

환경문제 해결을 위한 일본 시멘트 산업의 노력

Contribution of Japanese Cement Industry towards Addressing Environmental Issues



이종열*
Jong-Ryul Lee



전병용**
Byung-Yong Jun



김원석***
Won-Seok Kim

1. 서론

시멘트는 국가의 기반이 되는 중요한 물적 자원이다. 시멘트 산업은 한 지역에 한정된 국지적 산업에서, 생산량 증가와 대규모 유통 구조의 개선으로 전 세계적인 산업으로 변모하였다. 시멘트 생산에 사용되는 에너지는 시멘트 생산량 증가와 에너지 절감 기술 개발로 현저하게 감소하였다. 최근에는 환경에 대한 관심의 증가로 시멘트 업계에 대한 환경부하 저감 노력이 계속적으로 요구되고 있다. 시멘트 공장에서 폐기물과 부산물을 활용하는 것이 에너지 절감과 환경부하 저감을 위한 효과적 수단으로 확인되었고, 이를 위한 다양한 기술 개발도 이루어 졌다. 일본 시멘트 업계는 새로운 폐기물 재활용 기술을 개발하여 에너지 소비량을 줄일 수 있었고, 폐기물 재활용량을 증가시킬 수 있었다. 본 고에서는 일본 시멘트 산업의 환경문제 해결을 위한 대표적인 폐기물 재활용 기술에 대해 살펴보기로 한다.

2. 시멘트 생산 방식과 단위에너지 소비량의 변화

시멘트 산업은 다량의 에너지를 소비하는 산업으로 생산비 절감과 에너지 저감 노력이 계속되어 왔다. <그림 1>에 나타낸 바와 같이 1990년대까지 개발된 여러 형태의 소성 공정은 단위 에너지 소비량의 저감과 생산량 증가에 크게 기여하였다. 소성 공정은 2000년대 이후 NSP 형태가 약 90%, 나머지가 SP 형태로 이루어져 있다. 이 기간에 연료가 기름에서 석탄으로 바뀌었으며 폐기물 연료의 사용량도 증가하였다. 전력비의 대부분을 차지하고 있는 분쇄 공정은 볼밀(ball mill)의 개선, 롤러밀(roller mill)의 개발, 고효율 분급기술개발 등을 통해 전력비를 감소시킬 수 있

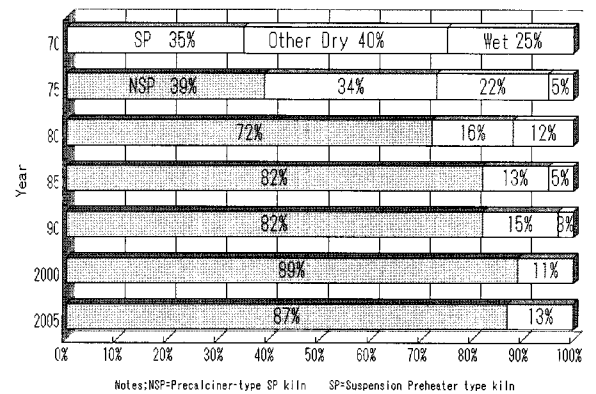


그림 1. 킬른 형태에 의한 생산 비율

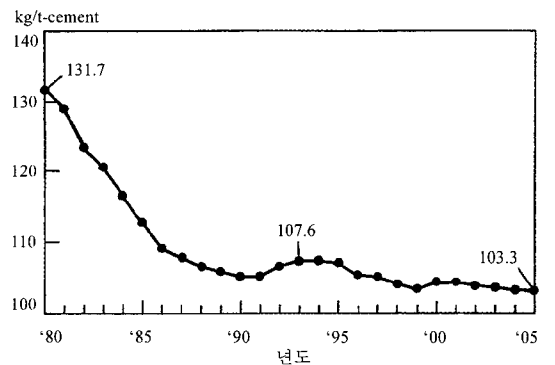


그림 2. 열 원단위(석탄량으로 환산)

