

3차원 X-ray 단층 화상을 이용한 스카른 광석의 정량분석 연구

Quantitative Analysis of Skarn Ore Using 3D Images of X-ray Computed Tomography

정 미 희(Mi Hee Jeong)¹ · 조 상 호(Sang Ho Cho)^{2,*} · 정 수 복(Soo Bok Jeong)¹ ·
김 영 훈(Young Hun Kim)³ · 박 재 구(Jai Koo Park)⁴ ·金子 勝比古(Katsuhiko Kaneko)⁵

¹한국지질자원연구원

(Mineral Resource Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea)

²전북대학교

(Department of Mineral Resources & Energy Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea)

³한국광물자원공사

(Korea Resources Corporation, Seoul 156-706, Korea)

⁴한양대학교

(Department of Geoenvironmental System Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

⁵홋카이도대학교

(Division of Environment and Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-8628, Japan)

요약 : 스카른 Zn-Pb-Cu 복합광석을 구성하는 주요 구성 광물의 정량분석을 목적으로, 마이크로 포커스 X-ray 단층촬영 장비를 이용한 스카른 복합광석의 3차원 비파괴검사를 수행하였다. X-ray 단층화상의 화상결함을 감소시키고자 제안된 화상보정법을 이용하여 화상들을 보정한 후에 3차원으로 재구성하였다. 주사전자현미경(SEM)에 의한 표면분석과 보정된 X-ray 단층화상을 비교하여 주요광물에 대한 CT 값의 범위를 결정하였다. 재구성화상 내 전체 광물의 체적비율을 분석한 결과, 황화광물 20.5%, 맥석광물 79.5%로 평가되었다. X-ray 3차원 단층화상 정량분석법은 광석 내 유용광물의 부존형상과 회수를 분석에 유용하게 적용될 것으로 기대된다.

주요어 : 스카른 Zn-Pb-Cu 복합광석, 마이크로 포커스 X-ray 단층촬영, 정량분석

ABSTRACT : A micro-focus X-ray computed tomography (CT) was employed to determine quantitative phase analysis of skarn Zn-Pb-Cu ore by nondestructive visualization of the internal mineral distribution of a skarn ore. The micro CT images of the ore were calibrated to remove beam hardening artifacts, and compared with its scanning electron microscope (SEM) images to set the threshold of CT number range covering sulfide ore minerals. The volume ratio of sulfide and gangue minerals was calculated 20.5% and 79.5%, respectively. The quantitative 3D X-ray CT could be applied to analyse the distribution of economic minerals and their recovery.

Key words : Skarn Zn-Pb-Cu ore, micro-focus X-ray computed tomography, quantitative analysis

*교신저자: chosh@jbnu.ac.kr

서 론

광물의 조성 및 정량분석 등과 같은 광물의 특성은 광물을 이용하는 공정에 있어서 중요한 정보가 된다. 광물의 정확한 정량분석은 광물의 활용을 용이하게 하며, 공정 효율을 높일 수 있다. 광물의 정량분석법으로는 X-선 회절분석 및 현미경 감정에 의한 분석 등이 있지만, X-선 회절분석은 오차가 심하고 분석 결과의 재현성이 낮아 정량분석에 어려움이 있다(손병국, 2007). 특히 현미경에 의한 분석법은 박편시료를 대상으로 2차원적으로 분석하기 때문에 시료 전체에 대한 정량평가가 어렵다.

최근에는 암석시료를 대상으로 한 X-ray 단층촬영에 의해 시료 내부를 3차원 비파괴 관찰함으로써 시료 내부의 광물 분포 및 공극 구조 등에 다양한 정보를 얻고 있다(Van Geet *et al.*, 2000; Miller and Lin, 2003a; Taud *et al.*, 2005; 현창욱과 박형동, 2005; 조상호 외, 2009). Miller *et al.* (2003b)는 암석시료를 X-ray 단층촬영하여 입도 크기 분포를 분석함으로써 회수율을 평가하였다.

본 연구에서는 스카른 Zn-Pb-Cu 복합광석을 구성하고 있는 주요광물에 대한 3차원적인 정량분석을 목적으로 마이크로 포커스 X-ray 단층촬영(micro-focus X-ray computed tomography) 장비를 이용하여 스카른 복합광석 샘플의 3차원 비파괴검사를 수행하였다. 주사전자현미경(SEM)에 의한 표면분석과 보정된 X-ray 단층화상을 비교하여 유용광물에 대한 CT 값의 범위를 결정하였다. 대상광물에 해당하는 CT 값 범위를 2진 화상(binary image)으로 변환시켜 3차원으로 재구성하여 구성광물의 체적을 계산하였다.

