

최근 기능성 시멘트의 개발 동향 및 향후 전망

이 종 열 (쌍용양회기술연구소장)

정 연 식 (콘크리트연구실)

1. 서 론

시멘트는 다양 방법의 개량을 거쳐 값이 싸고 신뢰성 있는 건설용 기초 재료로서 근대 사회에 확고한 위치를 구축했다. 최근 산업 구조의 고도화, 사회 구조의 다양화가 급격히 이루어지고 있고, 정보화 시대, 창조화 시대를 향해 사회 기반을 구축하기 위한 건설 프로젝트는 초고층 빌딩, 대심도 지하 구조물, 장대교, 해상 공항 등 초대형화 되고 있고 그 실행 과정에 있어서는 최신 기술과 인력 부족 시대에 대비하여 생력화 및 비숙 시공이 요구되고 있다. 또한 보다 쾌적한 생활 공간의 창출, 자연 환경과의 조화, 구조물 보수의 용이화, 간소화 등의 사회의 요청이 다양해지고 있다.

이러한 다양성에 대응하기 위해서는 기존 시멘트를 이용한 콘크리트 기술만으로는 그 요구 성능을 충족시키는 데에는 한계가 있다.

사회적 혹은 환경적 요구를 충족시키기 위해서는 무엇보다도 콘크리트의 고성능화의 달성에 있다. 콘크리트의 고성능화를 위해서는 시간을 요구하는 새로운 시멘트의 창조와 병행하여 기존 시멘트의 연장 선상에서 보다 높은 성능을 부여하여 비교적 단시간에 실용이 가능한 개량 시멘트 개발의 추진이 필요하다. 더불어 환경을 고려하여 고성능화와 함께 환경 부하 저감형 개량 시멘트의 개발도 필수적인 요소로 다양화, 환경 친화적인 측면을 고려해야 한다.

시멘트, 혼합재, 혼화제, 골재, 물 등을 구성 요소로 하는 콘크리트의 성능 각각 재료가 갖는 성질과 물성 및 이들의 조합, 복합화와의 반응 과정을 통하여 전혀 다른 특성의 콘크리트가 제조된다. 따라서 이들 상호간의 철저한 반응 기구 해석을 통해 새로운 혼화 재료의 개발과 발굴이 필요하다.

또한 이들 재료들은 결국 환경을 파괴하고 만든 인간의 창조물이다. 따라서 자연과 공존할 수 있는 건설 재료가 필수 불가결이다. 예를 들어 폐기물의 재활용, 재생 골재, 리사이클화를 통해 자연과 친화적인 시멘트 산업이라는 체계를 확립해야 한다.

본 검토는 향후 시멘트가 위와 같이 신종 혹은 개량 시멘트, 새로운 혼화 재료의 복합화, 환경 친화적인 시멘트라는 세 방향으로 시멘트 산업이 나아갈 향후 전망이 있는 개발 부분이라고 보고 이것을 기본 바탕으로 관련 기술을 소개하고자 한다.

2. 신종 및 개량화 시멘트를 이용한 콘크리트

제품 개발에 있어서 안전율이 높은 방법은 사용자 지향형의 연구 개발이다. 그러나 사용자 지향형의 개발은 고도의 첨단 기술 창조 등 결국 시멘트의 산업의 고부가적인 것을 기대할 수 없다. 따라서 다소 개발의 기간이 소요되더라도 사용자 지향형의 개발과 병행하여 기존 시멘트의 개량화를 통해 다양한 콘크리트의 제조에 필요한 기초 재료로서 그 역할에 임해야 한다.

가. 신중 시멘트

여기서는 신중 시멘트로서 그 기준이 모호한 부분이 있지만, 많은 기술자 및 시멘트 관련 종사들이 필요하다고 혹은 진행중인 몇가지 기술 사상을 소개하고자한다.

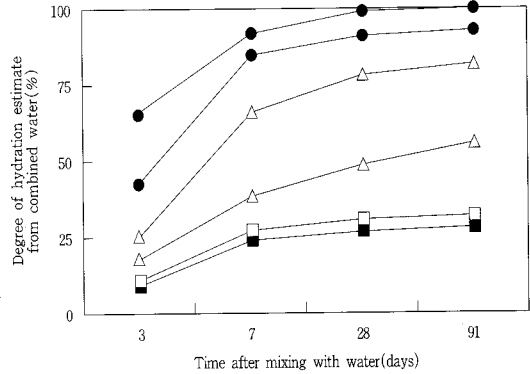
(1) 수화 반응성의 제어

각 물질의 수화율을 구하면, 수화 반응의 활성화 에너지에서 반응 속도의 온도 의존성을 알 수 있다. 예를 들어 수화 초기의 수화 반응 활성화 에너지는 시멘트 조성 화합물에서 C_3A 가 가장 크고 13.4kcal/mol, 다음으로 C_4AF 11kcal/mol이고, C_3S , C_2S 는 약 9kcal/mol이다.