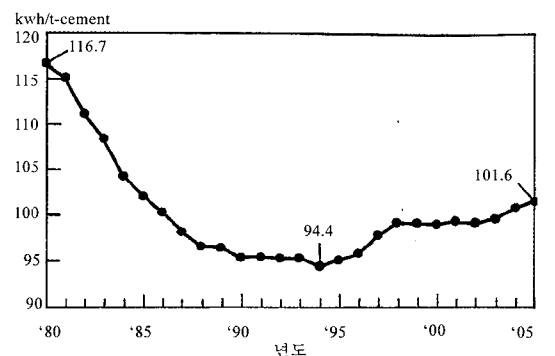


그림 3. 전력 원단위

* 정희원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 소장
jrlee@ssrc.ssy.co.kr

** 쌍용기술연구소 시멘트연구실 실장

*** 쌍용기술연구소 시멘트연구실 주임연구원

었다. 1990년대 까지 소성 및 분쇄 공정의 개발이 적극적으로 이루어져 <그림 2 ~ 3>에 나타난 바와 같이 시멘트 생산시 열 원단위와 전력 원단위가 감소하였다. 1990년 이후 일본 시멘트 산업의 열 원단위의 감소는 정체되어 있지만, 이는 세계에서 최초로 낮은 수준을 나타내고 있다. 1990년대 말 전력 원단위가 점진적으로 상승하는 것은 폐기물과 부산물의 사용 증가와 특수 시멘트 생산량 증가에 기인한다.

3. 폐기물과 부산물의 사용 현황

3.1 재활용 현황

일본 시멘트 산업은 <표 1>에 나타낸 바와 같이 다양한 종류의 폐기물과 부산물을 원료 대체, 열 에너지원 그리고 첨가제로 사용하여 연간 2,700 ~ 2,900만톤을 재활용 하고 있다. 대부분 고로슬래그, 석탄회, 부산(副産)석고가 재활용 되고 있으며, 최근 몇 년 사이에 분진, 슬러지, 건설 폐토사, 폐플라스틱, 폐유의 사용량이 증가되었다. 통상 산업성 위원회는 오는 2010년 까지 폐기물 및 부산물 사용량을 시멘트 1톤당 400 kg(400 kg/t-cement)정도로 증가시키겠다고 발표하였다. 일본 시멘트 산업의 폐기물 사용 원단위는 <그림 4>에 나타난 바와 같이 2000년도 332 kg/t-cement에서 매년 증가하여 2004년도에 400 kg/t-cement를 달성하였다.

3.2 시멘트 제조 공정

시멘트 제조 공정에서 폐기물과 부산물은 <그림 5>의 제조 공정 중 각 공정의 특성에 맞게 사용된다. 원료밀 분쇄 공정은 시멘트의 원료 조성을 정확하게 조정하고, 다량의 폐기물과 부산물이 사용되더라도 시멘트 품질을 일정하게 유지하도록 하는

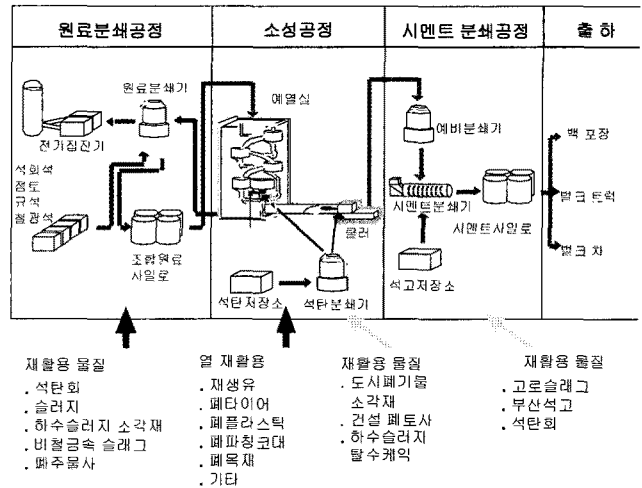


그림 5. 시멘트 제조 공정과 재활용 자원

폐기물 및 부산물에 의한 천연원료 대체할을 한다(그림 6). 따라서 석탄회, 정수슬러지, 하수슬러지 소각회, 비철금속 슬래그, 폐주물사 등은 <그림 6>에 나타낸 바와 같이 시멘트 제조 시 사용되는 천연원료의 주성분인 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃를 함유하고 있어 원료분쇄기에 투입되어 천연원료를 대체할 수 있는 자원으로 사용된다.

