

시멘트산업에서의 녹색기술

글 _ 권우택, 김영희, 김수룡
한국세라믹기술원 그린세라믹본부

1. 서론

에너지의 공급 및 사용과 관련된 지금까지의 트렌드가 지금과 같이 지속될 수는 없을 것이다. 시멘트산업이 지속가능한 사회발전 및 녹색성장에 대한 사회적 요구에 부응하기 위해서는 시멘트 제조과정에서 발생하는 막대한 이산화탄소 발생과 사용되는 자원을 최소화하는 기술 혁신이 필요하다.

시멘트 제조과정에서 배출되는 이산화탄소는 전 세계 인위적 배출량의 5%에 달한다. 2009년 12월 3일 워싱턴 DC와 브뤼셀에서 국제에너지기구(IEA)와 지속가능발전 시멘트 개발협회(WBCSD CSI)는 시멘트산업에서의 이산화탄소 감축을 위한 중장기 로드맵을 발표하였다. 본 로드맵은 2050년 까지 시멘트 제조과정에서 이산화탄소 배출량을 18% 감축하기 위한 세부적인 비전을 제시하고 있다. 시멘트 로드맵이 주는 주요 메시지는 지금까지 시멘트 산업에서 추진하여왔던 기술들이 유용하기는 하지만 사회적인 요구에 대응하기에는 충분하지 않다는 것이다. 본고에서는 시멘트로드맵에서 제시한 탄소배출 감축 기술을 소개하고, 시멘트 산업에서 추진되었던 대체연료 적용사례를 기술하겠다.

2. 탄소배출 감축기술

2.1. 탄소배출 감축수단

시멘트 산업에서의 탄소배출 감축수단은 시멘트공장에서의 열효율 및 에너지효율, 대체연료, 클링커 대체, 탄

소포집 및 저장으로 분류할 수 있다. 시멘트 로드맵에는 이러한 4가지 탄소배출 감축수단을 기반으로 2050년까지 시멘트 산업으로의 적용기술 및 이에 따른 탄소배출 감축목표를 연도별로 보여주고 있다

▶ 대체연료 : 시멘트 제조과정에서 탄소부하가 조금이라도 낮은 화석연료를 사용하고, 순환자원을 이용하여 제조한 대체연료와 biomass 연료 사용량을 증대하여 탄소배출을 감소하는 방법이다. 대체연료 사용은 현재 시멘트 산업에서 가장 적극적으로 추진하는 방법으로서, 시멘트 소성공정의 고온특성과 시멘트 재료의 유해물질 고정화 특성을 활용하여 산업체와 일상생활과정에서 발생하는 다양한 종류의 순환자원을 시멘트산업의 대체연료로 활용한다.

▶ 열효율 및 에너지 효율 : 시멘트 공장에서 현존하는 최신기술을 적용하고, 경제성이 있으면 열효율 및 에너지효율이 높은 고효율 설비로 개선하여 탄소배출을 감축하는 방법이다.

▶ 클링커 대체 : 탄소부하가 높은 클링커를 시멘트 성질을 갖는 저탄소 재료로 대체하는 방법이다. 잠재수경 특성을 철강산업 슬래그 및 화력발전소 애쉬를 클링커 첨가제로 활용하거나 클링커 소성온도를 낮추는 저온소성 클링커를 제조하여 탄소부하가 적은 시멘트를 생산할 수 있다.

▶ 탄소포집 및 저장 : 대기로 배출되기 전에 이산화탄소를 포집한 후 안전하게 저장하여 밖으로 새어나오지 못하게 하는 기술

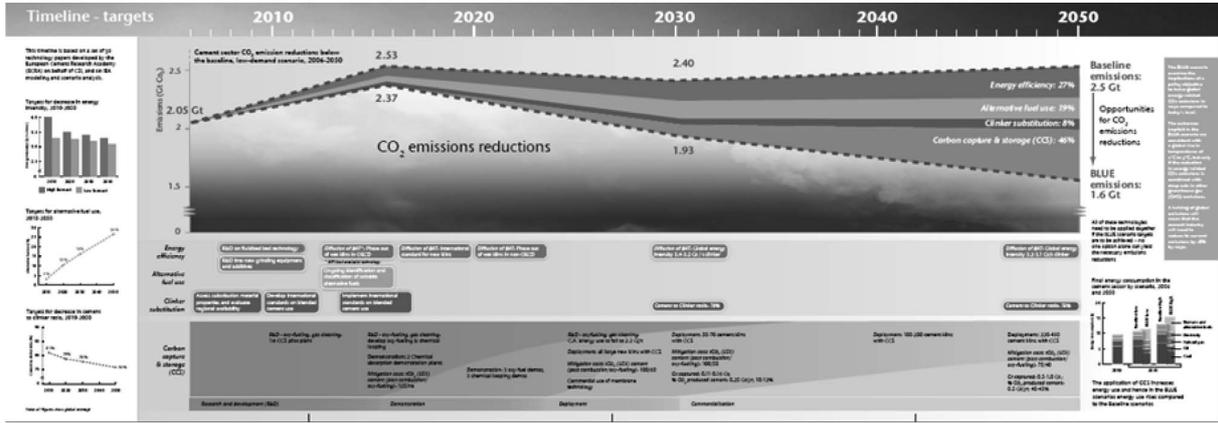


Fig. 1. 시멘트산업 탄소감축 로드맵 (적용기술 및 탄소배출 감축목표).

2.2. 시멘트 제조 개요

시멘트는 물, 골재와 섞어서 콘크리트를 만드는 인공적인 분말이다. 제조공정은 크게 클링커 소성을 위한 전처리 과정으로써 원료공정, 소성공정, 이 클링커를 기타 광물과 함께 분쇄하여 시멘트 분말을 제조하는 제품화 단계로 구분 할 수 있다. Fig. 2에 시멘트 제조공정과 현재 재활용되고 있는 대표적인 순환자원의 종류를 나타내었다.

제조공정을 좀더 세부적으로 분류하면 원석의 채광,

석회석 조쇄, 균질화 및 원료분쇄, 예열, 하소, 클링커 생산, 냉각과 저장, 혼합, 시멘트 분쇄, 사이로 저장으로 분류할 수 있다.

▶ 원석의 채광 : 자연적으로 생성된 석회석, 이회석 같은 석회질 광물이 탄산칼슘(CaCO₃)을 공급하며 이 광물들은 대개 시멘트 공장 인근에 위치한 광산에서 채굴된다. 아주 작은 양의 보정용 재료 즉, 철광석, 보크사이트, 철암, 점토 또는 모래 등을 통해 추가적인 Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂를 공급하여 공정 및 품질이 요구하는 로믹

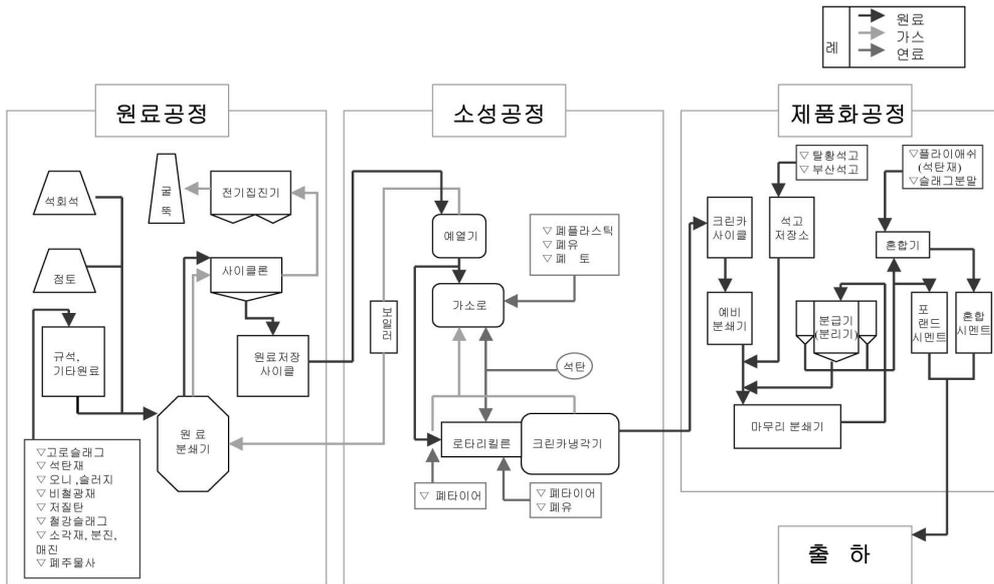


Fig. 2. 시멘트 제조공정.

스의 화학조성을 맞추게 된다.

▶ 석회석 조쇄 : 원석은 채굴 후 1차/2차 조쇄기로 이송되어 10 cm 크기로 부서진다.

▶ 균질화 및 원료분쇄 : 서로 다른 원석(Raw material)들이 잘 혼합되어, 필요한 화학조성을 유지하도록 균질화가 필요하며, 조쇄된 원석들은 함께 분쇄되어 분말 원료(Raw meal)가 된다. 시멘트의 고품질 유지를 위해서는 원석과 분말원료의 화학조성을 세심하게 모니터링하고 조정하여야 한다.

▶ 예열 : 예열기는 원료가 통과하는 사이클론이 수직적, 연속적으로 연결된 설비로써 이곳에서 원료는 킬른에서 배출된 뜨거운 가스와 접촉하여 열교환을 통해 소성로에 들어가기 전에 예열되어, 결국 필요한 화학반응이 좀더 빠르고 효율적으로 이루어지도록 한다. 싸이클론의 단수(段數)는 원석의 수분에 따라, 3~6단으로 이루어지는데 단수가 높을수록 열 교환량이 많아진다.

▶ 하소 : 하소는 석회석이 석회로 분해 되는 과정에서 썬 반응의 일정 부분이 하소로 (Precalciner)에서 일어난다. 하소로는 소성로 바로 위의 예열실 가장 아래 부분에 있는 연소실이다. 석회석의 화학적 분해에 의해 이 부분에서 총 CO₂ 배출량의 60~65% 정도가 배출되며, 나머지는 연료의 연소에 의해 발생된다. 연료에 있어서도, 총 연료 사용량의 65% 정도가 하소로에서 사용된다.

