

시멘트 산업의 신기술 동향

이종규, 추용식
요업기술원 세라믹·건재본부
ljk25@kicet.re.kr

1. 서론

시멘트 산업은 우리나라 기간산업의 하나로 토목·건축분야에서는 없어서는 안될 재료로서 우리나라의 근대화에 큰 역할을 담당해 왔다. 시멘트의 용도로는 일반 건축물, 댐건설, 철도, 도로, 공항, 항만 건설 등의 대형 구조물 뿐만 아니라 파일, 홈관 등의 콘크리트 2차 제품, 주택용 내장·외장용 등 그 용도는 다양하다.

시멘트의 기본성질은 물과 혼합을 하면 반응을 하여 자유로운 형태로, 고강도의 물건을 만들 수 있다는 것이다. 그러나 실제로는 사용목적이나 용도, 환경에 따라 작업성, 작업시간, 강도, 비중, 발열량, 내구성 등 여러 가지 부가기능이 요구된다. 시멘트 산업은 위와 같은 각각의 요구사항을 적절히 대응하면서 발전을 거듭해 왔다. 시멘트 성능을 좌우하는 복잡한 칼슘염을 목적에 부합하는 용도로 배합설계 함으로서 기본적인 성능설계는 가능하다. 또한 분말도, 입도 분포, 형상 등을 변화시킴으로써 성능을 조절할 수 있고, 무기혼화제, 유기혼화제 등을 첨가함으로써 복잡한 기능을 부가할 수 있다. 또한 제조공정에 있어서 시멘트 광물의 주성분인 칼슘실리케이트 생성을 용이하게 하는 방법이라든가 제조장치의 효율성을 높인다는가 그리고 폐자원을 적극적으로 활용하여 원가 절감 및 환경개선에도 이바지하는 연구 등이 철저히 진행되어야 할 것이다. 본고에서는 위와 같은 테마의 현재 연구동향에 대해서 간략하게 요약해 보겠다.

2. 분야별 연구동향

2.1 폐기물 이용의 확대 - 폐기물의 고정화

최근 시멘트 산업의 가장 큰 흐름의 하나로 원가절감

및 순환형 사회시스템 구축을 위해서 각종 폐기물을 시멘트 연·원료로서 적극 활용하려고 있다. 일반적으로는 고로수쇄슬래그를 이용한 고로시멘트, 화력발전소에서 부산 되는 석탄회를 이용한 플라이애쉬 시멘트 그리고 SO₂를 중화시켜 생성되는 배연탈황 석고 등의 이용은 이미 규격화되어 사용되어지고 있다. 최근에 와서는 다양한 종류의 산업폐기물들이 원료 및 연료로서 대체 사용이 진행되고 있다. 폐타이어뿐만 아니라 하수오니도 사용되고 있으며, Zero emission 사회실현을 위한 중요한 역할을 담당하고 있다. 이와 같은 배경은 시멘트 클링커 광물이 각종의 원소를 고용하고, 시멘트의 수화 활성을 높일 수 있다는 것에 있다. 또한 1450~1500°C의 고온에서 반응을 시키기 때문에 유해물질은 완전히 분해, 연소되고, 발생하는 SO₂ 가스등의 산성 가스는 공정상의 석회성분등과 반응하고 무해화 되어진다. 또한 미연분은 원료의 일부로서 재사용되어 진다.

그러나 현재 산업폐기물의 사용 확대에 의해서 지금까지 생각 할 수 없었던 성분이나, 투입량 등의 영향이 있을 수 있어 시멘트 품질에도 많은 영향을 미치게 된다. 미량성분에 대한 연구는 오래 전부터 수행되어 왔지만, 앞으로 더욱 더 많은 연구를 수행하여 미량성분을 효율적으로 조절하고 활용할 필요가 있다. 이와 관련한 최근 연구로서 폐기물을 연료·원료로서의 활용에 있어서 미량중금속인 Zn, Ni, Pb, Cr 등이 연소성, 클링커의 생성 반응, 시멘트·콘크리트물성에 미치는 영향의 검토가 진행되고 있으며, 특히 크롬에 대한 환경영향 평가나, 시멘트 수화물로의 고정화, 흡착 그리고 흡착후의 침출 등에 대한 연구가 진행되어지고 있다. 또한 폐기물중의 염소, SO₃, 중금속 화합물을 시멘트로 고정화하는 기술, 또한 Na⁺, K⁺ 농도에 따른 총상의 칼슘알루미늄에이트 수

화물로의 NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻의 고정화에 대한 연구보고가 최근 진행되어지고 있다.

