

# 콘크리트 구조물의 장수명화를 위한 콘크리트용 재료

- Materials for Long-term Durability of Concrete -



안태호\*  
Ahn, Tae Ho



김병기\*\*  
Kim, Byung Gi



이종규\*\*\*  
Lee, Jong Kyu

본 기사는 일본 동경공업대학교 재료공학과 E. Sakai와 M. Daimon 교수와 콘크리트 재료에 관한 이해를 돕고자 일본 콘크리트工學(Vol.40, No.5, 2002. 5)에 기고한 특집 “콘크리트構造物の長壽命化/3.材料技術”에 관한 기사를 중심으로 정리한 것이다.

## 1. 머리말

토목, 건축 구조물의 대형화, 고층화가 진행되어짐에 따라 콘크리트 사용은 나날이 증가되어지고 있으며, 재료성질에 따라 고기능성을 가질 수 있는 콘크리트의 제조 또한 가능해지고 있다. 보통 콘크리트 구조물의 경우 여러 성능들이 요구되어지지만 일반적으로 경제성, 안전성, 공용성, 내구성 및 경관성 등이 중요하게 요구되어지고 있으며 최근에는 이러한 기능성 이외에도 환경 부하 저감성 또한 중요하게 취급되고 있는 추세이다. 더욱이 이러한 콘크리트 구조물을 구축하는 재료인 콘크리트에 있어서 요구되어지는 성능으로서는 시공성, 유동성, 응결·경화 제어성, 고강도, 고내구성, 발열 제어성, 저수축성 및

환경 부하 저감성 등 여러 가지가 있으며 특히 콘크리트 구조물의 장수명화와 관련되어지는 항목으로써는 안전성, 공용성, 내구성, 경관성이 구조물을 장기간 유지하는데 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 경관성에 관한 콘크리트계 재료 자료의 축적은 아직까지 미흡한 것을 알 수 있으며 지금까지는 주로 내구성의 관점에서의 콘크리트계 재료의 연구가 검토되고 있다. 따라서 본고에서는 이러한 내구성을 중심으로 한 콘크리트의 장수명화와 그 재료에 대하여 총괄적으로 정리 논하고자 한다. 시멘트, 혼화재료 및 골재로 구성되어 있는 콘크리트의 장수명화에 관해서는 콘크리트를 구성하고 있는 각각의 재료들부터 검토할 필요가 있다. 물론 시공시 결합이나 초기 결합을 없애는 것이 가장 중요하며 이러한 관점에서 고유동 콘크리트 등의 개발 또한 활발히 진행되어지고 있다. 재료 중 가장 많은

용적을 차지하는 골재의 장기적인 내구성 또한 대단히 중요하지만 본고에서는 시멘트와 혼화재료를 중심으로 기술하고자 한다. 또한 콘크리트 구조물의 유지관리 증대에 따른 보수재료에 있어서도 장기 내구성이 요구되어지고 있으나 폴리머 시멘트를 제외하고는 유기계재료의 경우 100년 정도의 내후성을 요구하는 것은 곤란한 것으로 보여지며 보수계획 등을 충실히 이행하는 것이 필요할 것으로 여겨진다. 따라서 본고에서는 콘크리트의 장수명화를 위해서 필요 하리라 고려되는 콘크리트의 치밀화, 시공 결합 방지, 크랙방지와 재료와의 상관관계를 정리하여 나타내었으며, 1000년을 지속 하더라도 우수한 내구성 가질 수 있는 재료의 가능성에 관해서도 소개하였다. 또한 콘크리트 장수명화 고려시 환경 부하 저감효과 및 리사이클과 같이 순환형 사회의 구축에 있어서 시멘트·콘크리트의 중요성에 관해서도 고려할 필요성이 있는데 이러한 경우 치밀성을 향상시킨 고내구성, 약 130 ~ 180 N/mm<sup>2</sup> 정도의 고강도 콘크리트를 분쇄하여 진분량을 콘크리트 재료에 재이용하여 60 N/mm<sup>2</sup> 정도의 콘크리트를 제조할 수도 있는 것이 보고되고 있다. 따라서 이

\* 정회원, KG케미칼㈜ 연구개발센터 선임연구원  
\*\* 정회원, KG케미칼㈜ 연구개발센터 팀장  
\*\*\* 정회원, 한국세라믹기술원 선임연구원

와 같이 콘크리트의 장수명화는 콘크리트 재료의 Cascade Recycle System이라는 관점에서도 유용하게 적용되어 질 수 있을을 알 수 있다.

