시추자료와 물리탐사자료의 복합해석을 통한 3차원 광체 모델링 연구

노명근¹ · 오석훈^{1*} · 안태규²

¹강원대학교 에너지 · 자원공학과

²Geolux 기업부설연구소

A Study of 3D Ore-Modeling by Integrated Analysis of Borehole and Geophysical Data

Myounggun Noh¹, Seokhoon Oh^{1*}, and Taegyu Ahn²

¹Dept. of Energy & Resource Engineering Kangwon National University

²Research Institute, Geolux. Co., Ltd.

요 약: 철광산 지역에서 획득한 시추자료와 물리탐사자료를 복합 분석하여 3차원 광체모델링을 수행하였다. 지질조사 및 시추조사 자료를 통해 획득한 5가지 대표 암종에 지수를 부여하였고, 이를 이용하여 광체의 범위를 효율적으로 결정하기 위해 지구통계학적 순차 지표 시뮬레이션(Sequential Indicator Simulation)을 실시하였다. 그리고 전기비저항 탐사 자료와 자기지전류 탐사 자료를 이용한 부가적인 자료를 생성하기 위해 정규크리깅(Ordinary Kriging)과 순차가우시시뮬레이션(Sequential Gaussian Simulation)을 사용하였다. 시추자료에서 획득한 입력변수와 전기비저항자료 간의 상관관계를 분석하여 지구통계학적 복합 분석에 적용하였다. 상관관계 분석 결과, 밀도가 높아질수록 전기비저항이 낮아지는 관계를 확인할 수 있었으며, 이를 통해서 다변량 크리깅 중 하나인 가변적 지역평균 크리깅(Simple Kriging with Local varying means)을 적용하여 지수를 이용한 광체의 모델과 품위 자료를 이용한 품위 분포 모델을 생성하였다. 광체 모델링 결과, 실제 채굴도와 유사한 결과를 확보할 수 있었고, 품위자료에 대한 모델링 결과는 품위별 위치에 따른 변화 정보를 제공하였다.

주요어: 시추자료, 물리탐사, 지구통계학, 광체 평가, 가변적 지역 평균 크리깅

Abstract: 3-D ore modeling was performed to understand the configuration of ore bodies by integrated analysis of borehole and geophysical data in iron-mine area. Five representative indices of rocks were designated, which were obtained from geological survey and borehole. The five indices of rocks were geostatistically simulated by Sequential Indicator Simulation method to delineate boundary of the ore bodies. And Ordinary Kriging and Sequential Gaussian Simulation was applied to make secondary information using resistivity data from magnetotellurics and DC resistivity survey, and this information was used for simple kriging with local varying means, one of integrated kriging techniques. From the correlation analysis between each properties, it was found that high grade of ore is characterized by increased density, whereas the electrical resistivity decreases. With the integrated results of geophysical and borehole data, it was also found that the real configuration of ore body was similar to the modeled result and information about ore grade in 3-D space was obtained.

Keywords: borehole data, geophysical data, geostatistical method, ore-modeling, Simple Kriging with Local varying means

서 론

최근 광산개발의 붐으로 인해 3차원 광체 모델에 대한 기술이 발전하고 있다. 3차원 광체모델은 과거의 단면적으로 계산

되던 방법과 달리 광체의 분포 및 품위를 정확하게 산정할 수 있고, 개발계획에 있어 중요한 자료로 이용된다. 하지만 3차원 모델링은 자료의 양이 2차원 모델링과 달리 충분한 자료를 획득하기 용이하지 않아 자료를 통합하거나 해석에 있어 많은 오류를 범하게 된다. 이러한 이유로 3차원 모델링에 대한 오류를 줄이기 위해서 현장에서 얻은 다양한 자료간의 복합해석이 필요하다. 정확하고 신뢰성 있는 결과를 제공하기 위해서는 획득한 자료에 대한 불확실성을 최소화하고, 각 자료간의 정확한 상관성을 비교해야 한다. 정확한 상관성을 가지고 있을 때 복합해석에 대한 신뢰도가 높은 결과를 획득할 수 있다.

