

파쇄 메카니즘과 파쇄회로에 따른 입도분포

Particle-Size Distribution Dependent upon Crushing Mechanism and Crushing Circuit

최 도 영(Do Young Choi)¹ · 김 완 태(Wan Tae Kim)² · 김 상 배(Sang Bae Kim)^{2,*}

¹전남대학교 에너지자원공학과

(Department of Energy & Resource Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea)

²한국지질자원연구원 자원처리연구실

(Mineral Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 92 Gwahang-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 본 연구에서는 파쇄 메카니즘이 상이한 파쇄기(함마 크러셔와 롤 크러셔)와 파쇄회로(개회로 및 폐회로)를 사용하여 각각의 파쇄기 종류에 따른 백운석 파쇄산물의 입도분포와 파쇄특성에 대해 알아보았다. 함마 크러셔로 파쇄한 경우, 100 mesh 이하의 미분이 약 34 wt.%로 롤 크러셔로 파쇄한 경우보다 약 3배 이상 높았다. 또한 14~25 mesh 산물은 롤 크러셔로 파쇄할 경우, 함마 크러셔로 파쇄한 경우에 비하여 약 20 wt.% 이상 많이 생성되었다. 35 mesh 이하의 산물은 함마 크러셔로 파쇄 시 전체의 약 80 wt.% 정도였다. 두 파쇄기 모두 개회로에 비해 폐회로 파쇄 시 미분의 발생률이 감소하였다. 광석에 따른 적절한 파쇄기 및 파쇄회로의 선택에 따라 목적하는 입도의 산물을 효율적으로 얻을 수 있다.

주요어 : 파쇄 메카니즘, 파쇄회로, 백운석, 함마 크러셔, 롤 크러셔

ABSTRACT : We report the particle-size distribution and comminution characteristics of dolomite depending upon crushing equipment (hammer crusher and roll crusher) and crushing circuit (open and closed). The quantity of fine particles (<100 mesh) produced by hammer crusher was 34 wt.% which is about three times that by roll crusher. The quantity of 14~25 mesh size fraction by roll crusher was 20 wt.% higher than that produced by hammer crusher. 80 wt.% of the crushing products by hammer crushing was under 35 mesh in size, while the particles produced by roll crushing were relatively coarse. The particle size of both the hammer and roll crushers decreased by employing closed crushing circuit in comparison to open circuit. Products of required particle-size were obtained effectively depending on appropriate crushing equipment and crushing circuit.

Key words : Crushing mechanism, crushing circuit, dolomite, hammer crusher, roll crusher

서 론

백운석($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)은 방해석군의 하나로 광대

한 고생대지층에서 퇴적암으로 흔히 산출되는 탄산염광물이다. 광물의 결정형태는 능면체이며 결정계는 삼방정계로 무색, 흰색, 갈색을 띠며 투명 또는 반투명하고 비중은 2.9, 굳기는 3.5로 알려져 있다. 백운석의 국내 매장량은 67,337톤이며 현재

*교신저자: sbkim@kigam.re.kr

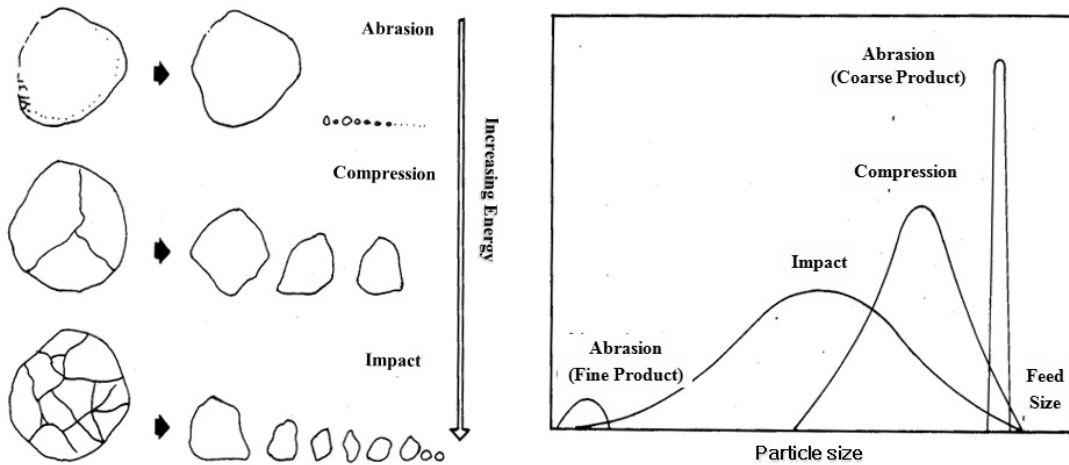


Fig. 1. Particle-size and energy depending on grinding mechanism.

