시멘트 산업에서 본 분체기술의 현황과 과제

이 종 열 (쌍용양회공업(주) 기술연구소장)
안 광 원 (쌍용양회공업(주) 생산관리담당 상무이사)
길 준 호 (쌍용양회공업(주) 기술연구소 시멘트연구실 책임연구원)

I. 서 언

첨단기술의 발전은 새로운 분체의 개발에 의해 촉진된다고 해도 과언이 아니며, 각종의 산업분야에서 분체공업 기술이 적용되지 않는 분야는 거의 없을 정도로 산업발전의 촉진에 있어서 분체가 차지하는 의의는 상당히 크다고 할 수 있다. 분체공업 기술이란 현장에서 제품의 품질을 향상시키고 원가절감을 꾀하는 당면 기술문제에서부터 신물질·신소재의 개발, 환경개선, 자원환경·유효활용과 같은 첨단기술 분야에 이르기까지 폭넓게 관계하고 있다. 특히, 건축재료, 토목공학 분야에 있어서 분체기술의 적용·응용의 범위는 상당히 광범위하고 중요한 의미를 갖는다. 건축재료 분야에서 가장 많이 취급하는 분체로서의 시멘트는 그 제조 공정 및 품질이 분체기술의 총집합체라고 해도 과언이 아니며, 시멘트 제조시에 효율적인 분체기술의 적용여부에 따라 생산원가, 시멘트 품질이 좌우되기 때문이다. 시멘트 산업에 있어서 분체 처리기술과 관련된 단위조작으로서는 주로 분쇄, 분급, 집진, 수송기술 등이 있으며 그 밖에 고기능성 시멘트 및 시멘트 연관제품 생산을 위한 분체의 이학 및 공학적 기술이 응용되고 있다. 시멘트 제조산업은 전력 및 열에너지를 다량 소비하는 업종으로 소요 전력에너지의 70% 이상을 분쇄에너지로 사용하고 있으며 따라서 분쇄에 영향을 주는 분급 등 연관기술의 지속적인 개발이 필요한 실정이다. 따라서 본고에서는 시멘트 제조에 응용되는 주요 분체처리, 취급기술의 소개 및 기술현황과 개발전망에 대해 검토하였다.

II. 분체의 특성

1. 분체의 이학과 공학

분체의 처리, 취급 및 연관기술을 이학(Science)과 공학(Engineering)으로 나누어 분류하면 〈표-1〉과 같다.

시멘트 제조, 취급 및 이용기술을 총망라할 때 Powder Science와 Engineering 전분야가 연관기술이나 시멘트 제조 프로세스를 몇개의 단위공정으로 나누어 보면 분체의 공학에 해당되는 분리, 혼합, 제조, 반응, 수송, 제어 및 연소, 건조분야가 기본기술로 사용되어지며, 따라서 시멘트 제조공정은 분체의 관련기술이 모두 필요한 분체관련 복합공정이라 할 수 있다.

2. 시멘트 산업에서 분체물성이 갖는 의미

가. 분체물성의 범위

시멘트의 분체물성은 시멘트의 제조·수송·사용의

〈표-1〉 분체의 이학과 공학

항 목	분 야	기 술
분체의 이학 (Science)	분 체 역 학	운동, 반발, 마찰, 유동, 압력분포, 성형 등
	분 체 물 성	부착, 충진, 흡습, 색조, 정전기, 자기(磁氣) 등
	분 체 화 학	흡착, 응집, 촉매반응, Mechanochemical
	분 체 계 측	특성(입도, 농도 등), Level, 유량, 혼합도, 표면적, 점성 등
분체의 공학 (Engineering)	건 식 분 리	집진(대기오염), 분급 등
	습 식 분 리	침강, 원심분리 여과 등
	분 체 혼 합	건식(1상), 습식(2상) 등
	분 체 제 조	입자생성, 분쇄, 조립(造粒), 분무건조, 정석(晶析), 분말야금 등
	분 체 반 응	촉매, 고체반응, 소결 등
	분 체 수 송	유체이용(Slurry,유동층), Hopper, Conveyor 등
	분 체 제 어	분체 프로세스 제어 및 유동성
	기 타	연소, 건조, 반응장치 등

각 단계에 있어 여러가지 영향을 주는 중요한 물리적 특성값으로서 비중(比重), 분말도(粉末度), 입도특성(粒度特性), 유동성(流動性), 부착성(付着性), 분산성(分散性) 및 발진성(發塵性) 등을 포함한 개념으로 볼 수 있다. 한마디로 분체물성이라고 해도, 그 의미하는 것은 입도, 입자 형상 등의 일차 물성으로부터 안식각, Carr의 유동성 지수 등의 고차 물성까지 포함하고 있다. 또 입자간 부착력 등 입자 상호간의 현상에 관한 특성, 입자와 벽면 등 그 주위환경과 관련되어 있는 특성, 그리고 분산성 등 입자와 그 주위의 유체와의 관계를 포함한 특성 등이 포함된다.

나. 시멘트 산업에서 분체물성의 중요성

시멘트 산업에 있어서 분체물성의 중요성은 여러가지 측면이 있다. 그 하나는 싸이로, 호퍼 등에 있어서 원활한 배출의 확보와 가교 현상의 방지에 관한 것으로 이에 대한 극한 상황으로서 흡습 등에 의한 싸이로내의 연결(軟結)·고결(固結)의 발생의 문제가 있다. 분쇄조제의 사용에 의해 시멘트의 유동성은 현저하게 변화하지만, 잘못 사용할 경우 Flushing 등의 수송공정에 있어서 트러블을 일으키는 경우가 있어 시멘트의 흐름특성인 유동성(流動性) 및 분류성(噴流性)의 콘트롤이 중요한 과제가 된다. 시멘트의 수송, 하역과정에서는 발진성(發塵性)의 문제가 있는 경우가 있으며, 시멘트의 기류 분산성(分散性)은 분급기에 의한 분급효율과 밀접한 관계가 있다. 또한 시멘트 등의 충진 특성이라든지 밀도의 예측은 호퍼 등의 설계에 중요한 항목이 되고 있다.

다. 분체물성의 특성 및 의의

(1) 분체의 밀도와 겉보기 밀도

밀도(Density)는 단위 부피당 질량, 즉 kg/m^3로 정의된다. 분말상 고체에서는 고체입자 사이의 공간에 들어있는 기체나 액체의 부피 때문에 단일상 고체의 밀도와는 달리 겉보기 밀도(Bulk 또는 Apparent Density)가 더 자주 쓰인다. 이와 같이 겉보기 밀도는 물질의 고유한 성질이 아니고 분체의 입도분포나 그 존재하는 환경에 따라 달라진다. 일반적으로 겉보기 밀도가 크면 분체가 잘 흘러내릴 것 같지만 그렇지 않을 수도 있다. 겉보기 밀도가 입도와 입도분포에도 영향을 받고 입자 형상에도 영향을 받기 때문이다.

겉보기 밀도는 기체-분체계에서 뿐만 아니라 액체-분체계에서도 중요한 의미를 갖는다. 즉,

① 분체의 저장용량이나 수송유량을 결정할 때
② 저장과 수송에서 분체의 다짐특성 문제
③ 분체의 수송과 유동화에서의 난이도 문제
④ 마모성과 겉보기 밀도와의 관계
⑤ 분쇄, 혼합, 분급에 미치는 겉보기 밀도의 영향
⑥ 분체공정의 열전달 속도의 문제

겉보기 밀도로부터 다짐성(압밀도, Compaction)도 계산할 수 있는데, 이 다짐성은 분체물질의 겉보기 밀도, 입도, 입도분포, 입자형상, 표면적, 경도, 수분함량, 점착성 및 변형도 등 분체의 기본 물성에 직접 영향을 받고 변하는 특성이다. 실제로 분체의 다짐성은 흐름성(Flowability)과 마찬가지로 분체의 기본 물성을 간접적으로 측정하거나 나타내는 수단이기도 하거니와 실무적인 분체 취급 공정에서는 더욱 중요한 특성이다.

(2) 분체의 입도분포

㉠ 입도의 정의

구형입자는 그 크기를 지름으로 정의할 수 있고, 육면체나 기타 규칙적 모양을 가진 입자는 한 변 또는 모서리간의 대각선 길이를 입도로 표시하지만, 원통형 입자의 경우에는 높이와 지름 중 어느 것을 크기로 할지 결정하기가 쉽지 않다. 따라서 주어진 어떤 입자든 그 크기를 나타낼 때는 크기와 관계 있는 특성치가 될만한 길이 차원을 결정해서 입도로 해야 한다. 가장 보편적인 경우로써 구에 상당 한다고 생각하는 지름을 그 입자의 상당입도라 부른다.

㉡ 입도분포와 평균입도

어떤 분체 제품이나 원료의 입도분포를 알고 있으면 물성치도 알 수 있다. 또한 주어진 분체의 입도분포를 알아야 그 결과로부터 평균입도를 결정할 수 있다.