본 연구에서는 현장에서 획득한 시추자료와 물리탐사자료를 이용하여 광체평가를 위한 3차원 모델링을 실시하였다. 3차원

2013년 11월 18일 접수; 2013년 11월 25일 수정; 2013년 11월 26일 채택
*Corresponding author

E-mail: gimul@kangwon.ac.kr

Address: Dept. of Energy & Resource Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

©2013, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

모델링을 위한 자료통합 방법은 지구통계학적 방법을 이용하였다. 지구통계학적 방법은 공간적 또는 시간적으로 분포하는 물리적 현상이나 자료의 분석에 적용할 수 있는 통계학의 한 분야로서 시간적 및 공간적으로 분포하는 자료의 분석이나 다양한 자료를 통합, 여러 사례분석과 위험도 분석을 통한 의사결정에 유용하게 이용된다(Choi, 2007). 좁고 한정적인 정보를 가지고 있는 시추자료를 이용한 단일 분석은 광산개발에 있어 위험도를 높일 수 있다. 광산지역 전체에 대한 등간격으로 시추공간 자료가 존재할 때 광채평가에 대한 신뢰도를 향상시킬 수 있지만 비용, 시간, 지형 등의 한계가 있어 국내 광산에 대한 적용은 어렵다. 광범위에 대한 지하구조의 자료를 획득할 수 있는 물리탐사자료와 복합해석을 실시할 경우 넓은 지역에 대한 효율적인 자료를 얻을 것으로 예상되었다. 물리탐사는 금광화대 및 황화광체에 대한 이상대의 반응을 관찰할 수 있어 철광산에 대한 적용성이 높을 것으로 사료되었다(You *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2007). 시추자료와 물리탐사자료에 대한 상관관계를 분석한 후 각 자료에 대해 지구통계학적 방법인 시뮬레이션과 크리깅을 수행하여 연구지역에 대한 정보를 획득하여 비교 분석을 실시하였다. 지구통계학적 방법에 의해 추정을 시도할 경우, 관심 변수에 대한 직접적인 측정과 더불어 부가적인 정보가 있을 경우 훨씬 정확한 결과를 제공되는 장점을 가지고 있다(Isaaks and Srivastava, 1989). 본 연구에서는 광체의 분포 및 품위에 대한 추정을 하기 위해 다변량 크리깅(multivariate kriging)을 실시하였다. 추정하고자 하는 자료가 적게 분포하여 연구지역에 대한 적용이 용이하지 않을 때 상관성이 있는 부가적인 자료가 전역적으로 얻어진 경우 적용할 수 있는 지구통계학적 방법이다.

획득한 시추자료에서의 분류된 암종과 품위를 부가적인 자료(Secondary data)인 물리탐사자료와 복합 해석하여 광체의 분포와 품위에 따른 모델링을 구현하였다. 구현된 모델을 과거의 채굴자료를 이용하여 제작된 3차원 모델링 자료와 비교하였는데 유사한 양상을 볼 수 있었다. 품위 자료를 이용한 모델링 결과에서 품위별 위치 정보를 확인할 수 있어 광산계획의 유용한 자료로 이용될 것으로 사료된다.

가변적 지역 평균 크리깅

가변적 지역 평균 크리깅(Simple Kriging with local varying means, SKlvm)은 부가자료가 전역적으로 얻어진 경우에 적용 가능한 다변량 크리깅이다. 가변적 지역 평균 크리깅은 단순 크리깅에서 일정하다고 간주하는 평균값을 부가 자료로부터 계산할 수 있는 지역 평균으로 대체하는 방식을 차용한다. 가변적 지역평균 크리깅은 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$z_{SKlvm}^*(u) - m_{SK}^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{SK}(u) [z(u_{\alpha}) - m_{SK}^*(u_{\alpha})] \quad (1)$$

여기서 z_{SKlvm}^* 은 가변적 지역평균 크리깅의 추정값이고, λ_{α}^{SK} 은 크리깅의 가중치이다. m_{SK}^* 로 표현한 지역 평균은 샘플 위치에서의 자료 값을 기준으로 부가 자료 값을 보정(calibration)하여 사용한다. 이 과정에서 부가 자료가 연속형 변수일 경우에는 선형/비선형 회귀분석을 응용할 수 있으며, 부가 자료가 범주형 자료일 경우에는 특성 범주에서의 샘플 자료 값의 평균을 보통 이용한다. 가변적 지역평균 크리깅은 연속형, 범주형 부가 자료를 모두 이용할 수 있으며, 부가 자료의 수가 많

Fig. 1. Examples of simple kriging with local varying means. The trend component at location u is estimated by the mean of Cd concentrations for the rock type prevailing at that location (Goovaerts, 1997).

더라도 앞에서 설명한 보정 과정을 통해 지역 평균을 계산하므로 적용이 간편한 장점이 있다(Goovaerts, 1997). Fig. 1은 가변적 지역평균 크리깅 중 범주형 자료에 대한 예시 그림이다. 가변적 지역평균 크리깅은 확률변수의 속성값을 경향성분과 잔차 성분으로 분해하여 이용된다. 샘플위치에서의 자료 값을 기준으로 동일한 위치의 부가 자료를 보정하여 지역평균을 계산한다. 이때 얻어진 관계식을 연구지역에서 전역적으로 이용가능한 부가 자료에 적용하여 연구 지역 전체에 걸쳐 지역 평균값을 계산한다. 그리고 샘플 위치에서의 자료값에서 계산한 지역 평균을 빼주어 잔차를 계산한다. 잔차는 샘플 위치에서만 이용 가능하므로, 잔차의 베리오그램 모델링 결과를 이용하여 잔차를 대상으로 단순크리깅을 적용하여 연구지역 전체에 걸친 잔차 성분을 예측한다. 마지막 단계로 부가자료로부터 미리 계산한 지역 평균값에 예측된 잔차성분을 합쳐서 최종적인 예측값을 얻게 된다.