소성 공정에서는 열원대체로 폐유, 폐타이어, 폐플라스틱, 폐목재가 사용된다. 열원대체를 위한 폐기물의 투입 위치는 폐기물의 크기, 취급 설비, 연소 특성을 고려하여, 예열실(preheater), 킬른 후단(원료 투입구 쪽, 이하 "킬른 inlet"), 킬른 전단(메인버너쪽)의 세 부분 중 한 부분으로 투입된다. 폐타이어와 같이 크기가

표 1. 시멘트 산업에서의 폐기물과 부산물 사용 실적(단위: 천톤)

| 구분 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 고로슬래그 | 11,915 | 10,474 | 10,173 | 9,231 | 9,214 |
| 석탄재 | 5,822 | 6,320 | 6,429 | 6,937 | 7,185 |
| 부산석고 | 2,568 | 2,556 | 2,530 | 2,572 | 2,707 |
| 오니, 슬러지 | 2,235 | 2,286 | 2,413 | 2,649 | 2,526 |
| 건설발생토 | - | 269 | 629 | 1,692 | 2,097 |
| 비철광재 | 1,236 | 1,039 | 1,143 | 1,305 | 1,318 |
| 연소재, 분진, 더스트 | 943 | 874 | 953 | 1,110 | 1,189 |
| 주물사 | 492 | 507 | 565 | 607 | 601 |
| 철강슬래그 | 935 | 803 | 577 | 465 | 467 |
| 톱밥 | 20 | 149 | 271 | 305 | 340 |
| 폐플라스틱 | 171 | 211 | 255 | 283 | 302 |
| 경석 | 574 | 522 | 390 | 297 | 280 |
| 재생유 | 204 | 252 | 238 | 236 | 228 |
| 폐유 | 149 | 100 | 173 | 214 | 219 |
| 폐타이어 | 284 | 253 | 230 | 221 | 194 |
| 폐백토 | 82 | 97 | 97 | 116 | 173 |
| 동물성잔재물 | 2 | 91 | 122 | 90 | 85 |
| 기타 | 428 | 435 | 378 | 452 | 468 |
| 총계 | 28,061 | 27,238 | 27,566 | 28,782 | 29,593 |

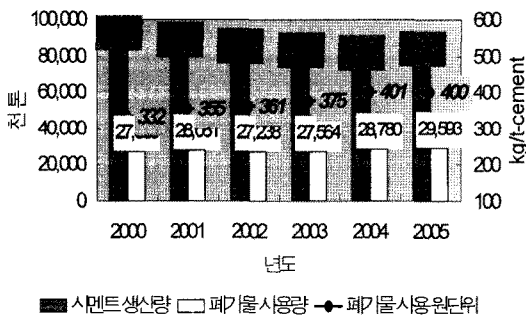


그림 4. 일본의 년도별 시멘트 생산량, 폐기물 사용량 및 폐기물 사용 원단위

| 천연원료의 화학성분 | 화학성분 | 보통 포틀랜드 시멘트 | 폐기물 및 부산물 | | |
|------------|--------------------------------|-------------|-----------|-------|-------|
| | | | 재 | 정수슬러지 | 하수슬러지 |
| 석회석 | CaO | 64 ~ 65% | 23.0% | 13.9% | 10.1% |
| 점토, 규석 | SiO ₂ | 20 ~ 21% | 27.3% | 33.0% | 30.7% |
| | Al ₂ O ₃ | 5% | 14.3% | 16.2% | 19.5% |
| 철광석 | Fe ₂ O ₃ | 3% | 6.2% | 4.8% | 5.2% |

| 구 분 | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ |
|-----|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 석회석 | 47-55% | < 4% | < 2% | < 2% |
| 점토 | < 5% | 45-78% | 10-26% | 3-9% |
| 규석 | < 2% | 77-96% | 2-10% | < 5% |
| 철질 | - | - | - | 40-90% |

그림 6. 폐기물 및 부산물에 의한 천연원료 대체

크거나, 재(ash)함량이 많은 폐기물은 대부분 킬른 inlet에 투입된다. 시멘트 분쇄 공정에서는 부산석고가 클링커와 함께 분쇄되며, 혼합시멘트 제조시에는 고로슬래그와 플라이 애쉬가 첨가제로 사용된다.