▶ 클링커 생산 : 하소된 분말원료가 소성로에 들어감, 연료의 직접 연소에 의해 소성로 내부 온도가 1,450 °C에 이르게 한다. 소성로가 3~5 rpm으로 회전함에 따라

소성로 내의 원료는 미끄러지고 뒤범벅되면서 점점 뜨거운 화염 쪽으로 이동한다. 강력한 열로 인해 원료에 화학적 물리적 반응이 일어나고 부분적으로 녹아서 클링커가 된다.

▶ 냉각과 저장 : 소성로부터 뜨거운 클링커가 그레이트 쿨러로 떨어진 후, 이 클링커는 연소용 공기를 이용하여 냉각된다. 이를 통해 시스템 내에서의 에너지 손실을 최소화할 수 있다. 일반적으로 시멘트 공장은 클링커 저장소를 가지고 있으며 클링커 자체로도 판매가 이루어진다.

▶ 혼합 : 클링커는 기타 광물 성분과 혼합되는데, 모든 종류의 시멘트는 4~5%의 석고를 첨가하여 응결시간을 조절한다. 상당한 양의 슬래그, 석탄회, 석회석 또는 기타 재료들로 클링커를 대체한 경우 이 제품을 혼합시멘트라 부른다.

▶ 시멘트 분쇄 : 냉각된 클링커와 석고 혼합물은 회색을 띄는 분말 형태로 분쇄되어 OPC(Ordinary Portland Cement, 보통 시멘트)가 만들어 지며, 다른 재료와 함께 분쇄되면 혼합시멘트가 된다. 전통적으로는 볼밀이 많이 사용되고 있는데 최근에는 롤러 프레스나 롤러밀 등 좀더 효율이 높은 설비들이 개발되어 많은 현대식 공장들에 사용되고 있다.

▶ 사이로 저장 : 최종제품은 균일한 상태로 시멘트 사이로에 저장된 후, 포장 공정으로 보내지거나 또는 BCT를 이용하여 출하된다.

시멘트를 재료적인 측면에서 보면 Fig. 3에서 보는 바

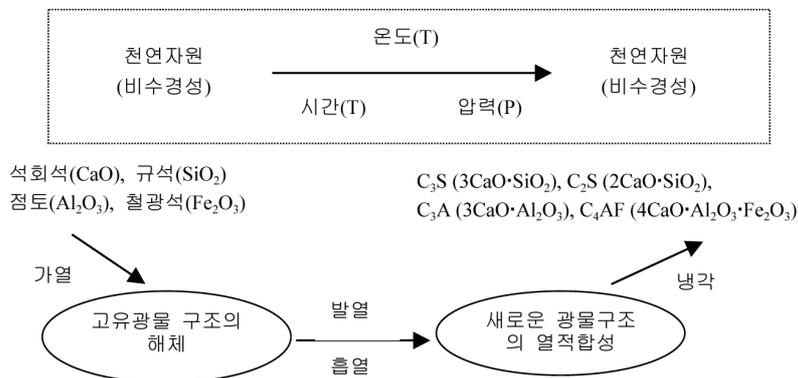


Fig. 3. 시멘트 제조공정의 재료학적 이해.

와 같이 물과 결합하지 않는 성질(비수경성)의 석회석, 점토 등 천연원료가 1450°C 이상의 고온 분위기 하에서 각 원료중의 광물이 분해 및 상호 결합하여 수경성을 갖는 새로운 수화광물이 생성되는 것이다. 이 반응은 상압 하에서 일정시간이 경과되어야 일어나므로 온도, 압력, 체류시간의 함수이나, 천연광물 내에 존재하는 광물구조의 다양성으로 인해 대단히 복잡한 메커니즘을 거친다.

2.3. 대체연료 활용

기존의 연료(주로 유연탄)를 페타이어와 같은 가연성 연료로 대체함으로써 탄소배출 원단위를 낮출 수 있다. 시멘트산업에서 이러한 대체연료를 효율적으로 사용할 수 있는 이유는 첫째, 대체연료의 에너지 성분은 화석연료의 대응으로 사용되고 둘째, 연소 후에 남은 무기성분은 클링커와 일체화된다. 이러한 순환자원의 재활용에 의한 대체연료는 이산화탄소 배출량에서 제외되기 때문에 탄소배출 원단위가 감소하게 된다. 전과정 평가(LCA)에 따른 대체연료의 시멘트 산업활용효과는 (a) 사회의 일상과정에서 배출되는 대체연료가 폐기물로 간주되어 소각되어 버리면 소각공정에 추가적인 화석연료가 필요하며, 그 자체로도 이산화탄소가 배출된다. (b) 대체연료의 사용은 불필요한 폐기물의 매립을 방지하고 유효자원으로 활용함으로써 지속가능 사회발전에 기여한다. 시멘트산업에 사용되는 전형적인 대체연료로써 전처리된 산업 및 도시고형 순환자원, 페타이어, 폐유 및 폐솔벤트, 플라스틱, 섬유, 종이잔재물 및 바이오매스가 있다. 대체연료 사용은 시멘트업체가 별도의 커다란 투자없이 적용할 수 있는 기술이다. 일부 유럽국가는 시멘트산업에서의 평균대체율이 50%를 넘고 단일 시멘트공장으로 한정하면 연평균 대체율이 98%에 달하는 공장도 있다. 연료로부터 발생하는 이산화탄소의 양이 약 40% 정도이므로 대체연료 사용에 따른 이산화탄소 감축효과는 매우 크다고 할 수 있다. 시멘트산업에서 가연성 순환자원의 대체연료 사용은 고온의 시멘트 제조공정의 특성 및 연소 후에 남은 무기성분은 시멘트 성분에 고용되어 클링커와 일체화 된다는 특성과 밀접한 관련이 있다.

▶ 대체연료 적용에 따른 고려사항 : 이미 언급한바와

같이 시멘트 제조에서 플라스틱과 같은 가연성 순환자원을 대체연료로 유용하게 활용함으로써 탄소배출을 감축할 수 있다. 그러나 플라스틱과 같은 가연성 순환자원의 종류와 성상이 다양하기 때문에 시멘트 제조공정에서 요구하는 품질관리와 소성공정의 관리조건 및 환경안정성을 만족하기 위해서는 이에 준하는 적정 투입기술의 개발과 아울러 시멘트 제조공정 최적화 및 생산 클링커의 품질에 미치는 영향평가가 선행되어야 한다. 가연성 순환자원을 시멘트 킬른에 적용할 경우, 순환자원중의 Cl, 알칼리, 중금속 등의 유해물 성분에 의한 공정 불안정/품질저하 문제뿐만 아니라 환경유해성 문제가 야기될 수 있다. 순환자원을 시멘트자원으로 리사이클링 할 때, 시멘트공정, 품질, 환경안정성, 경제성 등을 고려한 리사이클링 기준의 확립이 필요하며, 일반 시멘트회사에서 적용하고 순환자원의 리사이클링 전제조건을 소개하면 다음과 같다.

- 시멘트 품질 및 공정상의 영향을 미치지 않아야함.
- 리사이클링 자원의 사용을 통한 새로운 오염 발생이 없어야 함.
- 안정된 공급이 지속적으로 이루어져야 함.
- 경제성이 있어야 함.
- 다루기 편해야 함. (수분, 점착성)
- 염소, 유황, 알칼리, 중금속등 시멘트 유해물질 성분이 적어야함.
- 품질, 물성 편차가 적어야 함

▶ 적용에 있어서의 한계 : 기술적으로는 시멘트 소성 공정에서 대체연료를 100%까지 사용할 수 있지만 현실적으로는 한계가 있다. 대부분의 대체연료들은 기존의 연료와는 물리화학적 특성이 매우 다르다. 페타이어나 일부 플라스틱 물질은 시멘트 산업에서 쉽게 사용이 가능하지만 다른 많은 것 들이 성분, 형상 및 균일성 등의 문제점으로 인하여 대체연료로의 사용이 곤란한 것 들이 많다. 낮은 발열량, 높은 수분, 염소 또는 기타 미량성분 농도 같은 것들이 바로 그것이다. 예를 들어 휘발성 금속(수은, 카드뮴, 탈륨)이 포함되어있는 물질은 매우 조심

스럽게 관리되어야 하며, 킬른 시스템으로부터 시멘트 킬른 더스트를 적절히 제거하여야 한다. 하지만 대체연료 사용에 걸림돌이 되는 것은 기술적인 문제보다 정치적, 법적인 측면이 더욱 크다고 할 수 있다.

2.4. 열효율 및 에너지 효율

시멘트산업은 에너지 다소비 산업이며, 대규모 설비가 요구되는 장치산업으로서 장치의 에너지 효율이 탄소배출효율과 직접적인 상관관계가 있다. 일반적으로 시멘트 제조업자들은 공장을 신설할 경우, 가장 최근에 개발되어 에너지 효율이 가장 좋은 기술을 도입한다. 따라서 신설 소성로는 비교적 에너지 효율이 높다. 효율이 높은 기술을 적용하면 에너지 비용이 낮아져 제조업자에게 비용 측면의 이익이 있기 때문에 새로운 공장이 신설되고 기존설비가 개선됨에 따라 점점 효율은 향상된다. 효율은 시멘트공정에 대한 최초의 그리고 후속 투자비에 따라서 결정되며, 투자비는 대부분 그 지역의 에너지 및 시멘트 가격과 같은 경제성에 따라서 좌우된다. 국내 시멘트 회사의 경우에 1990년대 이후 소성설비의 대부분을 최신 설비인 NSP와 NNSP 킬른 type으로 개조하거나 신설하였다. 소성설비의 수요와 공급측면에서 볼 때, 2000년대 이후 시멘트 시장증가율이 적고, 생산설비가 과잉으로 설치되어서 당분간 신규 소성설비의 설치 및 개조는 최

소화 될 것이다. 따라서 시멘트 소성설비 개선에 의한 열 효율 및 에너지 효율 증가는 크지 않을 것으로 예상되며, 오히려 일부 환경규제강화에 따른 배가스 처리시설 및 관리 강화에 따른 추가적인 전력소비가 증가될 것으로 예상된다.