## 2. 장기 내구성과 콘크리트의 성능

일반적으로 콘크리트의 장수명화라고 하는 경우 어느 정도의 수명을 고려하는지에 따라 콘크리트에 대한 요구 성능도 크게 달라지게 되어진다. 보통 100년 정도의 콘크리트 내구성은 염해, 중성화(일부 탄산화 반응), 알카리 골재반응, 화학적 침식이나 동결융해 등과 같은 항목에 대한 저항성을 가지는 것이다. 그러나 최근에는 방사성 폐기물 등과 같이 폐기물 매설 등이 관련되어지는 경우 더 오랜 기간의 내구성이 요구되어지는 경우도 발생되고 있으며, 이러한 경우에는 콘크리트의 변질, 수화물의 용탈, 탄산화 반응 등을 더욱더 심각하게 고려할 필요가 있다. 특히 1000년 이상의 장기 내구성이 요구되어지는 경우에는 콘크리트의 전부가 탄산화하고 있는 상태에서 요구 성능을 만족하는지 아닌지 의논할 필요도 있다. 재생 골재 등의 리사이클을 고려하여 보면 특히 골재 부분에 있어서는 100년을 넘을 수 있는 듯한 내구성의 검토도 필요하게 될 것이다. 또한 환경에 의한 영향에 의하여 알카리 탄산염 반응 등 지금까지 많이 알려진 문제점들 이외에도 장기간 새롭게 보고될 골재의 반응 등이 나타날 가능성도 있다. 따라서 리사이클이나 오랜 장기의 내구성을 고려하는데 있어서는 이러한 상태의 연구 또한 충실히 연구되어야 할 것으로 본다. 장기간의 안정성을 고려하는 경우에는 세라믹스계 인공 골재 등의 제조나 세라믹스계 산업 부산물의 이용도 필요하게 될 것이다. 그러나 인공 경량 골재에 관해서는 경제성, 펌프 압송성, 동결 융해 저항성 등 해결해야 하는 문제도 남겨져 있으며 산업 부산물 부문에 있어서는 그대로 사용하고자 하는 것은 아니며 안정된 세라믹스로 전환시키는 필요성의 요구도 고려될 것이다.

## 3. 콘크리트의 치밀화와 재료

오늘날 내구성에 관하여 현재까지 축적되어지고 있는 자료들은 약 100년 정도를 대상으로 하는 자료이다. 이러한 경우 일반적으로 콘크리트 내구성은 콘크리트의 고밀도화·치밀화와 깊게 관련되어지고 염화물 이온이나 탄산가스 등의 부식 인자의 침투를 억제하는 것이 내구성을 유지하는데 중요하게 작용되어진다. 일본 토목 학회에서는 100년 정도(유지 관리를 하는 경우 300 ~ 500년 정도)의 내구성을 가지는 구조물을 구축하는 것을 목표로 하는 자기충진형 고강도, 고내구성 콘크리트 구조물의 설계·시공 지침안도 제출되어져 있기도 하다. 이러한 경우의 자기충진형 고강도 고내구성 콘크리트는 물-결합재비가 40% 이하, 설계 기준 강도가 60 N/mm<sup>2</sup> 이상, 양호한 자기 충전성을 가지며, 자기 수축이 적고, 내구성에 뛰어난 것으로 보고되고 있다. <그림 1>은 시멘트, 콘크리트의 고밀도화와 관련된 재료들을 정리한 것이다. 기본적으로 내구성을 향상시키는 방법으로는 적절한 유동성을 확보하면서 물-결합재비를 낮추는 것이며, 치밀한 콘크리트를 제조하는데 있다. 시멘트