연구방법

본 연구에서 대상으로 하는 스카른 복합광석(Zn-Pb-Cu)은 강원도 삼척시 가곡면 풍곡리에 위치하고 있는 가곡광산 내 선곡 400갱에서 채취하였다. 가곡광산은 태백산 광화대에 속하는 국내의 대표적인 연·아연 광상이며, Ca 계열 규산염광물이 지배적인 스카른화 작용을 나타내고 있다(Yun, 1978).

본 광산에서 산출되는 유용광물은 섬아연석, 방연석, 황동석, 자류철석 등이 있으며, 맥석광물로는 회철회석, 투회석 등의 휘석류와 녹염석, 녹니석, 석영, 방해석 등이 있다. 주요 유용광물의 품위는 Zn 5.1%, Pb 0.4%, Cu 0.1%로 알려져 있다.

채취한 스카른 복합광석의 광물학적 특성 분석을 위하여 X-선 회절분석(XRD)과 파장 분산형 형광 X-선 분석(WD-XRF)에 의한 분석을 수행하였다. X-선 회절분석은 Rigaku D/MAX 2500을 이용하였으며, 파장분산형 형광 X-선 분석에는 Bruker S4 Pioneer 모델을 이용한 화학분석을 수행하였다. 동일 광물로부터 직경 31.38 mm, 길이 15.7 mm의 원통형 시료를 정밀 제작하였다(표 1). 이때 제작된 시료의 겉보기 밀도는 3.39 g/cm³이었다. 이는 일반적인 화강암의 평균밀도에 비하여 1.2배 높은 것으로 나타났다.

시료 내 광물별 부존형상을 파악하기 위하여 JEOL JSM-6400 주사전자현미경을 이용하여 BSE (back scattered electron) 촬영과 X선 화학분석을 수행하였다. 동일 시료 내에 광물별 3차원 부존형상 및 정량분석을 위하여 마이크로 포커스 X-ray 단층 촬영 시스템을 이용하여 비파괴 3차원 내부촬영을 수행하였다.

마이크로 포커스 X-ray 단층촬영 시스템

X-ray 단층촬영 장비는 비파괴 검사 기법 중 하나로, 암석의 공극 및 균열의 여부나 조직 구성 등의 내부 구조와 공학적 물성들을 파악하는데 사용된다(현창욱과 박형동, 2005). 본 연구에서는 스카른 복합광석 시료의 내부를 3차원으로 관찰하고, 획득한 단층촬영 화상에서 광물의 특성을 파악하기 위하여 마이크로 포커스 X-ray 단층촬영 시스템을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 마이크로 포커스 X-ray 단층 촬영 장비는 일본 홋카이도 대학에서 보유하고 있으며, Toshiba IT& control system 사에서 고안한 Toscano 30900 μ hd 장비이다. 분해능은 5 μ m이며, 최대 관전압이 130 kV로 3세대 X-ray CT에 속한다(조상호 외, 2009).

Table 1. Physical properties of the skarn ore sample

Sample No.	Diameter (mm)	Length (mm)	P-VL (m/sec)	Mass (g)	Density (g/cm ³)
G-10	31.38	15.71	7,860	41.2	3.39

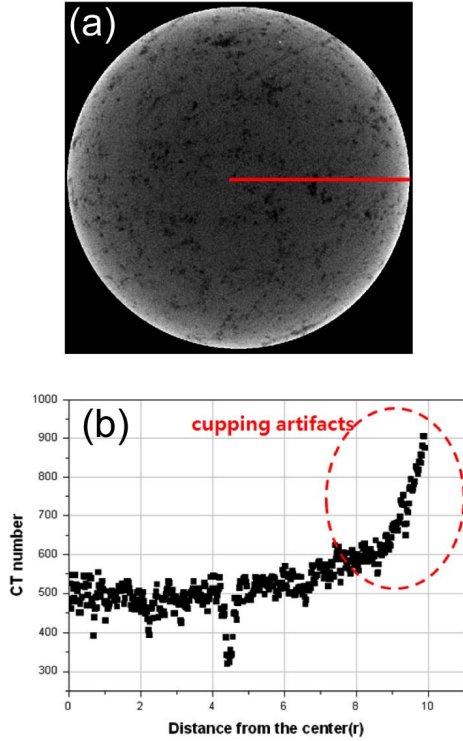


Fig. 1. General X-ray CT scan image and CT number profiles of a rock sample. (a) X-ray CT slice image. (b) CT number profile.