따라서 이들 시멘트 조성 화합물의 20°C 및 40°C에 있어서 반응 속도는 0°C 일 때의 값에 비해 C_3A 는 5.4, 23.5배, C_4AF 는 4.0, 13.4배, C_3S , C_2S 는 3.1, 8.3배이다. 상기 4종류 물질 이외에도 예를 들어 기타의 규산 칼슘, 알루미늄산칼슘, 알칼리 회토류의 규산염 및 알루미늄산염, 겔레나이트와 메리나이트 등의 수경성 물질에 대해서도 같은 데이터를 구해, 이들의 수경성 물질 종류와 양을 적정히 조합하면 사용하는 온도 조건하에 소요의 반응 속도를 갖는 시멘트의 설계가 가능하다.

(2) 입자 특성 제어

수화 반응 속도는 물과 접촉하는 시멘트 입자의 비표면적에 비례한다. 시멘트의 입자의 비표면적은 입자의 직경에 반비례한다. 보통 포틀랜드 시멘트에 대한 입경별 수화 발열 속도 및 적산 수화열의 실측 예를 <그림-1>에 실었다. 시멘트 크링카 광물의 피분쇄성은 각각 다르기 때문에 각 입균에 포함되어 있는 크링카 광물의 비율은 반듯이 같지 않지만, 분리한 각 입균을 소정의 양으로 재혼합 함으로서 소요의 수화 속도를 얻을 수 있다. 이것은 또한 자기 치유가 가능한 소위 인텔리전트 재료로서도 이용 가능성이 크다.



(■) : >40mm, □ : 30~40mm, ▲ : 20~30mm, △ : 10~20mm, ● : 5~10mm, ○ : 0~5mm

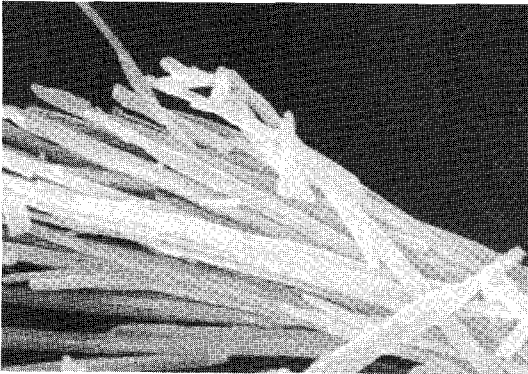
<그림-1> 여러 가지 입도로 분리한 시멘트의 수화율 (W/C=0.5, 20°C)

(3) 합성 물질 제어

시멘트는 일반적으로 1400°C 이상의 고온 반응으로 합성하지만, 세라믹 재료와는 다르게 재료로서의 강도 발현에는 고온이 필요하지 않는다. 따라서 저온에서 시멘트 크링카 광물이 합성된다면 에너지형 재료로서 가치가 대단히 높아진다. 한편, 시멘트로서 대표적인 포틀랜드 시멘트는 Alite, Belite라고 하는 시멘트 크링카 광물을 중심으로 구성되어 있다. C_2S 는 C_3S 에 비해 사용하는 석회량이 적어 자원형 재료로서의 가치는 높지만 C_3S 에 비해 훨씬 활성도가 낮고 50일이 경과해도 40%정도 반응하고 1년 이상을 양생해도 반응은 완료하지 않는다고 보고하고 있다

따라서 「고활성 C_2S 의 저온 합성」기술의 개발이 에너지, 자원형 재료로서 가치가 높다는 것을 시사하고 있다. 종래의 시멘트 제조 공정과는 발상이 전혀 다른 수열 반응을 이용해서 600°C 이하에서 합성한 β - C_2S (hillebrandite)가 활성이 높다는 보고가 최근 몇가지 발표되고 있다.

<그림-2>와 <그림-3>에 수열 합성한 β - C_2S (hillebrandite)의 모양과 압축 강도 특성을 나타내었다. 기존의 포틀랜드 시멘트와는 입자의 형태도



〈그림-2〉 SEM photograph of hillebrandite.

전혀 다르다. 기존에 비해 마치 에트링카이트를 다발 형태로 묶어 놓은 것 같고, 물리적 특성도 포틀랜드 시멘트의 경우 물시멘트비가 낮을수록 압축강도는 높아지지만, 합성한 β -C₃S (hillebrandite)의 경우 오히려 압축 강도가 낮아진다.