가행중인 백운석광산은 대부분 노천채광 방식으로 채광을 하고 있는데, 백운석 원석은 주로 국내에서 생산, 소비되고 있다(지식경제부, 2010).

백운석의 이용 및 제조방법은 석회석과 유사하여, 석회석의 경우와 같이 원석 그대로 이용하는 경우와 소성해서 이용하는 경우가 있다(이나경, 2006). 단순 파분쇄된 제품은 제강, 유리, 비료, 골재용 등으로 사용되며, 소성된 제품은 제강용, 내화물 등으로 이용된다. 백운석을 조크러셔로 조쇄한 산물의 경우 5~8천원/톤으로 판매되고 있으나 중쇄기를 거쳐 2차 파쇄해 특정용도에 따라 분리한 산물의 경우, 입도별 용도에 따라 조쇄산물보다 10배 이상의 부가 가치를 가질 수 있다. 백운석의 용도는 철강용, 비료용, 유리용 등이 대표적이다. 백운석을 조쇄한 산물은 주로 철강용으로 쓰이고 14 mesh 이하 산물은 입도별로 병커사, 백시멘트몰탄, 건축용 내외장재, 고토비료 등 건축용과 농업(비료)용으로 사용되고 있다. 비료용으로 사용되는 것을 석회고토 비료라 하며 생석회, 소석회 비료와 마찬가지로 산성토양의 토질 개량제로서 토양을 중화시켜주고 엽록소 생성(Mg) 등 영양 보충과 중금속 흡수 억제, 미생물 활동 촉진, 병해충 예방 등 농작물의 생산량 증대와 품질향상, 농경지 보호 등의 효과가 있다(대한광업진흥공사, 2009).

광산에서 채굴된 광석은 파·분쇄과정을 거쳐 원하는 입도의 산물을 얻게 되는데 분쇄는 조작되는 분위기에 따라 건식 또는 습식 분쇄로 구분되며, 분쇄회로에 따라 폐회로(closed circuit) 분쇄와 개회로(open circuit) 분쇄로 대별된다(강석호, 1995).

분쇄기의 종류는 다양하지만 분쇄기 내에서 광석에 작용하는 힘의 종류에 따라 압축(compression), 충격(impact), 전단(shearing), 만곡(bending) 및 마찰(abrasion) 등으로 대별 가능하며 이들은 단독 또는 복합적으로 작용하는데 이 작용하는 힘의 종류에 따라서 산물의 모양과 입도 분포가 달라지게 된다(이강문, 1990). 또한 큰 덩어리의 광석을 목적하는 크기로 파쇄할 때에 잘게 부서진 광석이 발생하게 되는데 파쇄 과정에서 같은 알들이 많이 발생하게 되면 광석의 가치가 저하되기도 하고 불필요한 에너지 소비의 원인이 되기도 한다(Kobayashi *et al.*, 2004). 따라서 효과적인 파쇄를 위해서는 산물의 특성을 고려한 알맞은 장치와 파쇄 회로의 선택이 중요하다(Lewis *et al.*, 1976; Wills, 1990).

본 연구에서는 1차 파쇄기인 조크러셔로 파쇄한 백운석을 대상으로 주로 충격력이 작용하는 함마 크러셔와 압축력과 마찰력이 작용하는 롤 크러셔를 각각 사용하여 파쇄 메카니즘과 파쇄 회로에 따른 백운석 산물의 입도분포 특성을 비교하여 더욱 효과적인 파쇄방법에 대하여 알아보았다.