단층촬영 화상은 시료의 밀도에 따른 X-ray의 투과량에 의해 CT 값이 결정되며, CT 값의 범위에 따라 회색음영의 화상으로 나타난다. 단층화상은 복셀(voxels)로 이루어져 있으며, 각각의 복셀은 CT 값으로 이루어져 있다. CT 값은 다음의 식 (1)에 의해 결정된다.

$$CT_{number} = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \times K \quad (1)$$

여기서 μ_t 는 스캐닝 지점에서의 흡수계수, μ_w 는 물에 대한 X-ray 흡수계수, K는 상수이다. 일반적인 X-ray 단층촬영의 경우 상수 K 값은 물은 0, 공기는 -1,000이다. 그러나 본 연구에서 사용한 마이크로 포커스 X-ray 단층촬영 장비의 CT 값은 식 (2)~(5)에 의하여 표현된다.

$$CT_{number} = Slope \times \mu + Bias \quad (2)$$

$$Slope = \frac{100,000}{(CT_w - CT_a)} \quad (3)$$

$$Bias = \frac{1,000 \times CT_w}{CT_a - CT_w} \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \rho \quad (5)$$

*Slope*와 *Bias*는 단층촬영시 입력하는 촬영 조건으로 밀도가 유사한 두 광물을 구별할 수 있도록 설정해주는 값이며, CT_w 와 CT_a 는 각각 물과 공기에 의해 계산된 CT 값을 의미한다. μ 는 감쇠계수, μ_0 는 질량감쇠계수, ρ 는 밀도를 나타낸다. 여기서, 감쇠계수 μ 는 시료의 밀도와 원자번호에 따라 변화하게 되고, X-ray의 에너지 또한 변화됨을 의미한다.

X-ray 단층촬영 후 2차원 화상으로 재구성하는 과정에서 몇 가지 결함이 발생된다. 고밀도의 시료를 단층 촬영할 경우 시료의 가장자리의 밀도가 시료의 중심보다 높게 나타나는 빔하드닝(*beam hardening*) 또는 컵핑결함(*cupping artifacts*)이 있다. 그림 1a에 암석시료의 마이크로 포커스 X-ray 단층촬영 화상을 보여주고 있으며, 그림 1b는 그림 1a의 실선을 따라 분포하는 CT 값을 보여주고 있는데, 시료의 중심부에서 평균적인 값을 보이다가 가장자리에 가까워질수록 높은 CT 값을 나타내는 빔하드닝 화상결함을 관찰할 수 있다. 이러한 X-ray 단층화상의 결함을 보정하기 위한 방법으로 공기와 알루미늄 필터, 그리고 균질한 물질을 이용하는 개인보정법(*gain calibration*) 및 다양한 화상보정법이 적용된다. 본 연구에서는 개인보정법과 Kitayama (2008)가 제안한 화상보정법을 적용하여 빔하드닝 결함을 최소화시켰다. 이 화상보정법은 빔하드닝 결함을 보이는 단층화상의 CT 값을 읽어 들여 제안된 빔하드닝 수정식에 의하여 CT 값을 감하는 방식으로 Fortran 언어로 작성되었다.

마이크로 포커스 X-ray 단층촬영 및 정량분석

표 2에 스카른 복합광석 시료에 대한 마이크로 포커스 X-ray 단층촬영 조건을 나타내었다. 이 촬영 조건의 설정은 조상호 등(2009)의 촬영 조건과 유사하며, 고밀도의 스카른 복합광석의 특성을 고려하여 관전류는 120 μ A로 촬영하였다. 회색음영의 단층촬영 화상에서 구성광물의 밀도 차에 따른 CT 값의 범위를 산출하기 위하여 이미지 프로세싱 프로그램인 Image J 프로그램을 이용하였다. 주사 전자현미경에서 분석한 BSE 화상과 맵핑 화상을

Table 2. Operation condition of the micro-focus X-ray CT scanner

Voltage (kV)	Current (μ A)	Gain calibration (mm)	Space of slice (mm)	Pixel size (pixels)
130	120	6	0.05	1024*1024