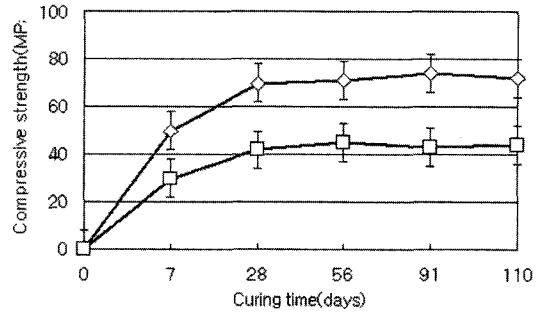
물론 생산성 및 비용적인 것을 고려하면 아직은 특수 재료로서 혹은 일부 혼합재로서 사용 가능성이 한정되어 있지만, 새로운 개념의 시멘트라는 측면 또는 환경적인 측면에서 향후 그 가능성이 매우 밝을 것으로 전망한다.

나. 개량화 시멘트·콘크리트

토목, 건축 구조물의 대형화, 고층화 및 복합화 추세는 점차 가속화되고 있으며 특히 지하 구조물 및 대형 매스 콘크리트 구조물 등 국가적인 차원의 거대 SOC 사업들이 추진됨에 따라 국내 건설 기술도 이러한 시대적 요구에 부응하기 위하여 고도화에 진일보하고 있으며, 이러한 기술은 혼화제의 발달과 함께 시멘트의 개량으로 이루어진 결과라고 할 수 있다.

(1) 벨라이트 시멘트 이용 콘크리트

콘크리트의 구조물의 대형화 경향에 따라 재료의 고강도화 문제, 수화열 문제, 공기 단축 문제 등이



〈그림-3〉 Variation of compressive strength with curing time for highly reactive β -C₃S under different w/s ratios ; 0.25(□) and 0.5(◇).

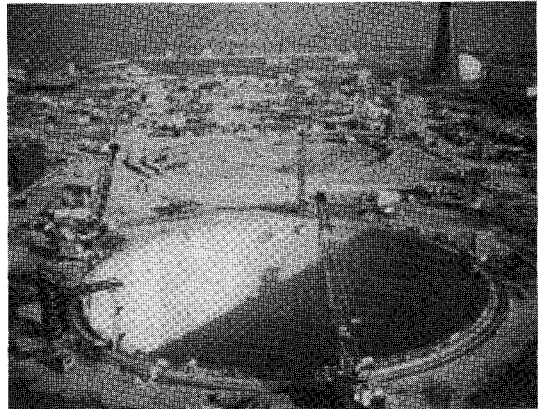
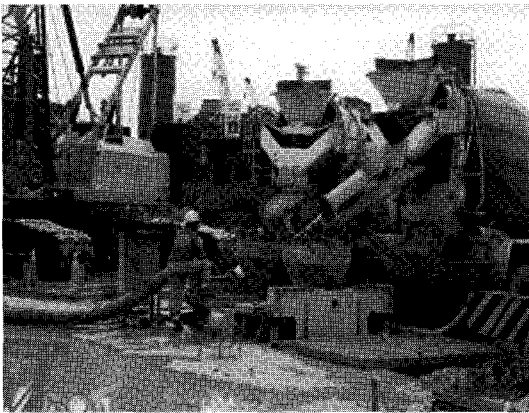
대두었고 이는 곧 고강도화, 저발열화, 고유동화와 직결되는 문제이기도 하다. 이중 고강도화 및 고유동화는 유기 혼화제 등의 이용으로 그 특성을 충족하지 못하지만, 콘크리트의 품질을 어느 정도까지는 끌어올릴 수 있으나, 저발열화와 병행하여 시멘트의 재료 특성의 개량 및 개발의 요구가 증가되어 왔고 이미 선진 외국에서는 그 사용 범위가 확대되어 왔다.

수화열을 적게하기 위해서는 시멘트 광물중 C₃A, C₃S를 적게 할 필요가 있다. 이렇게 하여 탄생한 것이 벨라이트 시멘트이며 국내에도 현재까지 수십만 톤 이상 사용 실적을 가지고 있고 향후 지속적인 증가가 예상된다.(〈그림-4〉 참조).

이들의 요소 기술 및 특징은 〈표-1〉과 같아 저발열화와 더불어 고성능 감수제의 흡착 특성이 향상되어 고유동화 및 고강도화도 함께 특성 향상을 이루어져 기타 시멘트계 보다 우수한 특성이 부가되어 내구성능 우수한 콘크리트도 가능하게 되었다.

(2) 저수축화(팽창재 이용) 콘크리트

보통 시멘트를 이용한 콘크리트는 대기 중에서 경화하면 수축하거나 균열이 발생하기도 한다. 철근 콘크리트에서 이러한 균열은 곧바로 구조물의 붕괴를 가져오지는 않지만 탄산화나 유해물질의 침입 등 열화 요인을 제공하기 때문에 구조물의 최대 약점으

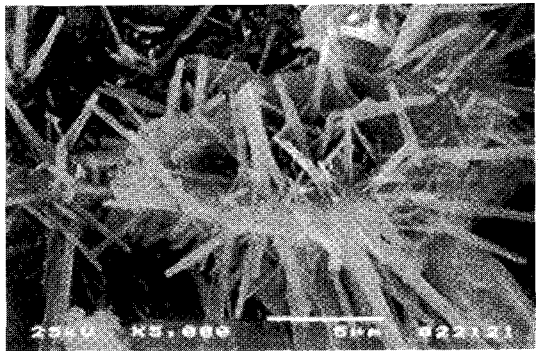


〈그림-4〉 국내 저발열 시멘트 이용 콘크리트 타설 사례(지중 연속벽)

로 되고 있다.