이론적 배경

그림 1은 파쇄 메카니즘에 따른 에너지 효율과 산물의 입도분포 특성을 표현한 그림이다. 파쇄에 작용하는 메카니즘에는 마찰(abrasion), 압축(compression), 충격(impact) 등으로 알려져 있다. 이런 상이한 파쇄 메카니즘에 따라 파쇄산물의 입도분포도 달라지고 소모되는 에너지량도 다르다. 마찰력에

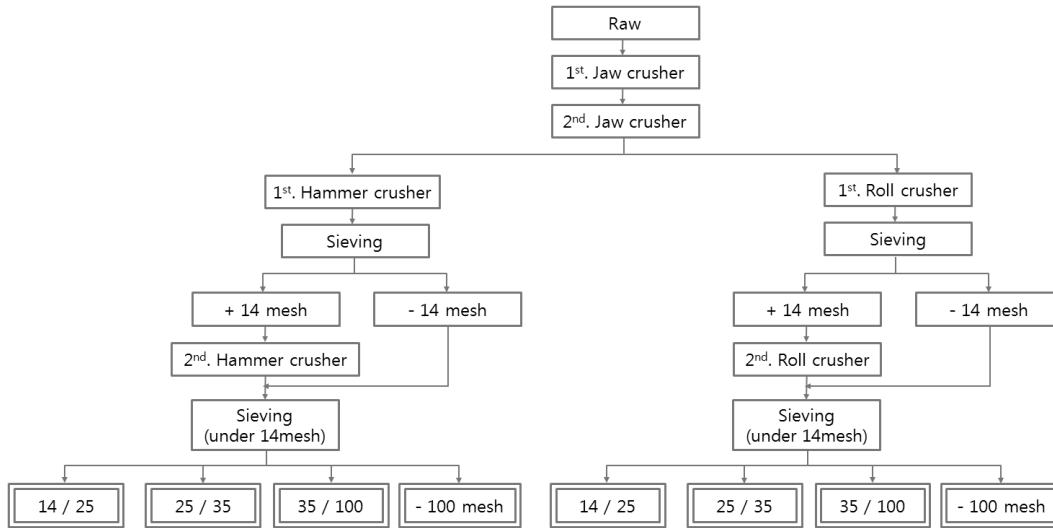


Fig. 2. Flowsheet of hammer and roll crushing.

의한 파쇄는 입자의 걸부분부터 조금씩 파쇄되기 시작하여 아주 미세한 입자나 굵은 입자를 얻을 수 있고 다른 메카니즘보다 소모되는 에너지량이 적다. 압축력에 의한 파쇄는 압축력이 가해졌을 때, 광석의 결합력이 약한 방향을 따라 굵은 입자로 파쇄된다. 충격력에 의한 파쇄의 경우, 충격이 가해지는 모든 부분에서 파쇄가 일어나게 되어 광석이 접촉하는 부분은 미세하게 파쇄되고 에너지 소모량도 많아지게 된다(Wills, 1990; Wills and Atkinson, 1993; Wills and Napier-Munn, 2005).

시료 및 실험방법

실험에 사용된 시료는 전북 장수지역에서 채취한 백운석을 사용하였다. 파쇄실험은 그림 2와 같은 순서로 수행하였다. 먼저 채취한 원광 시료를 조크러셔로 2차에 걸쳐 6 mm 이하로 파쇄하고 이 조쇄산물은 함마 크러셔(그림 3)와 롤 크러셔(그림 4)를 이용하여 각각 2차에 걸쳐 파쇄하였다. 함마 크러셔와 롤 크러셔 모두 폐회로 파쇄 방식으로 1차 파쇄 후 14 mesh 이상의 산물은 2차 파쇄하여 14 mesh 이하로 입도를 조절하였다. 파쇄된 산물은 Tyler 표준체를 사용하여 ro-tap sieve shaker (W.S.Tyler Mentor, OH, USA, RX-29-16)로 10분간 건식 체가름한 후 입도분석(Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd.)하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 함마 크러셔는 회전

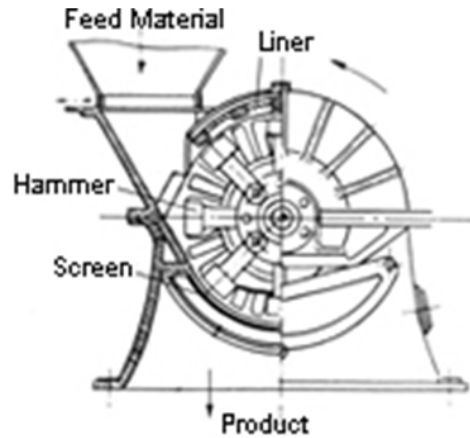


Fig. 3. Structure of hammer crusher.