Table 3. X-ray fluorescence analysis of the skarn ore

Elemental composition (%)													
Si	Ca	Zn	Fe	S	Mn	Mg	Al	P	Cu	Cd	K	Ti	Pb
22.54	20.88	19.56	17.67	8.05	6.03	2.96	1.33	0.42	0.094	0.147	0.11	0.079	0.104

X-ray 단층촬영 화상과 비교하여 황화광물의 윤곽을 가지는 CT 값의 범위를 결정하였다. 결정된 CT 값의 범위에 해당하는 황화광물의 화상을 2진 화상으로 변환시킨 후에 3차원 화상으로 재구성하여 황화광물과 맥석광물의 체적을 계산한다.

연구결과

XRD 분석으로부터 스카른 복합광석의 광물 조성은 맥석광물인 석영, 회철회석, 녹니석과 유용광물인 섬아연석로 구성된 것으로 나타났다. 형광 X선 분석 결과, 유용광물의 함량은 아연 19.56%, 납 0.104%, 구리 0.094%로 확인되었다(표 3).

제작시료의 표면 전체에 대한 구성광물의 부존 형상을 관찰하기 위하여 그림 2a와 같이 주사전자 현미경에 의한 BSE 화상 분석을 실시하였다. 밝은 영역은 금속광물을 나타내며 어두운 영역은 맥석광물들을 나타내고 있다. 특히 밝은 영역 내 약간 어두운 영역의 광물구성을 분석하기 위하여 그림 내 표기된 사각형 영역에 대한 화학분석(mapping)을 수행하여, 자류철석($Fe_{1-x}S$)과 섬아연석(ZnS)의 주요 성분인 S, Fe, Zn과 맥석광물의 주요 성분인 Ca의 분포를 그림 2b에 나타내었다. 그림 2a의 밝은 영역은 섬아연석이며, 실선으로 표시된 영역은 자류철석, 그 외에 맥석광물로 구성되어 있음을 알 수 있다.

동일 시료 내에 광물별 3차원 부존형상 및 정량 분석을 위하여 마이크로 포커스 X-ray 단층 촬영 시스템을 이용하여 비파괴 3차원 내부촬영을 수행하였다. 한 번에 시료 전체에 대한 단면화상을 획득할 수 있는 큰범 촬영 조건을 선택하여 356장의 단면화상(slices)을 얻었다. 그림 3은 획득된 356장의 단면화상을 3차원으로 재구성한 화상이다. XY축은 시료의 반경방향 단면을 나타내며, Z축은 시료의

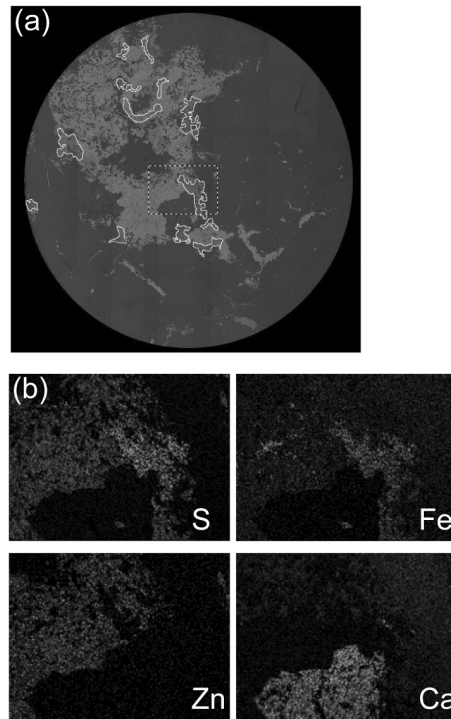


Fig. 2. SEM analysis results of the skarn ore. (a) SEM-BSE image, (b) X-ray elemental maps.

높이를 나타낸다. 또한 시료 내 광물의 밀도에 따라 256단계의 회색염영으로 나타나며, 밀도가 높은 광물은 백색 계열, 밀도가 낮은 광물은 흑색 계열로 나타났다.