그 외 유기물의 고정화에 대해서는 건축물의 환경 적 합성의 관점에서 시멘트 건축재 중에서 유기혼화제로 사용되어지고 있는 리그닌술포산, 나프탈렌술포산의 leaching 거동에 관한 연구가 진행되고 있다.

이와 같이 시멘트 연·원료로서 폐기물의 이용이 전 세계적으로 실시되고 있으며, 이들 폐기물을 사용함으로써 이들 폐기물에 포함되어 있는 미량성분들의 물질지수, 안정성 등에 대한 산업적인 책임이 점점 더 증대되고 있다. 따라서 폐기물을 이용한 시멘트의 안정성 및 환경 평가 등에 관한 연구가 더욱 더 철저히 이루어 져야 할 것이다.

2.2 환경조화형 시멘트 제조기술

시멘트 클링커의 소성은 고온에서 이루어지고 생산량도 대량이기 때문에 에너지 다소비 산업의 하나이다. 또한 원료로서 대량의 석회석을 사용하기 때문에 천연자원 및 환경을 파괴시킬 뿐만 아니라, 탈탄산에 의한 이산화탄소 가스가 발생된다는 문제점이 있다. 따라서 앞으로의 시멘트 제조는 위의 사항을 고려한 시멘트 제조기술 개발이 필요할 것이다.

먼저 시멘트 제조장치의 개발로서 기존의 에너지 소비가 큰 로타리 킬른을 대체할 수 있는 유동상형태의 킬른

개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 균일한 소성이 가능하고 소성온도도 100°C정도 낮은 1350~1400°C에서 클링커를 제조할 수 있다. 또 하나의 방법으로는 혼합시멘트의 개발 및 활용이다. 고로슬래그 및 플라이애쉬의 혼합비를 증가시키고 또한 최근 석회석 미분말과 같은 새로운 혼화제의 검토도 진행되어지고 있다. 이들은 시멘트에 혼합을 하기 때문에 혼합량의 증가분만큼 소성 에너지 절약이 가능하고 또한 CO₂ 방출량도 줄일 수 있는 효과가 동시에 있다. 또한 최근 시멘트 자체의 리사이클을 위해서 골재의 분리회수가 필요 없게 하기 위해서 석회석을 골재로 사용하여 콘크리트를 제조한 후, 수명이 다한 후 다시 시멘트를 제조하려는 연구가 진행 중에 있다.

최근 도시형 폐기물을 포함한 산업폐기물의 시멘트 연·원료화에 따른 공정상의 문제점이 많이 발생을 하게 되는데, 이들 공정상의 문제점을 해결하기 위한 노력으로, 새로운 개념의 by-pass 시스템을 개발·설치하는 연구가 현재 진행 중에 있다. 또한 폐기물의 사용과 by-pass 시스템의 가동 등으로 발생하는 폐기물의 무해화 처리기술도 현재 활발히 연구진행 중에 있다.

2.3 시멘트의 유동성

지금까지는 시멘트의 강도발현성이 중시되는 연구가 주류를 이루고 있었지만 앞으로는 유동성을 중시한 시멘트의 재료 설계기술에 대한 연구가 활발하게 진행될 것