평균입도는 주어진 분체 집단의 입도분포를 대표하는 입도로서, 누적 분포곡선의 50%에 해당하는 입도이다. 평균입도가 같은 분체라 할지라도 입도분포는 달라질 수 있으므로 평균입도와 입도분포는 분체의 특성을 표시하기 위하여 함께 표시되어야 한다.

㉢ 입도분포곡선(빈도분포곡선과 누적분포곡선)

분체는 크기가 다른 단일 입자의 집합체로서, 동일 물질이라 해도 그 입도분포는 그 제조과정에 따라서 달라지게 되며, 또 동일한 시료분체의 평균입도를 표시하는데도 여러가지 방법이 있다. 즉 입도로 측정되는 분체입자의 개수(r=0), 길이(r=1), 부피(r=2) 또는 질량(r=3)에 따라서 입도분포곡선이 달라지게 되고, 그 결과로 결정되는 평균입도의 값도 달라진다.

〈그림-1〉은 빈도입도 분포곡선과 누적분포 입도곡선을 나타낸 것으로 누적분포곡선은 다시 잔류율 누적분포곡선과 통과율 누적분포곡선으로 구별된다. 예를 들면, 체 분석결과를 체 위에 잔류하는 무게 %별로 나누어 계산할 수도 있고, 또 역으로 체를 통과하는 무게 %를 누적 계산할 수도 있다.

㉣ Rosin-Rammler 입도분포
(R-R입도분포) 이론에 의한 평가

일반적으로 분체의 입도분포를 누적분포도로 나타내면 완만한 S형 Curve를 갖게 되는데, 이러한 Curve의 형상을 직선화하면 분체의 특성을 평가하는데 편리하다. 따라서 이러한 목적으로 Rosin과 Rammler은 확률적 이론을 도입하여 입도분포도를 직선화하였다.

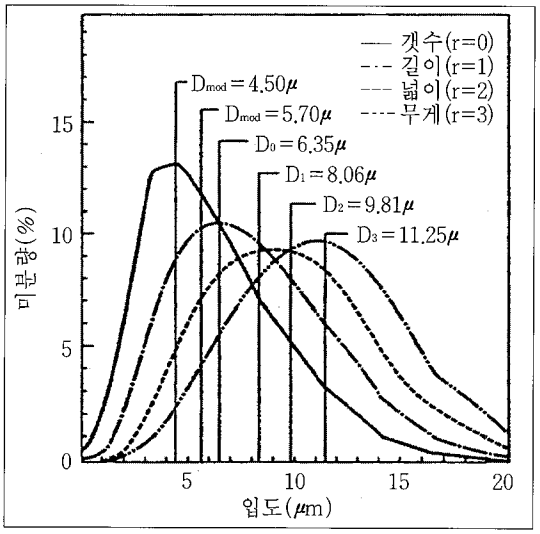
잔류율 R%와 입경 D_P와의 함수로 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$R = 100\exp(-bD_P^n) \quad (b,\ n\text{은 상수})$$
$$\log(2-\log R) = \log(b\log e) \div n\log D_P$$

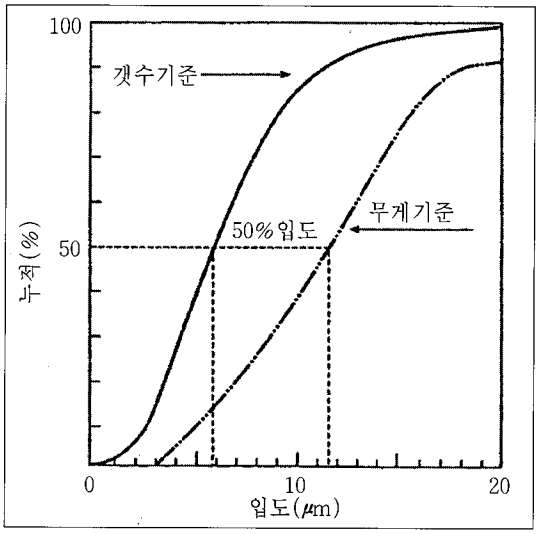
log(2-logR)과 log의 관계를 Plot한 것이 〈그림-2〉의 Rosin-Rammler선도이다.

따라서 선도를 이용하여 R%을 Plot함으로써 기울기 n을 구할 수 있다.

이렇게 구한 n값을 R-R 입도분포지수라 하고, 시멘트 입도분포는 이 분포를 잘 따르며 보통 n=1.0~1.2이다. 구한 n값이 클수록 입도분포는 Sharp한 것을 의미하고 반대로 작을수록 Broad한 것을 의미



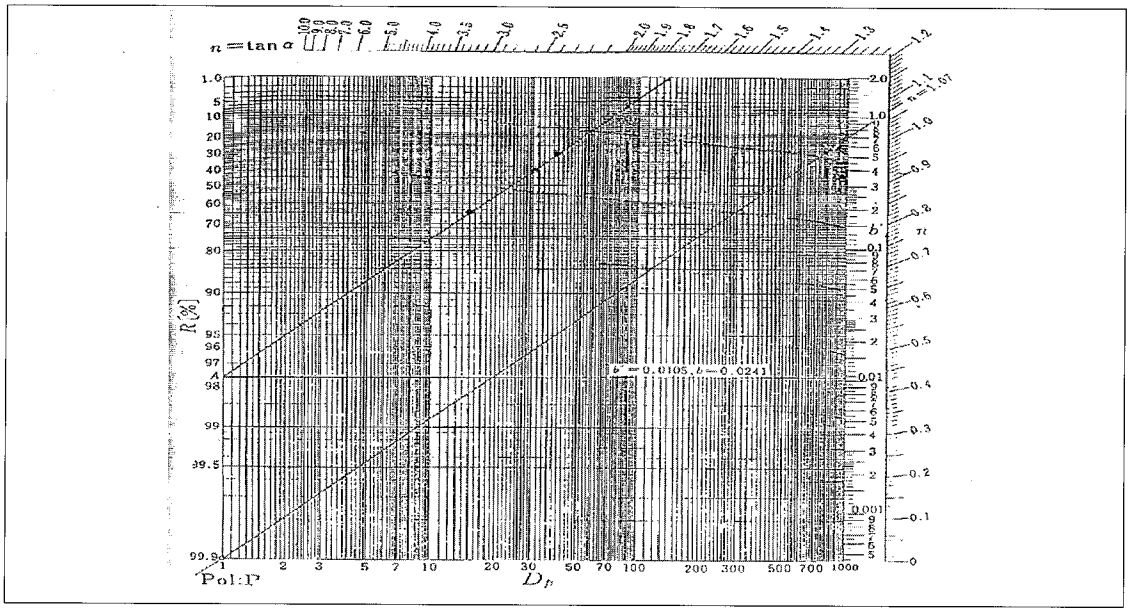
〈빈도 입도분포곡선〉



〈누적 입도분포곡선〉

〈그림-1〉 입도분포곡선 표시 예

한다. 일반적으로 Plot한 직선의 기울기가 직선이 되지 않고 처음과 끝이 휘어지는데 이는 입자가 구형이 아니기 때문이다. 분체의 특성상 동일 분말도라 할지라도 입도분포가 다를 수 있는데 이러한 입도분포의 특성이 제품의 특성에 영향을 미치는 경우가 많다. 예를 들어 시멘트 분말의 경우 동일 Blaine을 갖는 시멘트일지라도 〈3μm의 비율이 높으면 초기강도의 발현이 좋고 3~25μm의 비율이 높으면 장



〈그림-2〉 Rosin-Rammler선도 예

기 강도발현이 양호한 것으로 알려져 있다.

(3) 분체의 응집성과 부착성

미세분말의 분체입자는 분체입자끼리 서로 엉겨 붙기도 하고, 분체취급장치의 벽면에 달라붙는다. 이러한 현상은 입자의 흡착력이 London van der Waals힘이라고 설명되는 입자들끼리 작용하는 힘에 의하여 또는 입자와 장치내의 벽면, 즉 평활한 표면사이에 작용하는 힘에 의해 일어난다. 입자들끼리 붙는 현상을 응집성(凝集性)이라 하고, 후자의 현상을 부착성(付着性)이라고 한다. 부착 현상은 기계적일 수도 있는데, 이때는 서로 기계적으로 엇물림으로 인하여 일어나는 현상이고, 정전기적 부착은 입자의 전기적 부하에 의한 인력에 의해서 일어나며, 분자간의 인력에 의해서 일어나는 부착현상은 원자가 힘이 원인이 되는 등 각각 다른 원인이 있다. 부착성과 비슷한 현상으로 점착성(粘着性)이 있는데, 이 점착성은 오히려 원자가 힘에 의해 입자가 서로 붙어 있는 성질이다. 점착성이나 부착성은 물질의 표면특성, 습도 등에 따라 변한다.

결과적으로 분진이나 분체의 부착성은 고체표면과 미세입자 사이의 상호작용으로 생기는 것이라고 결론지을 수 있다.