단층화상으로부터 그림 1에서 설명한 빔하드닝 화상결합의 발생을 확인하였다. 그림 4는 단층화상으로부터 시료의 중심에서 가장자리까지의 CT 값을 나타낸 그래프이며, 시료의 가장자리 부근의 CT 값이 평균 CT 값보다 현저히 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 빔하드닝 화상결합을 보정하기 위

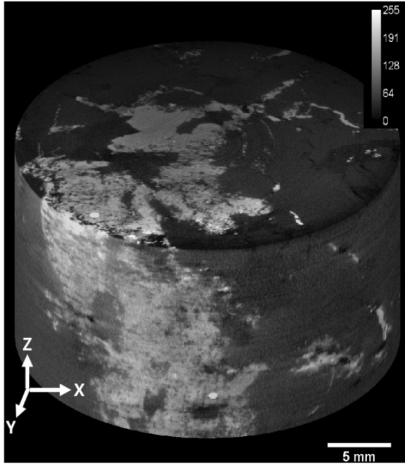


Fig. 3. Volume rendering image of the skarn ore.

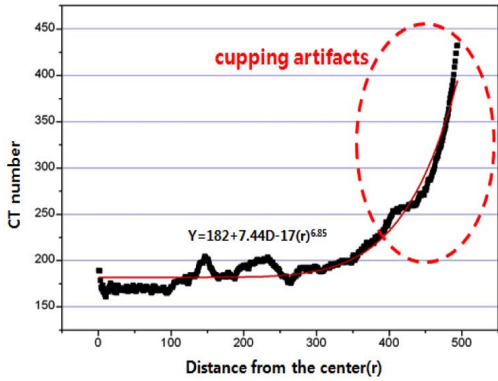


Fig. 4. Fitted curve and equation to calibrate cupping artifacts in CT images.

하여 화상보정 프로그램(Kitayama, 2008)을 이용하여 그래프 내 수정식을 제안하였다. 평균 CT 값은 182, 그래프의 기울기는 7.44D-17, 곡선의 시작점은 6.85로 평가되었다. 평균 CT 값과 분석된 화상 결합의 CT 값의 차를 이용한 화상보정을 실시하여 그림 5와 같은 결과를 얻었다. 그림 5a는 보정 전후의 화상을 각각 나타내는 것이며, 보정 후 가장 자리의 음영이 변화된 것을 확인하였다. 그림 5b는 그림 5a 화상의 실선에 해당하는 CT 값을 그래프로 나타낸 것이며, 시료 가장자리의 CT 값이 낮아진 것으로 확인되었다.

보정된 단층화상을 이용하여 화상분석을 실시하였으며, 황화광물의 CT 값 범위를 산출하기 위하여 BSE 화상에서 분석된 자류철석과 섬아연석의 위치를 단층촬영 화상에서의 위치와 비교하였다.

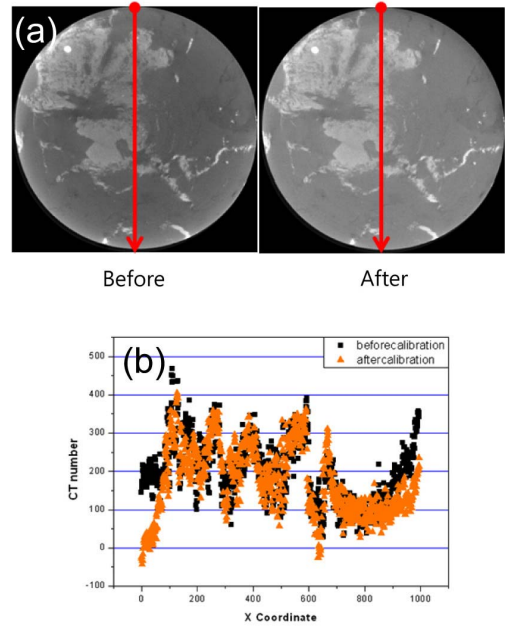


Fig. 5. Image processes for calibrating image artifacts. (a) X-ray CT images before and after calibration of CT number, (b) CT profiles before and after calibration of CT number.

단층화상에서 자류철석과 섬아연석의 CT 값의 차이가 미미하고, BSE 화상과 달리 구분이 용이하지 않아 광물별로 세분화하지 않고 황(S)을 포함하는 황화광물로 간주하여 CT 값의 범위를 산출하였다. 그림 6a는 시료의 단층화상에 대한 CT 값의 범위를 나타내며, CT 값은 -8192~+8191의 범위 내에서 최소값 -557, 최대값 +4768로 나타났다. 황화광물의 CT 값 범위는 236~Max이며, 그림 6b는 이에 해당하는 2진 화상을 나타낸다.

