

## 고전압 방전 충격펄스를 이용한 유용광물 회수에 관한 실험적 연구

조상호<sup>1)\*</sup> · 정상선<sup>2)</sup>

### Experimental Study on the Recovery of Useful Minerals Using High Voltage Discharge Shock Pulse

Sangho Cho, Sangsun Jeong

**Abstract** Electrical pulse disintegration(ED) is known as an efficient technology for recovering valuable resources by inducing dielectric breakdown in solids to separate mineral interfaces in ores among the crushing technologies by high voltage discharge. In this study, ED crushing experiment and mechanical crushing experiment of sulfide minerals were performed, and SEM analysis and Microfocus X-Ray CT of the crushed product were performed in order to analyze the disintegration characteristics of zinc minerals exist in the sulfide minerals by the shock wave generated in the solid by high voltage discharge.

**Key words** High voltage pulse discharge, Dielectric fracture, SEM, Microfocus X-ray CT, Electric pulse disintegration

**초 록** 고전압 방전에 의한 파분쇄기술 중 ED(Electrical pulse Disintegration)는 고체 내 절연파괴를 유도하여 고체 내 취약한 경계면을 분리하여 유가자원을 분리·회수하는 고효율 자원처리 기술로 알려져 있다. 본 연구에서는 고전압 방전에 의하여 고체 내 발생한 충격파가 황화광물 내 존재하는 이연광물의 단체분리특성을 분석하기 위하여, ED분쇄실험과 기계식 분쇄실험을 수행하고 분쇄산물에 대한 SEM-BSE 분석과 Microfocus X-Ray CT 분석을 수행하여 단체분리도를 비교하였다.

**핵심어** 고전압 펄스 방전, 절연파괴, SEM, 마이크로포커스 X-ray CT 단층촬영, 전기펄스분쇄

## 1. Introduction

광물자원으로부터 유용광물을 분리하는 처리공정은 암석 속에 들어 있는 유용광물과 맥석광물을 분쇄하여 별도의 입자로 나누어 분리하는 공정을 의미한다. 이와 같은 것을 단체분리(libération)라고 하는데, 단체분리가 완전히 이루어진 입자를 분리입자(free particle), 그렇지 않은 입자를 미분리 입자(locked

particle)라 부른다. 이러한 단체분리의 효율을 높이는 방법으로는 구성하는 광물입자의 경계면에 임의의 응력을 가함으로써 목적 광물(valuable mineral)입자의 자체 크기를 유지하면서 주변 맥석(gangue mineral) 부분만을 부수는 방법이다. 예를 들어, 대부분의 복합광물은 높은 온도와 낮은 온도를 반복적으로 가하여 이상적인 단체분리를 이룰 수 있으나 에너지효율이나 수익성이 떨어져 적용하지 못한다(Ito et al., 2009 and Andres et al., 2001). 특히, 광물파분쇄에 일반적으로 적용되는 Jaw crusher 및 Roll crusher 등과는 같은 기계적 분쇄법은 복합광 내 유용광물입자의 경계뿐만 아니라 유용광물 내 파분쇄를 발생시켜 회수율이 낮아지게 된다. 최근까지 알려진 단체분리도 향상을 위한 파분쇄 기술에는 AG(autogenous) 및 SAG(semi-autogenous) mill, 마이크로웨이브 분쇄, 전자빔

1) 전북대학교 토목·환경·자원에너지공학부 자원에너지공학과

2) 구마모토대학 첨단과학기술 국제연구소

\* 교신저자 chosh@jbnu.ac.kr

접수일 : 2022년 3월 17일

심사완료 : 2022년 3월 23일

게재승인 : 2022년 3월 28일

분쇄, 전기펄스 분쇄(electrical pulse disintegration, ED) 등 다양한 자원처리기술이 제안되거나 적용되어 오고 있다(조상호 외, 2006).

본 연구에서는 금속광물 및 비금속광물에 대한 단체분리능력이 높은 것으로 알려진 고전압전기펄스 방전을 통한 분쇄기술을 황화광물에 적용하여 유용광물의 단체분리특성을 분석하고, 기계식 분쇄법과 비교하였다. 유용광물의 단체분리도를 평가하기 위하여 체가름분석을 실시하였으며, 직경 및 높이가 15 mm 인 고무홀더에 에폭시를 이용하여 시료를 고착시킨 후, 각각의 입근별 Microfocus X-Ray CT 촬영을 통해 단체분리도를 비교 분석하였다. 추가적으로, 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 이용한 후방산란전자(back scattered electron, BSE) 촬영 기법을 이용하여 시료 내 구성광물의 성분 및 분포 경향에 대한 분석을 수행하였다.

## 2. Electrical Pulse Disintegration(ED)

ED 실험은 수중에서 시료에 전극을 접촉시켜, 고전압 펄스를 가함으로써 국소적으로 편중된 전하들 간에 형성된 강한 자기장으로 인해 발생한 플라즈마 전류를 직접 시료에 인가하여, 고전압 펄스 에너지가 직접 암석 표면에 전달되고, 절연파괴현상에 의하여 전류경로가 형성되며, 이때 형성된 전류경로는 광물 경계를 따라서 발생한다. 또한, 이 전류경로가 방전전극과 접지전극을 연결하여 아크방전에 의한 대전류가 흐르게 되면서 발생하는 열과 팽창에 의해 시료가 단체분리 되는 원리이다. Fig. 1은 고전압 펄스 방전 시

스템을 보여주고 있다. 고전압 펄스 시스템은 고전압 펄스 발생기(impulse voltage generator, IVG-80), 전류 및 전압 감쇄기(attenuator), 고전류계(current monitor), 디지털 오실로스코프(digital oscilloscope), 방전 수조로 구성된다. 고전압 펄스 발생기에서 발생된 고전압은 상부전극에서 방전되고, 방전 시 발생하는 전압은 분압기와 전압 감쇄기를 경유하며, 전류는 고전류계와 전류 감쇄기를 통과 후 디지털 오실로스코프에 시간과 함께 전류값으로 기록된다. 상부전극은 세라믹으로 피복된 구리봉을 사용하였으며, 하부전극은 2 mm 스테인리스 철망으로 구성된다. 시료는 상부전극과 하부전극 사이에 위치하며 고전압 방전 펄스에 의하여 분쇄된 산물은 하부 전극망을 통과하게 된다.