▶ 열효율 향상에 있어서의 한계 : 시멘트 소성을 위한 화학적, 광물학적 반응을 위한 이론적인 최소 열에너지 소비량은 381~440kcal/kg 이다. 그러나 현실적으로 이 수준에 이를 수 없는데, 예를들면 소성로와 하소로 표면에서의 방열손실 및 배가스 손실 등이 바로 그것이다. 시멘트 제조공정에서 열효율뿐만 아니라 전기에너지 효율을 향상시키는 것도 매우 중요하며, 전기에너지에 있어서도 이런 최소치에 이를 수 없는 장애요소가 있다.

- 전력 원단위가 어느정도 감소하려면 대규모 개조가 필요한데 막대한 투자비 때문에 대규모 개조가 제한적 임.
- 환경규제 강화로 인한 전력소비 증가 (예를 들면 시멘트 제조공정의 배출가스에서 먼지배출량 규제는 더 많은 전력소비를 필요로 함)
- 분쇄를 더 많이 해서 시멘트 분말도를 높여야하는 고성능 시멘트에 대한 요구
- 일반적으로 CCS(Carbon dioxide capture and stor-

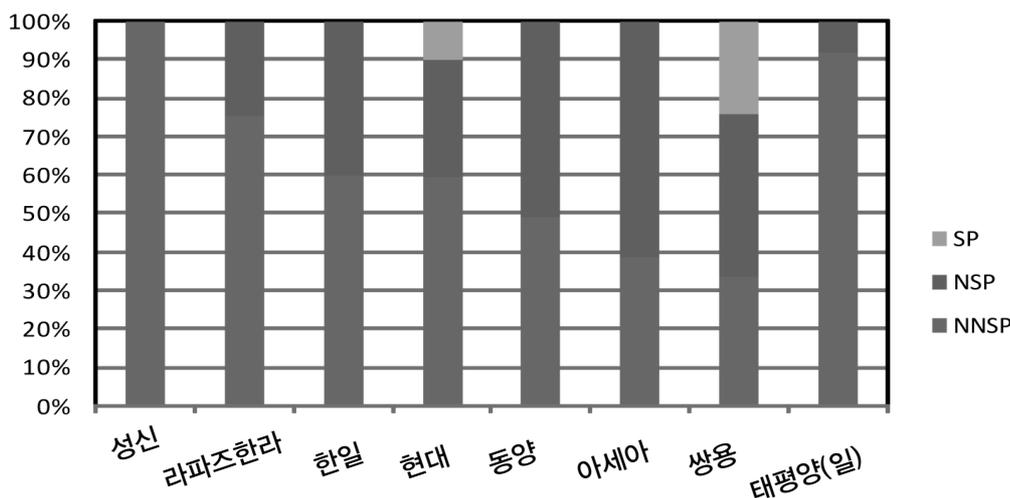


Fig. 4. 각 사별 소성설비 구성비.

age)가 이산화탄소를 줄이는 열쇠로 인식되고 있지만, 해당공장에서는 이산화탄소를 분리저장 하기위한 추가공정(분리, stripping, 정제, 압축 등)으로 인해서 전력사용량이 50~120% 정도 증가할 것으로 예상된다.

2.5. 클링커 대체

클링커는 시멘트를 구성하는 주요원료 이다. 클링커를 4~5%의 석고와 함께 분쇄하면 이것이 물과 반응하여 굳어진다. 이렇게 클링커, 석고와 함께 분쇄하여 혼합하면 이러한 수경성을 갖게되는 광물로서 고로슬래그, 석탄회 그리고 자연산 화산재가 있다. 이렇게 시멘트와 같은 외부의 자극에 의해서 경화되는 물질을 잠재 수경성 물질이라고 한다. 이러한 물질들은 클링커를 부분적으로 대체할 수 있어 클링커 사용량을 줄여줌으로서 클링커 제조과정에서 공정, 연료 및 전력사용과 관련된 이산화탄소 배출을 감소시킨다. 일반적으로 시멘트 중 클링커 함량이 극도로 많거나 적은 것은 사용처에 제한이 있을 수 밖에 없지만 고로슬래그와 같은 잠재수경성 물질을 첨가할 경우에는 클링커의 비율을 상당부분 낮출 수 있다. 2006년도 GNR 데이터에 따르면 전세계 시멘트에 있어서의 평균 클링커 비율은 78% 이었는데, 이는 24억톤의 시멘트를 만드는데 클링커 대체재가 5억톤이 사용되었다는 것이다. 하지만 클링커 대체재 사용량은 해당지역의 관련법규 및 대체재 발생 여건 등에 좌우되기 때문에 지역적으로 사용량 편차가 매우 크다.

▶ 실행에 있어서의 한계 : 기술적으로 특정한 콘크리트 제품에 대해 높은 클링커 비율이 가능하지만 비 기술

적인 요인에 의해 실제적용에 많은 제약이 있다.

- 클링커 대체재료의 발생과 수요불일치로 인한 지역별 사용 한계성
- 대체재료 가격의 상승
- 대체재료의 특성 및 시멘트 적용용도의 불일치
- OPC와 혼합시멘트에 대한 국가규격
- 혼합시멘트에 대한 건설업자 및 수요자의 인식 및 수용성

이러한 클링커 대체재 사용에 있어서 가장 커다란 불확실성은 환경정책과 법규에 의해 가장 큰 영향을 받을 것이다. 예를 들어, 미래의 발전소에서 탄소배출이 작아지게 되면 석탄회 발생량이 감소하고, 궁극적으로 석탄회의 이용가능성이 낮아질 것이다. 또한 시멘트 제품의 균일성과 특정 품질특성 확보를 위해 시멘트에서의 대체재 사용비율을 제한할 경우에는 사용량이 제한 받을 수 밖에 없다.

2.6. 탄소포집 및 저장 (CCS)

탄소포집 및 저장기술은 시멘트 산업에서 아직 산업용 규모로 입증되지 않은 신기술 이지만 정부의 규제 및 기술발전에 따라서 장래에 적용잠재력이 있는 기술이다. 이 기술의 기본은 시멘트 산업에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 액체상태로 압축한 후에 파이프라인을 통해 이송하여 깊은 바다에 저장하는 기술이다. 시멘트 산업에서 이산화탄소는 연료의 연소과정과 소성로에서 석회석의 탈탄산 과정에서 배출된다. 시멘트 제조공정에서는

Table 1. 클링커 대체재 종류별 장단점

대체재	발생원	장점	단점	예상 발생량	가능성
분말 고로 슬래그	철강 제조	장기강도, 화학저항성 향상	초기 강도 저하, 분쇄 동력 증가	2억톤 (2006년)	예측 곤란
석탄회	석탄연소로 배기가스	물 사용량 감소, 작업성, 장기강도, 내구성 향상 (사용처에 따라 다름)	초기 강도 저하, 발전소 연료 전환에 따라 감소 예상	5억톤 (2006년)	예측 곤란
천연 포졸란(화산재), 쌀겨재, 실리카폼	화산, 일부 퇴적암, 기타 산업	강도 증진에 기여, 작업성, 장기강도, 화학저항성 향상	대부분 초기 강도 저하, 시멘트 품질 변동 큼	3억톤 중 (2003년) 실제 사용은 50% 수준	지역별로 다름. 많은 지역이 시멘트 제조용 포졸란 없음
인공 포졸란 (하소된 점토)	특별히 제조	천연 포졸란과 비슷	하소에 열에너지 추가 필요	미상	경제위축에 따라 공급량 매우 제한적
석회석	광산	작업성 향상	강도 유지를 위해 추가적인 동력 필요	미상	언제든 가능

출처 : ECRA 자료 (2009)

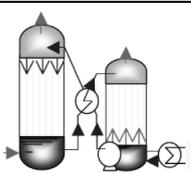
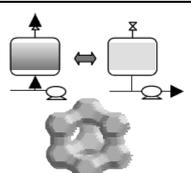
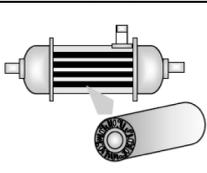
대량의 고농도 이산화탄소가 발생되며, 이를 저비용, 고효율로 포집할 수 있는 시멘트 산업에 특화된 이산화탄소 포집기술이 필요할 것이다. CCS 기술에 대한 일반적인 더 많은 정보는 CO₂ Capture and Storage a Key Carbon Abatement Option(IEA, 2008)에 나타나있다. 그동안 시멘트업계는 이산화탄소 배출저감 기술과 관련하여 현지점에서 기술적, 경제적으로 가장 현실적인 순환자원의 대체연료화에 대하여 R&D를 집중하고 관심을 기울여 왔으며, CCS 기술에 대해서는 크게 관심을 기울이지 않았다. 그러나 최근들어 CCS 기술의 발전과 이산화탄소 배출저감권과 관련된 CDM 사업으로서 CCS의 채택이 가시화됨에 따라서 이산화탄소 포집기술의 연구개발에 능동적인 자세를 보이고 있다. 시멘트 포집기술은 크게 연소 전 포집기술과 연소 후 포집기술로 나눌 수 있으나, 연소 전 포집기술은 시멘트 킬른에서 사용된 적이 없다. 왜냐하면 첫째, 시멘트를 제조할 경우에 배출되는 이산화탄소의 가장 큰 배출원인 '석회석 하소'에 의한 이산화탄소를 포집할 수 없으며, 게다가 순수한 수소는 폭발성을 가지고 있기 때문에 소성 공정에 대해 상당한 개조가 필요하게 된다. 따라서 시멘트공정에서 현실적으로 적용 가능한 탄소포집기술은 연소 후 포집기술이다.

▶ 연소 후 포집기술 : 이산화탄소를 제조공정 마지막 출구에서 포집하는 것이므로 소성공정의 기본을 바꿀 필요가 없기 때문에 신설 소성로 뿐만 아니라 기존 소성로에도 설치가 가능하다.