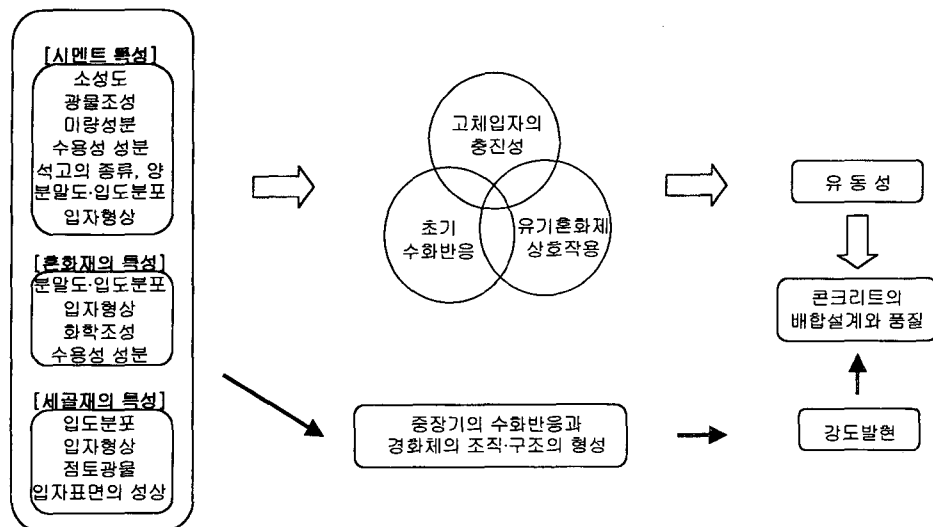


Fig. 1. 시멘트·콘크리트의 유동성에 미치는 인자.

이다. 실제로 고유동 콘크리트나 고강도 콘크리트를 제조하기 위해서 최근 폴리칼본산계의 고성능 AE감수제를 사용하여 큰 폭의 W/C저감과 적절한 유동성의 확보가 실현되고 있지만, 시멘트의 품질변화에 따라서 고성능 AE 감수제의 사용량이 변화한다거나 응결 지연 등의 문제가 발생을 한다. 또한 AE감수제에 의해서 W/C를 줄였을 경우의 유동성은 시멘트와 골재의 미세한 특성에 따라 민감하게 변화를 하기 때문에 경시변화 등이 발생하여 고유동 시멘트를 안정적으로 제조하기 어렵게 된다.

따라서 최근 시멘트의 특성을 최적화시킨 후 강도에 미치는 영향을 고려해 가면서 새골재를 포함하는 각 재료의 특성이 유동성이 미치는 영향에 대한 연구가 진행되어 지고 있다. 시멘트의 특성, 석회석 미분말이나 고로슬래그등과 같은 무기혼합재의 특성, 또한 골재의 품위나 배합조건 등에 따라 얻어지는 유동성 특성은 변화를 하게 된다. 따라서 이들 각각의 특성이 유동성에 미치는 영향을 파악하고 체계적인 결론을 얻기 위해서는 유동성을 지배하는 요인을 파악하는 것이 중요하다. 유동성을 지배하는 요인으로는 아래 그림에 나타난 것과 같이 크게 “고체입자의 충전성”, “시멘트의 초기수화 반응”, “시멘트와 유기혼화제의 상호작용” 3가지로 나눌 수 있으며 이것들은 각각의 시멘트 특성, 혼화제 특성, 새골재 특성 등에 따라 크게 좌우되기 때문에 이들의 특성 파악이 유동성을 제어하는 중요한 요인이 될 것이다.

2.4 콘크리트의 내구성

시멘트·콘크리트의 특성에서 장수명화를 이루는 것이 환경에 미치는 악영향이 가장 적은 것이다. 구조물이 장수명화 하면 콘크리트 폐기물 발생량이 줄어들 것이며, 경제적으로 도움이 될 것이다.

2.4.1 보수·보강재 개발에 의한 구조물의 장수명화

외관상으로 원래의 깨끗한 상태로 되돌려 주고 강도, 내구성 회복 및 향상을 이룰 수 있는 분야이다. 일반적으로 보수, 보강의 경우 구조물의 열화가 발생하는 상황이 처차만별이며 시공 시 각종 제약을 받게 되는 것이 보통이다. 따라서 보수 보강을 할 수 있는 만능적인 재

료가 개발되면 좋으나 실제로는 그러하지 못하고 발생 현장에 적합한 여러 종류의 재료 및 공법이 개발되어 있다. 일반적으로는 폴리머 시멘트 몰탈로 대표되어지는 복합재료의 개발이 중심으로 되어져 있다. 최근에는 탄소섬유나 유기계 섬유를 섬유상 뿐만 아니라 sheet상으로 사용하는 등 재질 자체 뿐 만 아니라 형상에도 여러 종류의 것들이 연구 개발되어 지고 있다. 또한 환경적인 측면에서 항균제를 혼합한다든가 광촉매를 표면에 도포하여 새로운 기능을 부여하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