트 경화체에 있어서의 고밀도화는 물-결합재비를 낮추는 것이며 그러기 위해서는 화학혼화제, 특히 폴리카르본산계의 고성능 AE감수제가 필수 불가결하게 된다. 또한 고로슬래그 미분말, 실리카 폼, 플라이 애쉬, 에트린자이트 생성계 혼합재등의 혼화재료도 중요하게 되며 결과적으로 이러한 혼화재료에 의해, 골재 주위의 천이대도 개선되어질 수 있다. 그러나 수화발열에 따르는 온도에서의 의한 균열과 건조 수축, 물-결합재비 저하시 발생하는 자기 수축에 의한 균열 등을 제어할 수 있도록 고려해야 할 것이며, 양질의 골재 선정 또한 중요한 것을 알 수 있다.

장기 내구성이 우수한 시멘트로서는 일본콘크리트협회(JCI)의 경우 장기 내구성 연구 위원회에서 여러 인자들을 고려하여 중용열 클링커를 기초로한 혼합(혼합 재료의 혼합률이 20% 정도)시멘트, 분말도를 적게 한 보통 포틀랜드시멘트, 혼합 시멘트계 등을 권장하고 있다. 이러한 시멘트들이 장기 내구성을 고려한 시멘트로 권장되어지는 이유는 이미 100년 정도 경과한 구조물 등으로부터 채취한 온전한 콘크리트 분석에 기초를 두고 보고하고 있는 것으로서 이러한 콘크리트 시편 중 시멘트는