4. 순환자원 사용량 증대를 위한 기술

4.1 염소 바이패스(Cl bypass) 시스템

〈그림 7〉에 휘발 성분 증가에 따른 킬른 안정 운전 저해 메커니즘을 나타내었다. 염소, 알칼리, 황 등의 휘발성분은 킬른 내의 고온부에서 휘발과 저온부에서 응축을 반복함에 따라, 킬른-예열실내에서 순환되고 농축된다. 순환하는 휘발 성분의 증가는 저온점 물질의 형성에 의한 코팅 문제를 유발하여 킬른의 안정 운전을 저해하게 된다. 또한, 염소 농도의 변화는 예열실

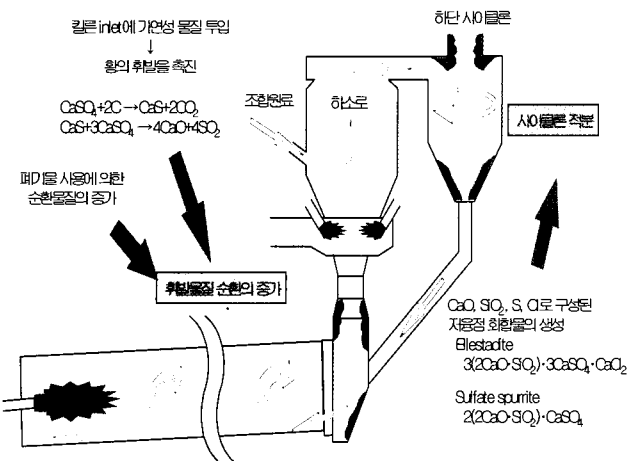


그림 7. 휘발 성분 증가에 따른 킬른 안정 운전 저해 메커니즘

코팅 생성에 가장 민감하게 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 최근의 연구에 따르면, 황의 순환이 코팅의 부착, 성장을 유도하고, 킬른 inlet에 폐타이어 등의 가연성 물질을 투입하게 되면 황의 순환이 촉진되는 것으로 알려져 있다. 특히, 염화물을 함유하고 있는 폐기물을 다량 사용하는 경우 용융 온도가 낮은 염소 화합물들이 형성되고 농축되어 코팅에 의한 원료 적분 문제가 발생할 가능성이 있다.

이것에 초점을 맞추어, 배가스의 일부를 생산공정에서 빼내어 염소 화합물을 뽑아내는 기술, 즉 “염소

바이패스 시스템”이 개발되었다. 염소 바이패스 시스템이 적용됨으로써 원료 코팅 문제는 해결되었고 킬른의 안정적인 운전이 가능해 졌다. 〈그림 8〉에 나타난 바와 같이 염소 바이패스 시스템은 탐침(probe), 조립자 분리 사이클론, 간접 냉각기, 백필터로 구성되어 있다. 탐침(probe)은 킬른 inlet부분에서 일정량의 가스를 뽑아내는 역할을 하며, 탐침에서 추출된 가스는 간접 냉각기에 의해 염소 화합물이 응축되는 온도로 즉시 냉각된다. 염소함량이 낮은 조립자 더스트는 조립자 분리 사이클론에서 회수되어 다시 킬른으로 투입된다. 염소함량이 높은 분말(K-powder)은 백필터에 포집된다. 분말(K-powder)의 주 화합물은 염화칼륨(KCl)으로, 일본은 염화칼륨의 수급을 수입에 의존하고 있어 분말에서 염화칼륨을 회수하는 기술 개발이 필요하였으며, 2004년에 세계 처음으로 폐기물로부터 염화칼륨을 회수하는 기술을 개발하였다. 〈그림 9〉에 나타나 있는 분말