## 3. Experiments

본 연구에 사용된 시료는 가곡광산에서 채취한 아연광으로, 지질학적으로는 스카른 광상(skarn deposit)으로 분류된다. 채취한 광석 시료에 대하여 고전압 ED 실험 및 Roll crusher를 이용한 기계식 분쇄 실험을 수행하였고, 두 종류의 분쇄실험을 통해 획득한 파쇄 산물에 대하여 황화광물의 단체분리 경향을 평가하였다. Fig. 2(a), (b)는 실험에 사용된 고전압 펄스 발생 장치와 Roll crusher 장비를 보여주고 있다. 고전압 펄스 발생 장치의 경우 약 1  $\mu\text{sec}$  이내에 최대 80 kV까지 방전 시킬 수 있으며, 충전 시간은 약 5 sec 정도 소요된다. 고전압 펄스 분쇄 실험은 2층, 3층, 4층으로 수행되었고, 2층, 3층, 4층은 Discharge chamber 내부의 대략적인 샘플 높이를 의미한다(Fig.

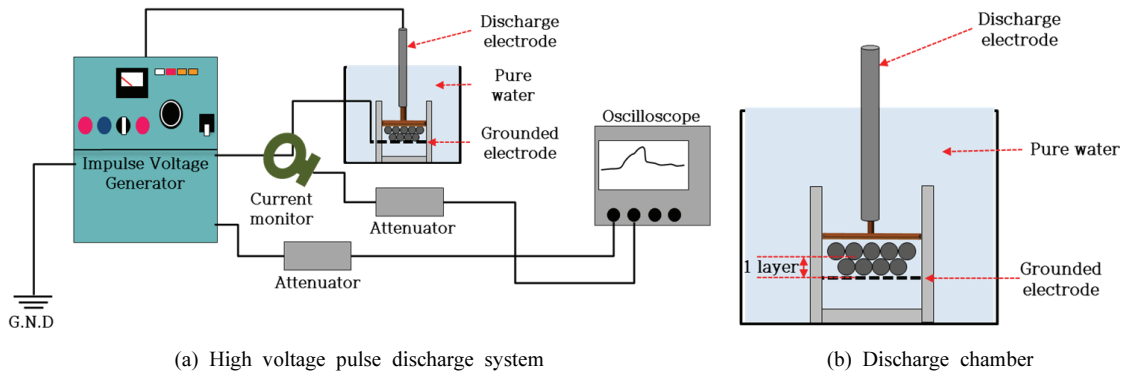


Fig. 1. Schematic diagram of high voltage pulse discharge system

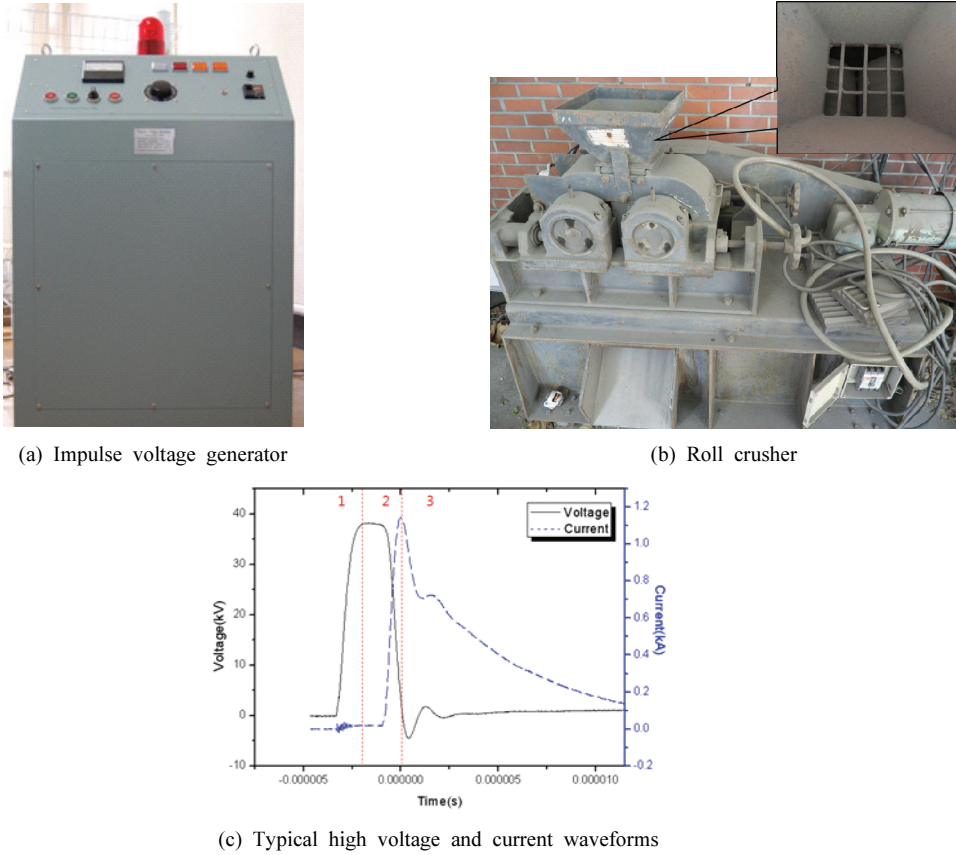


Fig. 2. High voltage pulse discharge equipment and roll crusher and generated pulse waveforms

1(b)). 샘플에 높이에 따른 방전 전압은 각각 26, 26, 32 kV로 4층 샘플의 경우 샘플 높이가 증가하여 높은 전압량이 요구 되었다. 상부전극과 하부전극의 간격이 가까우면 절연파괴현상이 발생하지 않는 경우가 있으며, 반대로 샘플을 높이 적층하여 상부전극과 하부전극의 간격이 멀어지면 높은 전압량이 요구되는 경우가 발생한다. Fig. 2(c)는 2층 샘플에 대한 방전 시 측정된 고전압 전압곡선과 전류곡선 예시를 보여 주고 있다.