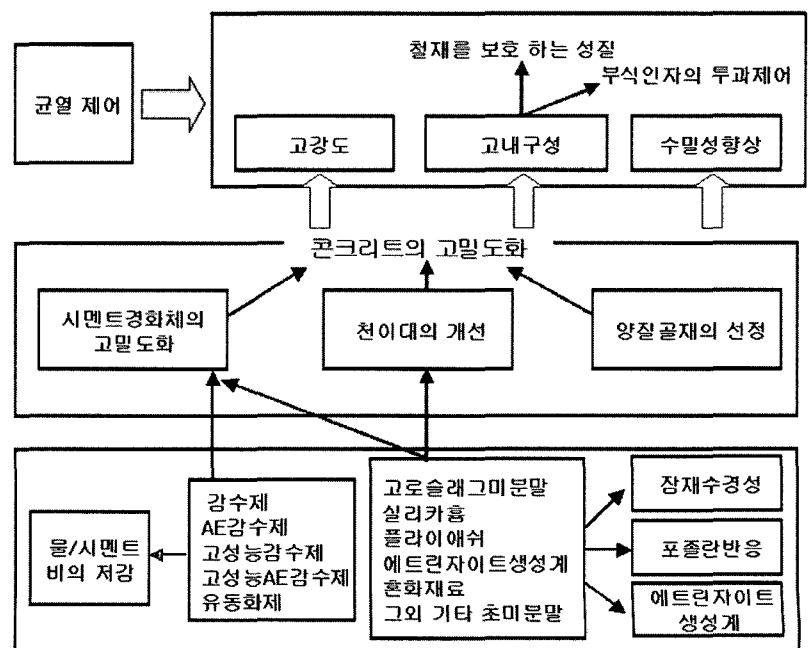


그림 1. 콘크리트의 치밀화와 재료

표 1. 혼화재의 특징과 재료설계시의 주의사항

혼화재	장수명화와 관련된 효과	작용기구	반응과 성능을 지배하는 인자	재료(배합)설계시 상기해야할 사항
고로슬래그미분말	치밀화와 천이대개선 알카리골재반응억제 염화물이온고정화	잠재수경성 알라이트의 초기수화촉진	염기도 유리화율 미분말	중성화억제 자기수축
서냉(고로)슬래그미분말	중성화억제 유동성개선 저발열성	메리라이트반응 미량성분 알라이트의 초기수화촉진	메리라이트함유율 미량성분함유율	품질변동
플라이 애쉬	치밀화와 천이대개선 알카리골재반응억제 염화물이온고정화 초기강도발현	포졸란반응 알라이트의 초기수화촉진	유리화율 (유리상의염기도) 분말도 미연탄소	품질변동 중성화억제
실리카 폼	치밀화와 천이대개선 알카리골재반응억제 염화물이온고정화	포졸란반응 알라이트의 초기수화촉진	SiO <sub>2</sub> 함유량 석영함유량 미연탄소	자기수축 핸드링 품질변동
석회석미분말	유동성개선 저발열성	입자형제어 C <sub>3</sub> A와의반응 알라이트의 초기수화촉진	미분말 CaCO <sub>3</sub> 함유율 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 량 : 점도혼입률)	CaCO <sub>3</sub> 함유율 DEF*
에트린자이트생성제	치밀화 저발열성	에트린자이트생성 알라이트의 초기수화촉진	무수석고용해도 분말도 성분조정	장기안정성** (균열)

\* DEF : Delayed Ettringite Formation(석회석미분말의 경우 DEF는 한정된 치환율이나 분말도에 따라 생성되어질 가능성이 있음. 고유 동 콘크리트와 같이 치환율이 높은 경우는 생성되어지지 않음. 팽창성은 불분명함.)

\*\* 시판되는 재료는 성분, 안정성을 확보하여 설계 되어진 것임. 무수석고를 단독사용 하는 경우에는 균열을 발생시킬 가능성이 높음.

현재의 보통 포틀랜드시멘트에 비하여 벨라이트(C<sub>2</sub>S)를 많이 포함하고 있으며, 분말도 또한 적은 것으로 보고되어지고 있기 때문이다. 보통 100년 정도 경과한 구조물을 관찰하여 본 결과 이러한 종류의 시멘트를 사용하고 있었으며 물-시멘트비를 낮게 하고, 시멘트량을 확보한 콘크리트가 제조, 사용되어졌다. 한편 시멘트 제조 기술에 있어서는 회전로(rotary kiln)가 도입되어 대량생산이 가능해짐과 동시에 시멘트 구성 화합물 중 알라이트(C<sub>3</sub>S)가 증가하고 분말도도 커져 초기 강도 발현성을 향상시키는 방향으로 기술 개발이 진행되어지게 되었다. 이러한 결과는 콘크리트에 있어서 물-시멘트비가 높아져도 소정의 강도를 확보할 수 있게 하였으며, 이전에 단위 수량이 다소 증가해도 강도의 변동폭이 생겨 문제시되었던 시멘트 부분의 문제들도 변화하게 되었다. 이러한 경향은 콘크리트 제조시 단위수량 증가로 이어지게 된 것으로 고려해 볼 수 있는데 예를 들면 유럽의 경우 32.5 N/mm<sup>2</sup>의 콘크리트를 얻는데 1970년대의 경우 물-시멘트비가 50%이었던 것이 1984년에는 57%가 되어

졌던 것을 보아 추정할 수 있다. 그러나 이러한 물-시멘트비의 증가는 내구성의 관점에 있어서 좋은 영향을 끼치지 않는다고 보고되어지고 있으며, 따라서 유럽의 경우에도 시멘트 물리시험에서의 물-시멘트비는 ISO와의 정합성으로부터 50%로 내렸지만 강도는 변함없이 높은 값을 추이하고 있다. 시멘트의 유럽규격(ENV-197)에서는 32.5(32.5 N/mm<sup>2</sup> 이상, 52.5 N/mm<sup>2</sup> 이하) class나 42.5(42.5 N/mm<sup>2</sup> 이상, 62.5 N/mm<sup>2</sup> 이하)class와 같이 강도의 상한 규격을 정하고 있으며, 현재 일본 보통포틀랜드시멘트는 경우 거의 전부가 52.5(28일에 52.5 N/mm<sup>2</sup> 이상)class에 포함되어지고 있다.

