 방법에 의해 추정을 시도할 경우, 관심 변수에 대한 직접적인 측정과 더불어 부가적인 정보가 있을 경우 훨씬 정확한 결과를 제공함을 제시하였다(Issaks and Srivastava, 1989). 특히 이러한 부가정보는 직접 측정된 변수의 자료가 부족하거나 공간적으로 연속성을 갖지 못한 경우 더욱 중요한데, 시추공 주변에 그 정보가 한정된 광체 분포 추정 문제의 경우 더욱 그 의미가 크다. 본 연구 사례와 같이 조사 대상이 3차원 일 경우에는 자료의 부족에 의한 해석의 오류 가능성이 더욱 크다 할 수 있다(오석훈, 2005). 여기서, 분산을 최소화하는 방식의 크리깅 기법은 자료의 간격이 매우 조밀한 경우에는 좋은 결과를 보일 수 있다. 그러나 본 연구 지역의 경우, 자료의

수가 부족하고, 간격이 멀어짐에 따라 크리깅 결과는 지나치게 부드러운 경향이 나타날 가능성이 크다. 이러한 특성상 특정 이상대의 규모가 실제보다 부풀려져서 나타날 가능성이 많으

Fig. 12. Flow chart of data processing.

Fig. 13. Histogram of each data. (a) Total data (log) (b) Transformed result of total data (log) (c) Grade data (d) Transformed result of grade data.

며 공간적 연속성에 대한 확률적 해석이 불가능하고 단정적인 결과만 제공할 가능성이 크다. 따라서 이러한 크리깅 기법의 단점을 극복할 수 있는 방안으로서 측정된 실제 자료의 히스토그램과 유사한 분포를 가지면서, 여러 번의 실현(realization)을 통해 확률적 분석이 가능한 지구통계학적 순차 가우시안 시뮬레이션을 적용하였다.

순차 가우시안 시뮬레이션

순차 가우시안 시뮬레이션은 자료의 공간적인 상관관계가 반영되면서 자료의 불균질성을 효과적으로 묘사 할 수 있으며, 동일한 조건 하에서도 시뮬레이션을 수행할 때마다 다른 결과를 나타내므로 추정 값의 불확실성을 예측할 수 있다. 식 (1)과 같이 주어지는 n 개의 위치에서의 $z(x)$ 의 다변량분포(multivariate distribution) 함수를 n 개의 단변량 조건부 분포(univariate conditional distribution) 함수의 곱으로 표현할 수 있다는 것에 기초한다(Johnson, 1987).

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n; z_1, z_2, \dots, z_n) \\ = f(x_1; z_1) f(x_2; z_2 | Z(x_1) = z_1) \dots f(x_n; z_n | Z(x_\alpha) \\ = z_\alpha, \alpha = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 n 은 자료의 위치의 개수이며, z_α 는 위치 α 에서의 값이다. 식 (1)은 n 개의 주어진 자료를 사용하여 하나의 확률변수 z_1 을 생성하고, n 개의 자료와 첫 번째 값(z_1)을 모두 주어진 자료로 가정하여 두 번째 확률변수 z_2 를 생성한다. 이와 같은 과정을 마지막 분포까지 반복하면 하나의 순차 시뮬레이션이 완료되는 것이다.

자료 처리 및 결과 해석

Flow chart

Fig. 12는 광체 모델링을 하기 위해 각 자료를 획득하고, 품위 자료 및 전체 자료에 대해 각각 지구통계학적 시뮬레이션을 수행하여 물리 탐사 및 물성 자료의 보충에 따른 불확실성 정도 감소의 파악 및 3차원 광체 모델링 결과를 비교 및 분석하였다. 본 연구에서는 이 순서도를 바탕으로 자료 처리 단계별 해석을 수행하였다.

히스토그램

순차 가우시안 시뮬레이션은 자료가 정규분포 형태를 나타내지 않을 때 이를 정규분포를 따르도록 변환시켜야 하는 가장 기본적인면서도 중요한 과정을 거쳐야 한다(Goovaerts, 1997). 따라서 본 단계에서는 SGeMS의 trans라는 도구를 이용하여 원래 자료를 Gaussian 분포인 평균0, 분산1로 설정하여 변환시켰으며, 이에 변환된 자료의 정규 분포성을 확인하였다.