이를 개량하기 위해서 칼슘실포 알루미늄네이트 계 및 석회계 팽창재가 개발되어 콘크리트에의 이용이 확산되고 있다. 또한 그라우트와 같은 프리 믹스 형태의 제품에는 필수 불가결한 재료로서 그 위치가 확고해 졌다.

이들을 콘크리트내에 혼합하여 제조하면 〈그림-5〉와 같은 에트링카이트 혹은 유사 물질을 생성시켜 〈그림-6〉과 같이 체적을 팽창 수축을 보상하는 메카니즘으로 작용한다.



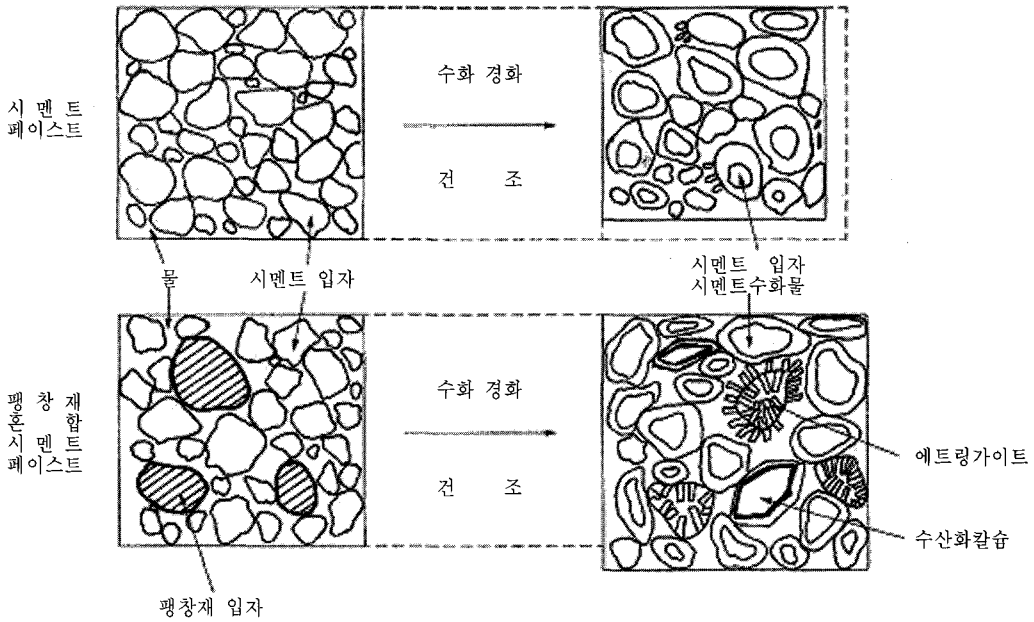
〈그림-5〉 팽창재 수화물(에트링카이트)의 예(재령 1일)

〈표-1〉 저발열 시멘트의 특성 및 요소 기술

시멘트의 특성 요소 기술	시멘트 제조 포인트	메카니즘
저 발 열	저 간극질 고 C ₂ S 함량	• 고수화발열 광물 저하 (C ₃ A, C ₄ AF, C ₃ S) → 수화발열 저감
고 강 도	저 간극질	• 시멘트 광물에 혼화제 균질 흡착(저 W/C) • 에트링자이트의 소량 생성(CSH 증대, 미세 조직 치밀화)
	고 C ₂ S 함량	• 지속적 후기 강도 상승
고 유 동	저 간극질	• 간극질에 의한 혼화제 불균질 흡착해소 - 시멘트 입자의 우수한 분산성 발휘

3. 혼화 재료를 이용 확대

콘크리트는 시멘트, 혼합재, 혼화제, 물 등을 구성 요소로 이들을 복합화하여 혼합, 타설, 양생 등의 기술을 종합화한 결과로서 콘크리트의 고성능화가 달성된다. 재료의 분야에 한정해서도 시멘트 뿐만 아니라 다른 콘크리트 재료의 진보가 콘크리트의 고성능화 및 고기능화를 위해 필수 불가결하다. 최근 일본에서 콘크리트 재료에 관한 최근 연구 개발 동향의 키워드를 나열한 적이 있다. 신재료를 포함해서 관련 콘크리트 재료로서는 저열(중용열)포틀랜드 시멘트, 고성능 AE감수제, 수화열 억제제, 건조 수축



〈그림-6〉 팽창제 혼합에 의한 체적 팽창

저감제, 방청제, 알칼리 골재 반응 억제제, 슬러지 안정화제, 슬래그 고결 응결제, 플라이 애쉬, 고로슬래그 미분말, 실리카 흙, 석회석 미분말, 초경량 골재, 재생 골재 등을 나열하였다. 여기에서도 알 수 있듯이 최근 연구 동향에서 차지하는 혼화 재료의 비율은 거의 대부분을 차지한다고 해도 과언이 아니다.

