

포틀랜드 시멘트의 제조

1. 시멘트의 원료

시멘트 공장에서는 중량이 큰 여러 가지 원료를 대량으로 취급하여, 이들을 가공하여 중량이 큰 시멘트로 만들고 있다. 무겁고, 단가가 싸기 때문에 어떻게 합리화시켜 저가로 제조할 수 있는지가 가장 중요한 과제이다.

지표에서 내부로 16km의 두께를 지곡(earth shell)이라고 하여 그 구성 원소량은 O 49.5%, Si 25.8%, Al 7.56%, Fe 4.7%, Ca 3.39%의 순으로 되어 있고, 이들 5원소의 합계만으로 90.95%를 차지한다. 포틀랜드 시멘트와 그 원료의 화학성분을 표1에 나타내었지만 포틀랜드 시멘트중의 대부분이 앞서 언급한 5원소의 산화물 형으로 계산하면 94.9%가 되어 시멘트공업이 얼마나 자원적으로 풍족한가를 이해할 수 있다. 포틀랜드 시멘트의 제조에 필요한 원료는 석회석, 점토, 규석, 산화철 원료, 석고 등이며, 연료로서는 석탄을 사용한다

표 1. 포틀랜드 시멘트와 그 원료의 화학조성

	강열감량	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	합계
포틀랜드시멘트	0.6	23.1	5.0	3.0	63.8	1.6	2.0	0.4	0.5	100.0
석 회 석	42.6	0.5	0.2	0.3	55.2	0.6	-	-	-	99.7
점 토	8.0	66.9	13.6	5.5	2.9	1.3	-	-	-	98.2
연 규 석	2.6	87.0	5.3	3.6	0.4	0.3	-	-	-	99.2
인산석고	20.9	0.6	1.2	0.6	31.5	0.2	45.1	-	-	100.1

표 2. 시멘트 1톤을 제조하는데 필요한 원료, 연료의 양 (kg)

석 회 석	1 1 5 0	석 고	3 0
점 토	2 2 0	석 탄	1 2 0
규 석	5 0	기 타	1 0
산화철 원료	3 0	전 력	1 0 3 (kwh)

시멘트 1톤을 제조하는데 석회석은 그의 약 1.3~1.4배를 필요로 하지만 우리나라에는 강원도의 동해, 삼척 및 경북의 울진, 충청도의 제천, 단양지역에 풍부한 석회석 자원을 가지고 있으며 특히 광산도 노천 광산이므로 채굴비용이 저렴하다. 석회석은 CaCO₃가 95% 이상의 것이 원료로 적당하며 석회석에 배합되는

점토는 SiO_2 가 60~70%의 것이 바람직하다. 점토를 첨가하여도 SiO_2 분이 부족할 때는 규석 등의 첨가에 따라 보충하는 것이 좋지만 되도록 첨가는 최소로 하는 것이 좋다. 시멘트용 점토는 카올린나이트, 할로이사이트, 몬모리노나이트, 석영, 장석 등이고 점토분만으로는 SiO_2 성분이 부족한 경우에는 연규석, 규석 등을 보급하지만 연규석이 SiO_2 성분이 높고 분쇄성이 좋기 때문에 많이 이용된다. 포틀랜드 시멘트중에는 약 3~4%의 Fe_2O_3 가 함유되어 있기 때문에 석회석과 점토만으로는 Fe_2O_3 가 부족한 경우가 많다. 이것을 보충하기 위해 산화철 원료로서 동제련슬래그, 제철공장에서 부산되는 전로슬래그 등이 사용되고 있다.

시멘트의 제조에는 이외에 응결시간의 조절을 위해 적당량의 석고가 첨가되어진다. 석고는 인산공장에서 부산되는 인산석고 및 천연광산에서 산출되는 석고 등이 있다.

2. 제조방식

포틀랜드 시멘트의 제조 방식에는 습식과 건식이 있으며, 과거에는 습식이 주류를 이루었다. 이 방식은 원료를 분쇄할 때 적당량의 물을 가하여 분쇄, 혼합하여 슬러리로 한 후 큰 탱크에 넣어서 저장하여 성분 조정을 행한 후 물의 일부를 여과하고 킬른으로 보내는 것이다. 그러나 습식은 품질의 안정화는 기할 수 있지만 수분의 증발을 위해서 다량의 열을 필요로 하기 때문에 연료의 소모가 크다. 현재에는 물을 전혀 사용하지 않고 원료를 분쇄, 혼합하는 건식으로 거의 바뀌었다.