Fig. 13(a)는 시추 자료, 전기비저항 탐사, MT탐사, 코어 물성(이하, 전체 자료) 값에 로그스케일을 취한 히스토그램 결과($0 \sim 9.16 \text{ ohm-m}$)이며, Fig. 13(b)는 (a)의 값을 정규분포 형태로 변환시켜 평균0, 분산1에 근접하도록 생성시킨 결과이다. Fig. 13(c)는 시추 주상도를 통해 확인된 품위 자료(이하, 품위 자료)의 값($10 \sim 68\%$)의 히스토그램 결과이며 Fig. 13(d)는 (c)의 값을 정규분포 형태로 변환시켜 평균0, 분산1에 근접하도록 생성시킨 결과이다. 변환 결과, 순차 가우시안 시뮬레이션을 수행하기 위한 중요 과정인 정규 분포 형태 모습을 확인할 수 있었다.

Fig. 14. Variogram results of each data. (a) Total data (b) Grade data.

Table 3. Parameters of each variogram.

Type	Model	Azimuth	Dip	Directional feature	Nugget effect	Sill	Max range (m)
(a)	Spherical	0	0	Isotropy	0.05	0.675	88
(b)	Spherical	45	0	Anisotropy	0.05	0.93	83.7

배리오그램

배리오그램은 해당 자료들간의 거리에 따른 상관성 정도를 파악하고 시뮬레이션의 변수로 적용시키기 위해 분석을 수행하였다. Fig. 14(a)는 전체 자료에 대해서 전방향(omni-direction)의 실험적 배리오그램을 생성하여, 구형 모델의 이론적 배리오그램을 도시한 결과로 잡음이 없는 이상적인 결과가 구현되었다. Fig. 14(b)는 품위 자료에 대해서 이방성(45도)의 구형 모델로 이론적 배리오그램을 도시한 결과인데, 상대적으로 시추 자료의 개수가 빈약하고 그 자료간의 거리가 멀어서 불확실성의 증대 및 잡음으로 인해 (a)결과에 비해 덜 이상적인 결과가 구현되었다.

또한, 매우 작은 상관거리에서 배리오그램 값이 0에 가깝도록 나온 것은 일반적으로 다른 시추공의 품위 자료가 아닌 수직적으로 한 공간에 분포하고 있는 근접한 자료의 영향이 크게 반영되어 나타난 결과로 이론적 배리오그램을 도시할 때 중요도를 낮추어 평가하였다. Table 3은 두 배리오그램의 변수를 나타내었다.

시뮬레이션

시뮬레이션은 각 자료들의 상관성을 이용하여 알려지지 않은 지점에 대한 값을 추정하여 연구 지역에서의 전체적인 비저항 분포 및 품위를 파악하고자 수행하였다. Fig. 15(a)는 전체 자료를 Fig. 14(a)를 이용하여 나타낸 시뮬레이션 한 개의 결과이며 Fig. 15(b)는 SGeMS의 도구인 E-type(기대값)을 이용하여 20개의 시뮬레이션 실행 값들을 평균치로 나타내어 상대적으로 부드러우며 주변의 잡음(noise)을 제거해준 결과이다. 두 결과 모두 원래 자료와 같은 위치에서 실제 측정 값을 그대로 유지하고 있으며, 주변에도 측정 값의 영향을 받아 지역적으로 넓은 범위까지 유사한 양상을 보이고 있다. Fig. 15(c)는 품위 자료를 Fig. 14(b)의 설정 변수를 이용하여 나타낸 시뮬레이션 한 개의 결과이며 Fig. 15(d)는 품위 자료에 대해서 Fig. 15(b)와 동일한 방식으로 나타낸 결과이다. 마찬가지로 광체가 존재하는 위치에서는 실제 측정 값을 그대로 유지하고 있으며, 주변에도 측정 값의 영향을 받아 지역적으로 넓은 범위까지 유사한 양상을 보이고 있다.

Fig. 15. Simulation results of each data. (a) One-simulation of total data (b) Mean of twenty-simulation of total data (c) One-simulation of grade data (d) Mean of twenty-simulation of grade data. (colorbar of (a), (b): resistivity (ohm-m), colorbar of (c), (d): percent of grade).

하지만 Fig. 15(a), (b), (c), (d) 결과 모두 원래 자료가 존재하지 않으며 영향이 미치지 않는 동떨어진 위치에서도 저비저항대 또는 높은 품위 값이 나타난 곳을 확인할 수 있다. 이는 SGeMS가 격자 자체를 육면체 형태로 생성함으로써 주로 격자와의 경계면 상에서 나타나는 오차인 것으로 판단된다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 연구에서의 최종 3차원 광채 모델링 결과에서는 코딩 작업을 통해 해당하지 않는 부분에 대해서는 영역을 잘라내어 오차의 영향을 최소화하였다.