#### 4. Liberation analyses of ore fragments

##### 4.1 Definition of the degree of liberation(DOL)

본 연구에서는 황화광물 분쇄산물에 대한 단체분리도(Degree of Liberation, DOL)를 평가하기 위해 화상분석법을 적용하였으며, 주사전자현미경 화상과 Microfocus X-ray CT 화상을 촬영하였다. 단체분리도

의 평가 방법은 Fig. 3 및 Eq. 1과 같으며, 파쇄된 입자들 중 80 % 이상 단체분리된 황화광물 입자들의 면적( $S_1 + S_2$ )을 전체 황화광물의 입자 면적( $S_1 + S_2 + S_3$ )으로 나누어 평가하였다(Miller et al., 2003).

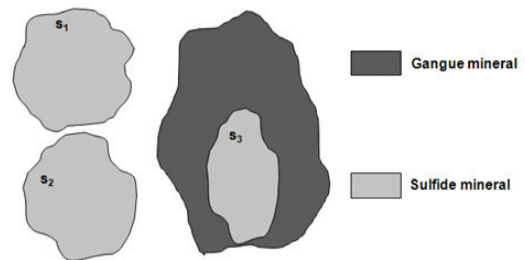


Fig. 3. Definition of the degree of liberation

$$DOL = \frac{A_s}{A_t} \times 100 \quad (1)$$

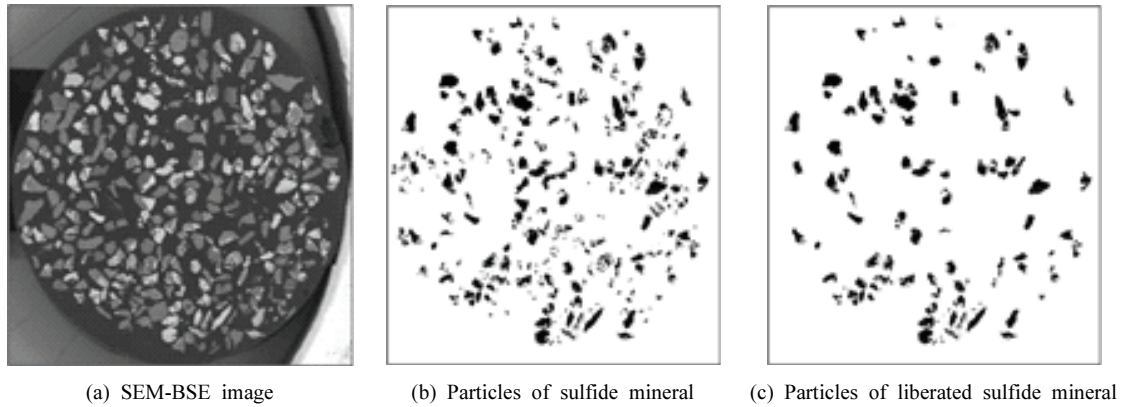


Fig. 4. The density analysis of SEM and Microfocus X-ray CT image

여기서  $A_s$ 는 80% 이상 단체분리된 황화광물 입자의 면적이고,  $A_t$ 는 전체 황화광물 입자의 면적이다.

촬영된 화상자료에 대한 단체분리도 평가는 미국 국립보건원(National Institutes of Health, NIH)에서 개발한 연구용 화상분석 소프트웨어인 Image J 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 평가 과정은 Fig. 3과 같이 평가된다. 우선, SEM-BSE를 통해 촬영된 원화상(Fig. 4(a))에서 Image J의 Threshold 기능을 이용하여 맥석 부분을 제거한 후 황화광물을 포함하는 모든 입자들을 가시화(visualization)한다(Fig. 4(b)). 이후, 가시화된 화상을 대상으로 Image J의 Analyze Particles 기능을 이용하여 입자들의 면적을 측정한다. 다음으로 SEM-BSE 원화상으로부터 80% 이상의 단체분리된 황화광물 입자만을 가시화시킨 후 동일 방법으로 면적을 측정한다(Fig. 4(c)). 여기서 SEM-BSE 촬영화상과 Microfocus X-ray CT 촬영화상은 구성광물의 밀도에 따라 흑백의 강도를 구분할 수 있다.

#### 4.2 Estimation of DOL based on SEM-BSE images

SEM-BSE 화상을 이용하여 Roll crusher와 ED 샘플에 대한 단체분리도를 평가하였다. Fig. 5는 Roll crusher 샘플과 ED 3층 샘플의 SEM-BSE 화상을 나타내는 것으로, 단체분리도 평가에 사용되었다. Table 1은 Roll crusher 샘플에 대한 단체분리도 평가 결과를 나타내고 있다. Roll crusher 샘플의 결과를 살펴보면, 입도가 작아짐에 따라서 황화광물의 전체 면적은  $2.069 \sim 7.932 \text{ cm}^2$  범위로 측정되었으며, 80% 이상 단체분리된 황화광물의 전체 면적은  $0 \sim 5.556 \text{ cm}^2$

범위로 측정되었다. 두 면적에 의해 평가된 단체분리도는  $0 \sim 91.33 \%$  범위로 입도가 작아짐에 따라서 증가하는 경향을 보여주고 있다. ED 3층 샘플의 결과를 살펴보면, 입도가 작아짐에 따라서 황화광물의 전체 면적은  $8.605 \sim 22.907 \text{ cm}^2$  범위로 측정되었으며, 80% 이상 단체분리된 황화광물의 전체 면적은  $7.891 \sim 15.829 \text{ cm}^2$  범위로 측정되었다. 두 면적에 의해 평가된 단체분리도는  $38.87 \sim 96.83 \%$  범위로 Roll crusher의 경우와 마찬가지로, 입도가 작아짐에 따라서 증가하는 경향을 보여주고 있다.