(4) 분체의 흐름성(流動性)

분체를 저장하거나 저장 싸이로에서 배출할 때, 또는 컨베이어 벨트위에서 운반할 때 분체의 흐름특성(Flowability)은 분체취급에 매우 중대한 영향을 미친다. 특히 분체의 상당 부분이 10μm 이하의 작은 입도를 가진 미세입자로 되어 있으면 흐름성이 매우 불량하다. 이러한 흐름특성의 불량은 미세 입자의 부착성에서 오는 경우가 많다. 그러나 어떤 분체의 흐름성은 부착성 뿐만 아니라, 혼합물질의 성분, 조성, 입자형상, 입도, 입도분포 등 입자의 고유한 성질과 주위환경에 의해 결정된다.

따라서 입자의 흐름특성을 측정함으로써 분체의 종합적 특성 또는 분체 공학적 거동을 결정할 수 있는데, 흐름성을 측정하는 쉬운 방법은 안식각을 측정하는 방법이다.

(5) 분체의 저장특성

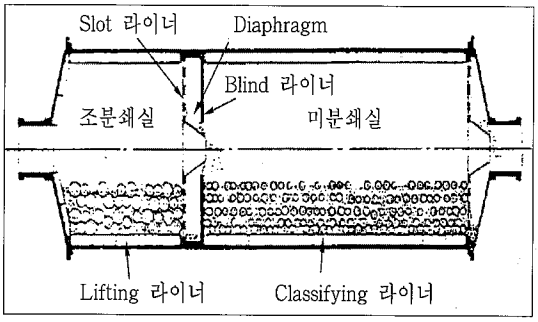
시멘트 등의 분체는 노천에 야적하면 품질이 변하므로 반드시 호퍼나 빈 또는 싸이로에 저장한다. 이러한 분체 저장설비는 콘크리트나 금속의 구조물이고 용기의 단면은 원형 또는 사각형이다. 싸이로는 높이가 높고 지름은 비교적 작으나, 빈은 높이에 비하여 밑이 넓은 것이 특징이다. 호퍼는 밑바닥이 경사진 작은 빈인데, 분체를 공정에 급송하기 전에 잠시동안 저장하는 목적으로 쓰이는 장치이다. 이들 용기들은 모두 위쪽에서 분체가 공급되고 밑바닥에서 배출된다.

분체를 용기에 공급, 저장, 배출하는데 있어서는 각각의 공급수단, 저장압력, 그리고 배출의 용이성이 중요한 요인이 된다. 배출의 용이성은 분체의 퇴적안식각 또는 배출안식각으로 추측할 수 있다. 저장압력은 저장용기의 내압설계와 분체배출시에 용기내에서 일어나는 분체의 흐름거동에 중요한 영향을 미친다.

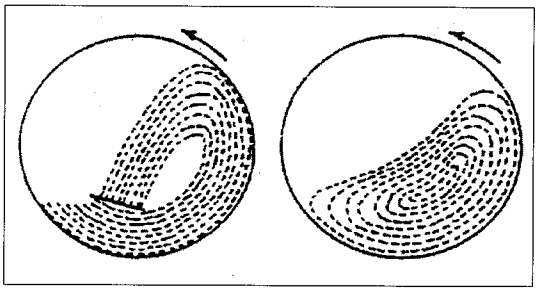
(6) 분체의 배출

싸이로에 저장된 분체가 밑바닥에 뚫린 구멍으로 배출되는 속도는 물이 저장 탱크의 밑바닥 구멍에서 배출되는 경우와는 달리, 이론적인 설명이 불가능하다. 다만 상당히 많은 연구결과에 의하면 분체의 배출속도는 배출구의 지름, 분체의 내부마찰각, 분체입도 및 분체밀도에 관계된다는 경험식으로 밖에 추산할 수가 없다. 그 추산식들도 분체의 종류, 저장장치, 모양에 따라서 모두 다르기 때문에 일반적 관계식은 아직 정립되어 있지 않다.

싸이로, 빈, 호퍼 등에 저장된 분체가 밑바닥 또는 하부 측면에 설치된 배출구를 통해서 배출될 때, 가교가 저장용기내의 임의의 지점에 생김으로써 배출이 중단되거나 배출유량이 달라지는 경우가 있다. 이러한 불편을 막기 위해 즉, 가교형성을 방지 또는 제거하기 위하여 저장 용기내에 체인이나 젖는 막대(Paddle Shaft)를 설치하거나, 압축공기를 여러 곳에 불어넣어 주거나 또는 장치 외벽, 특히 호퍼의 경사배출 부위에 충격파를 가하는 장치를 부착하기도



〈그림-3〉 볼밀의 내부구조



(a) Cataracting 운동 (조분쇄실)　(b) Cascading 운동 (미분쇄실)

〈그림-4〉

한다.

Ⅲ. 시멘트 산업에서의 분체기술

1. 분쇄기술

시멘트 제조공정에서 여러가지 원료나 연료, 시멘트 분쇄 등의 분쇄조작은 피분쇄물의 입도를 미세하게 하여 반응속도를 증대시키거나 요구하는 품질을 얻기 위해서 반드시 필요하며, 시멘트 제조시 총전력에너지의 70% 정도로서 다량의 전력에너지를 사용한다는 점에서 매우 중요한 공정의 하나이다.

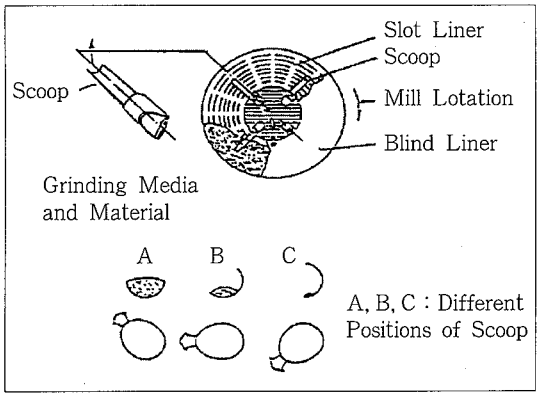
시멘트 산업에서 분쇄기술은 대량생산을 위한 생산능력 증대와 제조비용 절감을 위한 분쇄효율 증대를 기본적인 목표로 하여 착실하게 발전되어 왔다. 이러한 목표들은 분쇄설비의 대형화, 새로운 분쇄방식으로의 전환 그리고 같은 방식에 있어서도 부분적인 공정의 개선 또는 개량을 통하여 달성되어지고 있다. 특히 1980년대에 들어와 많은 연구개발을 통하여 시멘트 분쇄에 성공적인 실현을 이룩한 롤러프레스(Roller Press) 예비분쇄 설비와 롤러밀(Roller Mill) 분쇄설비 그리고 고효율 분급기는 비교적 현저한 분쇄기술의 진보로 평가되어질 수 있다.

가. 볼밀 분쇄기

시멘트 산업에서 볼밀 분쇄기는 매우 오래전부터 사용되어 왔으며 아직까지도 분쇄장치의 주종을 이루고 있다. 볼밀 분쇄기술도 근대화 과정을 거치면서 설비의 대형화와 함께 분쇄에너지 저감을 위한 개량과 개선으로 피분쇄물과 제품 요구특성에 부합되는 적정 분쇄시스템의 구성, 볼밀 내부 부속설비의 구조개선 및 운전 최적화를 통하여 분쇄효율이 향상되어 왔다.

볼밀의 분쇄효율을 향상시키기 위해서는 피분쇄물의 분쇄진행에 따라 적정한 크기의 분쇄매체를 선정하여야 하며 밀 길이에 따라 크기가 감소되어야 한다. 이를 위하여 밀 내부는 〈그림-3〉과 같이 2~3개의 조분쇄실과 미분쇄실로 나누고 이들 사이에 가느다란 구멍이 있는 스롯트 라이너로 통과되는 입자크기를 분리하고 분쇄매체를 구분한다. 분쇄매체의 운동은 적절한 밀 회전시에도 조분쇄실에서는 미분쇄실보다 분쇄매체의 큰 충격을 갖는 Cataracting 운동(〈그림-4〉)이 요구되며 밀 동력을 분쇄매체를 통하여 분쇄과정에서 효과적으로 전달될 수 있도록 라이너 형상이 이루어져야 한다. 이를 위하여 조분쇄실에서는 분쇄매체 대형화와 함께 밀 원주방향으로 경사각이 있는 형상의 Lifting 라이너가 채택되었으며 밀 크기에 따라 그 형상이 조금씩 다르게 설계되어야 한다.

미분쇄실의 밀 길이는 시멘트 분쇄시 통상 조분쇄실보다 2배 정도로 길며 분쇄진행에 따라 밀 길이 방향으로 분쇄매체가 분급되어 큰 볼은 입구측에 작은 볼은 출구측으로 자동분급이 될 수 있도록 Cla-



〈그림-5〉 Flow Controlling Diaphragm 구조와 작동원리

ssifying Liner를 사용하는 것이 효과적이다.