연구지역 지질 및 광산

본 연구는 강원도 양양군 양양읍 서면일대로 광구 양양115와 양양116 사이에 지역에서 수행되었다(Fig. 2). 이 지역은 과거 자철석을 생산 개발하는 국내 최대의 철광산이었지만, 1993년에 철광석의 가격경쟁 하락으로 폐광되었다. 2005년 이후로 광물자원 가격 상승으로 2011년에 재개광을 하여 현재 가동 중이다.

연구지역의 지질은 선캠브리아 이원 편마암류와 변성퇴적암류, 섬강암류(반정질 엽리상, 반정질 괴상, 엽리상, 괴상)(Lee and Kim, 1968), 흑운모 화강암과 반화강암질 페그마타이트질 화성암이 관입하고 있으며, 단층대 및 수직/경사 시추공이 분포하고 있다(Ahn *et al.*, 2012). Fig. 3는 지질도로 남북방향으로 습곡축을 갖는 향사구조를 가지고 있고, 변성화산암류와 변성 퇴적암류에 철광체가 배태되어있는 형태를 보인다. 연구지

Fig. 2. Satellite picture of study area.

Fig. 3. Geological map of study area (yangyang 115 yangyang 116).

역에서는 섬강암류가 주로 발달되었는데 변성퇴적암류와 변성 화산암류의 외각부에 존재한다. 부분적으로 변성염기성암체가 관입된 지질구조를 가지고 있다. 광상은 섬강암과의 접촉부와 포획된 부분에서 괴상의 고품위 결정질 자철석(magnetite, Fe_3O_4)이 산출된다. 양양철광에는 양논광체, 양양광체, 수갱광체, 7구신광체가 있고, 대체로 변성퇴적암 내에 엽리와 평행하게 동일층군에 배태되고 있다(Kim *et al.*, 2009).

암석코어 물성실험 결과

Ahn *et al.* (2012)은 양양철광산지역에 대해서 암석코어를 채취하여 5가지의 물성 실험(비중, 밀도, 공극률, 전기비저항, P파속도)을 측정하여 각각의 상관관계를 분석하였다. 2010년, 2011년도 시추코어 39개와 노두상의 암추에서 채취한 암석코어 22개로 총 61개 암석코어를 획득하였다. 모든 암석코어는 NX(52.3 ~ 56.1 mm)코어이고, 시추코어의 길이는 40 mm ~ 110 mm이고, 암추에서 채취한 암석코어의 길이는 36 ~ 47.5 mm이었다. 채취한 코어의 암종은 지질조사 결과를 참조하여 자철석과 섬강암, 편마암 등 연구지역에 대표할 수 있는 암종을 선택하였다. 자세한 물성실험에 대한 정보는 참고문헌(Ahn *et al.*, 2012)에서 확인 할 수 있어 본 논문에서 생략하고자 한다. 획득한 자료들을 자철석과 기타암종(섬강암, 편마암 등)을 나누어 상관관계를 분석하였다(Fig. 4).

Fig. 4(a)는 밀도와 비중간의 관계를 나타낸 것으로서 정비례관계를 보여주고 있다. 이는 질량에 의해서만 산출된 비중과 질량과 부피에 의해서 산출된 밀도가 잘 일치되는 결과를 보여준다. 이 결과를 통해 코어의 길이, 직경 및 질량에 대한 측정결과가 신뢰성이 높은 것으로 사료된다. Fig. 4(b)는 코어 전기비저항 결과와 밀도간의 상관관계 그래프이다. 연구지역의 광체는 자철석으로서 철은 전기전도도가 높고, 밀도가 높은 특

Fig. 4. Correlation results of physical properties. (a) Specific gravity-density (b) Density-resistivity.

성을 가지고 있다. 품위가 높아질수록 암석 내에 철의 함유량이 많아져, 주변의 암석보다 밀도가 높아진다. B그룹과 같이 밀도가 높을수록 품위가 높은 암석코어로 유추할 수 있다. A 그룹과 같이 철의 함유량이 낮아짐에 따라 밀도가 낮고, 전기비저항이 높은 결과를 볼 수 있다. 상관성 분석결과 광산지역에 대한 적용 물리탐사를 설정하고, 고품위 자철석의 전기비저항 범위를 10 ~ 1000 ohm-m로 설정하였다. 추후 회귀분석을 통해 품위와 전기비저항의 관계를 도식하여 자료간의 잔차(residuals)를 확인하였다.