산출된 황화광물의 CT 값의 범위는 236~Max이며, 맥석광물은 235~최소값으로 추출되었다. 그림 7은 추출된 CT 값에 따른 황화광물의 3차원 재구성화상을 나타낸다. 시료 내 황화광물이 밀집되어 있는 부근의 빔하드닝 화상결합이 완벽하게 제거되지 않았음을 확인하였다.

추출된 CT 값의 범위를 이용하여 정량분석을 실시하였으며 표 4와 같은 결과를 얻었다. 부피는 시료의 높이를 단층촬영 슬라이스 수로 나누어 계산한 슬라이스 간격(slice spacing) 0.044129 mm와 면적의 총 합 268,194 mm²를 곱하여 계산하였다. 시료 내 황화광물의 체적은 20.5%, 맥석광물의 체적은 79.5%로 분석되었다. 시료의 전체 부피 12,149

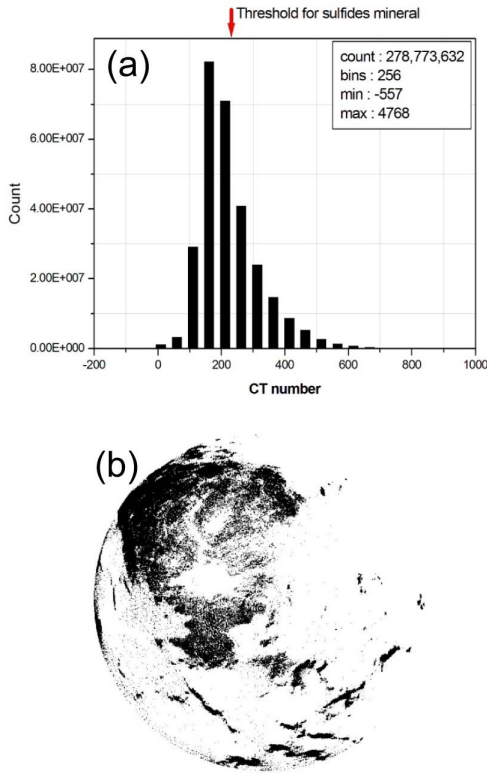


Fig. 6. Threshold of CT number range covering sulfide minerals. (a) Threshold for sulfide minerals, (b) Binary image for sulfide minerals.

mm³와 분석된 황화광물의 체적은 2.58%의 오차가 발생되었다.

고 찰

본 연구에서는 스카른 Zn-Pb-Cu 복합광석의 마이크로 포커스 X-ray 3차원 단층화상의 화상분석에 의한 정량분석을 실시하였다. 앞에서 소개한 황화광물 체적의 오차는 분석 시료의 실제 체적과 화상분석 결과를 비교한 것으로, 시료의 형태 또는 단층촬영시 시료의 상하 표면 부근에서 발생하는 화상결함에 의해 식별이 불가능하여 배제된 슬라이스로 인하여 발생되었을 것으로 판단된다. 또한 빔하드닝 현상이 완벽히 제거되지 않아 분석 결과에 오차를 발생시켰을 것으로 판단된다. 시료에 따른 X-ray 단층촬영 조건을 확립하여 화상결함을 최소화한다면 정확한 정량분석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

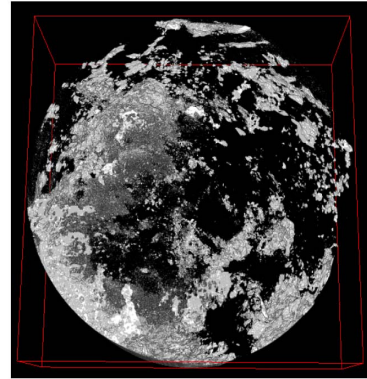


Fig. 7. Volume rendering image of sulfide minerals.

Table 4. The results of quantitative analyses

	Surface area (mm ²)	Volume (mm ³)	Volume (%)
Sulfides mineral	54,974.33	2,425.98	20.50
Gangue minerals	213,219.6	9,409.21	79.50
Total	268,194	11,835.19	100.00

본 연구에서 수행한 정량분석은 기존의 현미경 분석이나 X-선 회절분석에 의한 정량분석과는 다르게 시료 전체를 대상으로 하는 정량분석이다. 김영훈 외(2010)는 스카른 복합광석 시료의 광물학적 특성을 파악하기 위하여 현미경분석을 수행하였으며, 섬아연석 내에 자류철석, 황동석, 자철석이 0.01 mm 내외의 크기로 용리되어 있음을 확인하였다. 이와 같이 광물이 용리되어 산출될 경우 광물의 결정이 온전하지 않아 계수에 의한 정량분석은 어려울 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 제안한 정량분석법은 광물의 밀도 차에 의한 X-ray 단층화상의 화상분석에 의해 시료 전체에 대한 정보를 포함하므로 시료를 대표할 만한 평가가 가능하다고 판단된다. 본 연구에서 제안한 정량분석법은 현장 채취시료로부터 유용광물의 부존형상과 회수를 분석에 유용한 방법이 될 것으로 기대된다.