#### 4.3 Estimation of DOL based on Microfocus X-ray CT image

SEM-BSE 화상분석으로부터 평가된 단체분리도의 경우, 샘플의 표면만을 대상으로 평가된 결과라는 한계점이 있다. 따라서 Microfocus X-ray CT 촬영을 통해 시료의 내부를 가시화한 후 단체분리도 평가에 추가적으로 활용하였다. Fig 6(a)는 Microfocus X-ray CT 촬영으로부터 획득한 3차원 화상을 보여주며, Fig. 6(b), (c), (d)는 3차원 화상으로부터 획득한 샘플의 XY, YZ 및 ZX 축에 대한 화상을 보여주고 있다.

본 연구에서는 3가지 축 화상 중 XY 축 화상을 대상으로 단체분리도 평가에 사용하였다. XY 축 화상은 각각의 샘플당 약 50~400장으로 구성되어 있으며, 단체분리도 평가에는 각각의 샘플 입도 따라서 5장씩만을 동일 간격으로 선택하여 사용하였다. Fig. 7, 8, 9, 10은 각각 Roll crusher 샘플과 ED 2층, 3층, 4층 샘플(25 mesh)의 평가 결과를 보여주고 있다.

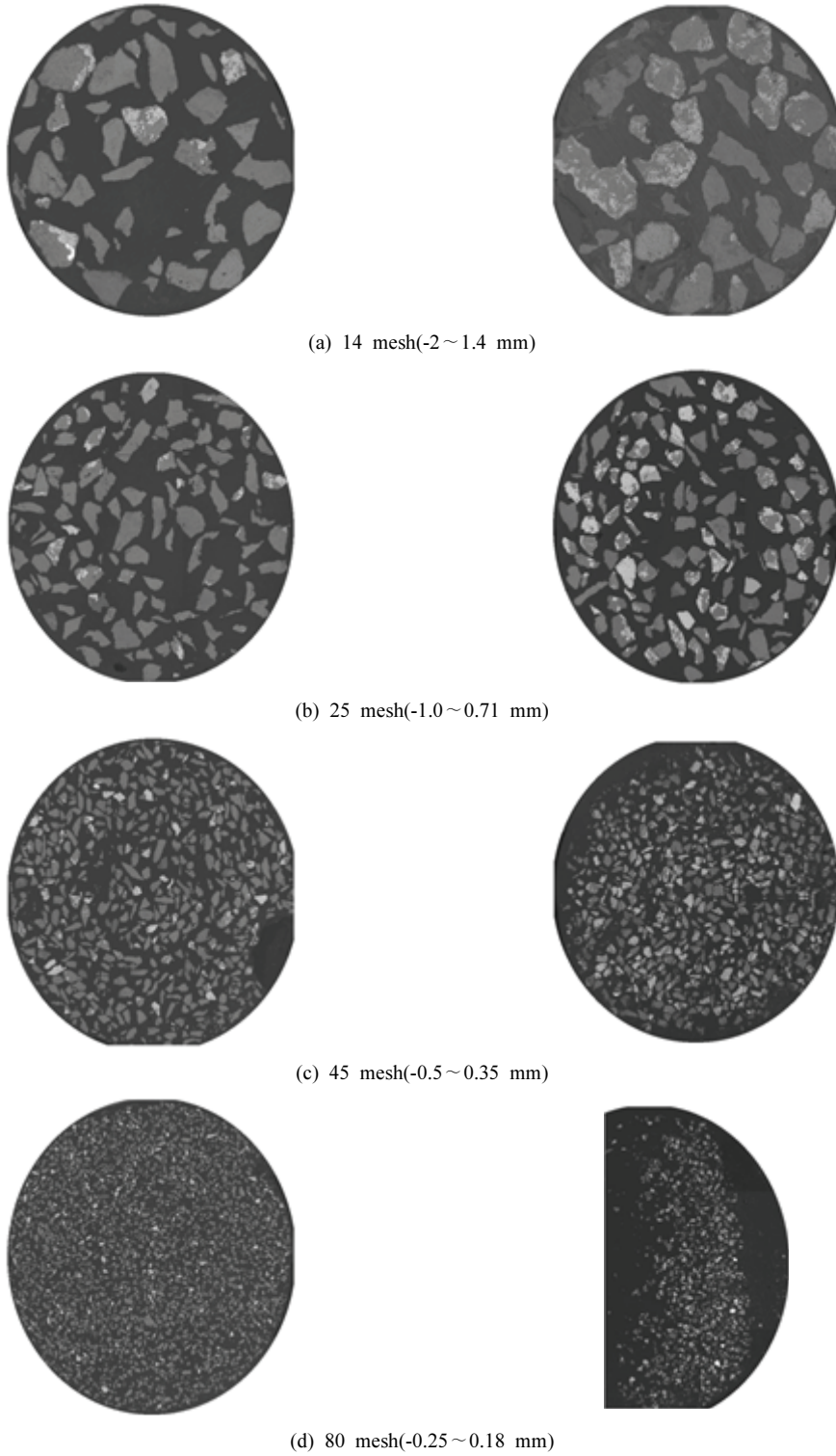


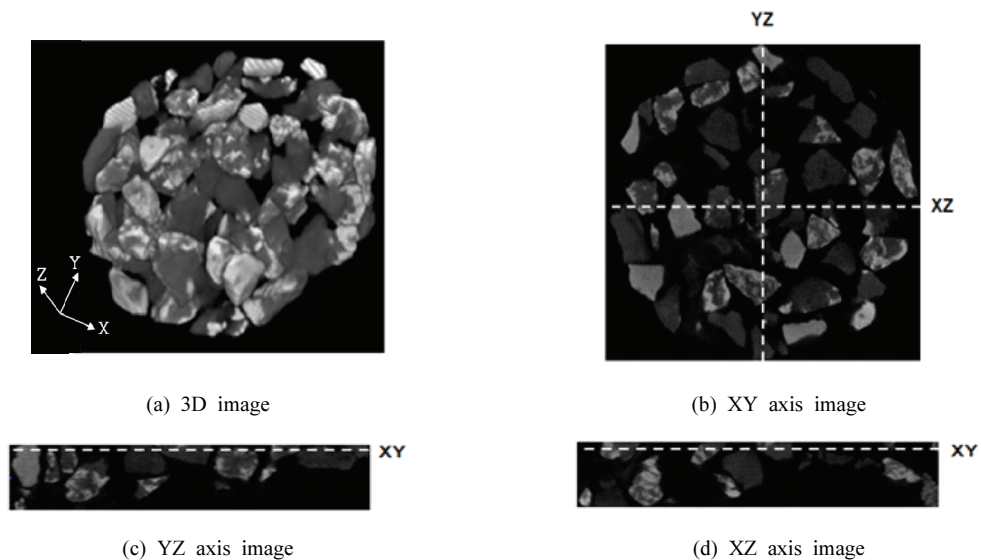
Fig. 5. SEM-BSE images of roll crusher and ED samples(left: roll crusher, right: ED 3 layer)

**Table 1.** Summary of the degree of liberation for roll crusher products

Mesh	Particle size (mm)	Area of sulfide mineral (cm <sup>2</sup> )	Area of liberated sulfide mineral (cm <sup>2</sup> )	Degree of liberation (%)