이외에도 원료의 소성방법은 에너지 절약 측면에서 여러가지 검토되어 왔다. 수십년 전 만해도 로터리 킬른 (Rotary Kiln) 만으로 900°C 이하에서 행하여지는 석회석과 점토의 열분해와 900°C 이상에서 행해지는 분해 생성물의 고상반응과에 필요한 전열량을 능률이 낮은 연소가스와의 열교환에 따라 수열하고 있었다. 그 후 기술발전에 따라 SP (Suspension Preheater) 킬른을 채용함에 따라 상당히 열효율이 좋은 사이클론식 프리히터로 킬른에서 연소가스를 유도, 열분해(흡열 반응)의 약 40%를 종료시키고 로타리 킬른내에 보내 넣기 때문에 필요열량은 60%로 줄게 되어 킬른의 소성효율을 현저히 높이는 것이 가능해 졌다. 이 프리히터에 있어 열분해를 더욱 촉진시키기 위해서 프리히터중에 별도의 열원이나 소성로를 마련한 것이 NSP (New Suspension Preheater)이다.

포틀랜드 시멘트의 제조는 원료공정, 소성공정, 제품화공정의 3공정으로 대별할 수 있다. 그림 1에 그 개요를 나타냈다.

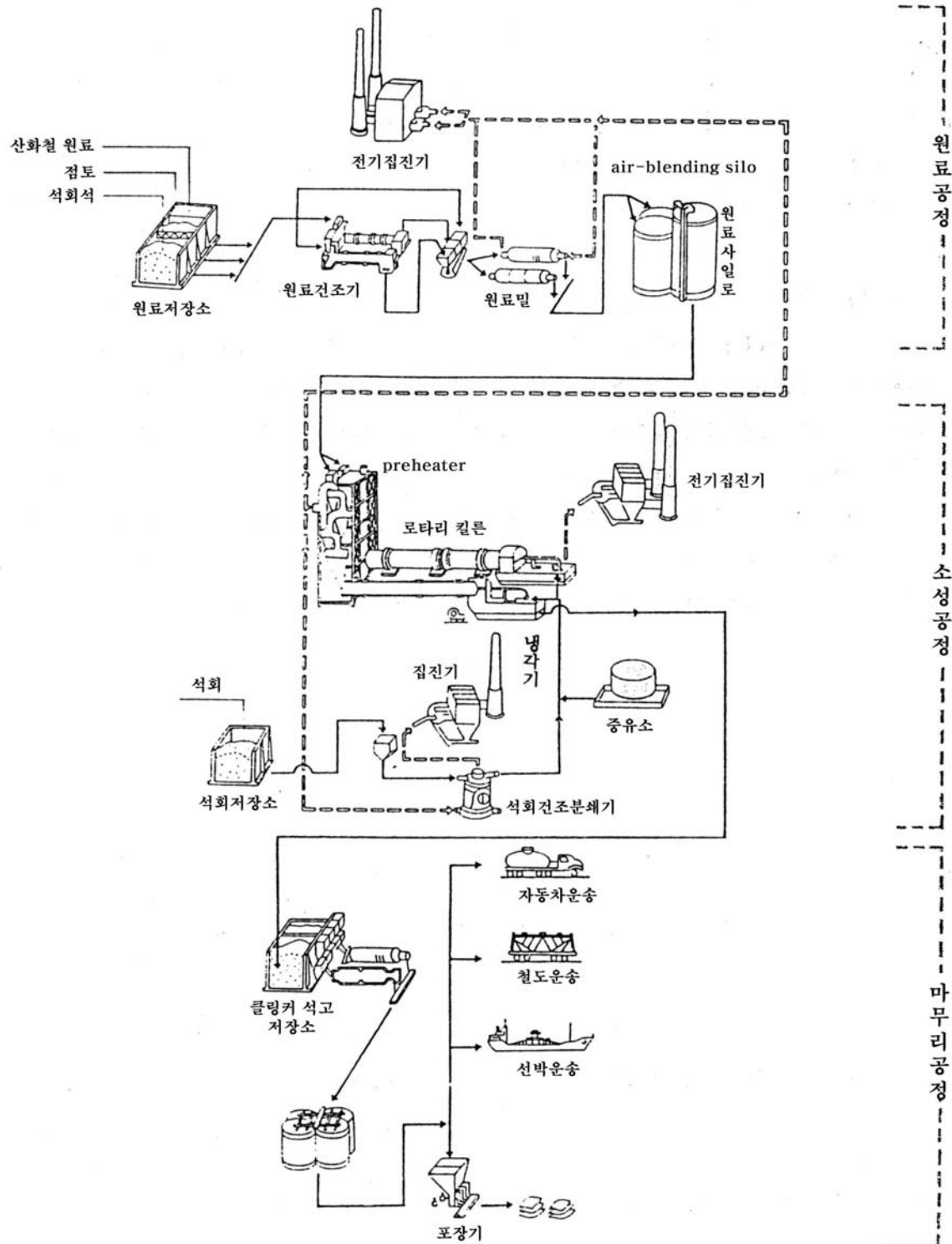


그림 1. 포틀랜드 시멘트의 제조공정

우선 원료공정은 석회석, 점토, 규석, 산화철 원료 등을 건조한 후 적당량을 비율로 배합, 원료밀로 미분쇄하고 혼합사일로중에서 균일하게 혼합될 때 까지의 공정이다. 다음 소성공정은 원료배합물을 프리히터를 통하여 로타리킬른으로 공급하고 충분히 소성한 후 냉각하여 시멘트 클링커로 할 때 까지의 공정이다.