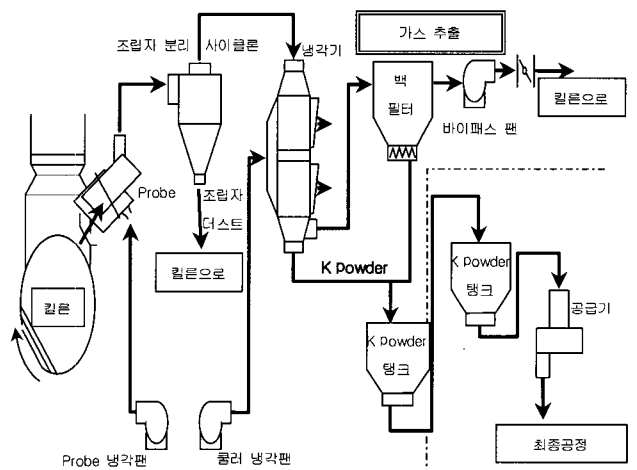


그림 8. 염소 바이패스 시스템의 흐름도

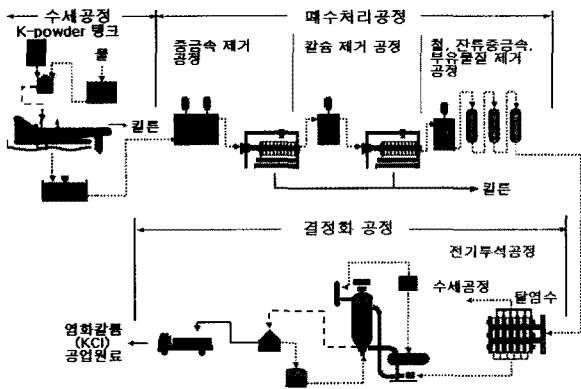


그림 9. 분말(K-powder)에서 KCl 회수 공정

표 2. 분말(K-powder)에서 회수되는 염화칼륨(KCl)의 품질기준과 실제 운전결과

| 항목 | 품질 기준 | 실제 운전 결과 |
|------------------|---------------|--------------|
| K ₂ O | 최소 57% | 60% |
| Ca | 1000 mg/kg 미만 | 100 mg/kg 미만 |
| SO ₄ | 1000 mg/kg 미만 | 100 mg/kg 미만 |
| 중금속 | 10 mg/kg 미만 | 0.2 mg/kg 미만 |

(K-powder)에서 염화칼륨을 회수하는 공정은 염소를 분리하기 위한 수세공정, 수세 후 여과 공정에서 발생하는 폐수중의 중금속 및 칼슘 제거 공정, 염화칼륨 농축 공정과 결정화 공정으로 구성되어 있다. <표 2>에 나타난 바와 같이 시멘트 공장의 실제 공정에서 분말(K-powder)로부터 회수된 염화칼륨은 품질 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

4.2 비산재 수세 시스템

대부분의 도시 쓰레기는 소각로에서 소각되고, 소각재는 매립장에 매립된다. 최근 매립장의 부족이 사회적 문제가 되었으며, 이에 따라 소각재를 이용하는 기술 개발이 필요하게 되었다. 이러한 사회적 요구에 따라 소각재를 시멘트 자원으로 사용하기 위해 비산재 수세 시스템, 예코 시멘트 시스템, AK 시스템의 세 가지 기술이 개발되었고, 이 기술들은 재활용 위주의 사회형성에 크게 기여하게 되었다(그림 10).

소각재를 시멘트 제조 원료로 사용하는 경우, 소각재에 함유되어 있는 염화물이 문제가 된다. 소각재는 바닥재(bottom ash)와 비산재(fly ash)로 분류된다. 바닥재의 염소 함량은 0.4 ~ 3%로 염소바이패스 시스템을 이용하면 바로 시멘트 원료로 사용할 수 있지만, 비산재는 염소 함량이 5 ~ 20%로 높아 직접 시멘트 원료로 사용할 수 없다. 이것을 시멘트 원료로 사용하기 위해서는 염소 성분을 제거하는 전처리 공정이 필요하다. 비산재에 함유되어 있는 염소 성분은 대부분 수용성이므로 수세 공