- 현재의 기술로 볼 때, 화학적인 흡착이 가장 유력하며 이 방법이 다른 산업에서도 높은 이산화탄소 포집율을 보였는데 흡착을 위해 아민, 칼륨 및 기타 화학 용액을 사용한다.
- 최근에는 설비의 간편성 및 분리효율 측면에서 분리막 기술도 많이 검토되고 있으나, 전제조건으로서 분리막의 안정성 및 세정기술개발이 필요하다.
- 최근에는 칼슘 산화물을 이산화탄소 함유 연소가스 와 접촉시켜서 탄산칼슘을 만들어내는 '카보네이트 루핑'이라는 흡착공정이 새로운 '산소 연소 공정'의 개발과 함께 시멘트 산업의 기존 소성로에 적용 가능한 방안으로서 검토되고 있다. 아울러, 발전소와의 시너지 효과도 가능하다. (발전소의 비활성 흡수제가 시멘트 소성로에서 대체원료로 재활용될 수 있다.)
- 이외의 연소후 포집기술(예 : 물리적 흡수 또는 광물을 이용한 흡착)들은 일부 실험실 적으로 검토가 되었으나, 상용화를 위한 연구는 많이 진행되지 않고 있다.

▶ 산소연료(Oxyfuel) 기술 : 소성로에서 공기대신 산소를 사용하면 상대적으로 순수한 이산화탄소를 얻을 수 있는 기술이다. 산소 연소기술 적용에 따라서 배가스 발생량 감소 및 설비운용의 여유 등으로 인하여 최근들어 시멘트 회사들이 관심을 보이고 있다. 하지만 이 기술은 기존의 클링커 제조설비가 공기연소를 전제로 하여 설계 제작되었기 때문에 클링커 품질 및 배가스특성 변화 및

Table 2. 대표적인 이산화탄소 포집기술

구분	흡수	흡착	막 분리
공정			
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 기술성숙도가 높음(상용화) • 대용량 가스처리 가능 • 연소배가스의 저농도 이산화탄소 포집처리 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 장치가 간단함 • 소규모 이산화탄소처리에 유리 	<ul style="list-style-type: none"> • 장치가 간단하고 조작이 용이 • 모듈화가 가능함
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 흡수액 재생에너지 소비가 많음 • 장기운전시 흡수액 열화에 따른 성능저하 및 보충비용이 많이 필요함 • 흡수액에 의한 장치 부식이 심함 	<ul style="list-style-type: none"> • 대용량 배기TM 처리 어려움 • 고농도 이산화탄소 처리에 적합 • 탈착에너지 소비가 많음 (진공펌프에 의한 전기에너지) 	<ul style="list-style-type: none"> • 고가의 분리막 사용 • 분리막의 안정성이 떨어짐 • 대용량의 배가스 처리 어려움 • 기계간 분리계수가 낮음

경제성 등 추가적인 검토 및 여건이 성숙된 후에 적용이 가능할 것이다. 현재 산소연료기술은 소규모 발전소에서 실증실험이 이루어지고 있으며, 이 결과는 시멘트 소성로에도 유용할 것이다.

기술적인 측면으로 볼 때, 탄소포집기술 및 산소연료 기술은 상용화하기전에 사전연구 및 파일럿 실험을 통하여 이 기술에 대한 실질적인 경험을 쌓을 필요가 있다. ECRA에 의한 연구와 캘리포니아와 영국의 파일럿 테스트 등 몇몇은 이미 연구를 시작하였다. 2015~2020년 사이에, 연소 후 포집기술에 대한 대규모의 데모 프로젝트가 시작될 것이지만, 전체적인 이산화탄소 감축은 아직 낮은 수준일 것이다. 전 세계적으로 10개 ~ 20개 정도의 대형 소성로 프로젝트(일간 평균 6,000톤)를 시행하고 그 감축 효율을 80%로 하여 대략적으로 추산해보면 연간 최대 20~35 백만톤의 감축이 가능할 것이다. 정치적 틀이 뒷받침되고 사회적으로 수용된다면, 2020년 이후에는 CCS가 상업적으로 적용될 수 있을 것이다.

▶ 실행에 있어서의 한계 : 기술적인 면 이외에도, 시멘트 산업에 CCS를 도입하기 위해서는 제도적인 뒷받침과 더불어 경제적인 구조가 결정적인 요소가 될 것이다. 미래의 CCS 비용은 기술과 과학의 발달에 따라서 감소될 것으로 예상되지만, 이산화탄소 포집의 추정비용은

Table 3. 화학흡착기술을 이용하는 연소후 탄소 포집비용(연산 200만톤 클링커 공장에 적용시)

적용연도	New installation / retrofit	
	투자 (백만유로)	운영 (유로/톤-클링커)
2015년	적용 불가	적용 불가
2030년	100 ~ 300	10 ~ 50
2050년	80 ~ 250	10 ~ 40

출처 : ECRA 기술문헌(2009)

주 : 제시된 비용은 ECRA 계산(2009)을 근거로 추정된 값. 투자비는 시멘트 공장 투자 이외의 추가적인 비용을 뜻하며, 이산화탄소 이송 또는 저장 비용은 미포함

이산화탄소 톤당 20유로에서 75유로 이상으로 시멘트 공장에 적용하기에 매우 높은 수준이다.

3. 대체연료의 적용사례

3.1. 관련법규 및 자원화 history

순환자원의 대체연료 적용은 적용기술뿐만 아니라 정부의 정책과 밀접한 관련이 있다. 특히 전처리 과정에 따라서 중금속 함유여부가 민감하게 변화하는 가연성 대체연료를 적용할 경우에는 환경유해성에 대한 공감대 형성을 통하여 순환자원을 안정적으로 활용할 수 있는 기반을 조성하는 것과 아울러 정부정책의 일관성을 유지하여 소모적인 논란을 최소화하는 것이 필요하다.

Table 4. 시멘트 산업에서의 순환자원 리사이클링 History

일자	주요 내용
- 1994년	"환경부 G-7과제" (페타이어의 시멘트 열원 활용연구)
- 1999년 8월	"폐기물관리법 시행령 4조" 시멘트 소성로는 폐기물처리시설의 중간 처리시설 중 소각시설로 분류 "폐기물 관리법 제44조의 2" 재활용 신고로 폐기물을 시멘트의 부원료 및 보조연료로 사용 가능
- 2005년 10월	환경부 국감에서 순환자원 활용에 따른 시멘트에서의 유해성 문제 제기
- 2006년 3월	환경부, "폐기물 소각시설로서의 시멘트 소성로 관리기준 개선연구"
- 2006년 12월	환경부와 시멘트 업계간 시멘트중에 6가크롬 함량 자율기준 설정
- 2008년까지	30mg/kg, 2009년부터 20mg/kg
- 2007년 11월	환경부와 국립환경과학원은 "민관 합동으로 시멘트제품, 시멘트 부원료, 보조연료에 대한 중금속 정밀조사 실시"
- 2008년 6월	환경부에서 시멘트 소성로 환경관리 개선계획 발표 - 폐기물 관리법 개정 : 폐기물 재활용 신고제를 허가제로 전환 - 시멘트중 6가크롬 함량 2009년부터 20mg/kg으로 강화 - 시멘트에서의 6가크롬, 납, 구리, 비소, 수은 카드뮴등 6대 중금속에 대한 함량 측정 및 측정결과와 공개토록 함
- 2008년 8월	서울시 보건환경 연구원, 시멘트 중 중금속 및 실내공기질 연구결과 발표 "공시체 및 구조체에 대한 안정성 연구에서 시멘트 공시체 및 구조체의 안정성에는 문제가 없으나, 시멘트 제품의 안정성 강화를 위해서 시멘트 생산시 사용 가능한 폐기물을 정하는 "Positive list 제도" 도입과 소비자 보호를 위한 품질표시를 의무화하는 법적제도 필요성을 환경부에 건의"
- 2008년 9월	환경부 대기환경 보전법 시행규칙 입법예고 - 시멘트 소성시설에서 폐기물을 연료로 사용시 배출되는 가스상 물질(NH ₄ , H ₂ S, F)과 4개 중금속(As, Cd, Pb, Cr)의 허용기준을 소각시설 수준으로 강화 - 양회협회는 "시멘트 제조시설의 폐기물 사용 자율기준 발표"
- 2009년 3월	환경부·업체·지자체 "시멘트 소성로 폐기물 사용·관리 기준(안) 발표"



Table 5. 순환자원의 대체연료 적용에 따른 예상문제점

검토항목	예상문제점
킬른 공정에 미치는 영향	<ul style="list-style-type: none"> 순환자원 내에 Cl, 알카리 등 순환물질이 많을 경우, 킬른내부의 순환물질 함량 증가로 예열실 적분 및 코팅형성 가연성 순환자원이 적정량 이상 투입되거나, 부적정 위치에 투입될 경우, 킬른 후단부의 온도상승 및 CO 발생 등으로 킬른 운전성 저해
클링커 품질에 미치는 영향	<ul style="list-style-type: none"> 순환자원 자체의 연소성 저하, 불균질 및 정량투입 안될 경우, 킬른 불안정 유발 대체연료의 연소특성이 불량할 경우, 환원분위기 형성으로 품질에 악영향을 미침 연소성이 상이한 폐기물 연소시 킬른내 전열형태 변화로 클링커링 반응 저해 시킬수 있음 대체연료내에 중금속, 알카리등 클링커링 반응 및 수화반응 저해물질 존재할 경우, 시멘트 품질 저하됨
유해성 문제	<ul style="list-style-type: none"> 분해에 필요한 연소조건을 만족하지 못하거나, 부적정 위치로 가연성 폐기물을 투입할 경우, 유해물질이 분해되지 않고 대기로 배출됨 폐기물중 중금속이 많을 경우, 클링커중 함량증가 및 경화체에서 일부 용출될 가능성이 있음

3.2. 대체연료 적용에 따른 고려사항

시멘트 제조공정은 페타이어나 플라스틱과 같은 가연성 순환자원을 대체연료로 활용할 수 있는 유용한 설비이다. 그러나 가연성 순환자원의 종류와 성상의 다양성 때문에 시멘트 제조공정에서 요구하는 품질관리와 소성공정의 관리조건 및 환경안정성을 만족하기 위해서는 이에 준하는 적정 투입기술의 개발과 아울러 시멘트 제조공정 최적화 및 생산 클링커의 품질에 미치는 영향평가가 선행되어야 한다. 순환자원을 대체연료로 적용할 경우, 순환자원에 함유되어있는 Cl, 알카리, 중금속 등의 유해물 성분에 의한 공정 불안정/품질저하 문제뿐만 아니라 환경유해성 문제가 야기될 수 있다. Table 5에 플라스틱과 같은 가연성 순환자원을 대체연료로 적용할 경우, 시멘트 킬른의 운전과 관련된 검토항목과 예상문제점에 대해서 나타내었다.