이종자료 및 물리탐사자료 획득

시추 자료

시추자료는 1960년 ~ 1990년까지 시추했던 자료와 2010년도와 2011년도 시추한 자료를 이용하여 연구를 실시하였다. 각 시추공 자료에서 암석과 품위에 따른 입력변수를 설정하였다. 암석은 총 5가지로 분류하여 아래 Table 1과 같이 지수를 부여하였다.

각 지수는 추후 순차지표시물레이션(Sequential indicator

Table 1. Each index number according to rock type groups.

Index number	Rock Type
0	Magnetite (Orebody), Mineralized zone
1	Syenite
2	Metasediments
3	Gneiss
4	Other Rocks (Quartz porphyry, Feldspar porphyry et)

simulation, SISim)을 이용하기 위해 분류하였다. 광체에 대한 특정지수를 부여하여 그 지수로 속성값을 나타내는 시물레이션 기법으로서 자료의 히스토그램의 빈도수를 유지하면서 광체의 모형을 효율적으로 표현할 수 있는 장점이 있다. 광체의 모형을 생성하고, 이를 전기비저항 분포와 비교분석을 실시하여 복합 적용하였다.

각 시추주상도에 따른 품위자료도 획득하여 3차원 공간의 품위자료를 입력하였다. 과거시추자료를 통해 60% 이상의 고품위시추자료를 얻을 수 있는 반면 2010년, 2011년의 시추자료는 대부분 광화대 및 저품위 광체의 품위자료를 획득하였다. 광화대 및 저품위 광체에 대한 품위 식별이 용이하지 않아, 광체의 저품위 범위를 과거시추 품위자료의 평균값범위인 10 ~ 20%의 값으로 설정하여 사용하였다. 자료에 대한 회귀분석을 실시하기 위해 시추코어를 통해 획득한 전기비저항값과 로그로 변환시킨 전기비저항값을 추가로 입력하였다.

물리탐사 자료획득

본 연구에서는 2012년(Ahn *et al.*)에 획득한 9개 측선에 대한 쌍극자 배열을 사용한 전기비저항 탐사자료와 37점의 MT 탐사자료를 이용하여 연구를 실시하였다. 이 후 2013년에는 양양본광체 및 주변의 전기비저항 분포를 확인하기 위해 14지

Fig. 5. Measurement location of MT survey (2012 MTdata: red circle, 2013 MTdata: blue circle).

Fig. 6. 1-D inversion results of MT survey (Fig. 4). (a) P2 (b) P3 (c) P4 (d) P6 (e) P7 (f) P8.

점에 대한 MT 탐사자료를 추가로 실시하였다. MT 탐사위치는 아래 Fig. 5와 같다.

추가된 14지점에서는 양양본광체와 인접한 부분으로 잔광체 및 하부의 신규광체에 대한 양상을 확인하고자 하였다. 과거 지반침하가 발생하여 하부에 지질변화가 심하게 나타날 것으로 예상되어 광체의 위치에 대한 정보가 필요하였다. MT 탐사자료는 1차원 역산을 실시하여 광체 위치와 비교분석을 실시하였다. 1000 ohm-m의 전기비저항 위치를 확인하기 위해서 붉은색 점선으로 표시하여 P1 ~ P14까지에서 저비저항대를 확인할 수 있었고, 각각의 심도는 다르게 나타났다. Fig. 6(a), (b), (c)는 P2, P3, P4의 위치에서 측정한 결과로서 양양본광체의 반응으로 예상된 100 ~ 200 m 사이에 대한 반응이 없고, 심도 300 m에서부터 700 m까지 저비저항대가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 지역에 대한 광체는 심도 300 m까지 채굴이 된 상황으로 300 m 하부에 대한 저비저항은 신규광체에 대한 반응으로 확인할 수 있었다. Fig. 6(d), (e), (f)는 100 ~ 200 m 사이에서 저비저항대가 나타나 양양본광체에 대한 반응으로 확인할 수 있었고, 300 m 하부에서는 별다른 반응은 나타나지 않았다. 양양본광체에 대한 반응 및 하부의 신규광체에 대한 반응을 확인되어 가변적 지역평균 크리깅에 부가적인 자료로 사용되었다.