축 주위에 달린 수많은 함마를 회전시킴으로써 상부에서 투입된 광석을 공중에서 가격하여 충격력에 의해 광석을 파쇄하는 장치이다. 특히 충격판에 의해 파쇄 작용이 이중으로 일어남과 동시에 충돌되어 나온 광석입자는 다른 함마에 의해 재 충격 파쇄가 일어날 것이다. 기계의 하측에는 스크린을 설치하여 파쇄산물 중 스크린을 통과하지 못한 조립의 광석은 다시 함마에 의해 재파쇄된다. 함마 크러셔는 시멘트 공장에서 석회석을 파쇄하는 데 많이 쓰이며 노천 채광되어 수분을 가진 석회석이 미분이 되어도 파쇄기를 매우지 않은 장점을 가진다. 요업 공장에서 점토를 깨는 데에도 간혹 쓰며

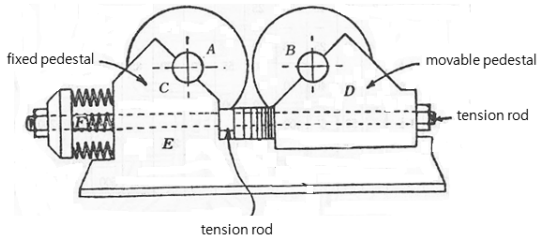


Fig. 4. Structure of roll crusher.

굳기가 썩 광석을 깨기는 어렵지만, 굵직굵직한 광물 결정별로 단체분리를 위해 파쇄 시 유용하다(이강문, 1990). 본 실험에서는 일본 Hosokawa사의 함마 크러셔(Model : H-12)를 사용하여 1차 파쇄 시 5 mm의 스크린을 설치하였고 2차 파쇄 시에는 1.2 mm의 스크린을 설치하여 수행하였다.

롤 크러셔는 그림 4에서 보는 바와 같이 수평면 위에 두 개의 롤 A와 B를 약간 사이를 떼어서 평행으로 설치해 놓고, 이들을 위쪽에서 보았을 때 안쪽을 향하여 서로 반대 방향으로 돌아가게 하고 그 사이로 급광을 해주면 반대 방향으로 도는 두 롤 면이 그 마찰력에 의하여 광석을 물어다가 좁은 목에서 분쇄되어 배출된다(이강문, 1990). 롤 A는 고정대(fixed pedestal) C에, 그리고 롤 B는 좌우로 움직일 수 있는 가동대(movable pedestal) D에 놓여 있는데, 이 대는 평행으로 놓여 있는 두 개의 긴장봉(tension rod) E와 강력한 스프링 F에 의하여 고정대의 편으로 끌리고 있다. 이 힘에 의하여 광석을 깨고 또 너무 단단한 이물이 들어오

면 스프링이 작용해서 롤의 간격이 벌어지면서 분쇄된다. 긴장봉의 중간의 두 대 사이에 보이는 부분에는 여러 장의 말굽쇠를 끼어 넣어서 두 롤의 간격(배출구의 세트에 해당함)을 적당하게 보정하는데, 필요에 따라 말굽쇠를 더 끼어 넣기도 하고 빼내기도 해서 세트를 조절한다. 롤 파쇄기의 조절에는 롤 면사이의 거리(세트), 롤 축의 세로 이동(lateral movement, side adjustment) 및 속도 등이 있고, 두 롤 면 사이의 거리를 조절 시에는 두 롤의 축이 완전히 평행이 되도록 조절에 주의해야 한다. 본 실험에서는 롤 크러셔를 사용하여 1차 파쇄 시 5 mm의 스크린을 설치하였고 2차 파쇄 시에는 1.2 mm의 스크린을 설치하였다.

그림 5는 파쇄회로실험 흐름도이다. 개회로 파쇄는 1차 파쇄산물에 대해 체가름 하지 않고 전체 광석을 다시 2차 파쇄하는 방식이고, 그림과 같이 폐회로 파쇄는 파쇄작업에 체를 삽입 병용하여 산물의 크기의 상한을 고정함으로써 체에 걸리지 않은 산물을 대상으로 2차 파쇄하는 방법이다. 폐회로 파쇄는 체를 쓰지 않고 전체 광석을 반복 파쇄하는 개회로 파쇄방식보다 미분 발생량이 적을 뿐만 아니라 훨씬 균일한 크기의 산물을 얻을 수 있다(Kobayashi *et al.*, 2004; Morrell, 2008). 본 실험에서는 폐회로 파쇄 시 1차 파쇄 후 14 mesh를 기준으로 체가름 하여 14 mesh 이상의 광석을 2차 파쇄하였다.