14	-2 ~ 1.4	4.013	0	0
18	-1.4 ~ 1.0	2.069	0	0
25	-1.0 ~ 0.71	2.388	0.314	13.14
35	-0.71 ~ 0.5	4.083	0.719	17.60
45	-0.5 ~ 0.35	5.349	2.800	52.34
60	-0.35 ~ 0.25	7.932	5.342	67.34
80	-0.25 ~ 0.18	3.832	2.901	75.70
120	-0.18 ~ 0.12	6.083	5.556	91.33
-120	-0.12	-	-	-

**Table 2.** Summary of the degree of liberation for ED products (3 layer)

Mesh	Particle size (mm)	Area of sulfide mineral (cm <sup>2</sup> )	Area of liberated sulfide mineral (cm <sup>2</sup> )	Degree of liberation (%)
14	-2 ~ 1.4	22.907	8.905	38.87
18	-1.4 ~ 1.0	19.384	9.258	47.76
25	-1.0 ~ 0.71	18.514	9.631	52.02
35	-0.71 ~ 0.5	21.897	14.042	64.12
45	-0.5 ~ 0.35	18.560	14.455	77.88
60	-0.35 ~ 0.25	11.204	9.330	83.27
80	-0.25 ~ 0.18	8.605	7.891	91.70
120	-0.18 ~ 0.12	16.347	15.829	96.83
-120	-0.12	-	-	-