순환자원을 이용한 대체연료를 시멘트 킬른에 적용할 경우, 투입위치의 선정이 매우 중요하다. 순환자원의 분해 및 킬른 소성대의 일정조건 유지를 위해 calcining zone에 가연성 순환자원을 투입하는 것이 일반적이며, 적용목적 및 순환자원 특성에 따라 main burner나 calciner에 투입한다. Table 6에 대체연료를 시멘트 킬른 내에 적용

할 경우, 일반적인 투입위치를 나타내었다.

3.3. 플라스틱의 대체연료 적용

▶ 플라스틱 종류 및 특성 : 플라스틱을 시멘트 소성공정의 대체연료로 적용하기 위해 발생업체 및 폐기물 수거업체를 통해서 플라스틱을 종류별로 입수하였다. 입수한 플라스틱을 시멘트 킬른에 투입할 경우, 시멘트 공정과 품질에의 영향을 검토하기 위하여 염소성분과 발열량, 원소분석 등 연료로의 기본특성을 분석하였다. 염소함량은 ASTM D 2361에 규정되어 있는 애쉬카 방법을 이용하여 측정하였으며, 원소분석은 Callo Erbo사(EA 1108) 원소분석기를 이용하였고, 발열량은 Leco사 AC-300 단열 발열량 분석기를 사용하였다. 입수한 플라스틱의 분석결과를 Table 7에 나타내었다. 분석결과에서와 같이 플라스틱은 종류별로 발열량, 원소분석 및 염소함량 등이 상이하며, 현재 시멘트 킬른의 연료로 사용 중인 유연탄과 비교해볼 때, 발열량이 비교적 높으나 염소성분도 최고 90,000ppm 수준으로 높게 나타남을 알 수 있었다. 시멘트 킬른에 적용한 플라스틱은, 폐전선 중에서 발열량이 높으며, 파쇄가 비교적 용이하고, 시멘트 제조공정에 악영향을 주는 염소함량이 2,000ppm 이하로 적은 것

Table 6. 대체연료의 일반적인 투입위치

투입위치 기준	대체연료 종류 및 형상별 투입위치
<ul style="list-style-type: none"> 일반적으로 calcining zone에 투입함. ⇒ 폐 연료의 연소 및 분해 위한 온도, 체류시간 제공 ⇒ 킬른 소성대 온도저하 방지 및 클링커 품질, 킬른공정 영향 최소화 	<ul style="list-style-type: none"> · Main burner 투입 순환자원 <ul style="list-style-type: none"> ⇒ 액상 및 연소성 양호한 분말상태의 고상 순환자원 ⇒ 분자량이 크고 연소특성이 불량한 폐합성수지, 프레온가스, PCB 등 난분해성 폐기물 · Preheater & precalciner 투입 순환자원 <ul style="list-style-type: none"> ⇒ 크기가 큰 고상 및 액상 순환자원 ⇒ Calciner, 킬른 inlet 또는 킬른 동체에 투입구를 만들어 calcining zone에 투입

Table 7. 플라스틱 종류별 특성분석결과

시료구분	발열량(kcal/kg)	원소분석 (wt %)					Cl 함량(ppm)	
		C	H	O	N	S		
페전선	4,500~10,000	40~80	5~10	2~9	0.3~1.2	0.5~2.5	250~90,000	
페 테이프	4,970	55.4	4.1	29.6	0.1	tr	4,553	
페 고무	7,979	66.1	6.0	17.4	0.4	2.5	38,152	
페블수지	6,078	60.2	5.0	22.3	0.3	1.0	382~13,126	
페 가 전	우레탄	6,147	69.7	5.0	8.0	5.8	0.1	4,098
	PP	10,782	84.3	6.8	5.7	0.1	1.9	220
	ABS	9,005	80.5	4.7	5.3	5.9	tr	905
유연탄	6,500~6,800	65~73	3~7	6~11	0~3	0~3	60~350	

을 선별하여 사용하였다.

▶ 투입설비 : 플라스틱 대체연료를 시멘트 킬른에 투입하기 위해 정량 투입 설비를 제작하였다. 투입설비의 설비 구성과 세부 spec`을 Fig. 5에 나타내었다. 플라스틱 대체연료 투입설비는 클링커 생산능력이 2800 t/d 인 NSP kiln을 대상으로 하여 적용하였다. 투입설비는 크게 저장 hopper와 bin actuator, air nozzle 및 agitator로 구성된 hopper내의 bridge 방지설비, 플라스틱 대체연료의 계량 및 정량공급을 위한 load cell, rotary valve, vibration feeder 및 킬른 내부로의 공급을 위한 feeding pipe와 root blower로 구성하였다. 플라스틱 대체연료는 용량 50 m³ 규모의 저장 hopper에 투입된 후, rotary valve를 통해 load cell이 부착되어있는 weighing bin으로 공급되고, vibration feeder와 cushion hopper를 통해 injector로 정량 공급된다. 이때 송풍기를 통해 공급된 압축공기는 injec-

tor에서 고속으로 압축·팽창하고 이때 발생하는 흡인력으로 injector내로 플라스틱이 투입되어 feeding pipe를 통해 킬른의 main burner로 공급되고, 이렇게 공급되어진 플라스틱은 유연탄과 함께 킬른 내로 투입되어 연소되도록 구성하였다.

▶ 현장적용 결과 : 플라스틱 대체연료 투입량 증가에 따라 main burner의 화염이 약화되고 장염이 되는 경향이 나타났으며, 킬른 후단부에 코팅이 형성되었다. 특히 플라스틱 투입량이 1 t/h 이상 증가할 경우, 킬른 inlet에서의 CO량이 증가하고, 킬른내 상태가 악화되는 경향을 나타냈다. 플라스틱 대체연료 투입 전·후의 클링커 생산량 변화, THC, 예열실 온도변화 등 킬른의 주요 공정 변화를 살펴보았으며, 투입 전·후 측정결과와 평균 데이터를 Table 8에 나타내었다. 표에서와 같이 플라스틱 대체연료를 킬른에 투입한 후, 클링커 생산량이 감소하

SPECIFICATION

16	CONTROL PANEL			1 Set
15	STRUCTURE			1 Set
14	FEEDING PIPE	100 A	SGP	1 Set
13	ROOTS BLOWER	30 HP		1 Set
12	INJECTOR	100 A		1 Set
11	CUSHION HOPPER	20 L		1 Set
10	SUMMING BOX	3 / 1 WAY		1 Set
9	LOAD CELL	500K*3POINT		3 Set
8	VIBRATION FEEDER	1.4 Ton / Hr		1 Set
7	AGITATOR	1 HP		1 Set
6	HOPPER SCALE	2 m³	SUS304	1 Set
5	ROTARY VALVE	300 A		1 Set
4	SLIDE GATE	300 A		1 Set
3	AIR NOZZLE	12 * POINT		2 Set
2	VIN ACTIVATOR			1 Set
1	HOPPER			1 Set
No	MACH` NAME	SPEC`	MAT`L	Q`ty

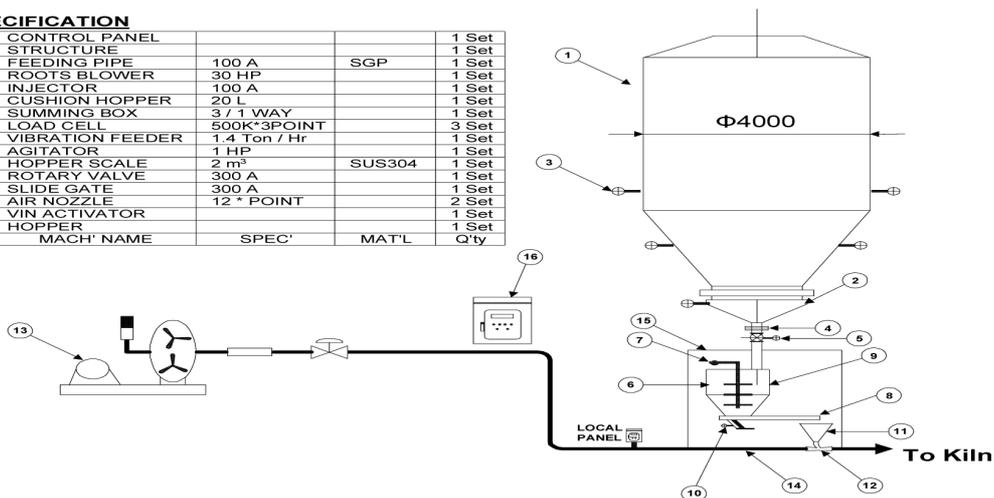


Fig. 5. 투입설비 flow.

Table 8. 클링커 생산량, THC 및 예열실 온도변화 측정결과

구 분	클링커 생산량	THC	예열실 K-1단 온도(°C)	
	(톤/일)	(kcal/kg · cl)	동	서
플라스틱 대체연료 투입전	2,890	715	824	851
플라스틱 대체연료 투입후	2,790	695	836	858

고 예열실 온도가 다소 상승하여 공정 불안정 요인이 증가하였으나, THC가 감소하여 플라스틱 대체연료의 연소 과정에서 발생하는 열이 시멘트 소성용 열원으로 기여하였음을 알 수 있었다.