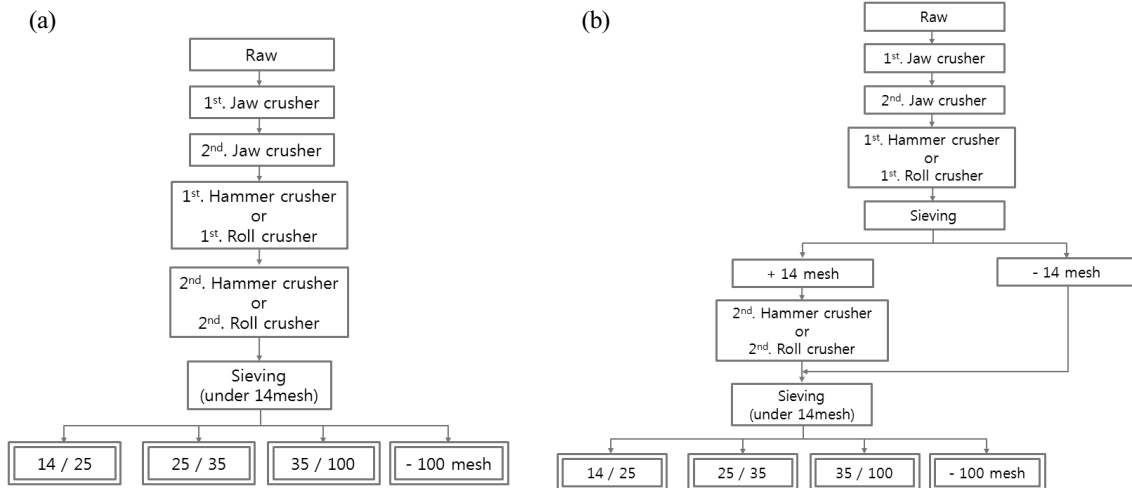


Fig. 5. Flowsheet of open (a) and closed circuit (b) crushing.

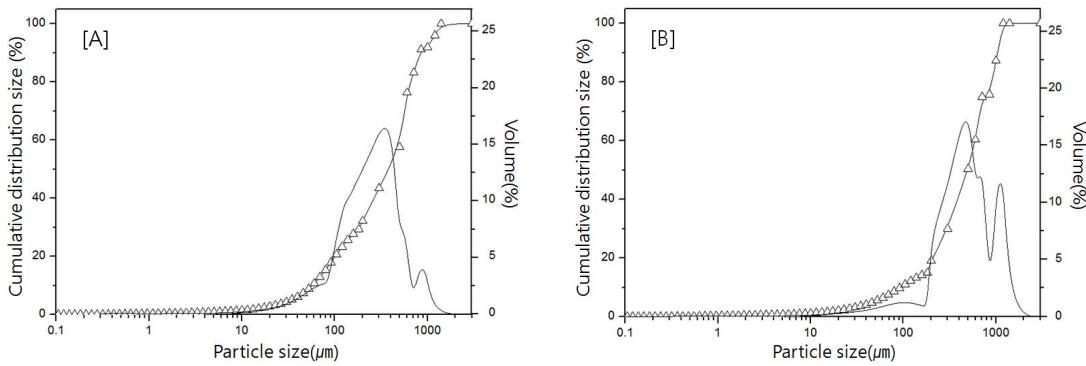


Fig. 6. Cumulative and relative frequency distributions of particle-size of hammer (A) and roll crusher (B).

결과 및 고찰

파쇄메카니즘에 따른 산물특성

함마 크러셔와 롤 크러셔로 파쇄 시 각각 산물의 입도분포 및 누적분포는 그림 6과 같다. 함마 크러셔로 파쇄 시 주로 건축용과 농업용에 사용되는 200 μm 이하의 가는 입자는 50% 이상인 반면에 500 μm 이상의 굵은 입자는 약 10% 정도 발생하였다. 그러나 롤 크러셔 파쇄 시에는 710 μm 이상의 굵은 입자는 약 17% 발생하였고 절반이상이 300 μm 이상의 입자로 전체적으로 상반되게 함마 크러셔로 파쇄 시에 미분이 많이 발생하였고 롤 크러셔로 파쇄 시에는 굵은 입자의 산물이 절반 이상을 차지하였다. 충격식 파쇄기인 함마 크러셔로 파쇄 시에는 굵은 입자든 가는 입자든 모든 광석마다 충격이 가해지며 파쇄되기 때문에 미분이 많이 발생하게 되고, 압축력과 마찰력이 함께 작용하는 롤 크러셔의 경우 굵은 입자에만 힘이 작용하기 때문에 입도분포도 좁고 미분 발생도 적게 된다(Taveres, 2005).