2.4.2 고내구성 시멘트·콘크리트의 개발

일반적으로 시멘트·콘크리트의 내구성이라고 하면 철골, 철근콘크리트의 내구성으로, 철근의 녹, 팽창에 의한 콘크리트의 파괴가 일어나는 경우가 많다. 철근에 발생하는 녹은 시멘트 수화생성물의 알칼리성에 의해 방지되어지고 있다. 그러나 공기 중의 이산화탄소 가스등에 의해 바깥부분부터의 중성화가 일어나기 때문에, 중성화 속도를 가능한 늦추는 것이 내구성 향상에 중요한 역할을 한다. 따라서 중성화 속도를 방지하고 조직의 치밀화를 이루기 위해서 무기 혼화제를 첨가하거나, 고성능 감수제를 사용하여 물비를 감소시킴으로서 치밀한 구조체를 만들어 내구성을 향상시키고 있다. 또 하나 내구성에 큰 영향을 미치는 것은 균열의 발생이다. 균열이 발생하게 되면 강도저하 뿐만 아니라 이산화탄소, 연소가스등의 유해한 물질이 콘크리트 내부로 침투하게 되어 급격하게 내구성을 저하시킨다. 시멘트 재료에 기인하는 균열의 원인으로는 건조수축 이나 팽창, 수화물의 체적변화에 의한 자기수축, 수화발열에 의한 온도 응력의 발생 등이 있다. 온도 응력에 의한 균열 발생에 대한 대책으로는 저열 시멘트의 개발, 컴퓨터 시뮬레이션 기술에 의한 최적의 배합설계기술 개발 등이 있다. 또한 자기수축에 관한 연구에서는 자기수축의 원인이 되는 시멘트 수화물중의 모세관 공극에 작용하는 수축저감제의 개발이 진행되어 지고 있다. 또한 내·외부적인 원인에 의해서 수화 생성물의 변화에 의한 팽창 및 파괴가 일어 날 수 있는데(ex : Delayed Ettringite Formation) 발생원인 분석 및 대책에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

2.5 혼화재

혼화재는 일반적으로 시멘트에 첨가하여 콘크리트의 성질 및 물성을 변화시키는 재료이다. 혼화재의 사용에 있어서 여러 가지 장점도 있지만 단점도 있다. 예를 들면

- 초기 강도 발현이 늦다. 특히 저온에서 강도발현성은 현저히 느리게 나타난다.
- 초기 재령기간 중에 건조가 되어 버리면 강도발현이 정지되어 버린다.
- 초기 수화반응에 의한 매트릭스 형성이 느리기 때문에 초기 건조수축이 클 경우가 있다.
- 시멘트에 고로슬래그 나 포졸란 물질을 첨가하게 되면 매트릭스중에 알칼리성이 낮아지게 되어 같은 물-시멘트 비에서 중성화가 빠르게 일어난다.

등이 있다. 현재 위에 열거한 몇 가지 단점을 개선하기 위한 노력을 중심으로 활발한 연구개발이 진행되고 있으며, 또한 메타카올린 등과 같은 새로운 혼화재의 개발이 진행되고 있다.

고로 슬래그

- 고로슬래그 시멘트는 장기간에 걸친 사용경험에 의해 성질 사용방법 등이 잘 알려져 있지만 분말도를 큰 폭으로 높인 고로슬래그 미분말에 대해서는 최근에야 연구가 이루어지고 있다. 고로슬래그 미분말의 비표면적을 높이면 반응속도가 빨라지기 때문에 초기 수화반응의 지연을 어느 정도 막을 수가 있다. 최근에는 비표면적 10,000cm²/g을 넘는 초미분말에 대한 연구가 진행 중에 있다.
- 고로슬래그는 다량 부산 되기 때문에 급냉슬래그 미분말의 용도개발에 의해 수요가 점점 더 증가하면, 혼화재로서의 수요도 증가하리라고 생각된다. 고로슬래그의 생산자로서도 서냉슬래그 보다 급냉슬래그의 부가가치가 높다
- 메스 콘크리트의 경우 수화열을 더욱 더 저감시키기 위해 슬래그 미분말을 70% 이상 첨가하려는 노력을 하고 있다. 이를 위한 입도 조절이나 최적의 배합설계, 알칼리 자극제의 개발 등이 현재 이루어지고 있다.
- 고로슬래그 미분말의 초기 반응성을 촉진시키기 위해 한 사용방법의 개발, 예를 들면 Hot mix에 의한