결 론

스카른 복합광석 시료를 대상으로 마이크로 포커스 X-ray 3차원 단층화상의 화상분석으로부터 정량분석을 수행하였다. XRD 분석결과 스카른 복합

광석의 광물 조성은 맥석광물인 석영, 회철회석, 녹니석과 유용광물인 섬아연석에 의해 구성된 것으로 나타났다. 유용광물의 함량은 아연 19.56%, 납 0.104%, 구리 0.094%로 확인되었다. 주사전자현미경에 의한 BSE 화상 분석으로부터 대상 광물시료의 표면을 구성하고 있는 자류철석($Fe_{1-x}S$)과 섬아연석(ZnS), 맥석광물의 부존형상을 확인하였다. 시료 내에 광물별 3차원 부존형상 및 정량적인 분석을 위하여 마이크로 포커스 X-ray 단층 촬영시스템을 이용하여 비파괴 3차원 내부촬영을 수행하였다. 단면화상의 CT 값에 대한 빔하드닝 분석결과, 평균 CT 값은 182, 그래프의 기울기는 7.44D-17, 곡선의 시작점은 6.85로 평가되었다. 빔하드닝 화상결합에 대한 보정화상을 이용하여 화상분석으로부터, 황화광물의 CT 값은 236 이상으로 평가되었다. 정량분석 결과로서, 시료 내 황화광물의 체적은 20.5%, 맥석광물의 체적은 79.5%로 분석되었다. X-ray 3차원 단층화상 정량분석법은 광석 시료로부터 유용광물의 부존형상과 회수율 분석에 훌륭하게 적용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지자원기술개발사업(3세부과제)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

김영훈, 현종영, 노혜정 (2010) 가곡광산 섬아연석의 기초 부선 특성 연구. 2010 한국지구시스템공학회 제 94회 춘계학술발표회, 149-151.
 손병국 (2007) 광물의 정량분석법 및 정량분석의 중요성.

광물과 산업, 20, 19-270.
 조상호, 조슬기, 김승곤, 박찬,金子 勝比古 (2009) 단계적 충격하중에 의한 암석의 동적손상메커니즘에 관한 실험적 연구. 한국암반공학회지, 19, 545-557.
 현창욱, 박형동 (2005) X-ray CT를 이용한 암석 내부 특성 연구. 2005년도 대한지질공학회 정기총회 및 학술발표회.
 Kitayama, H. (2008) A 3-D calibration method for the micro-focused X-ray CT by image processing. Ph.M. Thesis, University of Hokkaido, Sapporo, Japan, 47p.
 Miller, J.D. and Lin, C.S. (2003a) Three-dimensional analysis of particulates in mineral processing systems by cone beam X-ray microtomography. Minerals and Metallurgical processing, 3, 337-346.
 Miller, J.D., Lin, C.L., Garcia, C., and Arias, H. (2003b) Ultimate recovery in heap leaching operations as established from mineral exposure analysis by X-ray microtomography. International Journal of Mineral processing, 72, 331-340.
 Taud, H., Martinez-Angeles, R., Parrot, J.F., and Hernandez-Escobedo, L. (2005) Porosity estimation method by X-ray computed tomography. Journal of Petroleum Science and Engineering, 47, 209-217.
 Van Geet, M., Swennen, R., and Wevers, M. (2000) Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography. Sedimentary Geology, 132, 25-36.
 Yun, S. (1978) Petrography, chemical composition, and depositional environments of the Cambro-Ordovician sedimentary sequence in the Yeonhwa I mine area, southeastern Taebaegsan region. Korea. Journal of Geological Society of Korea, 14, 145-174.

접수일(2010년 9월 8일), 수정일(1차 : 2010년 9월 16일), 게재확정일(2010년 9월 17일)