▶ 순환물질 거동변화 : 플라스틱 대체연료 투입량 증가에 따라 main burner의 화염이 약화되고 장염이 되는 경향이 나타났으며, 염소 및 알칼리 등은 휘발온도가 낮아 킬른 내부의 고온 소성분위기에서 휘발과 응축을 반복하므로 예열실 적분 및 킬른내 코팅생성 등 킬른 공정과 생산 클링커의 품질에 악영향을 주게된다. 킬른에 투입한 플라스틱중의 염소함량을 2000ppm 이하로 제한

하였지만, 연료로 사용하고 있는 유연탄중의 염소함량에 비해서 10배 이상 많기 때문에 킬른내 염소 순환량이 증가될 것으로 예상되었다. 따라서 플라스틱 대체연료를 투입하기 전과 투입후의 순환물질 balance를 측정하였으며, 킬른 공정의 안정을 위하여 플라스틱의 시멘트 킬른 적용기간 중에 염소 by-pass 설비를 가동하여 킬른 inlet 부위의 gas를 평균 1% by-pass 하였다. 대체연료 투입전과 투입후의 예열실 K-1단에서의 순환물질 측정결과를 Table 9에 나타내었으며, 투입 후 순환물질 balance 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. 순환물질 balance 측정결과, by-pass 설비를 가동해도 예열실에서의 염소함량 및 K₂O와 SO₃ 성분과 같은 킬른내 순환물질 함량이 크게 증가하였다. 킬른 내부의 순환물질은 소성분위기의 영향을 많이 받으며, 특히 킬른 내부가 환원분위기일 경우에는 SO₃ 성분의 휘발도가 급격히 증가하여 킬른내의 순환량이 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 플라스틱을 대체연료를 투입할 때 예열실 K-1단에서의 SO₃ 함량이 증

Table 9. 플라스틱 대체연료 투입 전 · 후 예열실 K-1단의 순환물질 함량 변화

구 분		산화성분(%)				비고
		Cl(ppm)	K ₂	SO ₃	LOI	
플라스틱 대체연료 투입전	평균	2,746	1.65	2.47	4.32	현장실험시 By-pass설비 1% 가동
	편차	241	0.20	0.71	0.81	
플라스틱 대체연료 투입후	평균	3,046	1.75	2.71	4.13	
	편차	425	0.14	0.42	0.57	

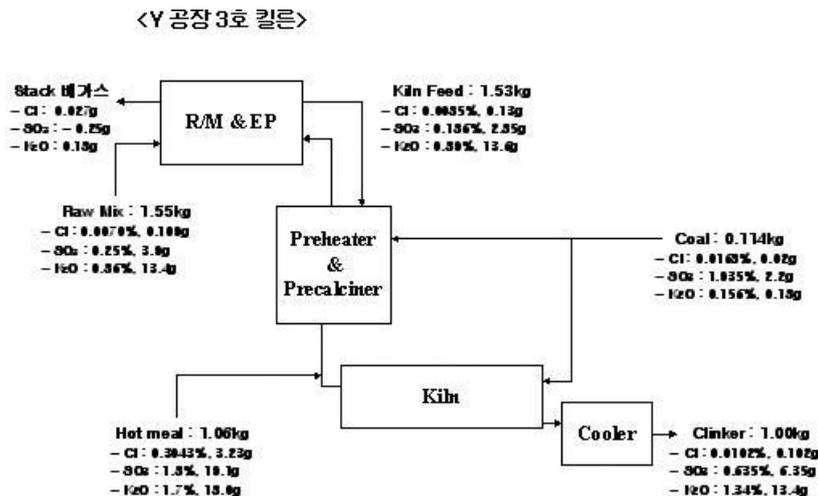


Fig. 6. 플라스틱 투입후 킬른계 시스템 순환물질 거동.

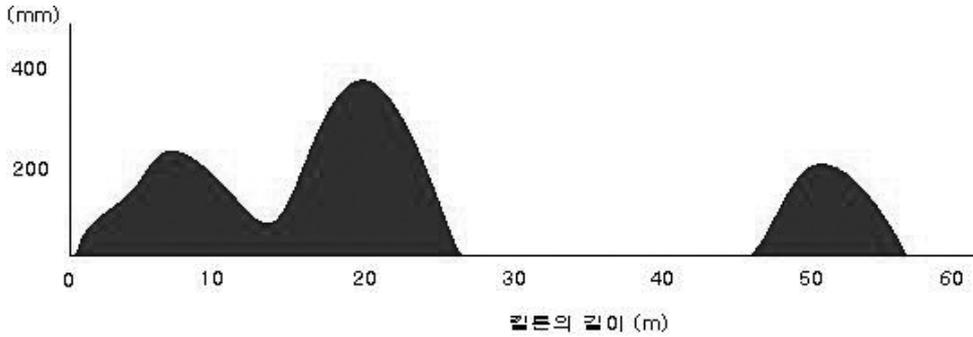


Fig. 7. 플라스틱 대체연료를 투입하였을 때 킬른 내부의 coating 형상.

가한 것은 플라스틱 대체연료가 킬른내부에서 완전연소 되지 않아 환원분위기로 변했기 때문이라 추정된다.

▶ 킬른내 코팅형성 : 플라스틱 대체연료를 투입했을 때 킬른 후단부 45~55 m 사이에 두께 25mm 정도의 코팅이 형성되었으며, 이로 인해 원료가 킬른 내부로 균일하게 공급되지 못하고, 염소성분 등의 순환물질에 의한 액상물질을 매개체로 킬른 후단부에서 조기에 nodulation이 형성되어 미소성된 직경 10~30cm 크기의 조대 클링커가 다수 발생하였다. 플라스틱 대체연료를 적용하였을 때 킬른 내부의 코팅 형성도를 Fig. 9에 나타내었으며, 킬른 전단부와 후단부의 코팅 분석결과를 Table 10에 나타내었다. 분석결과에서 나타난 바와 같이 킬른 후단부 코팅의 경우, SO₃ 함량이 23 %로 매우 많고, Cl 함량도 25,000 ppm 수준으로 많아 킬른 후단부에 생성된 코팅이 플라스틱 사용에 따른 SO₃와 Cl 성분의 순환물질 거동 변화에 의해 기인됨을 알 수 있었다. 특히 코팅의 성분 중 SO₃ 함량이 많은데, 이것은 플라스틱을 킬른 내에 투입할 때 불완전 연소 발생에 따른 킬른내 소성분위기가 변

화 때문이라 생각된다. 따라서 플라스틱 대체연료를 킬른 내부에서 안정적으로 연소하고 사용량을 확대하기 위해서는 크기를 작게 하고, burner에서의 연소조건을 변화시키는 등의 연소특성 향상방안이 필요할 것으로 판단된다.

▶ 킬른 배가스 분석 : 플라스틱 투입전과 투입후의 배가스 성분 분석결과, N₂ 및 CO₂ 이외의 성분은 전혀 검출되지 않았으며, 이 분석결과로부터 플라스틱 대체연료를 연소할 경우에 발생하는 배가스가 시멘트 킬른에서 완전히 분해됨을 확인할 수 있었다.

▶ 클링커 품질특성 분석 : 플라스틱 투입 전·후에 생산된 클링커는 f-CaO 함량이 1.1~1.2% 수준으로 공장의 품질 관리수준을 만족하였다. 이렇게 생산된 클링커에 화학석고 3 wt% 첨가하여 lab mill에서 Blaine 3,200g/cm²이 되도록 미분쇄 하였으며, 조제된 시멘트 재료에 대해 몰탈 압축강도, 응결, 안정도 등 물리특성을 분석하여 그 결과를 Table 11에 나타내었다. 분석결과로부터 플라스틱 사용시 초결이 다소 증가하나, 강도 및 안정도 등 품질변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 10. 플라스틱 대체연료를 투입한 후 킬른 내부 코팅 성분 (단위:%)

성분 구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	Cl(ppm)
전단부(8m)	21.8	6.3	3.3	62.3	0.04	1.61	1.2	0.2	357
후단부(50m)	13.2	4.1	2.3	41.0	0.04	6.18	23.2	5.9	25,414

Table 11. 생산 클링커 품질측정결과

구분	초결(min)	압축강도(kg/cm ²)				안정도(%)	클링커 F-CaO
		1 일	3 일	7 일	28 일		
플라스틱 사용전	150	77	196	281	359	0.15	1.2
플라스틱 사용후	169	70	199	298	361	0.13	1.1

Table 12. Light Fluff에서의 발열량 및 염소함량 분석결과

구분	발열량(kcal/kg)	염소함량(ppm)
스폰지류	4,981~7,959	1,700~68,400
형깍류	4,476~6,714	6,100~123,200
전선류	2,824~4,551	117,231~352,180
비닐류	5,383~9,254	753~4,800
종이·목재류	4,559~4,654	1,700~300,260
시트류	3,256	6,300~60,293
더스트류	1,197~5,226	5,100~45,634
흰플라스틱류	10,853	147~285
검정 플라스틱류	8,023	133~186
얇은 플라스틱류	6,672	657~160,260
고무류	5,771~6,854	730~68,400

3.4. 가연성 폐차잔재물의 대체연료 적용

폐차잔재물(ASR)의 시멘트 소성로 대체연료 사용은 시멘트 업계 뿐만 아니라 국내외 폐차처리 법규에 명시된 의무사항인 재활용율 (2015년 재료재활용 85% 및 열회수율 95%)을 달성하기 위해서도 중요한 현안문제이다. 폐차잔재물 발생공정에서 가장 많이 발생하는 light fluff를 대상으로 시멘트 소성용 대체연료 적용을 추진하였다.

▶ 가연성 폐차잔재물 종류 및 특성 : 폐차잔재물의 발생공정별로 채취한 대표시료를 금속, 고무류, 섬유류, 전선류, 스폰지류, 플라스틱류, 적층, 목재류, 종이류, 기타 토사류 등으로 나누어 육안으로 선별, 구분하였다. 폐차잔재물 발생공정 중에서 발생량이 가장 많은 light fluff의 경우에 경질 플라스틱이 29.1%로 가장 많으며, 타 공정에서 발생하는 ASR과 비교해 볼 때, 섬유류와 스폰지류가 각각 25.0% 및 11.3%로 많은 양이 포함되어 있음

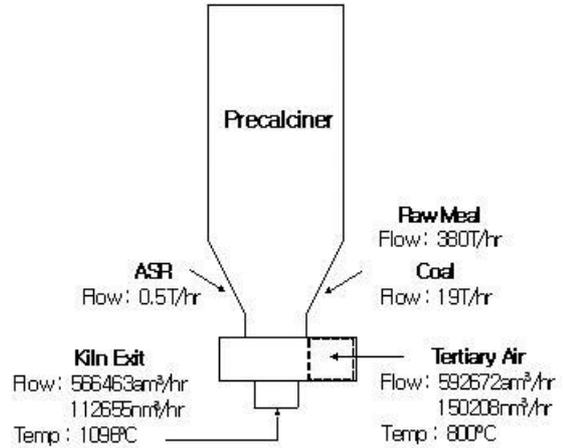


Fig. 8. 전산모사에 적용된 조업조건.