최종적으로 제품화공정은 클링커에 적당량의 석고를 가하여 제품밀로 미분쇄하여 제품으로 하는 공정이다.

3. 원료공정

석회석의 채굴은 대부분의 경우 계단식 노천광산으로 되어 있다. 착암기로 석회석의 채굴면에 구멍을 뚫고 폭약을 넣어 폭발시켜서 대량으로 깎아내어 폐이로더 등으로 조분쇄기의 입구까지 이동하여 죠 크러셔(Jaw Crusher), 자이로토리 크러셔 (Gyratory Crusher) 등에 따라 1차 분쇄된다. 다음으로 햄머 크러셔 (Hammer Crusher) 나 임팩트 크러셔 (Impact Crusher) 등에 의해, 2차 파쇄, 3차 파쇄가 행해지고 거의 25mm 이하의 크기가 되면 이 파쇄물이 공장으로 운반되어, 시멘트 원료로 된다. 그림 2에 개요도를 나타내었다. 점토는 석회석과 비교하면 사용량이 적기 때문에 채굴방법이 다를 수 있으나 유사한 경우가 대부분이다.

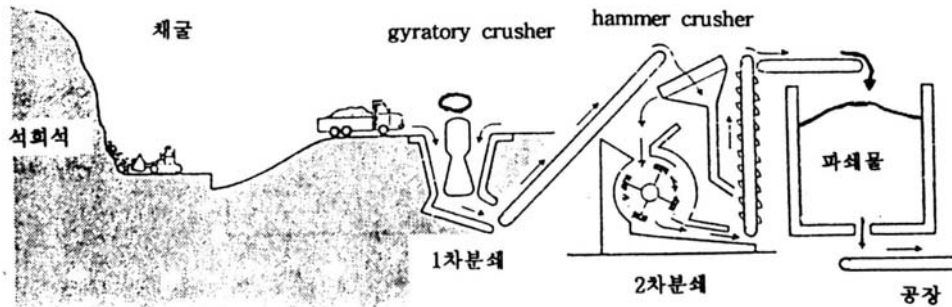


그림 2. 석회석의 채굴과 파쇄

공장에서의 미분쇄는 주로 그림 3에 나타난 강제의 원통형 튜브밀이 이용되어 지고 있다. 원통의 길이가 짧은 것을 볼밀, 긴것을 튜브밀이라고 한다. 모두 크고, 작은 여러가지 볼이 들어 있고 원통이 회전하면 볼과 동시에 충격과 마모에 따라 미분쇄가 행해진다. 밀의 분쇄능력 대 설비비는 대형화할 수록 감소하기 때문에 대용량으로 가는 추세이다. 밀내의 볼의 배열은 입구에서 출구로 감에 따라서 직경이 순차적으로 작게 되도록 한다. 큰 볼이 출구쪽으로 치우치는 것을 막기위하여 밀내에 칸 막음을 하는 경우가 많다.