가. 유기 혼화제의 활용

고유동화, 고강도화를 위해 고성능 감수제의 이용 확대는 점점 증가 추세에 있고 유기 혼화제의 발달과 함께 폴리카르본산계 이용에까지 이르렀다. 그러나 이들 고성능 감수제 자체의 메카니즘 규명 혹은 콘크리트의 적용보다도 중요한 것은 시멘트와의 상성 관계이다. 이 상성 문제가 해결되지 않고 콘크리트에 적용된다면 무엇보다 범용성 혹은 품질 편차의 우려가 있기 때문이다.

현재도 연구가 활발히 진행중에 있고 그 중에 한 가지를 소개하면 〈그림-7〉과 같이 시멘트 페이스트

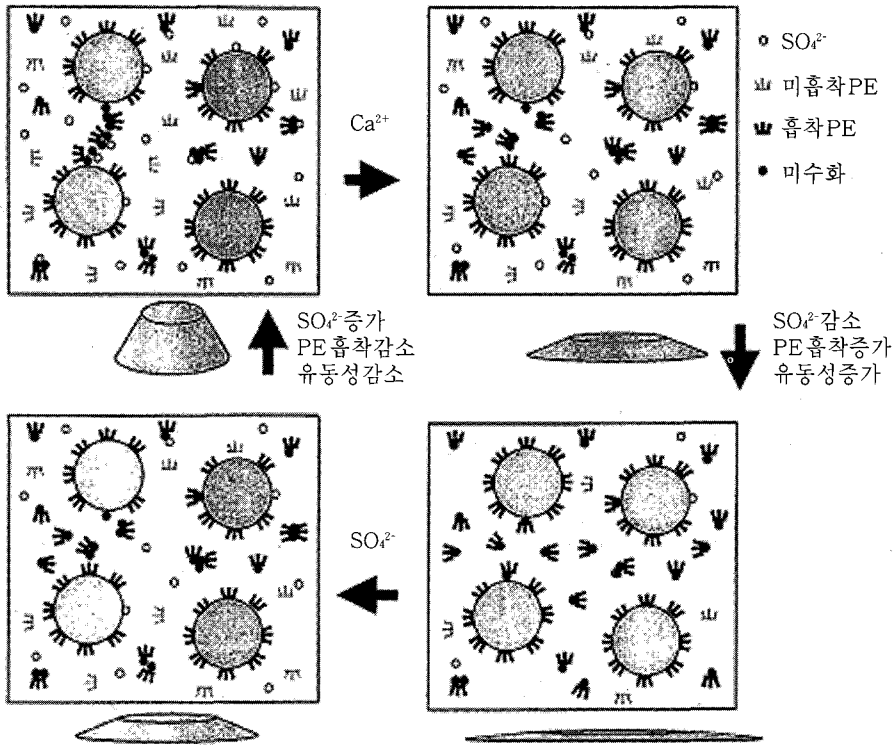
내의 황산 이온의 영향 관계이다.

칼슘 이온을 가한 경우에는 유동성이 증가하고, 황산 이온을 가한 경우에는 유동성이 저하한다. 이 원인은 폴리카르본산계 감수제의 흡착 거동에 관계하고 감수제가 시멘트 입자에 많이 흡착되면 개선되고 조감하면 감소한다.

즉, 황산 이온의 존재가 혼화제가 시멘트 입자의 특성에 작용하고 존재량이 많은 경우에는 감수제가 시멘트 입자에 흡착량이 작아진다. 이와 같이 시멘트내의 미량 성분과의 관계로 콘크리트의 유동 특성이 달라지는 것이다. 따라서 시멘트내의 미량 성분과의 상관관계는 아직 풀어야 할 문제가 남아 있고 이 문제가 해결되지 않으면 콘크리트 고성능화의 길은 멀다고 할 수 있다.