Classifying Liner의 형상은 사용하는 분쇄매체의 크기 범위와 밀경에 따라 매우 정교하게 설계되지 않으면 안되며 마모에 따른 형상변화가 적도록 내마모 재질의 사용이 필요하다.

이러한 분쇄매체의 분급기능의 개선은 미분쇄실에서 작은 볼을 효과적으로 사용할 수 있게 하여 미분쇄단계의 분쇄효율을 높일 수 있다.

또한 볼밀의 분쇄효율은 밀내 장입하는 분쇄매체의 충진율과 함께 밀내 체류하는 피분쇄물량(Hold-Up)에 의해 크게 영향을 받는다. 즉 분쇄매체의 공극에 피분쇄물이 너무 적거나 많이 분포할 경우 분쇄효율은 현저히 저하되므로 운전중에 적절한 피분쇄물의 체류시간과 피분쇄물량을 갖도록 하여야 한다. 이러한 관점에서 조분쇄실과 미분쇄실 공히 적절한 피분쇄물 레벨이 유지되도록 조분쇄실에서 미분쇄실로 유입되는 양을 조절할 수 있는 Flow Controlling Diaphragm이 개발되었다. 이는 〈그림-5〉와 같이 Diaphragm의 Slot Liner와 Blind Liner 사이에 설치된 Scoop의 각도를 조정하여 조분쇄실의 분쇄물 레벨을 적절한 상태로 유지케 한다. 밀 출구측 Diaphragm도 마찬가지로 미분쇄실의 피분쇄물 레벨을 유지토록 Slot Liner와 Lifter를 설치하여야 한다.

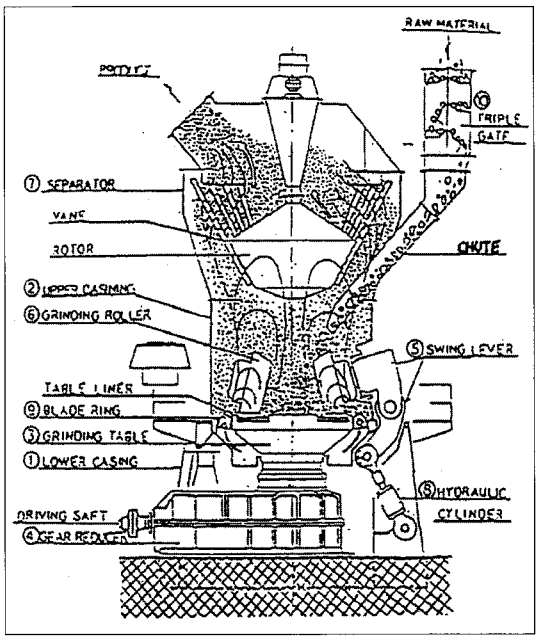
폐회로 분쇄계(Closed Grinding Circuit)에서 외부순환율의 최적화를 위하여 적절한 밀 체류시간을 유지할 필요가 있다. 이를 위하여 밀 통풍량의 적절화가 필요하며 미분쇄 효율증대를 위한 다량의 소형볼 사용에 따라 밀 통풍을 보다 강화시켜 주는 것이 바람직하다. 밀 통풍강화는 체류시간 적정화 외에 분쇄온도를 저하시켜 볼 및 라이너 코팅생성을 감소하고 밀내에 분쇄된 아주 작은 입자들을 신속히 배출하는 밀 내부 입자분급기능을 강화시켜 분쇄효율을 개선시킨다. 특히 분쇄조제의 사용과 함께 밀 통풍강화는 이러한 효과를 더욱 높일 수 있으며 폐회로 분쇄계에서 적정 밀 통풍량은 밀내 통풍단면에서 유속이 1.5～2.0m/s 수준이 적정하다. 또한 통풍공기에 부유되어 배출되는 Dust의 포집장치인 백 필터(Bag Filter)에서 기존의 기계식 청정방식으로부터 압축공기의 Pulse Air Jet 청정방식의 개발은 백필터의 압력 손실을 크게 감소시켜 밀 통풍량 증대를 효과적으로 가능케 하는데 기여하였다.

볼밀 분쇄기술에서 Lifting Liner, Classifying Liner, Flow Control Diaphragm 등 밀내 부속설비의 개량과 분쇄 매체 적정화 및 밀 통풍강화 등의 일련의 개선을 통하여 분쇄에너지의 저감이 꾸준히 이루어져 왔다.

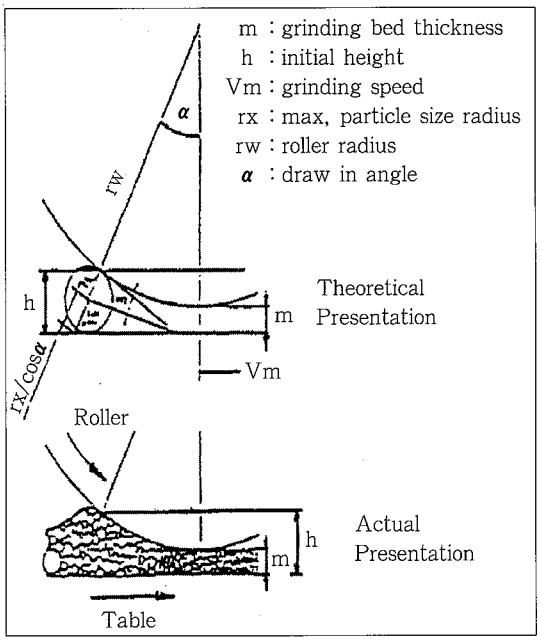
나. 롤러 밀

롤러 밀의 개발 초기에는 기계적인 문제 때문에 별로 관심을 끌지 못했지만, 대용량화와 에너지 절감의 관점에서 우수한 효율이 인정되어 점차 사용이 확대되기 시작했다. 1960년대 독일 Loesche사에 의해 석탄분쇄에 이어 시멘트 원료 분쇄에 적용이 실용화되었으며 근자에는 석탄과 원료분쇄 부문에서 새로 설치하는 밀의 대부분이 이러한 기종을 선택하고 있다.

반면에 경질물질이며 분쇄산물의 입도가 보다 미세한 크링카나 슬래그 분쇄에 있어서는 진동발생에 따르는 기계적 문제, 설비의 마모 및 입도분포 특성에 기인하는 제품품질 등의 문제로 그동안 이들 분쇄에는 이용하지 못하였다. 그러나 계속되어온 연구



〈그림-6〉 롤러 밀 구조(Losche Mill)



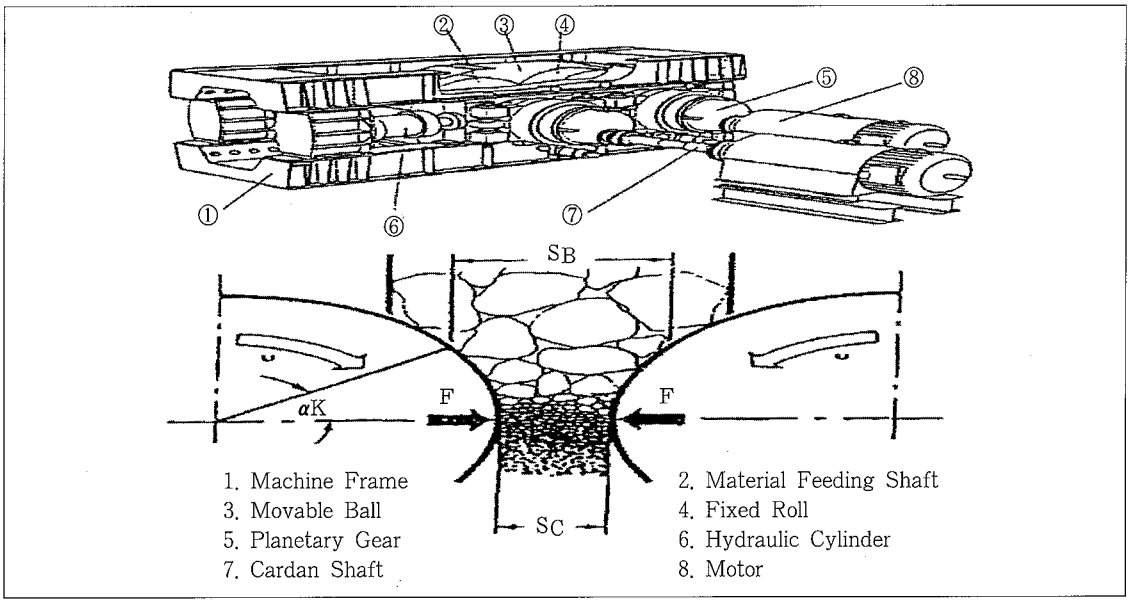
〈그림-7〉 롤러와 테이블 사이의 피분쇄물 유입과 파쇄

개발을 통하여 이들 문제들이 점차 해결되었고 1990년대 들어와서는 본격적인 실용화가 시작되었다.