**Fig. 6.** Selected cross-sectional images from a 3 dimensional microfocus X-ray CT image

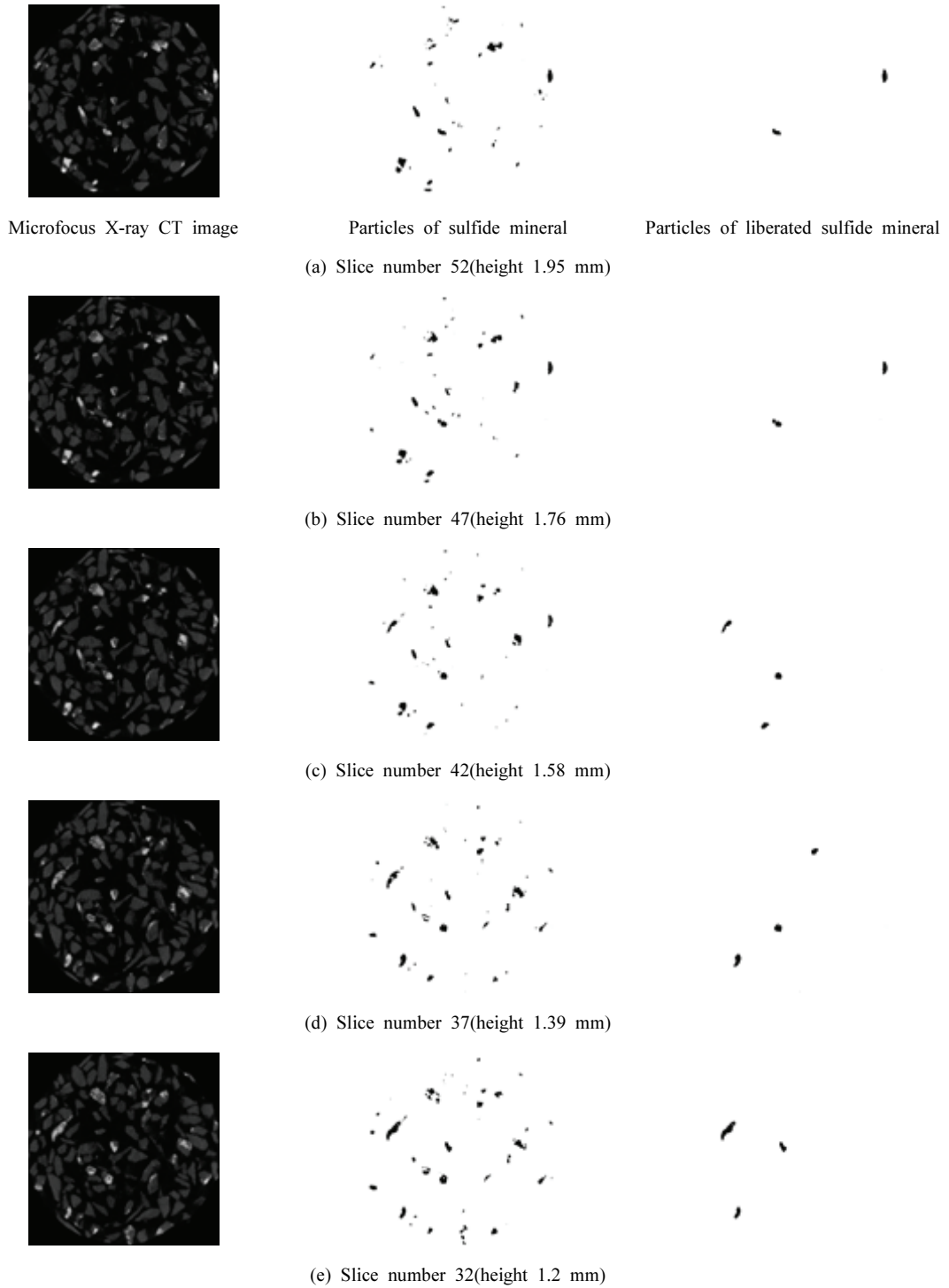


Fig. 7. Separation of liberated sulfide mineral particles for roll crusher products(25 mesh)

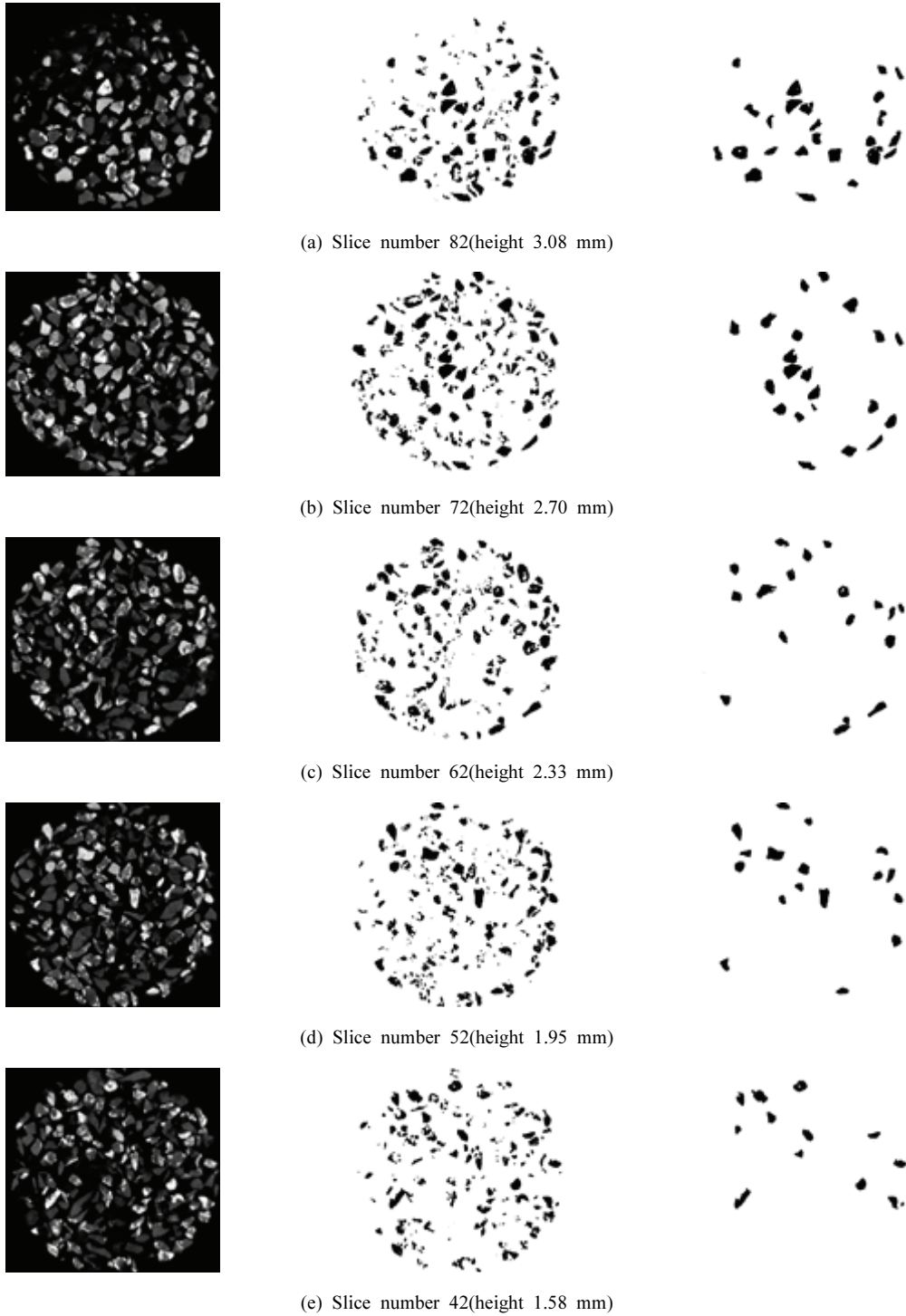
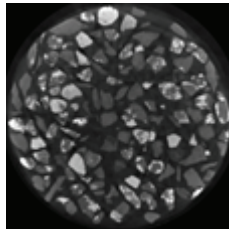
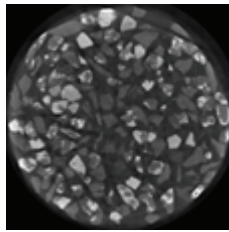