연구지역 격자 설정

본 연구에서는 획득한 자료를 S-GeMs를 이용하여 지구통계학적 기법에 적용하였다. 연구지역에 가변적 지역평균 크리깅을 적용하기 위해서는 획득한 자료에 대한 상관관계 및 연구지역에 대한 전체적인 정보를 가져야 하는데 본 연구에서는 지구통계학적 방법 중 정규크리깅과 순차지표시물레이션, 순차가우시물레이션(Sequential Gaussian Simulation, SGSim)을 이용하여 연구지역에 대한 속성값을 추정하였다. 연구지역에 대한 추정값의 분포를 확인하기 위해서는 격자 설정이 중요하다. 3차원 모델링일 경우 블록의 크기에 따라 광량 및 품위의 분포가 변화가 생기기 때문에 실제의 광체와 큰 오차를 발생하기도 한다. 오차를 줄이기 위해서는 적절한 블록의 크기를 설정하는 것이 중요하다(Journel *et al.*, 2004). 본 연구에서는 일정한 영역에 대해 각 블록의 크기를 다르게 하여 예비 순차지표시물레이션을 수행하였다(Fig. 7). 각 블록에 대한 정육면체를 유지하여 축의 길이를 5 m, 10 m, 20 m로 설정하였다.

Fig. 7(a)는 $5 \times 5 \times 5$ m³로 설정한 블록에 지표시물레이션을 실시한 결과로 광체에 대한 세부적인 모습을 나타내고 있다. 연구지역에 전체 블록수가 많아져 광체 모델에 연장성 및 확률적인 신규광체의 모델도 예측할 수 있다. 그러나 광체 형태

Fig. 7. Sequential indicator simulation at blocks of different size for index number. (a) $5 \times 5 \times 5$ size. (b) $10 \times 10 \times 10$ size. (c) $20 \times 20 \times 20$ size.

Table 2. Specific volume and the number of blocks of each size (size 5: $5 \times 5 \times 5$, size 10: $10 \times 10 \times 10$, size 20: $20 \times 20 \times 20$).

	frequency			Number of block			Volumes (m^3)		
	size 5	size 10	size 20	size 5	size 10	size 20	size 5	size 10	size 20
Category 0	0.0659	0.0546	0.0657	43,000	4,463	670	5,375,000	4,463,000	5,360,000
Category 1	0.5895	0.5312	0.5375	384,773	43,348	5,483	48,096,625	43,348,000	43,864,000
Category 2	0.1211	0.1632	0.1511	79,075	13,319	1,541	9,884,375	13,319,000	12,328,000
Category 3	0.1059	0.1095	0.1308	69,179	8,943	1,334	8,647,375	8,943,000	10,672,000
Category 4	0.1176	0.1415	0.1149	76,773	11,527	1,172	9,596,625	11,527,000	9,376,000

가 시추자료가 존재하지 않는 지역에 대한 세부적인 형태가 나타나고, 독립적으로 생기는 블록이 나타나고 있다. Fig. 7(b)는 $10 \times 10 \times 10 m^3$ 로 설정한 블록에 순차 지표 시뮬레이션 결과이다. Fig. 7(a) 보다 블록의 크기가 커짐에 따라 독립적으로 나타나는 블록들이 사라지고, 원 자료에 대한 빈도수를 유지하면서 광체의 형태를 확인할 수 있었다. 또한 블록수가 적어짐에 따라 시뮬레이션 구동시간이 줄어드는 장점을 가지고 있다. Fig. 7(c)는 블록사이즈를 $20 \times 20 \times 20 m^3$ 하여 시뮬레이션한 결과로서 전체 블록수가 적어짐에 광체의 부피는 커지는 효과를 볼 수 있다. 뚜렷하게 광체의 분포 나타나고, 독립적인 형태의 블록이 거의 없어진 것을 확인할 수 있다. 그러나 블록이 커짐에 따라 넓은 영역에 대한 개략적인 추정값을 얻을 수 있

어 블록에 대한 품위계산에 오차를 발생시킬 가능성이 높다. Table 2에 각 블록에 대한 결과를 정리하였다.

Table 2의 결과와 같이 시추자료에 대한 자료 빈도수를 유지하지만, 블록 크기에 따라 블록 수와 부피 차이가 발생한다. 블록 안에 품위에 대한 추정값이 주어지는데 광구 전체에 자원량의 변화가 크게 나타난다. 광체에 대한 정확한 평가를 위해서는 다양한 블록에 적용하여야 한다. 그러나 시뮬레이션 수행시간과 블록의 부피를 고려하여 $10 \times 10 \times 10 m^3$ 의 블록크기를 이용하여 연구지역 전체를 구현하였다. 지형고도자료를 이용하여 연구지역에 대한 영역을 설정하여 총 708,050개의 블록으로 생성하였다(Fig. 8). 이 후 시추자료(Fig. 8(b))와 물리탐사결과 자료(Fig. 8(c))를 입력하여 지구통계학적 방법을 적

Fig. 8. Grid of study area using input of borehole and resistivity data by S-GeMS. (a) Study area grid (b) Study area grid with borehole data (index number) (c) Study area grid with resistivity data (ohm-m).