나. 혼화재의 활용

혼화제는 구상의 입형, 미립분의 입도 분포, 포졸란 반응 등으로 콘크리트의 작업성, 강도, 내구성 등



〈그림-7〉 황산 이온 작용 기구의 개념도(PE : 폴리카르본산계 고성능AE감수제)

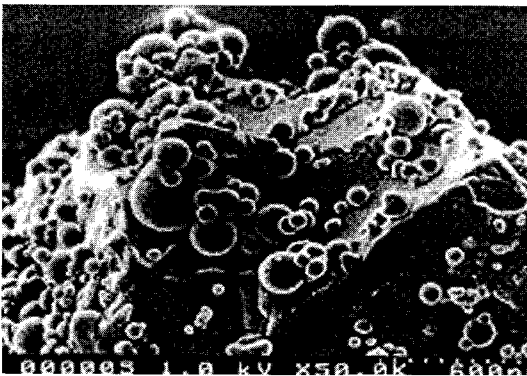
을 향상시키고, 콘크리트의 고성능화에 기여한다. 혼합재는 그 효과를 일층 향상시키기 위해서 혼화제와 병용하는 경우가 많다. 예를 들어 High Volume

Fly Ash Concrete에는 대량의 플라이 애쉬와 감수제, 자기 충전 콘크리트에는 슬래그, 플라이 애쉬와 감수제 및 증점제, 고강도 콘크리트와 고내구성 콘크리트에는 구상, 고비표면적을 갖는 포졸란 반응성 물질인 실리카 흙과 감수제, 반응성 유기물 등이 병용 사용된다. (〈그림-8〉 참조)

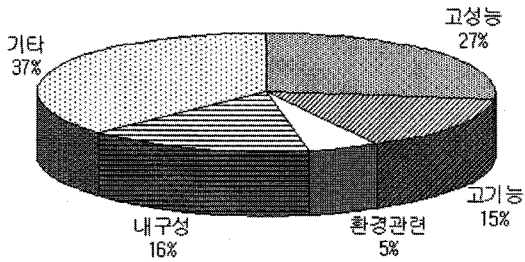
그러나 이들 혼합재를 잘못 사용하면 콘크리트 자체의 품질 편차 등의 발생 요인이 있어 슬래그와 같은 경우는 골재로서의 활용을 적극 추천하고 싶다.

4. 환경 친화적인 시멘트 콘크리트

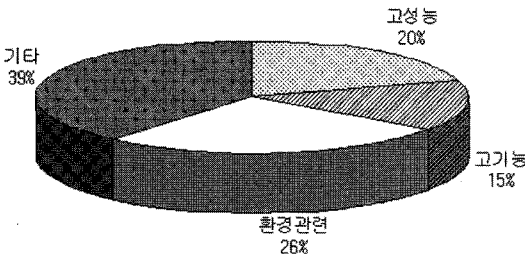
〈그림-9〉, 〈그림-10〉에 일본에 있어서 10년 전후의 연구 내용을 분석한 결과이다. 고성능과 고기능의 고부가 가치형 연구 비율은 변화가 없지만, 환경



〈그림-8〉 포틀랜드 시멘트와 실리카 흙 혼합 시멘트



〈그림-9〉 1990년도 일본내 콘크리트 관련 연구 내역



〈그림-10〉 2000년도 일본내 콘크리트 관련 연구 내역

관련 연구는 10년 전에 비해 약 5배의 증가율이 나타나고 있다. 이는 그만큼 환경과 관련된 연구 개발이 중요한 위치를 차지하고 있고 이는 일본뿐만 아니라 국내 및 산업계도 환경과 관련하여 직면한 문제이기도 하다.

〈표-2〉에 환경적인 측면을 고려한 시멘트계 재료 및 응용이라는 관점으로 표기고, 이중 그 일부의 연구 내용을 소개하고자 한다.

가. 포러스 콘크리트

콘크리트를 다공질로 만들기 위해서는 콘크리트 내부에 연속 또는 독립된 공극이 다량으로 도입되는 방법을 생각해야 한다. 연속 공극을 많이 포함하는 다공질 콘크리트(porous concrete)는 경화체 안에 물이나 공기가 자유롭게 통과하는 넓은 내부 표면을 지니게 되고 이 때문에 다공질 콘크리트는 투수성, 흡음성, 수질 정화 기능 있으며 식물을 생육시킬 수도 있고 열특성이 일반 콘크리트보다 우수하여 환경부

〈표-2〉 환경측면에서의 달성 수단과 재료 및 응용예

목적	달성 수단	대응 재료 및 응용	
폐기물 (부산물) 이용	폐기물(부산물)의 원료화	FA, 슬래그 시멘트 원료화 혼합시멘트	
	폐기물 부산물의 상품화	콘크리트용 플라이 애쉬, 고로슬래그 미분말, 슬래그 골재	
자원·환경 보존	장기수명	고강도(몰시멘트비저감)	고성능감수제
		균열저감	저열시멘트 수축저감제
	고유동성(시공결함감소)		
	리사이클	재생골재	
콘크리트 제품		포러스 콘크리트, 광촉매 콘크리트	

하 저감 및 보존을 위해 다양하게 활용될 수 있다. (〈그림-11〉 참조)