콘크리트 제품의 개발 검토, 또한 용도에 적합한 반응촉진제의 개발 등이 이루어지고 있다.

- 고로슬래그에는 CaO가 다량으로 포함되고 있기 때문에 포틀랜드 시멘트 혹은 SiO₂와의 성분을 조절하여 오토클레이브 양생을 실시하여 양질의 경화체를 얻으려는 연구가 진행중에 있다. 예를 들면, 고로슬래그미분말 - 실리카 미분말 - 물 계의 오토클레이브 양생 경화체는 앞으로 유망한 콘크리트 매트릭스가 되리라 생각되기 때문에 이의 연구개발이 절실하다고 판단된다.

플라이 애쉬

- 플라이 애쉬도 고로 슬래그와 마찬가지로 초미분말에 대한 연구가 최근 진행되고 있다. 보통의 플라이 애쉬 입도 1~150 μm, 비표면적 3.50m²/g 의 것에 비해 입도 0.25~25 μm, 비표면적 130m²/g 의 초미분말을 사용하여 초기 수화 활성을 높이는 연구가 진행중에 있다.
 - 현재 국내 플라이애쉬의 품질의 균일성이 없기 때문에 사용상의 문제점이 많이 노출되고 있다. 플라이 애쉬의 산지에 따른 특성을 분석하고, 플라이애쉬의 조성 및 입도의 균질성을 높이기 위한 연구가 진행 중에 있으며, 또한 저품위의 플라이 애쉬를 사용하였을 때의 유동특성 및 내구성에 미치는 문제점을 개선하려는 연구가 진행 중에 있다.
- 플라이 애쉬 -시멘트 -물계의 오토클레이브 양생 콘크리트는 앞으로 실용화가 기대되는 제품이다. 적절한 조성 및 양생 온도, 반응촉진제에 대한 연구가 진행 중에 있다.

그 외의 혼화재

- 실리카흄은 DSP용 혼화재로서 콘크리트를 고강도 화하기 위한 혼화재로서 널리 사용되고 있는 재료이다. 그러나 실리카흄은 가격이 높고, 발생량의 한계가 있다는 단점이 있다. 최근 실리카 흄의 용도와 비슷한 초 미분말의 메타카올린을 시멘트 혼화재로서 사용하려는 연구가 진행 중에 있다.
- 석회석 미분말은 최근 분체계의 고유동 콘크리트의

혼화제로서 사용되어 지기 시작하고 있다. 석회석 미분말을 시멘트에 혼화하면, 시멘트의 입자간에 들어가 증량효과에 따른 유동성 개선뿐만 아니라, 탄산칼슘 미분말이 alite의 수화를 촉진시킨다는 보고도 있다. 석회석 미분말로 시멘트를 대체할 경우 일반적으로 강도가 감소하게 되지만 시멘트나 석회석 미분말의 분말도를 높임으로 해서 강도저하를 막을 수 있다는 보고도 있다.

2.6 결합제/혼화제와의 적합성

혼화제란 시멘트, 골재 외에 첨가되는 제3의 물질로 “계면활성제에 의해서 콘크리트의 성질을 개선하기 위하여 사용되어지는 물질”이다. 화학혼화제는 성분, 기능상으로 AE제, 감수제, AE감수제 및 고성능 AE감수제가 있다. 현재 콘크리트의 성능 향상, 특수한 기능의 부여 등을 목적으로 국내에서 이들 화학혼화제가 사용되지 않는 콘크리트는 거의 없다.

화학혼화제의 일반적 요구사항은 다음과 같다.