상호 비교

일반적으로 순차 가우시안 시뮬레이션은 비록 그 값들이 완전히 일치하지는 않지만 평균과 분산을 효과적으로 재생한다 (Goovaerts, 1997). Fig. 16(a), (c)는 전체 자료 및 품위 자료 각각의 실제 측정 값에 대한 히스토그램이고, Fig. 16(b), (d)는 전체 자료 및 품위 자료를 정규분포로 변환시키고 시뮬레이션을 수행한 후, 이 정규분포 형태를 원래 자료의 분포 형태

로 되돌려 평균과 분산 값을 비교하는 기법인 back trans를 통해 생성된 히스토그램 결과이다. 일반적으로 원래 자료 값을 이용하여 크리깅을 수행한다면, 분포가 다양하고 튀는 값이 존재하기 때문에 평균과 분산을 효과적으로 재생하지 못하고 왜곡현상이 발생할 가능성이 많다. 반면에 Table 4에서 볼 수 있듯이 시뮬레이션을 적용하여 생성된 히스토그램의 평균과 분산은 시뮬레이션을 수행하기 이전의 결과인 Table 4(a), (c)의 평균, 분산과 차이는 다소 존재하나 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 순차 가우시안 시뮬레이션은 자료가 가지고 있는 원래의 값을 보전하면서 자료의 불균질성을 효과적으

Table 4. Value comparison of simulation mean and variance.

Type	Mean	Variance
(a) – total data (log)	3.02358	1.81434
(b) – back trans	2.89982	2.3006
(c) – grade data	32.681	372.097
(d) – back trans	32.4546	345.624

Fig. 16. Mutual comparison of histogram results about each data. (a) Original total data (log) (b) Back trans histogram after simulation of original total data (log) (c) Original grade data (d) Back trans histogram after simulation of original grade data.

로 묘사함을 알 수 있다.

3차원 광체 모델링

3차원 광체 모델링은 전체 자료 및 품위 자료 각 20개의 시뮬레이션 결과를 평균을 내어 광체 분포에 대해서만 표현하였고, 측정 자료가 전혀 존재하지 않는 외곽 및 격자 경계면 부분에 대해서는 불확실성을 해소하기 위해 잘라내어 결과를 도출하였다. Fig. 17의 각 결과에서 회색 선으로 표시되어 있는 것은 과거 개발 당시의 광산보안도, 지질 및 지형도 등의 자료를 통해 구현된 잔광체의 모습이다. 본 연구에서는 잔광체가 존재하는 위치에서의 광체 분포를 파악해 비교해 보고, 추가적으로 잔광체 하부의 깊은 심도에 대해서도 광체가 부존하고 있을지 가능성을 예측하고자 하였다. Fig. 17(a), (b)는 전체 자료에 대해 20개의 시뮬레이션 평균치를 이용하여 광체의 분포 양상을 구현한 것으로, 코어 물성 시험을 바탕으로 광체의 전기비저항 문턱값 범위를 로그 스케일 단위 0 ~ 1.5 (ohm-m)로 설정하여 나타낸 결과이다. 시뮬레이션 결과, 광체는 주로 MT

탐사 자료의 저비저항대 영향을 크게 받아 수직선상으로 깊은 심도까지 분포하고 있는 것을 확인할 수 있고, 특히 잔광체의 7구신광체 및 수갱 남향광체 부근에서 분포 양상이 다소 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 17(c), (d)는 품위 자료에 대해 20개의 시뮬레이션 평균치를 이용하여 광체의 분포 양상을 구현한 것으로, 품위 20% 이상에 대해서만 나타낸 결과이다. Fig. 17(a), (b)와 마찬가지로 잔광체의 7구신광체 심부 및 수갱 남향 광체 부근에서 고품위와 저품위의 광체가 어우러져 분포하고 있는 것을 확인할 수 있으나, 시추공 내 광체의 깊이가 알아 품위 자료로는 잔광체 하부의 깊은 심도에 대해 광체 분포 양상을 파악하기가 어렵다.

잔광체 부근의 MT 탐사 자료는 잔광체에 의한 저비저항대의 영향으로 그 하부 깊은 심도까지 연장된 광체 분포의 가능성에 있어서 불확실성이 다소 높을 것으로 예상되지만, 잔광체와 떨어진 위치에 존재하는 MT 탐사 자료는 잔광체 여부와 상관 없이 천부 및 하부 깊은 심도까지 연장된 저비저항대 결과를 통해 광체 분포의 가능성을 파악할 수 있다. 따라서, 전

Fig. 17. Three-dimensional modeling results of ore body. (a) top view of total data (b) side view of total data (c) top view of grade data (d) side view of grade data.