롤러 밀의 구조 일례는 〈그림-6〉과 같으며 메이커마다 조금씩 세부구조나 형태가 다르나 전체 설비는 회전하는 테이블과 구동부, 롤러와 가압장치, 내장형 분급기로 구성되어 있다. 롤러 밀 분쇄는 〈그림-7〉과 같이 회전하는 테이블과 롤러 사이에 피분쇄물이 층(Bed)으로 유입되어 유압으로 가압되는 롤러의 압력에 의해 압축력과 전단력을 받아 분쇄되어진다. 크링카나 슬래그와 같은 경질물질을 보다 미세하게 분쇄하기 위해서는 피분쇄물과 접촉되는 롤러의 면압(Surface Pressure)이 석탄이나 원료분쇄의 경우보다 증가되어야 하므로 진동발생을 보다 억제하고 밀 운전 안정화를 도모하기 위해서는 피분쇄물 층의 유입조건(Draw in Condition) 개선, 적절한 분쇄층의 형성 및 균일화 방안들이 고려되어야 한다.

한편 롤러 밀에서 외부 순환시스템(External Circuit System)의 채택은 총 분쇄에너지 감소에 크게 기여하게 하였다. 1982년 일본 미쓰비시 중공업은 외부순환시스템을 개발하여 테이블에서 분쇄된 물질 전량을 테이블과 외통사이의 노즐을 통해 전부 공기힘으로 들어올리는 대신 큰입자 일부를 외부로 배출, 재순환시키는 방식으로 시멘트 원료 분쇄시스템에서 흡입 휀의 용량과 압력을 대폭 감소하게 하여 전력 소모를 크게 감소시킬 수 있었다. 이러한 방식은 크링카나 슬래그 분쇄용 롤러 밀에서도 거의 필수적으로 채택되고 있으며, 밀내 내장형 분급기에서 필요 이상의 분급풍량 감소와 함께 분급기 개선을 통한 입도조정 기술이 개발되어 시멘트의 입도분포가 너무 좁아 생기는 물/시멘트비 증가 문제를 해소하게 되었다.

롤러 밀 분쇄시스템은 기존의 볼 밀 시스템에 비하여 분급기가 일체화된 수직형으로 설치공간이 적고 건설비가 절감되며, 마모에 따른 보수비가 다소 증가하나 분쇄에너지가 낮아 운전비용이 유리하여 크링카나 슬래그 등의 경질물질의 분쇄에도 확대 적용이 기대된다.

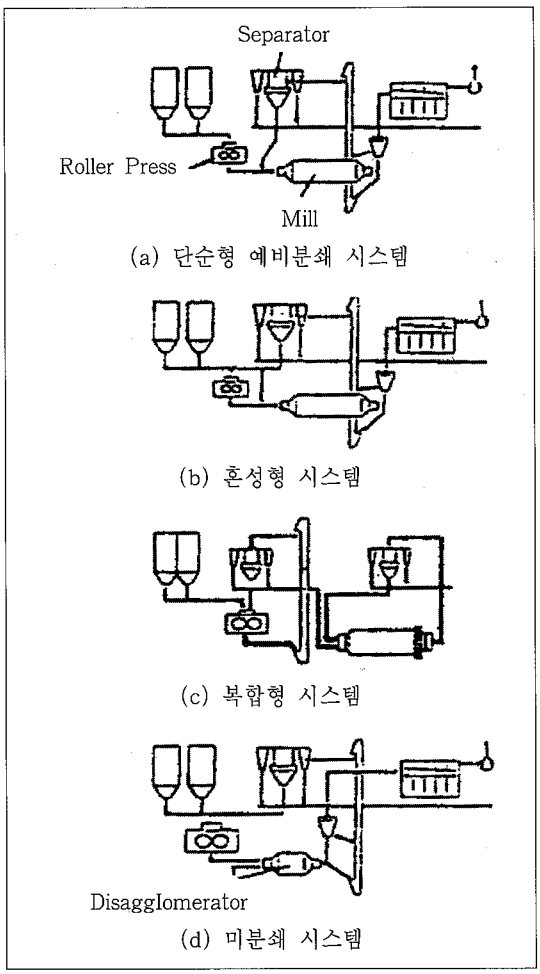


〈그림-8〉 롤러 프레스 구조 및 분쇄원리

다. 예비분쇄 시스템

볼밀 분쇄기 앞에 예비분쇄 시스템을 설치하는 다단 분쇄공정은 과거에도 부분적으로 시도되었으며 원료 분쇄에서 Impeller Breaker, Hammer Mill, 크링카 분쇄에서 Rod Mill 등이 사용되기도 하였다. 그러나 이들 예비분쇄 설비는 단순히 파쇄(Crushing) 수준에 불과하며 볼밀의 대형화와 1실의 대형볼 사용추세에 따라 그 예비분쇄 효과가 그다지 크지 않고 심각한 마모 등 보전관리의 어려움으로 인해 크게 관심을 갖지 못하였다. 하지만 1978년 독일 Clausthal 대학의 K. Schonert 교수가 2개의 롤 사이에 피분쇄물을 50Mpa 이상의 고압으로 압축분쇄하는 롤러 프레스 예비분쇄 방식을 제시한 후 1980년 후반에 들어 Polysius, KHD, F. L. Smidth, Fuller, CLE, MHI사 등에 의해 상품화되어 적용이 확대되고 있는 추세이다.

롤러 프레스는 〈그림-8〉의 구조와 같이 역방향으로 회전하는 원주형 롤 사이에 피분쇄물을 투입, 높은 압력으로 압축하여 Cake 상태의 분쇄산물을 생성한다. 이때 Cake내에는 다량의 미립자가 포함되어 있으며 조립자도 조직내 균열이 형성되어 있어 예비분쇄 효과를 크게 증대시킬 수 있었다. 롤러 프레스의 분쇄성능에 영향을 미치는 인자로 롤의 직경과 길이, 회전수, 롤간 간격, 크기, 분쇄압력 그리고 피분쇄물의 성상으로 입도, 형상, 경도 및 충진성이 중요하다. 특히 피분쇄물층의 충진성은 분쇄압력을 보다 효율적으로 이용하기 위한 중요한 인자로서 충진성이 증가되면 롤 사이의 유입조건(Draw In Condition)이 개선되어 미끄러짐 현상이 없이 유입될 뿐만 아니라 국부적인 압력의 집중화가 방지되고 입자층의 공극률을 최소화하여 입자간 분쇄에 효과적이다. 롤러 프레스는 공급되는 피분쇄물의 충진성과 밀접한 관계를 갖는 입자크기 분포 특성을 고려하여 전체 분쇄기 시스템으로서 여러가지 형태로 적용할 수 있다. 이들은 〈그림-9〉과 같이 롤러 프레스 예비분쇄기와 최종분쇄를 하는 볼밀 분쇄기와의 조합시스템에 따라 a) 예비분쇄산물을 바로 볼밀로 공급하는 단순형 예비분쇄 시스템(Pregrinding system), b) 순환계 볼밀의 분급기 조분 일부를 새로 공급되



〈그림-9〉 롤러 프레스 적용방법

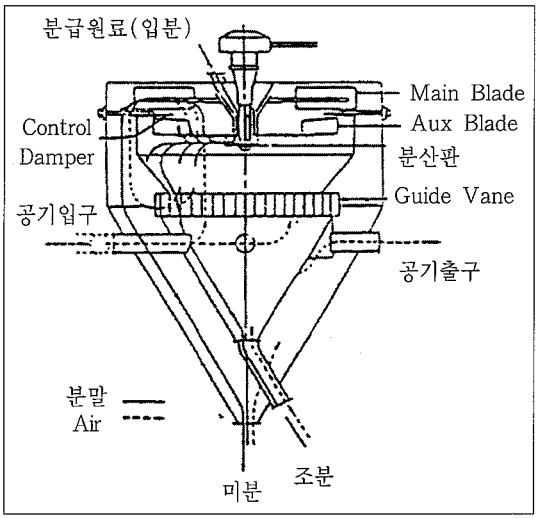
는 피분쇄물과 혼합하여 롤러 프레스에서 예비분쇄하는 혼성형 시스템(Hybrid System), c) 롤러 프레스의 예비분쇄산물을 별도로 설치된 분급기에서 분급하여 큰 입자 등은 예비분쇄기로 재순환하고 작은 입자들만 볼밀로 공급하는 복합형 시스템(Combind System), 그리고 d) 볼밀의 최종 분쇄단계를 거치지 않고 롤러 프레스와 분급기만으로 구성된 시스템에서 최종 분쇄산물을 얻는 미분쇄 시스템(Finish Grinding System)으로 적용될 수 있다.