- 유동성, 즉 감수성을 향상시킬 것
- 첨가량이 증가하여도 시멘트 수화반응에 영향이 적을 것
- 적은 첨가량에도 충분한 감수효과를 발휘할 것
- 슬럼프 유지기능이 뛰어날 것

등을 들 수 있다. 현재 주로 사용되고 있는 현재 국내에서 주로 사용되고 있는 화학 혼화제로는 리그닌술폰산염(리그닌계), 나프탈렌 및 멜라닌 수지 술폰산염계(나프탈렌계, 멜라닌계)등으로 감수성은 향상되어지나 슬럼프 유지기능이 부족하다는 단점이 있어, 옥시칼본산염계 등의 지연제를 동시 사용하려는 검토가 진행되고 있다. 또한 리그닌술폰산염 중에 저분자량 부분과 고분자량부분을 여과 분리시켜서, 고분자 부분의 리그닌술폰산염을 병용하고 있다. 고분자량의 리그닌 술폰산염은 종래의 리그닌술폰산염의 지연작용보다 적기 때문에 첨가량을 증가시킬 수가 있어 감수성을 향상시킬 수 있다. 또한 관능기 술폰산염 이외에 칼복실기인 폴리칼본산염은 술폰산염계의 비교해서 슬럼프 로스가 적어서 많이 사용되어지고 있다. 또한 슬럼프 유지기능을 향상시키기 위해서 시멘트 중에서 서서히 용해하여 성능을 발휘하는 고

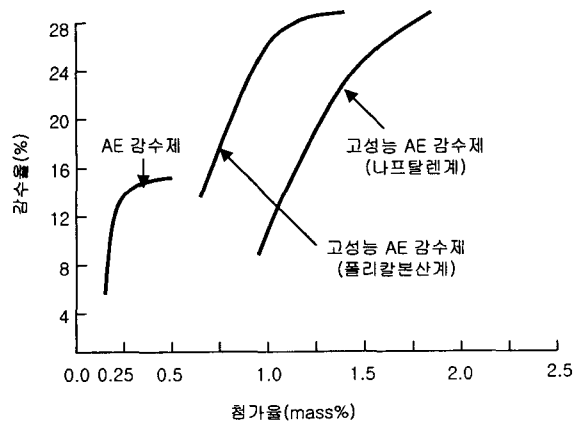


Fig. 2. 화학혼화제의 첨가율과 감수율.

분자등도 사용되어지고 있다. 최근에는 감수성과 슬럼프 유지기능이 우수한 폴리칼본산계라고 불리어지는 폴리에틸렌옥시드를 graft 체인으로 하는 빗살모양의 고분자가 많이 이용되고 있다. 이와 같은 폴리칼본산염계는 위의 그림에서 나타난 것과 같이 종래의 나프탈렌계 AE감수제 보다 첨가량이 적어도 높은 감수효과를 나타내고 있다.

대부분의 화학혼화제가 콘크리트의 요구 성능의 고성능화, 다양화에 따라 개발되어 지고 있다. 고성능 AE감수제의 개발도 고유동 콘크리트 등의 개발과 관련하여 개발 되었으며, 빗살모양의 고분자를 사용하는 차세대의 고성능 AE 감수제의 활발한 연구개발은 지금도 계속되어 지고 있다. 또한 고성능 AE감수제의 작용기구등의 검토가 계속 진행 중이기 때문에 더욱 고성능의 새로운 고성능 AE감수제도 개발될 것이다. 폴리칼본산계라고 불리어지는 고성능 AE감수제는 감수성 및 슬럼프 유지기능 등 우수한 성능을 가지고 있기는 하지만, 시멘트의 초기수화반응을 변화시켜서, 무기염의 작용에 따라 수화속도 및 유동특성에 영향을 받기 때문에 시멘트 성분의 변화에 따라 적합성이 변한다는 문제점으로 지적되고 있다. 특히 고유동시멘트와 같은 요구 성능이 높은 경우에는 안정적인 사용이 가능한 분산제의 개발이나 시멘트와 혼화제의 성능제어가 중요할 것이다. 또한 환경문제와 관련하여 도시형 폐기물의 처리와 관련하여 시멘트의 성질이 변할 경우 어떠한 화학혼화제가 적합한지 등의 연구개발도 필요할 것이다.