그림 7은 파쇄 메카니즘이 다른 함마 크러셔와 롤 크러셔로 파쇄 시 산물의 중량비이다. 충격식 파쇄기인 함마 크러셔로 파쇄 시에는 100 mesh 이하의 산물이 약 34 wt.%를 차지하고 있고 롤 크러셔로 파쇄한 경우는 약 11 wt.%로 그 차이는 약 3 배 이상으로 다량의 미분이 발생하였다. 이것은 함마 크러셔의 주 메카니즘인 충격력에 의해 광석에 접촉하는 부분이 아주 미세하게 파쇄되기 때문으로 판단된다. 반면에 병커사로 이용되는 14~25 mesh의 굵은 산물은 함마 크러셔로 파쇄한 경우에 비하여 롤 크러셔로 파쇄 시 약 20 wt.% 이상 많

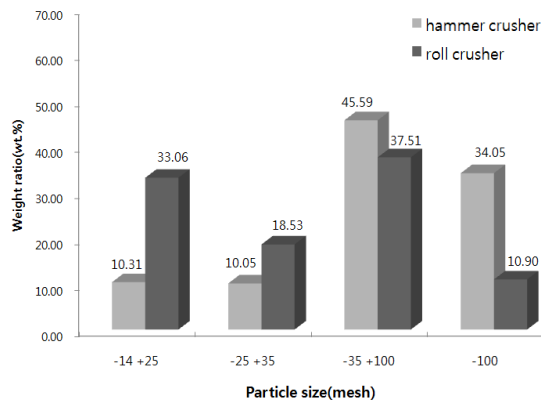


Fig 7. Particle-size distributions of hammer and roll crusher.

이 발생하였고, 또한 35 mesh를 기준으로 비교해 보았을 때 함마 크러셔로 파쇄 했을 경우 35 mesh 이하의 산물이 전체의 약 80 wt.% 정도로 미분이 다량 발생하였으나 롤 크러셔로 파쇄 시에는 함마 크러셔에 비해 굵은 산물의 비율이 높았으며 전 입도에 고르게 분포하였다. 파쇄산물은 입도별로 다른 용도로 쓰이며 한번 파쇄 시 원하는 입도산물이 생성되어야 하기 때문에 파쇄기 선택 시 파쇄메카니즘을 고려해야 하며, 백운석 파쇄 시 미분이 다량 발생하는 함마 크러셔보다는 전 입도에 고르게 분포하는 롤 크러셔가 유리할 것으로 사료 된다.