기존의 볼밀과 연계하여 이들 시스템을 적용할 경우 분쇄능력의 증가와 분쇄에너지 저감은 단순형 예비분쇄 시스템의 경우 능력증대는 20～30%, 혼성형은 40～60%이나 복합형은 100～150%로 크게 증대시킬 수 있기 때문에 초기에는 단순형을 주로 적용하였으나, 최근에는 복합형을 보다 많이 적용하고 있는 추세이다. 한편 순환계 롤러 프레스의 미분쇄 시스템은 분쇄에너지 측면에서 효율이 좋은 방식이지만 시멘트 분쇄시 석고의 불완전한 혼합 등 시멘트 품질상의 문제점을 개선해야 할 여지가 남아있다. 또한 롤러 프레스에서 압축 분쇄된 분쇄산물은 Cake 상태로 이를 분급기에서 효과적으로 분급하기 위해서는 사전에 충분히 해쇄를 할 필요가 있기 때문에 분급기와 결합된 형태의 해쇄장치나 별도의 장치를 사용하고 있으며, 예비분쇄산물중에 포함된 수 mm 이상의 큰 입자들은 분급기나 해쇄장치의 빠른 마모 문제를 야기시키고 있으므로 이에 대한 보다 확실한 개선대책이 연구되어져야 한다.

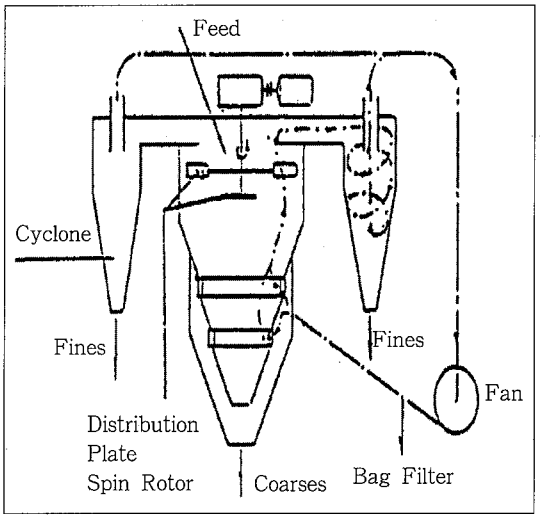
2. 분급기술

가. 분급기술의 개요 및 이론

분급이란 넓은 의미에서 화학성분, 입자경, 형상, 색, 밀도, 방사성, 자성 등의 특성을 이용하여 고체물질을 분리하는 공정을 말하며, 일반적으로 사용하는 의미의 분급은 고체 물질의 밀도, 입자경에 따라 2성분으로 분리하는 공정을 말한다. 분급방법에서는 습식법과 공기를 이용하는 건식법이 있는데, 현재 시멘트 산업에서의 분급공정은 주로 건식법으로 이루어져 있다. 분급공정을 사용하는 이유는 첫째, 입자경이 큰 입자를 함유하고 있는 분체로부터, 입자경이 작은 입자를 선택적으로 분리하여 분체나 기타 분체처리 공정에 사용되는 에너지 소비를 줄이기 위함이며, 둘째 이유는 분체가 갖는 입도분포의 폭을 좁힘으로써 입자의 특성을 균일하게 하여 고기능성 분체를 제조하기 위함이다. 시멘트 제조에서 공업적으로 사용되는 중세립용 대용량 처리의 건식기류 원심력식 분급기로는 종래 Sturtevant, Polysius Turbo형 등 내부순환기류식 분급기가 널리 사용되어



〈그림-10〉 Sturtevante Separator

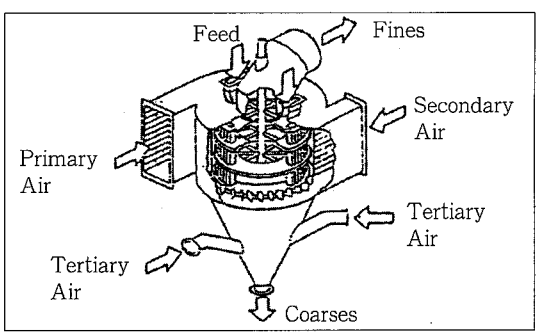


〈그림-11〉 Cyclone Separator

왔다. 이들 분급기는 〈그림-10〉와 같이 분급공기 휀이 내장되어 있기 때문에 대형화에 따른 분급공기량 발생의 한계가 있어 분급영역에서 분급이 예민하지 못하고, 분급된 정분은 상승공기와 함께 외통부로 이동하여 원추부(Cone)에서 순환되는 공기와의 분리가 효과적으로 일어나지 못하여 일부가 분급실로 재순환되거나 조분으로 포집되는 문제를 안고 있다. 이에 반해 외부순환기류식 분급기로 1960년대 초 독일 Wedge사에서 개발한 Cyclone형 분급기가 등장하여 기존의 내부순환방식의 대형화 한계를 극복하고 분급효율을 크게 개선하였다. Cyclone형 분급기는 〈그림-11〉 분산판과 회전날개로 구성되는 내부구조와 분급기구는 기존형과 유사하나 분급기 바깥쪽에 순환휀을 독립적으로 설치하여 적정 분급 공기량을 얻게 하고, 분급된 정분도 분급기 외부에 설치한 별도의 Cyclone을 통하여 순환공기와의 분리를 효율적으로 하게 하였다. 또한 순환 휀에서 토출되는 공기는 분급기 본체 하부의 어느 한 지점에서 유입되므로 이들 공기가 분급실로 균일 분배가 이루어지도록 하는 등 부분적인 개량이 이루어져 분급성능이 보다 크게 개선된 상태로 현재까지도 널리 사용되고 있다.

한편 1980년 오노다(일본)에서는 내향기류와 원심력 분급방식의 O-SEPA(〈그림-12〉)를 상품화한 이후 유사한 형태의 신형 분급기가 개발되기 시작하였다.

이 형식은 Cyclone형 분급기와 마찬가지로 외부순환기류식이나 수직형 회전날개를 채택하고 분급공기가 측면에서 내측 분급실로 유입하는 형식으로 분급실경에 비해 분급영역이 넓고 장치가 작아 설치공간이나 투자비가 Cyclone형보다 유리한 장점이 있다. 분급성능 면에서도 이러한 분급기는 대용량, 고성능 분급기로 손색이 없는 것으로 평가되고 있다. 또한 예비분쇄 시스템에서 채택되고 있는 분급



〈그림-12〉 O-SEPA의 구조(신형 분급기)

기는 롤 프레스에서 배출되는 Cake상 물질의 해쇄와 동시분급 기능을 갖도록 설계되기도 하는 등 시멘트 산업에서의 분급기술은 향후 다기능, 고효율형 분급기의 지속적 개발이 요구되고 있다.

3. 집진기술

가. 집진장치의 원리 및 특성

집진장치라고 하면 더러워진 먼지를 모으는 것으로 알려져 있으나 그렇지는 않고 분립체의 수송말단에 있어서 기체에서 고체입자를 분리하는 포집기나 Process Gas를 만들기 위한 것 등이 있다. 즉, Gas 중의 미립자를 분리 포집하는 장치를 말하는데 그 방법에 따라 다음과 같이 구분된다.

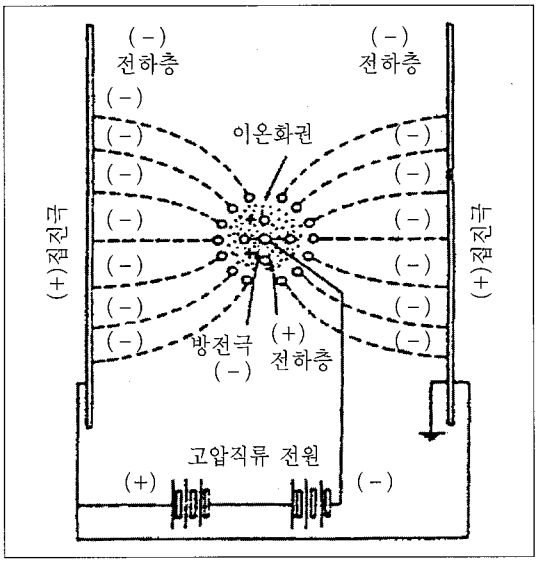
- 습식 집진장치 : Duct Gas 중의 미립자 또는 포집입자를 물이나 그 외의 액체에 의하여 포집하는 장치
- 건식 집진장치 : Duct Gas 중의 미립자 또는 포집입자를 액체를 사용하지 않고 포집하는 장치

일반적으로 미세한 입자에 대해서는 전기 집진기, Scrubber 혹은 Filter 포집기를 사용하지 않으면 안된다. 각종 집진장치마다 그 사양 및 특성 등이 다르며 사용장소에 따라서도 각기 다른 형태의 집진장치가 요구되나 일반적으로 시멘트 공장에서 사용되고 있는 집진장치는 전기집진기와 Filter 포집기가 있다.

나. 전기집진기

시멘트 제조산업에서 최종 함진(含塵) 배가스 처리를 위하여 여러가지 장점, 즉 낮은 압력손실 및 전력원단위, 대량의 가스처리, 고효율, 보전관리의 용이 등으로 전기집진기(Electrostatic Precipitator)를 설치 운영하고 있으나, 키른 단위생산량 증대 및 처리 배가스량 증가, 전기집진기 노후 등으로 인하여 집진효율이 저하되고 있는 실정이다.