2.7 저에너지, 특수 및 신종시멘트의 개발

현재 시멘트 업계의 연구동향은 폐자원의 이용, 폐자원의 이용에 따른 공정상의 문제점 해결방안, 원가절감 그리고 제품의 품질 안정화 등에 초점이 맞추어져 있어, 새로운 시멘트의 개발이라는 측면에서는 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 많이 이루어지고 있지 않는 실정이다. 그러나 CA, CSA계의 특수시멘트 제조나, 이와 관련한 저온소성 기술 등이 일부는 행하여지고 있다. 여기에서는 제11회 ICCC에서 발표된 내용을 간략하게 살펴보고자 한다.

- 칼슘알루미네이트 시멘트(CAC)에 대해서는 Al_2O_3 의 함량(40~80%)에 따른 특성변화와, 대표적인 불순물인 Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO , TiO_2 에 대한 영향을 SEM, TEM 분석 등을 통해서 분석하였으며, 구성광물 중 brownmillerite 외에 페로브스카이트형의 상이 존재한다는 것을 밝혔다. 또한 CAC의 미세구조에 알칼리 용액의 영향을 검토하여 미세구조와 강도발현성의 관계를 평가한 보고가 있었다.
- Pollmann 등의 연구에서 보오크사이트와 석회석의 출발원료 조합에서 Mn을 첨가하면 저온에서 소성이 가능하고 수화 반응성이 높은 고알칼리 알루미늄 시멘트를 제조할 수 있다는 보고를 하였다.
- Bonpasta 등은 CAC에 PVA(polyvinyl alcohol)과 PAA(polyacrylic acid)를 첨가하여 MDF 시멘트를 제조한 결과 보통포틀랜드 시멘트 보다 높은 강도를 나타내고 있음을 보였으며 MDF의 강도가 폴리머의 가교와 밀접한 관계가 있다는 것을 보고하였다.
- 백색시멘트의 제조에 있어서 C_3A 의 함량을 줄이기 위해서, 시멘트 원료중 점토의 함량을 줄이고, 고반응성 실리카를 첨가하여 제조를 하면 C_3A 의 함량이 적은 백색시멘트의 개발이 가능하여 내황산염성 및 동결융해저항성이 높은 시멘트를 제조 할 수 있다는 보고를 하였다.
- 칼슘실포알루미네이트(CSA)제조에 있어서 CSA상의 안정성에 미치는 온도 및 알칼리 농도의 영향을 검토한 보고에서, 상온에서는 알칼리농도가 높은 용액에서도, 낮은 황산이온농도에서만 monosulfaluminate 수화물이 생성되고 있지만, 안정하게 존재할 수 있는 황산이온의 농도는 온도가 증가함에 따라

고농도에서도 가능하였다. 또 CSA중의 ettringite의 탄산화에 의한 안정성을 검한 보고에서는, CO_2 가 존재를 하면 calcium carbo-aluminate 상이 생성되기 때문에 ettringite의 생성이 적어지지만, ettringite가 일단 생성된 이후에는 HCO_3^- 나 CO_2 가 존재하더라도 ettringite의 안정성에는 문제가 없다고 하였다.

- 여러 가지 미량원소가 클링커 생성반응에 미치는 영향에 대한 보고에서 원료의 반응성은 $1200^\circ C$ 에서는 Cu, Li, S 및 Cl이 존재할 경우에는 높아졌으며, $1400^\circ C$ 에서는 F, S, W, Ta, Sn 및 Cu가 존재를 하면 클링커 반응성이 높아진다고 하였다. Cr, 과 Sr은 클링커의 소성성에는 나쁜 영향을 미친다고 하였다.

2.8 분석기술

시멘트의 분석기술은 품질 관리 뿐만 아니라 제품의 안정성 및 성능개선 측면에서 아주 중요한 역할을 차지하고 있다. 특히 각 시멘트 공장에서 원가 절감 차원에서 폐기물을 많이 사용하기 때문에, 종전과는 다른 클링커 광물의 정량분석 기술이 필요할 것이다. 특히, 최근 Rietveld 법에 의한 광물의 정량과 ESEM(Environmental SEM)에 의한 조직의 관찰연구가 최근 많이 행하여지고 있다.