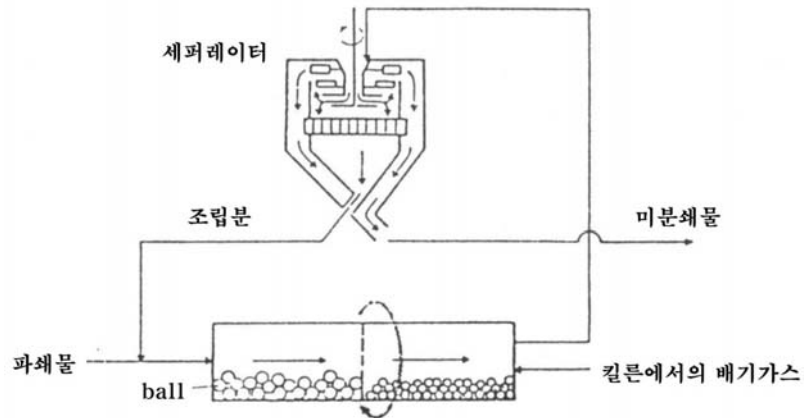


그림 3. 원료밀의 분쇄물의 흐름

그외에 시멘트공장에서 잘 사용되어지고 있는 밀로 수직 롤러밀이 있다. 그 대표적인 것을 그림 4에 나타내었다. 수직밀의 하부에 있는 회전테이블의 중앙에 원료는 놓이게 되고 원심력에 의해 밖으로 밀려 테이블과 롤러와의 사이에서 분쇄되고 건조되면서 상부의 분급기로 빨리 올라가 배기와 함께 밖으로 나온다. 미분쇄물은 재차 테이블로 떨어져 미분쇄된다. 시멘트공장에서는 이 롤러밀을 원료만이 아니고 연료용 석탄의 건조와 미분쇄에 사용하는 경우도 많다. 일반적으로 석회석과 점토는 원료 드라이어에서 충분히 건조되기 때문에 정확히 계량, 배합된다. 그래서 원료밀에서는 혼합과 미분쇄가 동시에 행하여진다.

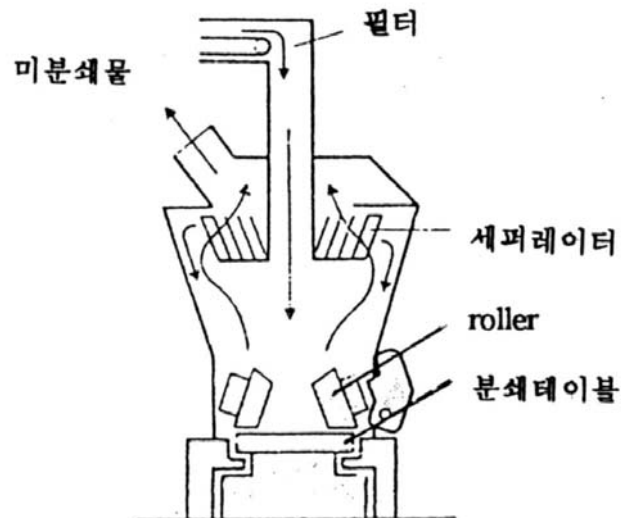


그림 4. 수직 롤러밀

효율이 좋은 분쇄를 하기 위해서는 에어 세퍼레이터 (air separator)에서 미

분쇄부분을 분리한 후 재분쇄하는 방법도 취하고 있다. 미분쇄된 원료배합물은 혼합(Air Blending) 사이로 보내지고 여기에서 균일하게 혼합된다.

4. 소성공정

대부분의 시멘트 공장이 NSP킬른을 이용하여 원료를 소성하고 있다. 그 이전의 시멘트는 로타리 킬른만으로 소성되고 있었지만 이 방식은 열 가스가 원료의 상면에서 열교환하는 것만으로 대부분의 열을 통과하여 버리기 때문에 열효율은 상당히 낮았었다. 킬른공정에서는 로타리 킬른 앞에 사이클론을 배열, 연결한 것으로 원료배합물의 미분체는 이들 사이클론을 순차적으로 통과하면서 내려오고 역방향으로 올라가는 킬른의 배기가스와 열교환하여 850℃정도까지 예열되면서 킬른에 들어간다. 따라서 모든 점토와 석회석의 일부는 프리히터중에서 열분해하여 킬른에 들어오기 때문에 열효율은 현저히 향상된다. 즉 열분해는 흡열반응이고 이것을 킬른내로 보내면 온도가 올라가기 어려워 열소비가 현저하게 크게 되기 때문이다. 로타리 킬른의 소성능력은 직경과 길이에 따라서 거의 결정되며 그것에 따라서 프리히터와 쿨러가 설계되어진다. 최근 시멘트공장에서는 합리화에 의해 근대화와 대형화가 적극적으로 진행되었으며, 킬른도 대형화하여 직경 3.5~6m 길이 55~100m 정도로 되며 2.7~3.7rpm으로 회전하고 있다..