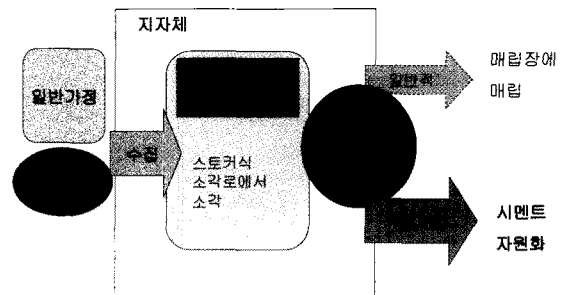


그림 10. 도시쓰레기 소각재의 시멘트 자원화 기술 개발

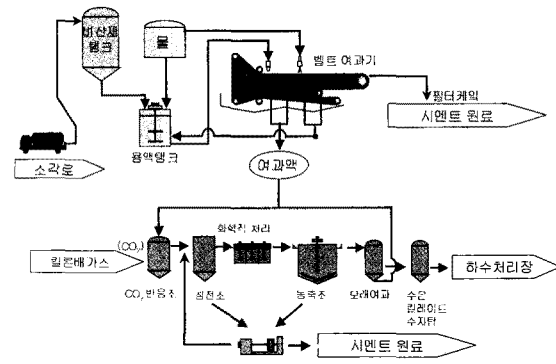


그림 11. 비산재 수세 공정

정으로 염소성분 제거가 가능하다. 일본에서 개발된 비산재 수세 시스템을 <그림 11>에 나타내었다. 비산재 수세 공정은 연속적인 탈수를 위해 슬러지의 고체-액체 분리 장치로 벨트 필터를 사용한다. 약 15%의 염소를 함유하고 있는 비산재가 수세 공정을 거치면 필터 케익(filter cake)의 염소 농도가 0.5%를 넘지 않으며, 염소 제거율은 97%가 된다. 수세 공정에서 발생하는 폐수는 킬른 배가스에 의한 중화, 킬레이트 용액에 의한 처리, 모래여과, 수은 킬레이트 수지 처리 공정을 거쳐 폐수배출 허용기준을 만족하도록 하여 하수도에 방류된다.

4.3 예코 시멘트

도시 쓰레기와 하수슬러지의 조성은 시멘트 원료의 점토 성분과 비슷하다. 도시 쓰레기와 하수슬러지를 시멘트 원료 중 점토 대체용으로 사용하기 위한 연구가 수행되었으며, 그 결과 예코 시멘트를 개발하게 되었다(사건 1). 예코 시멘트 제조 공정(그림 12)을 나타내었다. 소각로 바닥재는 불순물과 철 스크랩이 분리되기 전에 회전식 건조기에서 건조 후 석회석과 같은 다른 물질과 혼합 분쇄되어 공기 수송으로 원료를 균질화하는 사일로로 들어간다. 반면 플라이 애쉬는 공기 수송으로 원료를 균질화 하는 사일로로 직접 들어간다. 원료 균질화 사일로에서 일정 비율로 혼합된 원료는 로타리 킬른에 투입된다. 원료는 1,350°C 이상의 온도에서 소성되어 시멘트 반제품인 클링커가 된

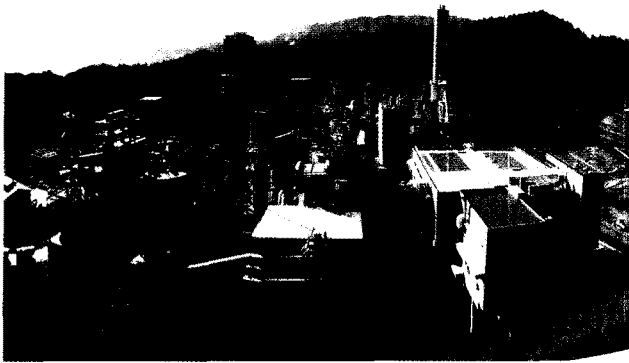


사진 1. 동경 타마(多摩) 에코시멘트 제조공장

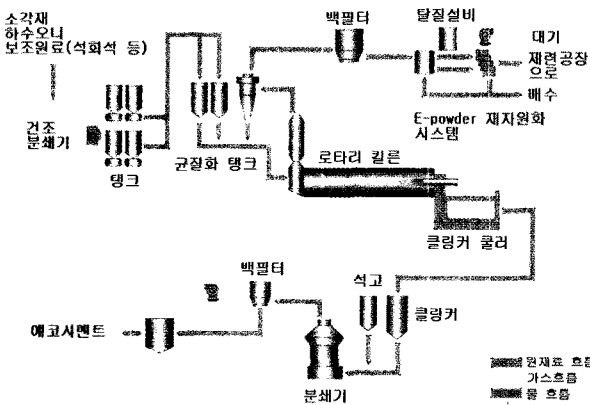


그림 12. 에코시멘트 제조과정

다. 마지막으로 클링커를 석고와 혼합 분쇄하면 에코 시멘트가 만들어 진다. <표 3>에 나타낸 바와 같이 에코 시멘트의 품질 기준은 SO₃와 염소함량을 제외하고는 보통 포틀랜드시멘트와 동일하다. 물리적 특성은 보통 포틀랜드 시멘트와 거의 같다. 덧붙여, 소성과정 배가스 중 염소화합물이 함유하고 있는 납, 아연, 구리와 같은 중금속은 <그림 13>에 나타낸 분말(E-powder) 재