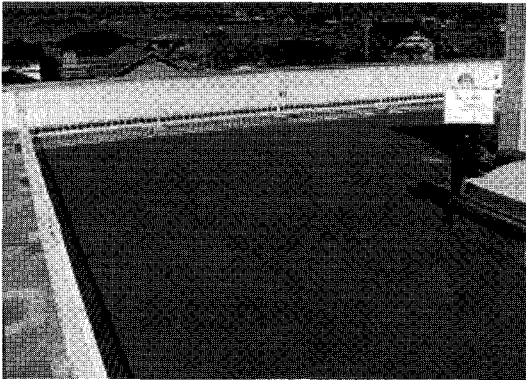
나. 광촉매 콘크리트

도시 내부 주요 도로나 고속도로 주변부에서는 주행하는 자동차로부터 발생하는 배기 가스가 큰 사회 문제로 되고 있다. 특히 최근에는 디젤차의 증가에 의한 배기 가스 가운데 호흡기계에 악영향을 주는 NOx의 증가가 현저하다.

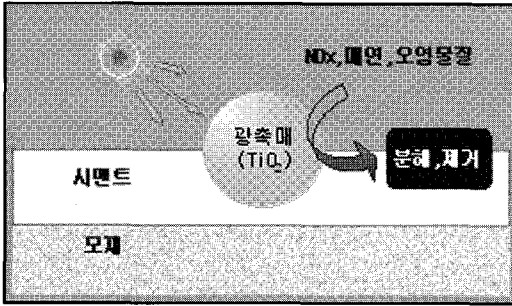
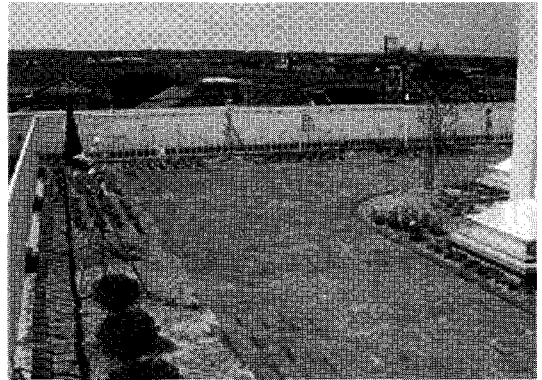
이와 같은 상황에 대응하여 물론 차량의 개량에 의한 발생원 억제 방법도 있지만, 경제적으로 유용한 기존 구조물에 광촉매 시멘트를 도포하여 발생한 배기 가스를 제거하는 방법도 있다. 이 방법은 최근 일본을 중심으로 연구 개발이 활발히 진행되어 상용화가 이루어지고 있다.(〈그림-12〉 참조)

다. 폐자원 및 산업 부산물 활용 시멘트

산업의 활발한 활동, 고도화와 생활 수준의 향상과 함께 사회가 배출하는 폐기물의 양은 증가 일로



〈그림-11〉 포러스 콘크리트 이용 옥상 녹화 시공 전후



〈그림-12〉 광촉매 시멘트의 배기 가스 제거 메카니즘

에 있고, 그 처리 및 처분이 사회 문제로 되고 있다.

시멘트 산업은 이전부터 고로 슬래그, 플라이 애쉬, 실리카 흙, 부산석고 등의 산업 폐기물을 원료 혹은 콘크리트 혼합재로서 대량 사용하여 왔다. 그러나 산업 폐기물에는 페타이어, 폐유, 폐고무, 폐프라스틱 등의 가연성 물질, 일반 폐기물에서는 하수 오니, 도시쓰레기 등의 것이 다양하게 존재한다. 이러한 폐기물의 처리 및 처분은 지역적인 공간 문제 뿐만아니라 거액의 비용이 들어간다. 따라서 시멘트 산업에서는 이들 폐기물을 원료 또는 연료로서 소비하는 제조 시스템 구축과 환경 정화 기능을 갖는 정맥 산업업으로서의 역할이 기대된다. 결국 시멘트 산업은 자원 순환형 사회 시스템의 중핵에 위치하고 지구 환경 보존에 공헌하는 산업으로서 그 역할을 재설정하여야 한다. (〈그림-13〉 참조)