Fig. 8. Separation of liberated sulfide mineral particles for ED 2 layered products(25 mesh)

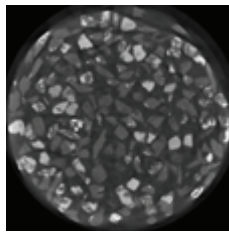




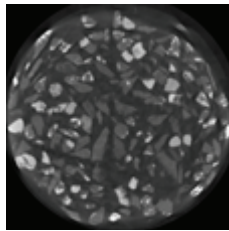
(a) Slice number 72(height 2.70 mm)



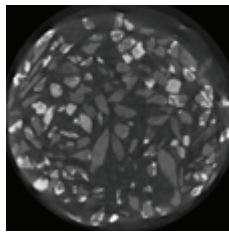
(b) Slice number 67(height 2.51 mm)



(c) Slice number 62(height 2.33 mm)



(d) Slice number 57(height 2.14 mm)



(e) Slice number 52(height 1.95 mm)



Fig. 9. Separation of liberated sulfide mineral particles for ED 3 layered products(25 mesh)

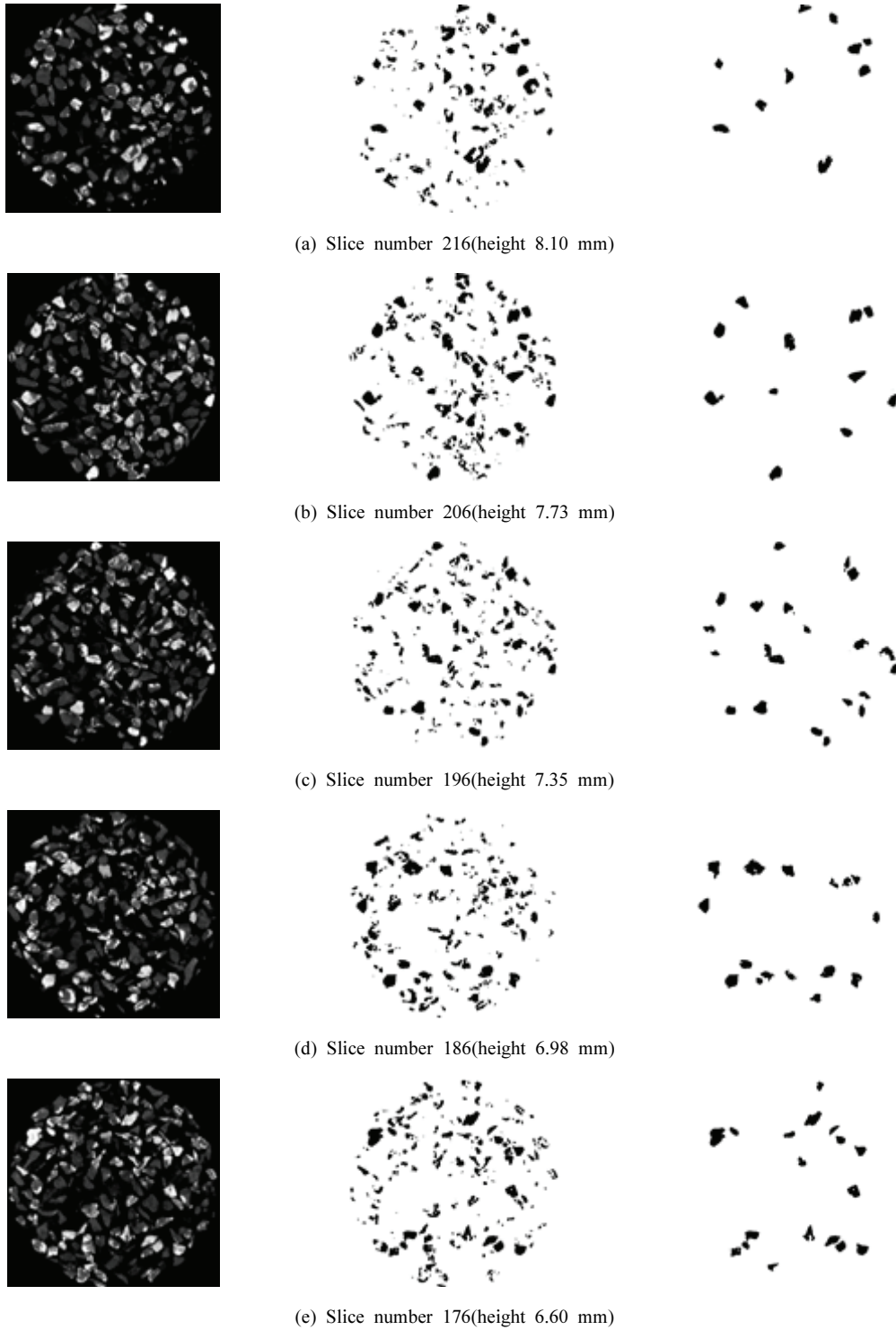


Fig. 10. Separation of liberated sulfide mineral particles for ED 4 layered products(25 mesh)

#### 4.4 Comparison of DOL

SEM-BSE 화상을 이용한 단체분리도 결과와 Microfocus X-ray CT 화상을 이용한 단체분리도 결과는 Table 3 및 Fig. 11을 통해 보여주고 있다. 결과를 살펴보면, 두 화상분석에 따른 단체분리도는 입도가 작아짐에 따라서 증가하는 경향을 보였으며, 전기 펄스 분쇄법을 적용한 ED 샘플의 단체분리도가 Roll crusher 샘플보다 높게 평가되었다.