표 3. 에코 시멘트의 품질 기준(JIS R 5214)

| 품질 | 종류 | 에코 시멘트 | | 보통 포틀랜드 시멘트 | |
|---------------------------|-------------------------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| | | 에코 시멘트 | 보통 포틀랜드 시멘트 | 에코 시멘트 | 보통 포틀랜드 시멘트 |
| 용결 | 비표면적 (cm ² /g) | 최소 2500 | 최소 2500 | 최소 2500 | 최소 2500 |
| | 초결 (시간:분) | 최소 1:00 | 최소 1:00 | 최소 1:00 | 최소 1:00 |
| | 종결 (시간:분) | 최소 10:00 | 최소 10:00 | 최소 10:00 | 최소 10:00 |
| 압축강도 (N/mm ²) | 3일 | 최소 12.5 | 최소 12.5 | 최소 12.5 | 최소 12.5 |
| | 7일 | 최소 22.5 | 최소 22.5 | 최소 22.5 | 최소 22.5 |
| | 28일 | 최소 42.5 | 최소 42.5 | 최소 42.5 | 최소 42.5 |
| | MgO | 최대 5.0 | 최대 5.0 | 최대 5.0 | 최대 5.0 |
| 화학조성 (%) | SO ₃ | 최대 4.5 | 최대 3.0 | 최대 3.0 | 최대 3.0 |
| | 강열감량 | 최대 3.0 | 최대 3.0 | 최대 3.0 | 최대 3.0 |
| 안정성 | 알칼리 함량(Na ₂ O eq.) | 최대 0.75 | 최대 0.75 | 최대 0.75 | 최대 0.75 |
| | 패드(Pad) 방법 | 양호 | 양호 | 양호 | 양호 |
| | 르샤틀리에 방법 | 최대 10 | 최대 10 | 최대 10 | 최대 10 |

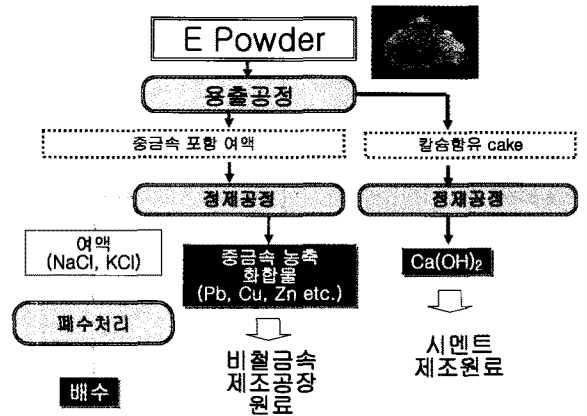


그림 13. E-powder 재 자원화 공정

자원화 공정을 통해 다시 회수된다. 에코 시멘트는 아래의 4가지 측면에서 보통 포틀랜드 시멘트와 차이가 있다.

- 1) 원료물질의 킬른 직접 투입에 따른 다이옥신의 즉각적인 제거
- 2) 냉각탑은 다이옥신 재생성을 방지
- 3) 염소 기화법에 의한 중금속 추출과 염화물의 제거
- 4) 중금속 염화물로부터 중금속의 회수

4.4 AK 시스템

비산재 수세 시스템과 에코 시멘트는 도시 쓰레기 소각시 발생하는 소각재를 시멘트 제조에 재활용 하는 기술이다. 요즘, 매립지의 부족 문제뿐만 아니라 다이옥신 문제로 소각로 건설이 쉽지 않다. 이러한 필요에 의해, 가정에서 발생하는 도시 쓰레기와 사업장에서 발생하는 일반 폐기물을 시멘트 공장에 직접 반입하여 처리 가능한 AK 시스템(applied kiln system)이 개발되었다. AK 시스템의 공정도를 <그림 14>에 나타내었다. 시멘트 공장에 직접 운반된 도시 쓰레기는 시멘트 킬른을 개조한 발효 킬른에서 호기성 발효를 하게 된다. 발효 후 냄새는 사라지고, 남은 물질은 재활용 물질이 되어 처리가 용이해 진다. 발효 된 재활용 물질은 자력 선별기에 의해 철 스크랩이 제거되고 30 ~ 40 mm 크기로 파쇄된다.