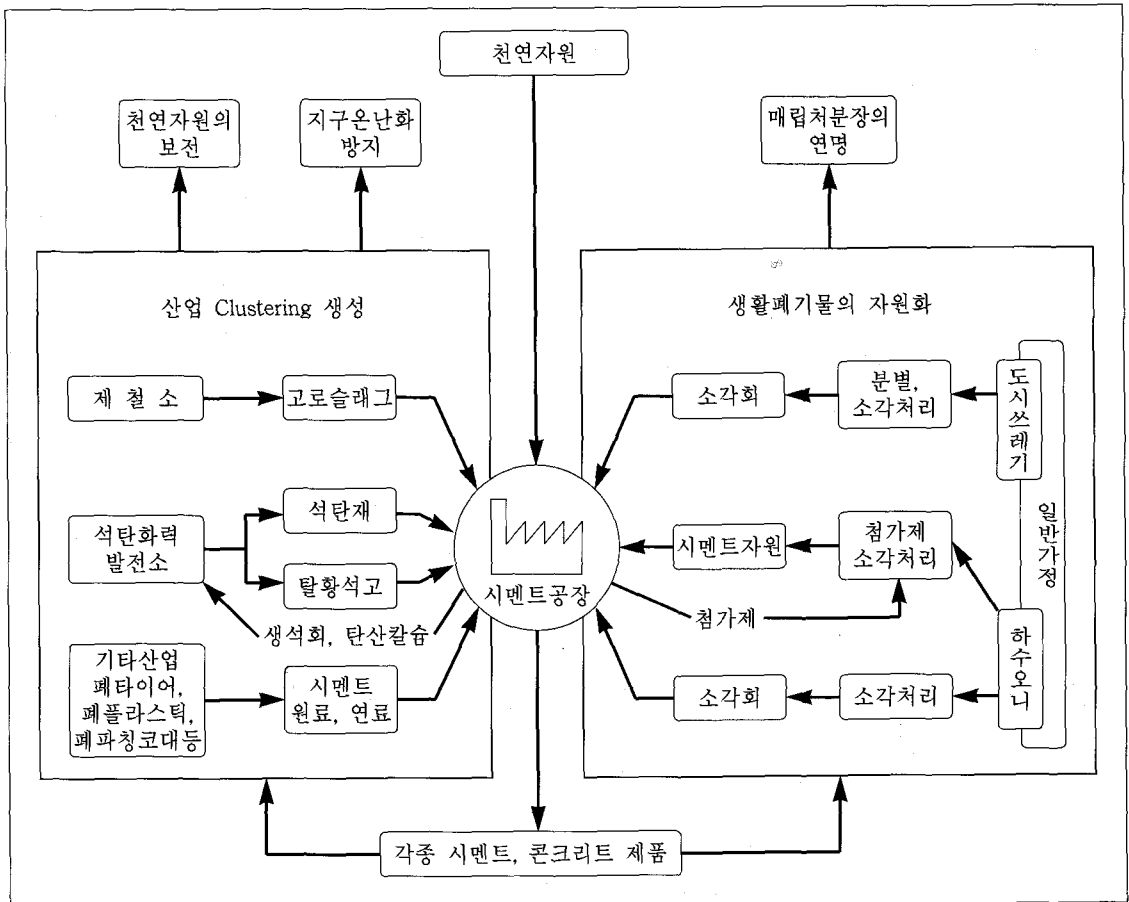
일본의 한 시멘트 회사내에는 이러한 목적으로 제로에미션(zero emission)사업부서를 두어 운영하고 있고 그 성과를 착실히 구축해 가고 있다.

5. 맺음말

최근 시멘트계 재료 개발에 대해서 몇 개의 사례를 소개했다. 그 경향으로는 재료의 개발과 함께 그 평가 방법도 다양화되어 가고 있고 특히 고성능화의 흐름과 함께 환경에 대한 재료와 응용이 주목을 받고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 흐름은 계속 진행될 것으로 판단되고 더불어 재료의 진보도 있을 것이다.

구조 재료로서 콘크리트에 요구되는 성능은 다양하다. 각각에 대한 성능 향상, 즉 고성능화 및 고기능화를 겨냥한 재료가 출현할 것이다. 예를 들어 고강도화가 진행하면 시공성의 문제가 중용하게 되어 시멘트와 혼화제의 개량이 필요하게 된다. 또한 골재의 원 및 사용 방법도 다양하게 될 것이다.

또한 조기 노화에 관계하는 내구성 문제가 있고 이것은 단순히 콘크리트 측면의 문제는 아니다. 품질의 향상 도모와 함께 시멘트계 재료의 고기능화라는 시점으로 문제를 해결, 혹은 각각에 적합한 재료의 조합 등을 통해 콘크리트의 내구적인 측면을 검토해야 할 것이다.



<그림-13> 시멘트 공장을 중심으로 한 자원 순환형 시스템

이와 동시에 품질과 환경 측면을 겸비한 재료 개발도 사용자 측면 모두에게 매우 중요한 부분을 차지할 것이다.

기능을 부가하는 연구 개발은 지금까지 다양한 방법으로 이루어져 왔지만, 향후 새로운 흐름을 예측

하기는 어렵다. 단, 시대의 흐름이 새로운 용도로 발생시킨다는 것은 명확하다. 따라서 성숙한 사회 구조에 대비하여 시멘트 산업의 종사자들도 착실히, 꾸준히 새로운 기능 부여의 시멘트 개발에 노력해야 할 것이다. ▲