Fig. 9. Flowchart of simple kriging with local varying means for index number of borehole data.

용하였다.

가변적 지역 평균 크리깅 결과

본 연구에서는 가변적 지역평균 크리깅을 이용한 광체 모델 구현과 품위자료를 이용한 광체의 품위 분포를 구현하였다.

광체 모델에 대한 가변적 지역 평균 크리깅 결과

광체 모형은 암종의 지수를 이용하여 순차지표시물레이션을 한 추정값을 물리탐사 자료의 시물레이션과 크리깅 한 추정값과 비교 분석하여 생성하였다. Fig. 9는 광체 모형에 대한 가변적 지역 평균 크리깅 방법을 순서도로 정리한 결과이다. 물성실험을 통해 전기비저항과 품위와 관련하여 반비례관계가 나타나 광체만 존재하는 영역에서는 저비저항대가 나타날 것

으로 예상되었다. 광체의 번호를 지정하여 순차 지표시물레이션을 실시하면 광체에 대한 영역을 필터링할 수 있어 이 부분과 같은 지점의 물리탐사 자료를 비교하였다. 상관관계는 물성실험을 통해 획득한 결과를 이용하여 경향을 분석하고 잔차에 대한 베리오그램을 이용하여 광체 모델을 생성하였다.

Fig. 10 시추 자료의 지수를 이용하여 순차지표시물레이션을 나타낸 그림이다. 광체의 형태를 확인하기 위해 필터링을 통해 자철석 추정값을 확인하였다. 시추자료의 지수에 대한 빈도수를 유지하면서 연구지역 전체에 대한 광체의 모델을 생성할 수 있는 장점이 있지만, 시물레이션 자체에서는 히스토그램상의 각 암종의 빈도수를 이용하여 연구지역 전체를 나타내기 때문에 시추자료가 존재하지 않는 지역에 광체의 형태를 나타낸다. 시추자료가 존재하지 않는 지역에 대한 값을 명확하게 하기 위해서는 부가적인 자료를 통해 복합해석이 실시되어야

Fig. 10. Results of sequential indicator simulation for index number. (a) SISim result. (b) filtering index number 0.

Fig. 11. Results of ordinary kriging and SGSim using resistivity (log) data (ohm-m). (a) ordinary kriging (b) sequential gaussian simulation.

Fig. 12. Comparison between actual ore models and SKLvm ore models. (a) Horizontal (b) Vertical.

한다.

본 연구에서는 부가적인 자료를 이용하기 위해서 전기비저항 값을 이용하여 정규크리깅과 순차지표시물레이션을 이용하였다. 정규크리깅은 편향되지 않고, 오차분산을 최소화 하는 크리깅으로서 자료가 존재하는 일정지역의 대한 평균을 사용하여 지역에 대한 변화를 단순크리깅보다 뚜렷하게 나타낼 수 있는 장점이 있다. 순차가우시물레이션을 자원의 공간적인 상관관계가 반영되면서 자원의 불균질성을 효과적으로 묘사할 수 있다. 또한 연구지역에 대한 다양한 실현을 구현하여, 추정값의 불확실성을 예측할 수 있다. 지구통계학적 방법을 수행하기전 전기비저항 자료를 살펴본 결과, 2012~13년에 측정된 MT탐사 전기비저항값은 측정범위가 $0 \sim 1.38591 \times 10^{13}$ ohm-m이고, 평균이 1.3848×10^{11} ohm-m이 나타나고 있다. 왜곡된 극단적인 양의 값 효과를 줄이기 위해 상용로그를 취한 전기비저항값을 이용하여 순차가우시물레이션과 정규크리깅을 실시하였다.

Fig. 11(a)는 정규 크리깅 한 결과로 Fig. 11(b)의 순차가우시물레이션 결과보다 자료의 분포 및 양상이 뚜렷하게 변하는 것을 볼 수 있다. 반면 전체적인 영역보다 전기비저항 자료가 있는 일정한 반경 안에서 변화를 살펴볼 수 있다. Fig. 11(b)는 연구지역에 대한 전체 자료를 얻을 수 있지만, 자료의 불균질성이 크리깅 결과보다 크게 나타난다. 광체 모델의 변화 양상을 보기 위해서 괴상형태를 구현되어있는 정규크리깅을 이용하여 가변적 지역평균 크리깅을 실시하였다. 전기비저항 자료는 시추공 주변에서 측정을 실시하여 시추자료와의 관계를 명확히 확인할 수 있어, 시물레이션과정에 생기는 오차를 효과적으로 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 두 자료를 복합 해석하여 생성된 광체 Fig. 12와 같이 결과가 나타났다.