을 알 수 있었다. 시멘트 소성공정용 대체연료 적용에 있어서 중요한 검토항목으로서 발열량과 염소함량 분석결과를 Table 12에 나타내었다.

▶ 대체연료 투입조건 선정 : 폐차잔재물과 같은 대체연료를 투입할 때, 최적 투입조건 (위치 및 투입크기 등)을 선정하는 것은 대체연료 사용에 따른 위험요소를 최

Table 13. 입자 적용조건

	Coal	Raw Meal	ASR
Minimum Particle Diameter	20 μ m	10 μ m	5cm
Mean Particle Diameter	55 μ m	15.9 μ m	7.5cm
Maximum Particle Diameter	100 μ m	128 μ m	10cm
Rosin-Rammler spread	1.04	1.04	1.50
Heat Value	6,500 kcal/kg	-772 kcal/kg	6,500 kcal/kg

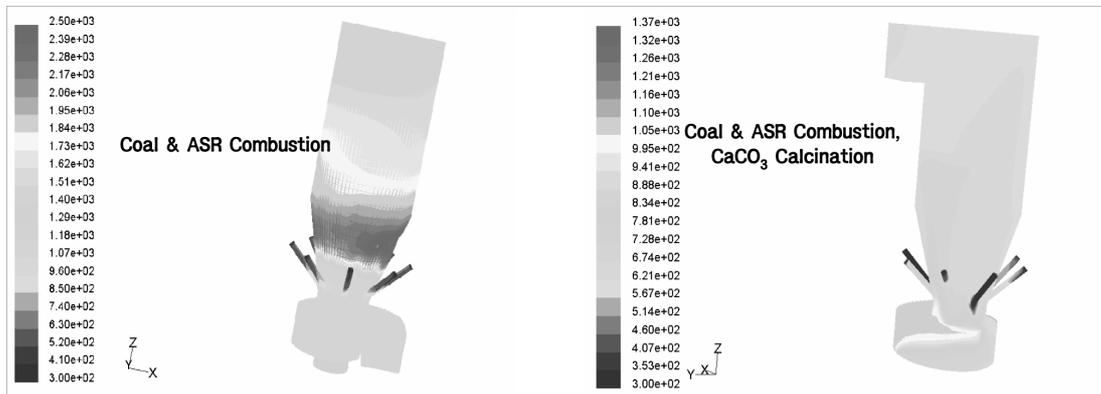


Fig. 9. 전산모사 결과 (Calciner내 온도구배).

소화하며, 적용효율을 증가 시키는데 있어서 매우 중요하다. Fig.8은 대체연료를 기존 시멘트 공정에 최적조건으로 투입하기위한 과정으로서 수행한 컴퓨터 전산모사를 적용한 사례이다.

Fig. 10과 Fig. 11에 현장의 운전조건과 전산모사 결과에서 calciner에서의 가스상 velocity 및 온도구배에 대한 튜닝 결과를 나타내었다. 점선 안의 가스상 유속은 현장 운전조건을 나타낸 것이며, 따라서 Fig. 10과 Fig. 11의 결과로부터 전산모사의 결과와 현장의 운전조건이 거의 일치함을 알 수 있다. 마찬가지로 하소로 내부에서의 온도구배가 현장조건과 비교할 때, 전산모사결과와 현장의

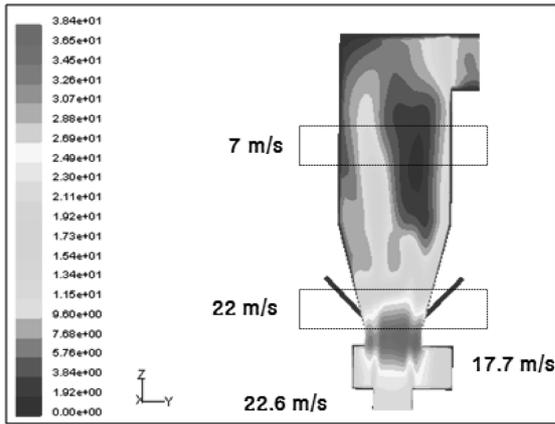


Fig. 10. 가스상 Velocity의 튜닝결과.

운전조건이 일치하여 전산모사의 튜닝이 적절히 수행되었음을 알 수 있었다.

▶ 투입설비 : 가연성 폐차잔재물 대체연료는 기존에 시멘트 소성설비에서 활용하는 플라스틱 대체연료와는 달리 구성물질 및 성상이 다양하고 염소성분이 다량 함유되어 있다. 따라서 폐차잔재물 대체연료를 시멘트 열원으로 활용하기 위해서는 기존의 시멘트 공정에 영향을 최소화할 수 있도록 폐차잔재물 대체연료를 시멘트 킬른에 안정적으로 균일하게 투입하고 염소성분을 제어하는 설비가 필요하다. 시멘트 킬른에서 ASR과 같은 가연성 물질을 균일하게 투입하기 위한 설비로서 투입 hopper, 수송장치, 저장 tank 인출 feeder 및 2중 damper 등이 있다. 폐차잔재물 대체연료와 같은 가연성물질을 시멘트 킬른에 효율적으로 적용하기 위해서는 저장위치로부터 킬른 내부로의 투입과정에서 dust 비산을 최소화하는 비산방지 설비 및 킬른 내부로의 잉여공기 유입을 최소화할 수 있는 장치가 필요하다. 폐차잔재물 대체연료의 시멘트 자원화 적용을 위한 설비 flow를 Fig. 12에 나타내었다.

▶ 현장적용 결과 : 폐차잔재물 대체연료의 현장적용에 따른 킬른의 주요 공정변화를 종합해서 Table 14에 나타내었다. Table에서 알 수 있는바와 같이, 현장실험기간 중에 시멘트 원료투입량은 183.4t/h에서 183.2 t/h로 거의 변화가 없었고, 예열실 출구온도도 338°C에서 331

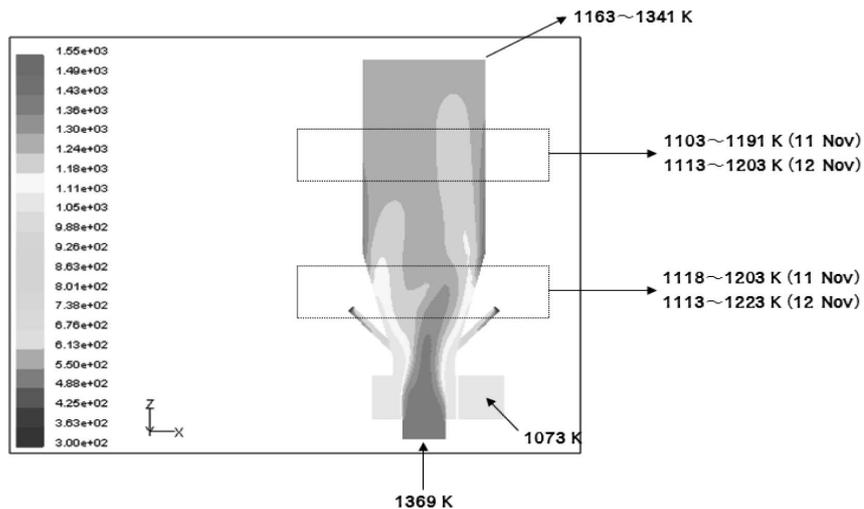


Fig. 11. 온도구배에 대한 튜닝결과.

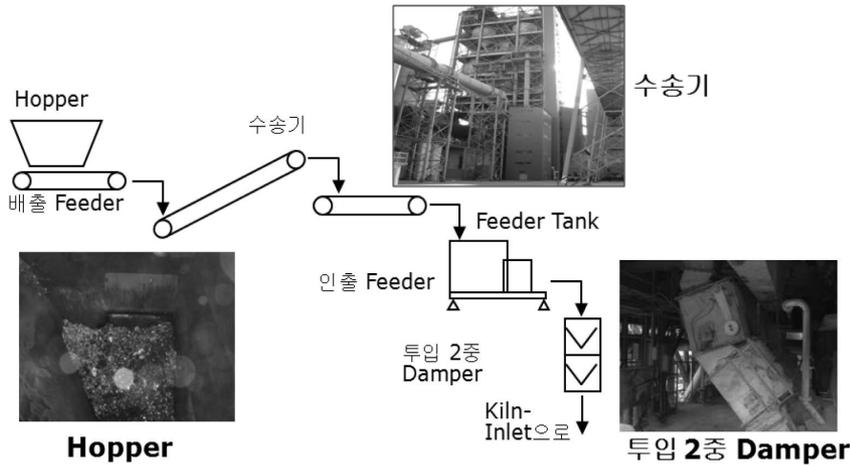


Fig. 12. ASR 투입설비.

℃로 비교적 변화가 적었다. 하지만 하소로에서 투입되는 가연성 폐플라스틱(ASR + 폐플라스틱)의 총량이 감소하였음에도 불구하고, kiln inlet 온도는 1,159℃에서 1,194로 증가함을 알 수 있는데, 이것은 실험기간 중에 main burner로 투입되는 유연탄양의 변화, 또는 하소로에 투입되는 ASR의 일부가 하소로에서 연소되지 않고 킬른 inlet으로 직투입 되어서 연소되기 때문이라 판단되었다. 킬른 inlet에서의 CI 함량은 2.11%에서 1.90%로 ASR 투입전과 비교해서 오히려 CI 함량이 감소하였는데, 이것은 하소로에 투입하는 가연성 폐플라스틱(ASR 포함)의 절대량이 줄어들었기 때문이다. 배가스 분석결과, ASR을 투입하였을 경우에 O₂ 농도가 4.66%에서 2.69%로 감소하였으며, CO 농도가 906ppm에서 3,627ppm으로 크게 증가하였는데, 이의 원인은 기존에 사용한 폐플라스틱과 ASR 특성과의 차이 및 이에 따른 킬른 운전조건 변화 등에 기인하는 것으로 예상된다. 킬른 배가스에서의 NO_x 발생량은 화염의 특성과 밀접한 관련이 있으며, NO_x 발생량이 많은 것은 화염이 세다는 것을 의미한다. 이러한 결과로 볼 때, ASR을 투입한 후에 NO_x 발생량이 감소한 것은 화염특성이 약화되었다

는 것을 의미하며, 이러한 결과는 킬른 배가스에서 O₂ 농도가 감소하고 CO 농도가 증가한 것과도 밀접한 관련이 있는 것으로 예상되었다. ASR을 투입한 후에 킬른 배가스에서 SO_x 발생량이 증가하였는데 이것은 ASR에서 S 성분이 함유 되어있는 고무류가 다량 포함되어있기 때문으로 추정되었다.