시멘트 클링커의 구성광물의 출발원료의 조성, 클링커 생성과정중의 열이력, 분위기 등의 여러 조건에 의해 다양하게 변화하며 시멘트 품질에도 큰 영향을 미친다.

시멘트 구성광물의 정량은 Bogue식에 의한 연산법, XRD에 의한 내부표준법, 광학현미경을 이용한 정량 등 여러 방법이 사용되고 있다. Bogue 연산은 미량성분에 의한 광물조성의 변화나 연료, 원료, 소성조건의 변화로 인한 클링커의 조성적, 광물학적 변화의 영향을 고려하지 않고 단순히 화학성분만을 기초로 하기 때문에 실제 광물조성과는 차이가 나게 된다. 광학현미경에 의한 정량은 시료의 전처리 과정이 다소 복잡하고, 시간이 많이 걸릴 뿐 아니라 시료의 대표성 문제나 주관적 분석에 따른 데이터의 정확성에 대한 신뢰도에 문제가 있을 수 있다. 한편 XRD에 의한 분석법은 매우 유용하기는 하나 광물의 함량을 결정하기에는 클링커 주요광물의 중복피크 분리에 따른 전문적인 지식이나 전처리 과정(선택용해법), 배향성의 처리등 숙련도가 필요하므로 정량분석용으로는

사용하기에는 제한적이었다. 그러나 Rietveld에 의하여 광물의 격자정수, 공간군 등 파라미터를 고려한 결정구조를 해석하는 방법이 개발되어 중복피크의 분리문제가 해결되었고, 또한 컴퓨터의 발달과 더불어 X-선 회절분석을 이용한 혼합물의 정량분석이 가능하게 되었다. 실제로 클링커 구성광물의 정량분석 논문을 살펴보면 대부분이 Rietveld법에 의한 정량법이 대부분을 차지하고 있다.

3. 결 론

전 세계적으로 글로벌화가 진행되고 있는 와중에 시멘트 산업도 시장동향, 기술동향에 강하게 연동하여 움직이고 있으며, 세계 각 국과 경쟁관계에 있지만, 또한 제휴를 하여 공동의 이익 창출을 위해 노력을 하고 있다. 또

한 자연환경을 파괴한다는 부정적인 인식도 있지만, 반대로 폐자원을 효율적으로 재활용하는 등의 자원 순환형 사회 시스템 창출을 위한 중요한 산업중의 하나로도 인식되어지고 있다. 시멘트 산업은 앞으로도 사회자본의 정비 등에 없어서는 안 될 건설재료이며, 우수한 화학안정성 및 물리적 특성을 가지는 재료는 없을 것이다.

앞으로의 시멘트 산업은 자원순환형 사회시스템 구축, CO₂절감에 의한 지구 온난화 방지, 자연조화형 제조기술 개발, 사회간접자본의 안정화 및 장수명화, 그리고 시멘트·콘크리트의 신규 분야의 창출 등에 기여하기 위한 기술력 향상과 연구개발을 한층 더 힘을 기울임과 동시에 산·학·연의 공동노력으로 시멘트 산업의 새로운 발전 방향 모색과, 부단한 기술 개발 노력으로, 우리 인류 사회에 공헌할 수 있는 산업으로 발전시켜야 할 것이다.



이종규

- 1988년 한양대학교 무기재료공학과 학사
- 1990년 한양대학교 무기재료공학과 석사
- 1990년 KIST 세라믹 공정연구실 연구원
- 1997년 동경공업대학교 박사
- 2000년 동경공업대학교 조수
- 현재 요업기술원 세라믹·건재본부 선임연구원



추용식

- 1992년 인하대학교 무기재료공학과 학사
- 1994년 인하대학교 무기재료공학과 석사
- 1993년 한라시멘트 기술연구소
- 1999년
- 2004년 한양대학교 박사과정 재학중
- 현재
- 2000년 요업기술원 세라믹·건재본부
- 현재 선임연구원