SEM-BSE 화상분석에서 최대 입도 14 mesh부터 최소입도 120 mesh까지 ED 샘플의 단체분리도는 Roll crusher 샘플의 단체분리도보다 5.5~47.8 % 범위로 높게 평가 되었다.

Microfocus X-ray CT 화상분석에서 최대 입도 14 mesh부터 최소입도 80 mesh까지 ED 2층 샘플의 단체분리도는 Roll crusher 샘플의 단체분리도보다 11.95~29.31 % 범위로 높게 평가되었다. ED 3층 샘플의

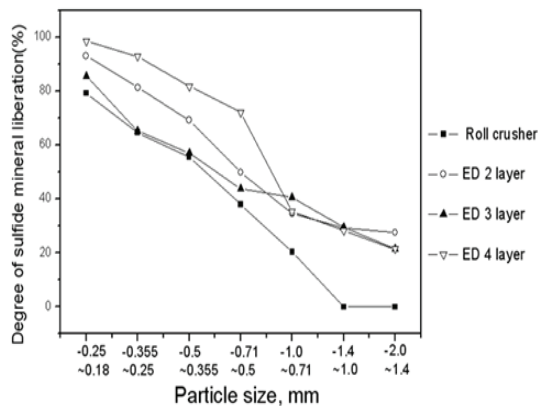


Fig. 11. Degree of average sulfide liberation with sieve size

단체분리도는 Roll crusher 샘플의 단체분리도보다 0.6~29.4 % 범위로 높게 평가되었다. ED 4층 샘플의 단체분리도는 Roll crusher 샘플의 단체분리도보다 14.72~34.18 % 범위로 높게 평가되었다.

#### 5. Conclusions

금속광물 및 비금속광물에 대한 단체분리성능이 높은 것으로 알려진 고전압전기펄스 방전기술을 적용하여 황화광물내 있는 아연광물의 단체분리특성을 분석하였으며, 기계식 분쇄법과 비교하는 연구를 수행하였다. 분쇄광물은 SEM-BSE 밀도분석과 Microfocus X-Ray CT 촬영을 수행하여 단체분리도를 비교하였다. 실험결과, 단체분리도는 입도가 작아짐에 따라서 증가하는 경향을 보였으며, 전기 펄스 분쇄법을 적용한 ED 샘플의 단체분리도가 Roll crusher 샘플보다 높게 나타났다. SEM-BSE 화상분석에서 최대 입도 14 mesh부터 최소입도 120 mesh까지 ED 샘플의 단체분리도는 Roll crusher 샘플의 단체분리도보다 5.5~47.8 % 범위로 높게 평가되었으며, X-ray CT 화상분석에서는 최대 입도 14 mesh부터 최소입도 80 mesh까지 ED 2층 샘플의 단체분리도는 Roll crusher 샘플의 단체분리도보다 각각 11.95~29.31 % 범위로 높게 평가되었다. ED 3층 샘플의 단체분리도는 Roll crusher 샘플의 단체분리도보다 최대 29.4 % 높게 평가되었으며, ED 4층 샘플의 단체분리도는 Roll crusher 샘플의 단체분리도보다 최대 34.18 % 높게 평가되었다.

향후, 고전압전기펄스 방전기술을 암석 파괴 및 자원처리(금, 은, 저급석탄 등)를 위한 단체분리 목적으

Table 3. Summary of the degree of liberation

Mesh	Degree of liberation (%)			
	Microfocus X-ray CT			
	Roll crusher	ED 2 layer	ED 3 layer	ED 4 layer
14	0	27.67	21.56	21.47
18	0	29.31	29.44	28.30
25	20.62	34.48	40.74	35.34
35	38.02	49.97	43.74	72.20
45	55.56	69.23	57.02	81.86
60	64.67	81.37	65.25	92.87
80	79.27	93.17	85.52	98.55

로 활용될 경우 종래의 기계적 분쇄에 대한 기술적 문제는 크게 감소될 것으로 예상된다. 또한, 고전압전 기펄스 방전기술을 이용한 암반 내 천공 기술의 경우 종래의 시스템보다 낮은 전력이 요구되며, 휴대성 및 소형 펄스 전원장치를 기반으로 다른 종류의 암반에 대해 천공 시 변수를 쉽게 조정할 수 있으며, 석유 및 가스 산업, 광업 분야 등에서 제한 구역을 천공할 경우 적용 가능성이 예상된다.

### 참고문헌

1. Andres, U., I. Timoshkin, J. Jirestig and H. Stallknecht, 2001, Liberation of valuable inclusions in ores and slags by electrical pulse, *Powder Technology*, Vol. 114, pp. 40-50.
2. Cho, S. H., Mohanty, B., Ito, M., Nakamiya, Y., Owada, S., Kubota, S., Ogata Y., Tsubayama, A., Yokota, M. and Kaneko, K., 2006, Dynamic fragmentation of rock by high-voltage pulses, ARMA/USRMS, 06-1118, Golden Rocks, *The 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics, Golden-Colorado*, June 17-21.
3. Ito, M., S. Owada., T. Nishimura and T. Ota, 2009, Experimental study of coal liberation: Electrical disintegration versus roll-crusher comminution, *Int. J. Miner. Process*, Vol. 92, No. 1-2, pp. 7-14.
4. Miller, J. D., C. L. Lin, C. Garcia and H. Arias, 2003, Ultimate recovery in heap leaching operations as established from mineral exposure analysis by X-ray microtomography, *Mineral processing*, Vol. 72, pp. 330-340.



#### 조 상 호

전북대학교 공과대학  
토목/환경/자원에너지공학부 교수

Tel: 063-270-4636  
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr



#### 정 상 선

구마모토대학 첨단과학기술 국제연구소

Tel: 063-270-4636  
E-mail: pro7954@gmail.com