재활용 물질 중 플라스틱과 같은 가연성 물질은 효과적으로 클링커 소성시 대체 연료로 사용된다. 또한, 잔재는 대체 원료로 사용되어 클링커에 포함된다. <그림 15>에 나타낸 바와 같이 시멘트 킬른은 1,450℃의 고온으로 일반적인 도시 폐기물 소각로에서 발생하는 다이옥신이 생성되지 않는다. 또한 중금속은 시멘트 광물에 고정된다. AK 시스템의 개발로 도시 쓰레기 소각로나 최종 매립지는 필요하지 않게 되었으며, 재활용 위주의 사회 형성에 있어 새로운 처리 시스템으로 각광을 받고 있다.

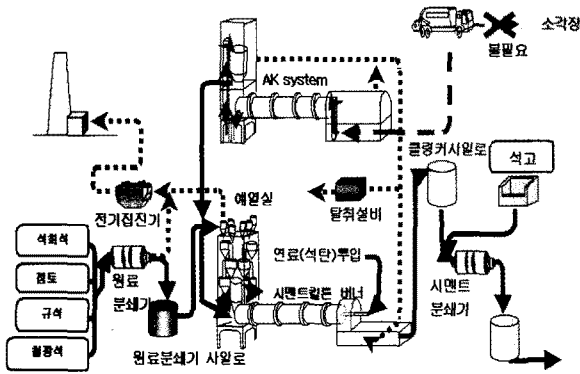


그림 14. 도시 쓰레기를 직접 시멘트 원료로 사용하는 AK 시스템의 공정도

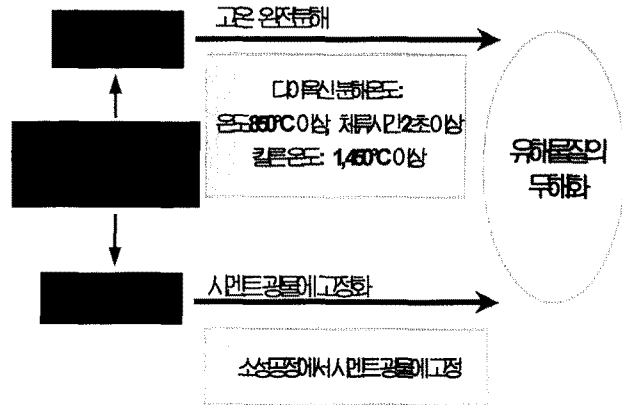


그림 15. 시멘트 제조공정을 통한 다이옥신과 중금속의 무해화

5. 결론

지금까지의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일본에서는 시멘트 생산에서 에너지 저감 기술이 개발되어 왔으며, 동시에 다양한 형태의 폐기물 재활용 기술로 발전되어 왔다.
- 2) 일본 시멘트 산업은 폐기물과 부산물을 시멘트 1톤당 평균 400 kg을 사용하고 있다.
- 3) 염소 바이패스 시스템으로 대표되는 처리 기술에 의해 염소 화합물을 함유한 도시쓰레기의 소각재는 시멘트 생산과정에 확대 사용되고 있다
- 4) 도시 폐기물을 사용하는 독특한 방법인 비산재 수세 시스템, 에코 시멘트 시스템, AK 시스템은 각 지역의 특성에 맞게 선택되어 적용되고 있다.

참고문헌

1. Japan Cement Association.
2. Japan Cement Association, "Cement Handbook", 1999/2006.
3. Japan Cement Association, "Japan's cement supply / demands situation in 2005 and its outlook for 2006", Cement concrete, No. 714, 2006, pp. 5 ~ 11.

* 본고는 2006년 11월 17일, "환경과 콘크리트 국제 심포지움"에서 발표된 "일본 태평양시멘트(주) 중앙연구소 토미타(富田六郎) 소장의 원고"를 발췌, 요약 정리한 것입니다.

특집제목 예고 및 원고 모집안내

학회지 편집위원회에서는 학회지 특집의 제목을 회원들에게 미리 알려으로써 필진의 다양성과 전문성을 확보하고, 더 많은 회원이 직접 참여할 수 있는 장으로 만들고자 합니다. 아래와 같이 2007년 5월호 특집제목을 알려드리오니 회원 여러분의 적극적인 참여를 부탁드립니다.

| 월 호 | 특집주제 | 특집주간 | 원고마감 |
|-------------|-------------------|--------------------------|---------|
| 2007년 05월 호 | 콘크리트 구조물의 기계화시공기술 | 김성욱(한국건설기술연구원 구조연구부 그룹장) | 02월 15일 |