SP킬른에서는 프리히터의 킬른측 입구에서 들어가는 배기가스의 온도가 900~1000℃정도 되지만 석회석의 탈탄산율은 40% 정도로 그친다. 그러나 최근에는 대부분의 회사에서 NSP를 사용하고 있는데, 이것은 프리히터와 킬른사이에 별도의 열원을 사용하여 킬른으로 보내지는 원료의 탈탄산율을 90% 정도까지 높인 것이다. 그림 5에 로타리 킬른의 온도분포의 일례를 나타내었다.

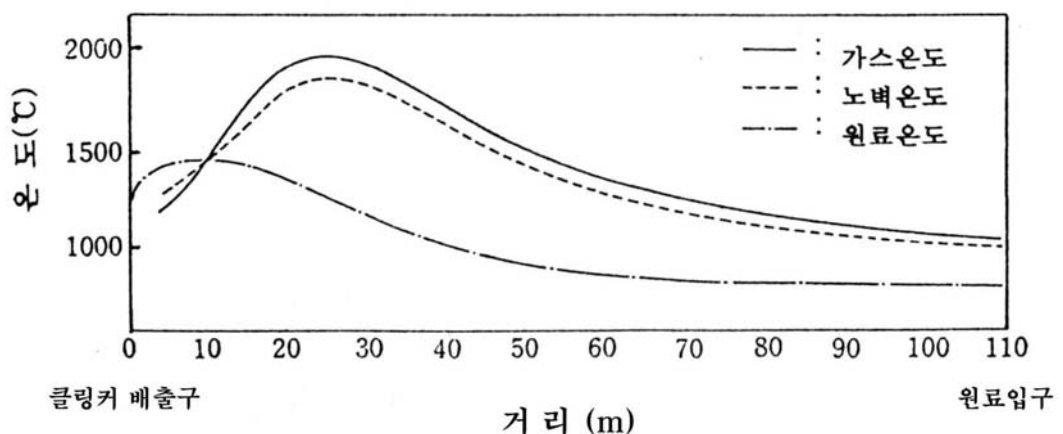


그림5. 로타리 킬른내의 온도분포

원료가 프리히터에서 킬른에 들어가면 열분해 반응은 거의 완료되기 때문에 킬른내의 고상반응과 소결반응을 위해서 원료에 주는 열량은 900~1450°C까지 원료의 온도를 올리기에 필요한 것이다. 킬른 출구의 약 10m앞에서 반응생성물의 온도는 약 1450°C가 되어 충분히 소결되어 직경 1cm 정도 크기의 둥근 괴상으로 되어 1200°C 정도의 온도로 킬른 출구로 나와 즉시 냉각장치로 들어간다. 이것이 시멘트 클링커이다. 이 클링커는 가능한 한 급냉각하여야만 결정전이를 방지할 수 있으며 냉각기에는 햄머가 붙어 있어 크기가 지나치게 큰 것을 일정한 크기로 만들어 준다. 냉각기에서 배출되는 클링커의 온도는 60~80°C의 것이 이상적이다.

5. 제품화공정

냉각기에서 나온 시멘트 클링커는 분쇄공정에서 석고를 3~5% 첨가하여 미분쇄되고 입경 3~30 μ m의 미립자의 포틀랜드 시멘트로 된다. 만들어진 시멘트는 일단 사이로에 저장되고 검사한 후 출하된다. 공장에서 출하되는 시멘트의 대부분은 비포장 상태로 선박, 화차, 탱크로리 등으로 운반되어 지고 일부는 지대포장으로 출하된다.

전술한 바와 같이 시멘트의 제조기술은 현재 상당한 속도로 급진전하고 있고 자동화의 속도도 빠르게 진전되어 대부분의 공정이 필요한 최소한의 인원으로 운영되어지고 있다.

또한 최근의 환경문제가 심각하게 대두되어 이에 대한 대책으로서 시멘트공장에서는 분진, 소음, 가스, 진동, 배수 등에 대한 문제점들은 설비를 충분히 보완하여 대부분 해소하였으며, 특히 분진에 대해서는 각종 집진기를 설치하여 제거, 재활용하고 있으며, SO_x에 대해서도 킬른이 탈황장치의 역할을 하기 때문에 그다지 문제가 되지 않는다.