체 자료의 3차원 광체 모델링 결과에서 잔광체와 무관한 부분의 광체 분포 양상을 통해 품위 자료의 잔광체 하부 깊은 심도에서도 광체가 존재할 가능성이 있다는 것을 추정할 수 있다.

결론 및 토의

본 연구에서는 시추 및 지질 정보만을 이용한 3차원 광체 모델링의 한계를 극복하기 위해 시추공, 복합 물리탐사(전기비저항, MT), 코어 물성 자료를 획득하였다. 이를 지구통계학적 순차 가우시안 시뮬레이션(SGS) 기법을 적용하여 연구 지역에 대한 새로운 3차원 광체 모델링을 수행하였으며, 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

코어 물성시험 분석 결과, 자철석(광체)이 기타 암종에 비해 밀도가 상대적으로 크게 측정되었으며, 또한 일반적으로 밀도가 증가함에 따라 비저항도 증가하지만 이와는 반대의 관계를 보였다. 이를 통해 자철석 코어 내부의 전도성 물질인 철(Fe) 성분 때문에 밀도와 전기전도도가 함께 증가한 것으로 판단이 되고, 이 결과를 이용하여 광체 품위와의 연관성 및 비저항대의 유추가 가능하며, 3차원 광체 모델링 구현을 위한 전기비저항의 기준 문턱값으로 사용되었다.

그리고 연구 지역에서 획득된 전체 자료 및 품위 자료를 이용하여 지구통계학적 순차 가우시안 시뮬레이션 기법을 통한 3차원 광체 모델링의 결과, 기존 잔광체의 7구신광체 및 수갱 남향 광체 부근에서 분포 양상이 다소 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 전체 자료의 3차원 광체 모델링 결과에서 잔광체와 무관한 부분의 광체 분포 양상을 통해 품위 자료의 잔광체 하부 깊은 심도에서도 광체가 존재할 가능성이 있다는 것을 추정할 수 있었다. 추후 연구로 연구 지역에서의 추가 조사를 통해 다수의 양질의 자료를 확보하게 된다면, 공간 분포 불확실성을 감소시켜 보다 더 신뢰도 높은 결론을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2012-8020)의

지원으로 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- Choi, D. H. *et al.*, 2010, Fe scrutiny report of Yangyang iron-mine, KORES, p. 2-5.
- Goovaerts, P., 1997, Geostatistics for natural resources evaluation, *Oxford University Press*, Oxford.
- Issaks, E. H., Srivastava, R. M., 1989, An introduction to applied geostatistics, *Oxford University Press*, Oxford.
- Johnson, M., 1987, Multivariate statistical simulation, *Wiley*, p. 230.
- Katsube, T., 1969, The electro-chemical transient phenomena of ore and rock samples (II) (An investigation of measuring apparatus and of transient phenomena of electrode): *Butsuri-tanko*, **22**, p. 21-33.
- Kim, S. J. and Park, H. D., 2009, Development of software for mineral resources estimation and 3D modeling using variogram, *KSEG*, **46**(2), 151-159.
- Kim, Y. H. and Choi, Y. K., 1999, Experimental verification of factors affecting core resistivity measurements, *Journal of the Korean Geophysical Society*, **2**(3), 225-233.
- Kim, J. D. *et al.*, 2009, A study of validation analysis for re-opening of Yangyang iron-mine, Kangwon National University, p. 18-19.
- Lee, S. H., 1979, Ore petrological studies on the genesis of the metamorphic iron deposits in southern Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, **15**, 210-229.
- Lee, S. M. and Kim, H. S., 1968, Petrogenesis and the syenite in the Yangyang mine district, Kangwon province, Korea., *Jour. Geol. Soc. Korea*, **4**, 199-214.
- Oh, S. H., 2005, RMR evaluation by integration of geophysical and borehole data using non-linear indicator transform and 3D Kriging, *The Korean Earth Science Society*, **26**(5), 429-436.
- Park, G. S. *et al.*, 2007, Geostatistical interpretation of sparsely obtained seismic data combined with satellite gravity data, *Mulli-Tamsa*, **10**(4), 252-258.
- Park, S. G., 2004, Physical property factors controlling the electrical resistivity of subsurface, *Mulli-Tamsa*, **7**(2), 130-135.