전기 집진기의 집진원리는 〈그림-13〉과 같이 방전극과 집진극 사이에 전장을 형성시켜 Corona 방전을 이용하여 가스중에 떠있는 입자에 전하를 주고, 대전된 입자를 전장의 작용에 의해 집진극상에 분리 포집하는 방법으로, 이 과정을 크게 다음의 4가지로 나누어 볼 수 있다.



〈그림-13〉 방전극과 집진극에서의 전장형성

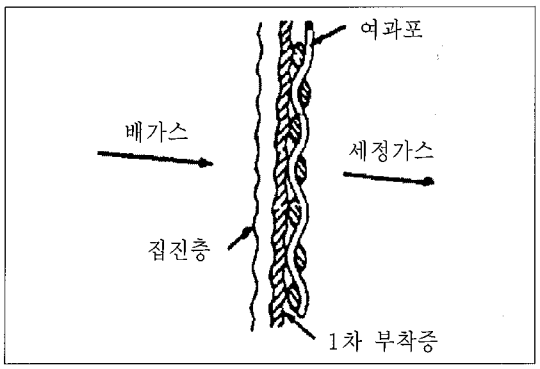
① 가스중에 부우하는 입자의 음이온에 의한 하전
② 대전된 입자는 전장중에서 Coulomb 힘에 의한 집진극 방향으로 이동
③ 집진극에 Dust의 부착
④ 집진극의 Dust층을 Rapping에 의한 포집

다. Bag Filter

함진 공기중에서 Dust를 제거하는 집진장치에는 각각 특징이 다른 여러가지가 있으나 분진의 입경이 1㎛ 이하인 경우에는 집진성능이 높은 Bag Filter를 사용하는 것이 바람직하다.

일반적으로 Bag Filter는 포의 Dust 부하가 커질수록 압력손실은 커지고 포집효율도 좋아지는 것이므로 특히 간헐적으로 털어내는 형식의 것에서는 순간 포집효율은 시간에 의해 변화하며 적산 포집효율도 어느 기간까지는 시간과 더불어 상승한다.

일반적으로 시멘트 산업에서는 원통식(Tube



〈그림-14〉 여과포에 있어서 여과작용

Type)의 Filter를 사용하여 분진을 Filter로부터 털어내는 Pulse Jet형을 채택하는 것이 보통이다.

〈그림-14〉는 여과포에 의한 입자 포집과정을 간략히 나타내고 있으며 여과포 혹은 여과지와 같은 비교적 얇은 여과재를 싸서 표면에 최소로 부착된 입자량(1차 부착층)을 여과층으로 하여 미세한 입자를 포집하게 된다.

표면여과 방식에서는 1차 부착층의 막힘을 방지하기 위해 처리가스의 온도는 노점 이상으로 해줄 필요가 있다. 이 표면여과에서는 포집분진의 부착량, 즉 분진부하(g/cm^2)가 증가하면 압력손실이 증가한다. 따라서 부착 분진에 의한 압력손실이 일정한 값에 달하는 시점에서는 분진이 떨어져 나가지만 1차 부착층의 대부분은 잔류하기 때문에 일단 1차 부착층이 형성되면 항상 1㎛ 전후의 미세한 입자까지 포집된다. 전기집진기 및 Bag Filter 시스템에서 요구되는 개발 기술은 집진효율의 증대, 내구성, 압력손실의 저감에 의한 에너지 절감, 분진 및 가스의 상태 변화에 대한 집진성능의 둔감성이며 최근 국·내외 유수한 집진설비 제조업체에서 관련기술이 꾸준히 개발되고 있다.

4. 수송기술

가. 분립체 수송장치의 종류

시멘트 산업에서의 수송장치 특히 분체를 수송하는 방식에는 크게 기계적 수송방식과 공기흐름을 이용한 방법으로 대별되며 그 종류는 다음과 같다. 이들 수송방식들은 수송물의 종류, 수송목적 및 형태, 능력 및 소요동력 등에 의해 결정이 되며 〈표-2〉에 그 대표적인 특징을 나타내었다.

Ⅳ. 분체처리 기술에 의한 고기능성 시멘트 제조

최근의 시멘트 개발은 고강도의 발현, 내구성 증

〈표-2〉 분체 수송장치의 일반적 특징 비교

구 분	스크류 콘베이어	벨트 콘베이어	체인 콘베이어	바케트 콘베이어	공기수송	Air Slide
1. 수송물 비산	없음	없음	없음	없음	없음	없음
2. 수송물 잔류	있음	없음	있음	있음	없음	없음
3. 수송경로	직선적	직선적	직선적	직선적	임의	직선적
4. 보수	전면보수	로라	체인	체인	곡관부	댐퍼
5. 경사 각도(°)	0～90	0～40	0～90	90	임의	하향, 4～10
6. 수송물 최고 온도(℃)	300	180	300	80	600	80
7. 수송물 최대 입경(mm)	30	제약작음	50	100	30	1
8. 수송 속도(m/min)	20～100(rpm)	15～180	10～30	20～40	360～2000	30～120
9. 최대 수송 능력(t/h)	300	3000	300	600	600	300
10. 소요 동력	중	소	대	소	대	소

〈표-3〉 고분말 첨가재의 종류 및 용도

재 료	용 도
중질석회석 분말 (3μm under)	-배연 탈황용 -중화반응용 -사료용, 비료용 -고무, 제지, 수지의 filler
경질 실리카 분말 (1~3μm under)	-제지, 고무, 플라스틱 산업용 -전자 세라믹 제조용 -내화물용
고분말 슬래그 (Blaine 8,000cm²/g)	-충진재용 -시멘트 혼합재 -특수 결합재 원료

대, 기계적 특성의 향상 등을 목적으로 최밀의 충진 구조체를 만들기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 최근의 고기능성 시멘트 제조의 핵심기술은 분쇄기술의 개발에 힘입어 입자 특성을 개선시켜 입자의 형태를 변경하거나 첨가재를 사용하여 시멘트의 기능성을 개선시키는 기술 및 입도분포를 조절하여 입자의 충진율을 향상시키는 기술이다.

〈표-3〉은 고분말 첨가재의 종류 및 용도를 나타낸 것이고, 〈표-4〉에 고기능성 시멘트의 특징 및 제조방법을 정리하여 나타내었다. 구상화 시멘트는 과거 수년전부터 일본을 중심으로 그 제조가능성 및 설비개발을 위한 연구가 진행되고 있으나, 현재까지는 대용량 제조 설비의 개발, 제조비용 감소 등의 숙제를 안고있다.

V. 고기능성 분체 제조 미분쇄기의 개발동향 및 특징

최근에는 신소재 개발의 흐름속에서 초미립자의 제조와 이용에 많은 관심이 모아지고 있다. 이는 입

〈표-4〉 고기능성 시멘트의 특징 및 제조방법

제 품	용도 및 특징	제 조 방 법
GFC (Gypsum Free Cement)	Porosity가 낮아 조직이 치밀하고 영하의 온도에서도 초기 및 장기강도 발현이 우수함	시멘트 크링카를 Blaine 비표면적 6,000~9,000cm²/g으로 미분쇄한 후 응결조절제로서 리그닌과 같은 유기물을 사용함
조강, 초속경 시멘트	빠른 반응성과 높은 초기강도를 발현 -한중공사용 -긴급 복구 공사용	시멘트 입자를 미분쇄하여 비표면적을 증가시켜 반응성 증대 및 수화반응을 촉진시킴(Blaine, ~8,000cm²/g)
Grout재	-Grouting -지반개량제	시멘트 분말에 수경성 분말 무기혼합재(Slag, Silica)를 넣어 유동성을 강화함
MDF 시멘트 (Micro Defect Free)	낮은 물/시멘트비에서 약간의 Polymer를 첨가시켜 극히 높은 고강도를 달성함 -철강대용, 선반, 방한용 재료	OPC 또는 AC에 Polymer물질을 첨가시키고, High Shear Mixing한 후, 압출성형하여 치밀구조를 갖게 함
DSP 시멘트 (Densified Systems Containing Homogeniously Arranged Ultra Fine Particles)	Micro Silica 첨가로 포졸란 반응을 좋게 하고, 기공충진 및 기포를 제거하여 고강도화함 -초고강도용 -고층건물용	OPC에 Micro Silica를 첨가하여 만들며, 미세 OPC 분말의 활성은 계면활성제 사용으로 조절함
구상화 시멘트	시멘트 입자의 구상화 및 표면이 혼화재로 피복되어 활발한 표면반응성 및 유동성을 지님 -고층건물 -발전소	시멘트를 기계적 충격으로 입자표면을 마쇄하여 미분이 정전기적 힘에 의해 큰 입자 표면에 부착되고 강한 기계적 에너지로 이를 고정화함

자를 미세화함으로써 분말의 물리적·화학적 기능을 높여 소위 분말특성의 고부가가치화를 가져올 수 있기 때문이다.