생성된 광체의 분포와 과거의 채광정보를 이용한 3차원 모델링 결과를 비교분석을 수행하였다. Fig. 12(a)와 같이 수평면에서는 각 광체에 대한 위치가 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 두 자료다 시추자료를 기반으로 수행된 결과로 광체

의 위치가 비슷하게 나타난 것을 알 수 있다. 수직단면(Fig. 12(b))에서는 동일한 심도에서 광체가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 그러나 실제광체에 대한 정보는 단층이 파쇄대를 고려하여 채광이 진행되었고, 품위가 낮은 지역에 대한 채광은 이루어지지 않아 가변적 지역 평균 크리깅과 차이를 보이는 것을 확인된다. 연장성이 좋아 각 광체가 연결되어 있는 것처럼 나타나고 있지만, 이는 광체의 위치와 분포만 나타내는 단점을 지니고 있다. 물리탐사와 암종별 인덱스에 대한 뚜렷한 상관관계가 지니고 있을 때 명확한 잔차 계산이 이루어져 광체 위치에 대한 불확실성을 해결할 수 있을 것으로 사료된다. 추가적인 자료인 물리탐사자료가 다양하게 존재한다면, 광체에 대한 모델을 명확하게 구현될 것으로 예상된다.

품위 자료에 대한 가변적 지역 평균 크리깅 결과

시추자료 중 품위와 로그 변환된 전기비저항값을 이용하여 가변적 지역평균 크리깅을 적용하였다. 시추자료 중 10% 이상의 품위가 전체자료에 5%에 존재하고 있어 연구지역에 대한 크리깅 자료를 이용하기 위해서는 추가적인 자료에 대한 회귀 분석을 실시하였다. 시추자료의 품위자료와 전기비저항값에 대한 상관성을 비교하여 경향 성분을 추출하였다. 회귀분석 결과를 얻은 추세식을 통해 획득한 자료에 대한 잔차크리깅을 구현하였다. 이는 기존의 회귀분석에서 잔차 성분이 공간적으로 독립, 즉 상관성이 존재하지 않는다는 가정을 적용하지만, 회귀분석으로 설명되지 않는 성분인 잔차 성분들은 공간적으로 상관성을 나타낼 수 있다. 따라서 잔차 성분들의 공간 자기 상관성 정보를 모델링하고 이를 분포도를 이용할 경우, 분포도 작성의 정확성을 높일 수 있다(Goovaerts, 1997; Lee *et al.*, 2012). 본 연구에서는 품위자료에 대한 잔차 성분을 심플크리깅 하여 경향 성분과 합하여 연구지역에 대한 품위를 추정하였다. Fig. 13은 품위에 대한 가변적 지역 평균 크리깅 방법을

Fig. 13. flowchart of simple kriging with local varying means for grade data.

정리한 순서다.

Fig. 13과 같은 과정을 통해 획득한 가변적 지역평균 크리깅 결과는 Fig. 14(a)와 같다. 이를 비교하기 위해서 품위자료를 이용한 정규 크리깅 자료와 비교 분석을 실시하였다. 두 결과를 10% 이상의 품위로 필터링 하여 나타난 결과를 비교하였다. 광체의 형태 및 위치는 비슷하게 나타났지만, 가변적 지역 평균 크리깅 결과의 블록수가 정규크리깅한 결과보다 블록수가 적은 것을 볼 수 있었다(Table 3).

정규크리깅과 달리 가변적 지역 평균 크리깅은 추가적인 자

Table 3. Number of blocks in SKlvm results and ordinary kriging results.

	> 10%	> 15%	> 20%	> 25%
OK	16663	7443	3058	732
SKlvm	15861	7163	2964	678

Fig. 14. Results of SKLvm and ordinary kriging for borehole data (%). (a) SKLvm result (b) ordinary kriging result.

Fig. 15. Results of patterns by changing the cut-off (a) more 10% (b) more 15% (c) more 20% (d) more 25%.

료인 전기비저항자료와 품위자료간의 회귀분석 결과를 통해 획득한 잔차의 영향으로 품위 변화가 발생한 것으로 사료된다. 품위자료를 이용하여 광체품위를 추정할 경우 분포가 넓게 나타나 채광량이 증가하는 것처럼 보이지만, 확실적인 추정값에 의해 나타난 결과로 연구지역에 대한 특성이 없다. 그러나 가변적 지역 평균 크리깅은 연구지역에 공간적인 특성이 반영되어 명확한 품위 분포에 대한 정보를 제공할 수 있다. 정확한 광체품위에 대한 평가를 위해서는 다양한 물리탐사자료를 이용하여 연구지역에 대한 특성을 파악하여야 하고, 광체의 영역을 효율적으로 설정하여야 한다.