파쇄회로에 따른 입도분포

파쇄회로에 의한 함마 크러셔와 롤 크러셔의 파쇄 산물 입도분포 및 누적분포는 그림 8, 9와 같

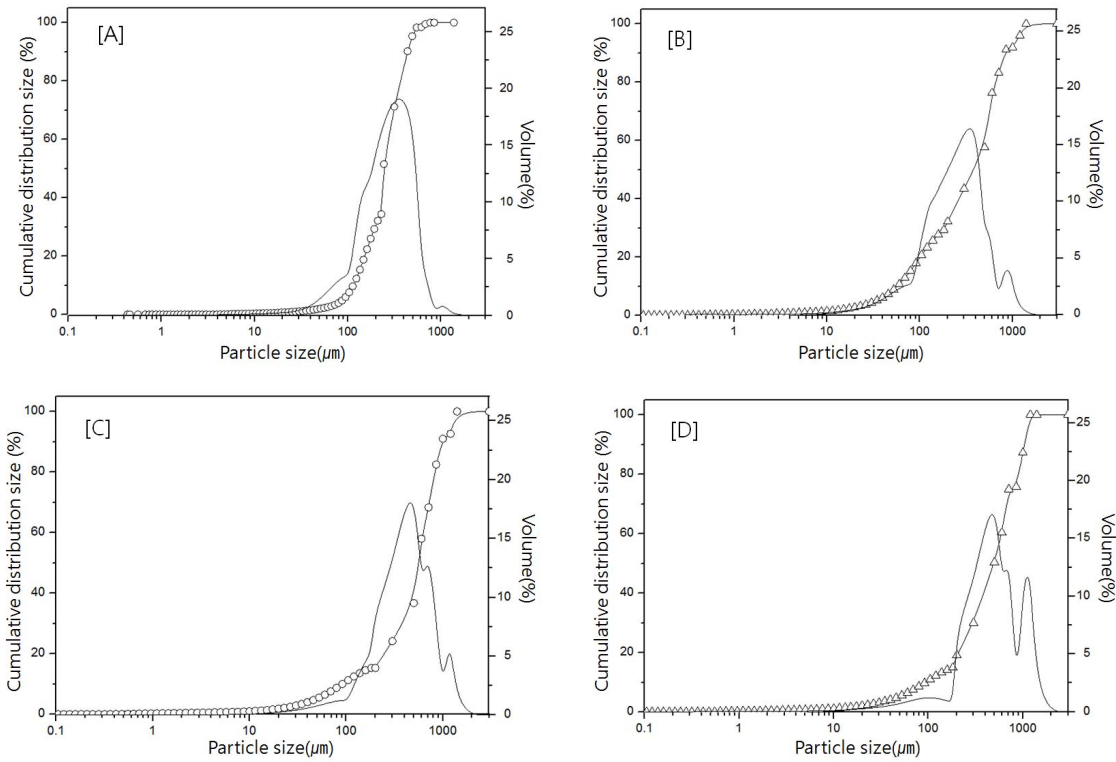


Fig. 8. Cumulative and relative frequency distributions of particle-size depending on circuit and crusher types. (A) Hammer crusher open-circuit. (B) Hammer crusher closed-circuit. (C) Roll crusher open-circuit. (D) Roll crusher closed-circuit.

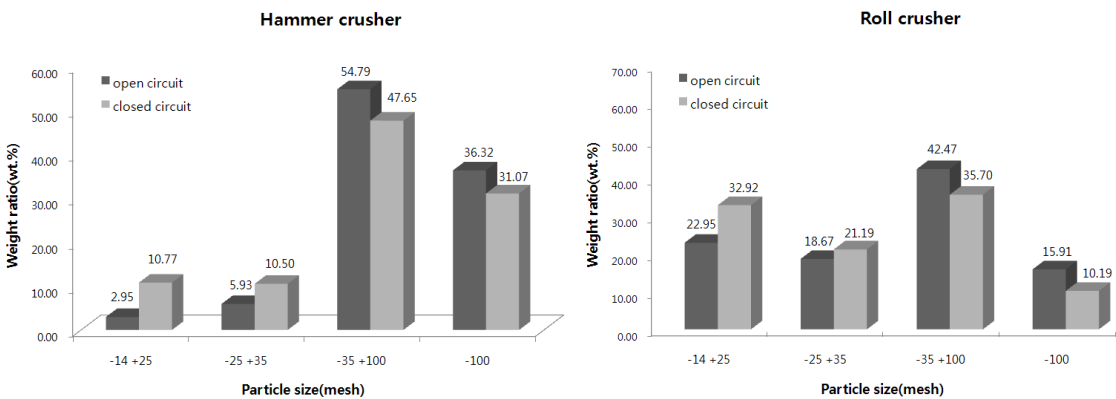


Fig. 9. Particle-size distributions of open- and closed-circuit crushing products of hammer and roll crusher.

다. 함마 크러셔 개회로 파쇄 시 35 mesh 이상의 입자는 약 9 wt.%, 폐회로 파쇄 시 약 22 wt.로 상대적으로 굵은 입자는 폐회로파쇄 시에 많이 발생하였다. 그러나 산물의 대부분은 35 mesh 이하의 입자였으며, 개회로 파쇄 시 산물의 양은 약 91

wt.%였고 폐회로파쇄 시보다 훨씬 많은 미분이 발생하였다. 개회로파쇄 시 1차 파쇄 후 분급을 하지 않았기 때문에 2차 파쇄 시 굵은 입자나 가는 입자 모두 입자끼리 부딪히며 가는 입자도 다시 충격을 받아 또 파쇄되면서 폐회로파쇄 시보다 많은

양의 미분이 발생하였다. 롤 크러셔를 사용하여 개회로파쇄 시 가장 굵은 14~25 mesh 입단에서는 약 23 wt.%, 폐회로 파쇄 시는 약 33 wt.%로 폐회로 파쇄 시 약 10% 정도 굵은 입자가 많이 발생하였고, 35~100 mesh 입단에서는 약 23 wt.%, 폐회로 파쇄 시는 약 33 wt.%로 개회로파쇄 시 미분의 발생이 많았다.