산업용 분체는 일반적으로 325mesh(44㎛) 표준체를 100% 통과하는 입자로서 평균입도가 1~20㎛인 입자로 구성된다. 이러한 분야로서 최근에는 중질탄산칼슘, 다공성실리카, 화인세라믹스, 반도체, 의공학용소재, 특수금속 분야 등에서 1㎛ 이하의 고순도 초미립분체가 공업용 원료로서 절실히 요구되고 있고 그 수요가 급격히 증가되고 있다. 이러한 초미립분체를 얻기까지 건식분쇄에 있어서는 1㎛의 분체기술 장벽이 있으며, 따라서 현재까지는 1㎛ 이하의 분체제조는 주로 습식공정에 의해 소량 제조되고 있는 실정이나, 최근에는 건식분쇄공정을 통해 분체기술의 장벽을 넘어 초미립분체를 제조하고자 하는 연구가 미국, 일본, 독일 등에서 활발히 진행되고 있고, 이러한 고순도 고기능성 초미립분체의 제조에 있어서 제트밀 분쇄가 가장 적합하다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이러한 제트밀의 장점과 단점을 구분하면 다음과 같다.

장점으로는

① 건식분쇄이고 초미분체를 얻을 수 있다.

② 프로세스가 연속이고, 원료분말을 공급한 직후에 짧은 시간내에 제품분말을 얻을 수 있다.

③ 유체에 압축공기를 사용하면 단열팽창에 의한 온도강하가 일어나기 때문에 상온분쇄가 가능하다. 따라서 저융점 물질과 약열성 물질의 미분쇄에 적당하다.

④ 건조혼합과 코팅 등의 다른 프로세스와의 복합화가 가능하다.

⑤ 응집된 덩어리를 본래의 단일입자로 분산시키는 효과(해쇄라고함)가 매우 우수하다.

⑥ 분쇄매체로써 압축성 공기 및 증기를 사용하기 때문에 최종산물의 오염, 훼손이 없다.

단점으로는

① 압축공기 및 증기가 다량 소용된다.

② 요구동력비가 상당히 크다.

③ 분쇄물에 많은 공기가 포함되어 분리 포집장치가 필요하다.

이러한 관점에서 최근의 분체공학 및 분체제조 기술에 있어서 주목되고 있는 방향은 다음과 같다.

① 미분 또는 Submicron의 초미립분체의 효율적 제조

② 분쇄산물의 질적향상-입도분포, 표면개질, 결정구조 등

③ 분쇄·분급공정의 연동 시스템 구축에 의한 에너지의 효율적 이용, 결국 이러한 방향이 제트밀 개발연구의 중요한 지표가 되고 있다.

현재 상용화되고 있는 제트밀의 유형적 특징을 살펴보면 다음과 같다.

① 기류 충돌형 제트밀

원형의 분쇄실이 있고, 그 분쇄실의 내측을 향해서 여러개의 노즐을 압축공기를 유입시켜 고속의 선회기류를 형성한다. 그리고 선회기류안에 분사기 등으로 쇄료를 혼입시켜 입자끼리의 상호충돌로 분쇄가 이루어진다.

② 충돌판 충돌형 제트밀

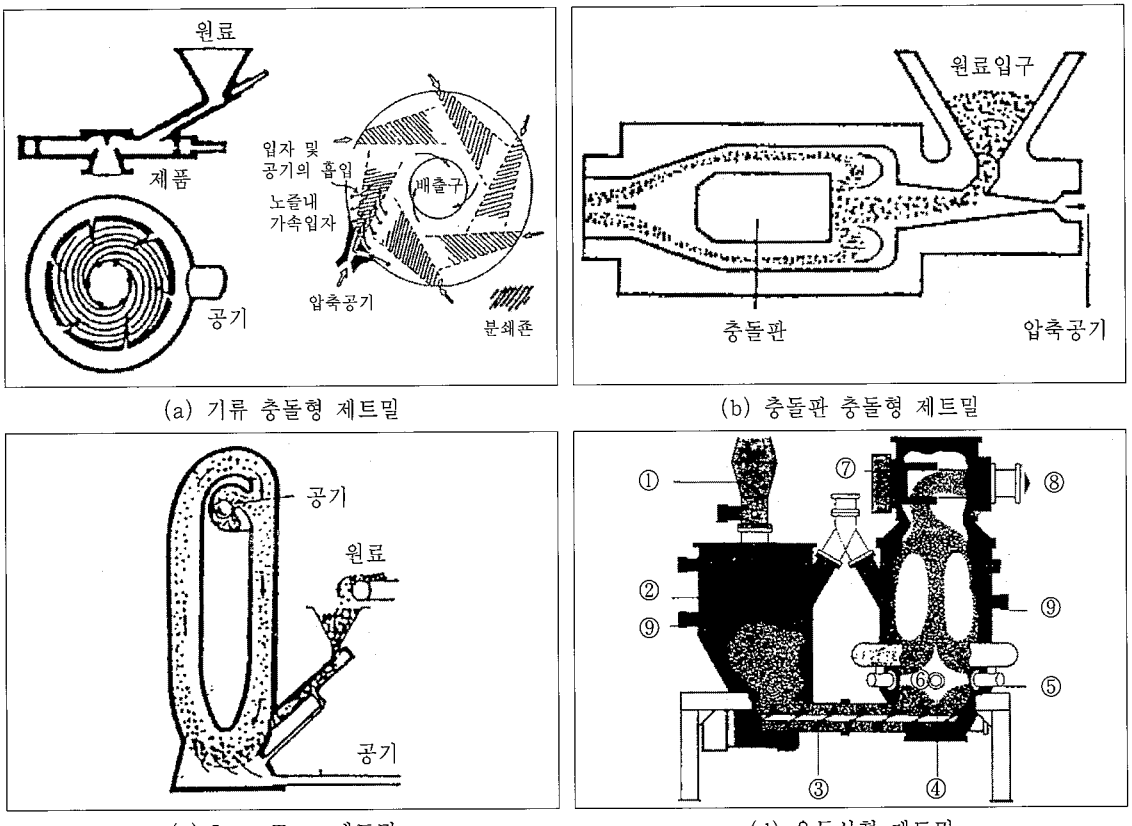
단단한 재료로 만들어진 충돌판에 벤츄리 노즐 등으로 가속한 쇄료를 고속으로 충돌시켜 분쇄한다. 이 유형의 제트밀도 공기분급기와의 폐회로로 운전되는 것이 보통이다.

③ Loop Type 제트밀

기류의 순환속도는 그다지 빠르지 않고, 분쇄력도 그다지 크지는 않지만 대용량 처리에서 응집체를 분산하는 목적 등에 효과적이다. 순환속도가 낮기 때문에 쇄료가 부착하기 어렵다. 또한 처리량을 대폭으로 변화시켜도 생성입도가 비교적 균일하게 유지되는 특징이 있다.

④ 유동상형 제트밀

원형 호퍼 측면의 벽으로부터 분체 Bed의 중앙부를 향해서 대향하는 여러개의 노즐로 압축공기를 불어넣는다. 분체 Bed안의 쇄료입자는 고속으로 충돌하거나 입자표면이 마찰되어 분쇄가 일어난다. 이와 같이해서 분쇄된 미분말을 분쇄기 상부에 설치한 분



(a) 기류 충돌형 제트밀 (b) 충돌판 충돌형 제트밀

(c) Loop Type 제트밀 (d) 유동상형 제트밀

〈그림-15〉 제트밀의 유형적 특징

급기로 분급해서 제품분말을 얻는다.

이상에서 언급한 유형의 제트밀의 구조를 〈그림-15〉에 나타내었다.

Ⅵ. 결 언

건설재료로서 시멘트의 제조공정은 앞서 설명된 바와 같이 분체의 제조, 취급공정이 총망라된 복합 분체공정으로 전체적으로 분체관련 기술의 발전에 의한 에너지 절감, 환경보호 및 고부가가치형 고기능성 재료의 개발이 가속화될 것으로 본다.

본고에서 취급된 분체처리기술 중 분쇄기술은 분쇄설비 및 방식의 부분적인 개량이나 개선에 의한 분쇄에너지 저감 노력이 계속될 것이며, 그밖에 자동시료채취 및 분석시스템의 도입, 정밀제어시스템의 개발로 보다 안정된 분쇄공정의 운전을 통하여 분쇄효율의 극대화가 실현될 것으로 생각된다.

또한 제품의 다양화, 고기능성화 및 폐부산자원의 활용 등을 위하여 기존의 제품보다 훨씬 미세한 고분말도의 제품생산을 위한 분쇄 및 분급기술이 요구된다.

아울러 분체제조의 연관공정으로 집진, 수송, 저장, 혼합 및 건조기술 개발 또한 중요하며 전체적인 분체 제조, 취급 및 처리기술 개발의 뒷받침으로 아직까지는 몇몇 선진국에 의해 주도되어 왔던 분체관련 프로세스 설계 및 엔지니어링을 자체 수행할 수 있는 요소기술의 개발이 조속히 이루어져야 할 것이다.