구현된 광체에 대한 각 품위에 따라 변화양상을 살펴보았다 (Fig. 15). 10%, 15%, 20%, 25%에 따라 변화가 나타나고 있는데 고품위광체는 북쪽방향 광체에 주로 존재하는 것을 확인할 수 있다. 위 결과를 통해 채굴 방향을 북쪽에서 남쪽 방향으로 채굴을 진행해야 할 것을 사료된다. 연구지역에 대한 자원량을 평가함으로써 경제성을 평가할 수 있는 자료로 활용할 것으로 예상된다. 하지만 연구지역에 광체에 대한 품위자료 빈도수가 적어 추후 추가적인 시추자료를 확보가 필요할 것으로 예상된다.

결론

지구통계학적 방법을 이용하여 물리탐사자료와 시추자료를

복합해석을 실시하여 광체 평가를 실시하였다. 가변적 지역 평균 크리깅을 이용하여 광체 모델을 생성하였고, 품위의 분포를 확인할 수 있었다. 시추자료와 부가적인 물리탐사 자료의 복합 해석을 통해 생성된 광체모델은 연구지역에 대한 시추자료의 시뮬레이션결과와 물리탐사결과와 크리깅 결과의 뚜렷한 상관관계에 의해 명확한 광체 분포를 제시할 수 있다. 각 자료에 대한 상관관계를 규명하고자 물성실험에 대한 결과를 이용하여 철(Fe)성분의 함유량에 따라 전기비저항이 낮아지고 품위가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 위 결과를 이용하여 연구지역에 대한 전기비저항 분포를 이용하여 시추자료상의 적은 품위 자료를 이용할 수 있었다. 이를 통해 품위별 위치 정보 및 분포를 제공하여 광체 평가 방법에 비교 분석 자료로 이용될 것으로 예상된다.

가변적 지역평균 크리깅은 물리탐사자료와 시추자료간의 뚜렷한 상관관계를 나타내고, 다중 회귀분석 결과가 명확한 추세식을 획득하여야 한다. 이를 이용하여 잔차의 베리오그램과 경향 분석을 통해 각 자료의 특성을 반영할 수 있다. 3차원 공간상의 위치가 명확하고 자료에 대한 신뢰성이 높을 경우 이용한다면, 광체에 대한 정확한 정보를 전달할 수 있을 것으로 생각된다. 앞서 언급한 전제조건을 통해 추정된 광체평가는 초기 개발단계에서 추가 시추공 위치 및 광산의 채굴 방향에 대한 계획을 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 추후 품위 자료와 전기비저항의 자료가 추가로 획득하고, 다양한 물

리탐사를 적용하여 신뢰성 높은 광체 평가를 연구하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 기상기술개발원의 연구비 지원(CATER 2012-8020)을 통해 이루어졌으며, 연구비 지원에 감사를 표합니다.

참고문헌

- Ahn, T. G., Oh, S. H., Kim, K. Y., and Suh, B. S., 2012, Geostatistical Approach to Integrated Modeling of Iron Mine for Evaluation of Ore Body, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **15**(4), 177-189.
- Choi, J. G., 2007, Geostatistics, Sigma Press, Seoul, Korea, p. 386.
- Goovaert, P., 1997, Geostatistics for natural resources evaluation, Oxford University Press, Oxford, UK, p. 483.
- Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M., 1989, An introduction to applied geostatistics, Oxford University Press, Oxford, UK, p. 592.
- Journel, A., and Kyriakidis, P., 2004, Evaluation of Mineral Reserves A Simulation Approach, Oxford University Press, Oxford, UK, p. 216.
- Jung, Y. H., and Byun, J. M., 2007, Integrated Interpretation of ERT Data from the Mineralized Zone in Geumpung Mine, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **10**(4), 322-331.
- Kim, J. D. *et al.*, 2009, A study of validation analysis for re-opening of Yangyang iron-mine, Kangwon National University, Chuncheon, Korea, p. 284.
- 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.
- Lee, S. W., Park, N. W., Jang, D. H., Yoo, H. Y., and Lim, H. S., 2012, Surface Sediments Classification in Tidal Flats using Multivariate Kriging and KOMPSAT-2 Imagery, *Journal of the Korean Geomorphological Association*, **19**(3), 37-49.
- You, Y. J., Yoo, I. K., and Kim, J. H., 2004, Electrical Responses on the Auriferous Mineralized Zone in Sambo Mine, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **7**(4), 217-224.