개회로파쇄 시 에너지소모도 과다할 뿐 아니라 원하는 입도의 산물을 고루 얻을 수 없고 특정 입단에 집중되며 과파쇄되었다. 폐회로파쇄 시에는 두 파쇄기 모두 개회로 파쇄에 비해 폐회로 파쇄 시 미분의 양이 줄어들었고 에너지소모량도 줄어들었다. 또한 2차 파쇄 시의 급광량이 줄어들기 때문에 처리량도 증가하였으며 처리시간 및 입도조절에도 용이할 것으로 사료된다.

결 론

광석 파쇄 처리 시 파쇄기와 파쇄회로 선택의 최적화를 위하여, 백운석 광석을 대상으로 함마 크러셔와 롤 크러셔를 사용한 파쇄회로별 파쇄실험과 입도분석을 실시하고 파쇄특성을 분석하였다. 상이한 파쇄메카니즘에 따른 파쇄실험에서는 함마 크러셔로 파쇄 시, 100 mesh 이하의 미분산물이 약 34 wt.%로서 롤 크러셔로 파쇄한 경우보다 약 3배 이상 다량 발생하여 고른 입도분포로 산물을 얻기 위해서는 충격식 파쇄기인 함마 크러셔보다는 압축력과 마찰력이 작용하는 롤 크러셔의 사용이 유리하였다. 파쇄회로에 따른 파쇄실험결과는 개회로파쇄 시 과파쇄되어 -35 mesh 이하의 가는 입자가 많이 발생하였으나 폐회로파쇄 시에는 입도분포가 특정 입단에 집중되지 않고 원하는 입도에 고르게 분포하고 미분 발생률이 줄어들었다. 또한 폐회로파쇄의 경우 1차 파쇄 후 분급과정을 거치면서 2차 파쇄 시의 급광량이 줄어들기 때문에 처리량이 증가하였으며 그에 따라 처리시간 및 에너지도 절약할 수 있었다. 따라서 미분 발생이 적고 목적하는 입도의 산물을 효과적으로 얻기 위해서는 파쇄메카니즘에 따른 적절한 파쇄기와 파쇄회로 선택이 중요한 요인으로 작용하며 본 연구에서는 롤 크러셔를 사용하여 폐회로파쇄 시 가장 효과적임을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 지식경제부에서 시행하는 한국지질자원연구원 2010년도 주요사업(과제명 : 해외 금속광물 개발을 위한 활용기술 연구)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 강석호 (1995) 분체공학, 회중당, 서울, 170-172.
 대한광업진흥공사 (2009) 광물자원 매장량 현황.
 이강문 (1990) 광물처리공학, 반도출판사, 서울, 399-445.
 이나경 (2006) 고품위 석회석과 백운석의 분체 특성 및 분쇄 효과에 관한 응용광물학적 연구. 강원대학교 석사학위 논문.
 지식경제부 (2010) 2009년도 광산물 수급현황.
 Kobayashi, A., Nagasaka, H., Iizuka, K., and Yoshida, H. (2004) Characteristics of open- and closed-circuit grinding systems Separation and Purification Technology, 36, 157-165.
 Lewis, F.M., Coburn, J.L., and Bhappu, R.B. (1976) Comminution: A guide to size-reduction system design. Min. Engng., 28, 29.
 Morell, S. (2008) Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits. Minerals Engineering, 22, 544-549.
 Tavares, L.M. (2005) Particle weakening in high-pressure roll grinding. Mineral Engineering, 18, 651-657.
 Wills, B.A. (1990) Comminution in the minerals industry - an overview, Minerals Engineering, 3, 3-5.
 Wills, B.A. and Atkinson, K. (1993) Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies. Minerals Engineering, 6, 697-706.
 Wills, B.A. and Napier-Munn, T. (2005) Wills' Mineral Processing Technology (Seventh Edition). Butterworth-Heinemann, England, 146-147.

접수일(2010년 9월 6일), 수정일(1차 : 2010년 9월 28일, 2차 : 2010년 11월 30일), 게재확정일(2010년 12월 14일)