▶ 염소거동 변화 : 폐차잔재물 대체연료의 투입 전, 후 킬른 inlet에서의 CI 함량 변화를 Table 15에 나타내었다. 대체연료를 투입한 후에 킬른 inlet에서의 CI 함량은 2.11%에서 1.90%로 ASR 투입전과 비교해서 오히려 CI 함량이 감소하였는데, 이것은 하소로에 투입하는 가연성 폐플라스틱(ASR 포함)의 절대량이 줄어들었기 때문이며, CI 함량 산포는 ASR 투입 후에 증가하였는데, 이것은 킬른에 투입된 ASR에서의 CI 함량 변화와도 밀접한 관련이 있을 것으로 예상되었다.

▶ 클링커 품질특성 분석 : 폐차잔재물 대체연료 투입 전과 투입 후에 생산된 클링커에 화학석고를 3% 혼합한 후, ball mill을 이용하여 분말도가 3,500±50cm²/g 수준이 되도록 분쇄하여 시멘트를 조제하였으며, 조제된 시멘트의 물리특성을 측정하였다. 시멘트 물리특성은 KS-L-

Table 14. ASR 투입 전, 후 주요공정변화 요약

구분	클링커 f-CaO(%)	K/L inlet CI(%)	C/K CI(ppm)	원료 투입량(t/h)	배가스				P/H 출구온도 (°C)	K/L inlet온도 (°C)
					O ₂ (%)	CO(ppm)	NO _x (ppm)	SO _x (ppm)		
ASR 투입전	1.22	2.11	420	183.4	4.66	906	775	19.3	335	1,159
ASR 투입후	1.17	1.90	329	183.2	2.69	3,627	706	29.4	331	1,194

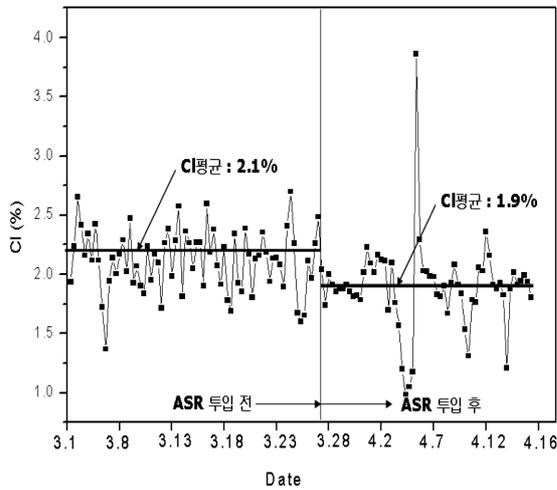


Fig. 13. ASR 투입 전, 후 킬른 inlet Cl 함량 변화.

5201 방법으로 측정하였으며, 측정결과를 Table 15에 나타내었다. 시멘트 품질특성 측정결과에서 알 수 있듯이 대체연료를 사용한 후에도 응결 및 압축강도와 같은 시멘트 품질특성의 변화가 없이 현재 수준의 품질특성을 보여줌을 알 수 있었다.

▶ 클링커에서의 6가 크롬 함량 변화: 최근 시멘트 산업에서 순환자원 활용량이 증가하면서 유해성 논란이 제기되고 있다. 이러한 이유로 일본에서는 시멘트에서의 6가 크롬(Cr⁶⁺)에 대한 함량 기준을 세워서 관리하고 있으며, 유럽에서도 2005년 1월부터 Directive 76/769/EEC 규정을 두어서 시멘트에서의 6가 크롬 함량을 규제하고 있고, 국내에서는 시멘트 업계의 자율기준으로 6가 크롬 함량을 30ppm 이하로 제어하고 있다. 시멘트에서의 6가 크롬 함량은 킬른 내부에서의 온도 및 소성분위기에 따라서 민감하게 변화되며, 대체연료 투입에 따라서 킬른 내부의 소성분위기 변화가 예상되어 생산되는 클링커에서의 6가 크롬 함량을 측정하였다. 대체연료 투입 전, 후 생산 클링커에서의 6가 크롬 함량측정결과를 Table 16에 나타내었으며, 6가 크롬 함량 측정결과, 대체연료 투입량

Table 15. 시멘트 몰탈 특성 측정결과

구분	주도	초결(분)	종결(시간)	압축강도 (kg/cm ²)		
				3일	7일	28일
ASR 투입 전(3/1-3/20)	26.2	287	444	275	318	6월/11일
ASR 투입 후 (3/29-4/16)	26.5	289	479	277	322	6월/11일

Table 16. 대체연료 투입 전, 후 클링커에서의 6가 크롬 함량 변화

투입 전	투입 후
13.6 (mg/kg)	13.0 (mg/kg)

변화에 따라서 생산 클링커에서의 6가 크롬 함량변화가 크지 않음을 확인할 수 있었다.

3.5. 대체연료 사용 전망

1999년 폐기물 관리법에서 시멘트 소성로를 폐기물 처리시설의 중간처리시설 중 소각시설로 분류하여 재활용 신고로 폐기물을 시멘트 부원료 및 보조연료로 사용이 가능하도록 하면서 대체연료의 리사이클링이 본격화되기 시작하였다. 하지만 순환자원의 자원화 과정에서 환경안정성에 대한 연구부족 및 자료를 충분히 확보하지 못하면서 지역사회 및 관련단체와의 공감대 형성부족으로 2000년대 중반부터 순환자원의 시멘트 자원화에 따른 유해성 논란이 제기되었다. 이러한 논란의 결과로써 2009년 3월 “시멘트 소성로 폐기물 사용·관리기준의 발표에 따라서 2009년 9월부터 시멘트 소성로에 사용되는 원료와 연료의 사용기준이 개별사업장마다 적용되기 시작하였다. 하지만 시멘트 자원화 관리기준 설정과정이 근거있는 연구결과 및 일정한 기준에 의해서 정해진 것이 아니고, 일부 항목이 가연성 순환자원의 RDF 사용기준과 차이가 있어서 향후에 환경안정성 및 정책 일관성 측면에서 다소의 논란의 소지가 남아있는 상황이다.

대체연료 활용은 기술발전에 따라서 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 하지만 시멘트는 인간 주거생활과 밀접한 관련이 있으며, 상품으로서 충분한 환경안정성을 확보하는 것이 필수적이다. 따라서 대체연료 활용을 확대하고 소모적인 논란을 최소화하기 위해서는 공정 및 품질안정을 위한 기술개발과 더불어 환경안정성에 충분한 공감대 형성이 선행되어야 한다.

4. 맺음말

탄소배출 저감 및 자원의 효율적 활용을 위한 녹색기술의 적용은 선택의 문제가 아니라 지속적으로 추진해야 할 필수과제이다. 지속가능발전 시멘트 개발협회는 2009년 12월 이산화탄소 감축을 위한 중장기 로드맵을 발표하였다. 이 로드맵의 중요한 메시지는 현재의 기술 및 경제성으로 시행이 가능한 대체연료 및 클링커 대체기술이 유용하기는 하지만 한계가 있다는 것이다. 이를 극복하고 목표를 달성하기 위해서는 더 많은 국제적인 공조와 기업사이의 협력이 촉진되어야 하며, CCS 및 기타 혁신적인 녹색기술의 역할을 강조하고 있다.

지금까지 시멘트업계는 에너지 및 원료비용 절감 등 제조원가를 낮추기 위해서 대체연료 개발 및 클링커 대체기술을 추진하였다. 시멘트 산업이 지속가능한 녹색성장을 위해서는 CCS기술의 적용과 같은 추가적인 투자와 아울러 혁신적인 녹색기술개발이 요구되고 있으며, 이를 위한 정부의 정책적인 지원과 국제적인 협력의 필요성이 증가하고 있다.

참고문헌

1. WBCSD-IEA Cement Roadmap, 2009.
2. 지식경제부, 가연성 폐차잔재물의 시멘트 열원 활용기술개발 연구 보고서, 2010.
3. Sea Cheon Oh, Woo-Teck Kwon, Soo-Ryong Kim "Dehydrochlorination Characteristics of Waste PVC Wires by Thermal Decomposition" *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **15** 438-441(2009).
4. Woo-Teck Kwon, Seong Youl Bae, "Utilization of Waste Plastics as a Fuel in the Fluidized Bed Calciner for Cement Kiln Process" *Materials Science Forum*, Vol. **486-487** pp. 399-402(2005).
5. Sea Cheon Oh, Cheol Min Jin, John Hee Hong, Woo-Teck Kwon and Soo-Ryong Kim, "The Behavior of Automobile Shredder Residue Chips in a Precalciner for Cement Manufacturing Process" *Materials Science Forum*, Vol. 544-545 pp. 885-888(2007).
6. 内川浩, セメント製造における今日の課題, セメント・コンクリート, No 556, June 1993.
7. 권우택 외, "시멘트 산업에서의 리사이클링 현황과 기술", 세라미스트, (2000).

●● 권우택



- 한양대학교 화학공학과 박사
- 쌍용 중앙연구소 선임연구원
- (美)오크리지연구소 교환연구원
- 한국세라믹기술원 책임연구원

●● 김영희



- 고려대학교 화학과 (학사, 석사)
- Polytechnic University of New York (박사)
- 현재 한국세라믹기술원 수석연구원

●● 김수룡



- 한양대학교 요업공학과 (학사)
- 서울대학교 무기재료공학과 (석사, 박사)
- 현재 한국세라믹기술원 수석연구원