내구성의 향상과 관련하여 고유동 콘크리트 등의 기술에 있어서는 화학혼화제 특히 고성능 AE감수제와 시멘트와의 상용성이 문제시된다. 이러한 고유동 콘크리트 기술에 있어서는 시멘트 클링커 상중 간극 질량을 저감시킨 것이나 혼합 시멘트를 사용하는 것도 효과적이며, 황산알카리나 인 혼입량 등의 제어도 필요하게 된다. 최근 시멘트 산업을 둘러싼 환경적인 측면을 고

려해 보면 CO<sub>2</sub>배출량 저감에 의한 환경 부하 감소에 대한 대응이 필요한 것을 알 수 있으며, 최종 처분장의 확보가 곤란하게 되어지고 있는 도시형 폐기물이나 산업 폐기물의 이용 또한 시멘트 산업에서 기대되어지고 부분이다. 그러나 이러한 폐기물을 이용할 경우 화학 조성적으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분량이 증가하게 되기 때문에 클링커 내부의 간극질량은 자연적으로 증가하게 되어진다. 이러한 현상은 내구성을 추구하는 시멘트의 경우 간극질량을 저감시키는 고벨라이트계 시멘트와는 달리 흐름에 역행하는 것을 알 수 있다. 그러나 도시형 폐기물 등의 감용 처리는 시멘트산업 이외로는 곤란하기 때문에 어느 정도의 간극질량을 확보한 시멘트가 생산되지 않을 수 없으며, 따라서 간극상의 조성에서 C<sub>4</sub>AF 비율을 많은 것에 대한 대응에 의해 내구성 측면과 환경친화성의 두 가지 방향을 만족시킬 수 있는 가능성이 있다.

시멘트 제조에 있어서 CO<sub>2</sub> 발생량은 시멘트 제조시와 원료로부터 대부분 발생하기 때문에 환경에 미치는 영향을 줄이기 위해서는 이것을 저감시키는 것이 가장 중

요한 것을 알 수 있다. 결론적으로 클링커 생산량을 감소시킨 혼합 시멘트가 유리한 것을 알 수 있는데, 예를 들면 고로시멘트에서는 보통포틀랜드시멘트에 비하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 약 60% 정도, 석회석 포틀랜드시멘트 등으로서 32.5 class로 수준으로 하면 약 80% 정도 저감시킬 수 있다. 32.5 class의 경우 소요강도를 확보하기 위해서는 물-시멘트비를 낮게 할 필요가 있어 환경 부하 저감과 콘크리트의 장수명화 모두 만족할 가능성이 높은 시멘트 재료이다. 따라서 각종 혼합재나 혼화재료를 사용한 시멘트의 재료 설계 기술이나 품질 관리 방법 및 제조 기술에 관한 체계화 또한 절실히 요구되어진다.

콘크리트의 고밀도화와 관련하여 각종 혼화재료도 중요하게 되어진다. <표 1>은 각종 혼화재료의 작용과 재료 설계상 고려해야 하는 점들을 정리하여 나타낸 것이다. 석회석 미분말은 불활성인 미분체로서 고유동 콘크리트나 고품질 콘크리트에 이용 되게 되었지만 filler 시멘트, 유럽 규격에 의한 석회석 포틀랜드 시멘트, 복합 포틀랜드 시멘트 등의 원료로도 중요하게 사용된다. 또한 서냉고로슬래그재료도 슬럼프 유지성능 개선이나 중성화의 억제 효과 등 기대되어지는 혼화재료의 하나로서 보고되고 있다. 석회석 미분말의 경우 장기 강도 발현에는 크게 기여하지 않는 것으로 보이나 수화에 의한 발열량이 증가하지 않는 불활성을 특성으로 가지고 있으며 알라이트의 초기수화를 촉진하고 칼슘 알루미네이트(calcium aluminate) 상과는 반응하는 특성을 가지고 있다. 석고의 반응이 종료하면 석회석미분말은 반응을 개시해 모노카보네이트(monocarbonate)를 생성하는데 이 때 분말도나 치환율에 의해서 에트린자이트가 다시 증가하는 경우도 있기 때문에 재료 설계시 유의해야 한다.

또 산업 부산물인 고로슬래그 미분말이나 플라이 애쉬를 유용하게 이용하기 위해서는 품질의 제어 또한 중요하게 된다. 고로슬래그 미분말의 경우 유리화율은 95% 이상 높으며, 유리의 염기도가 낮은 경우

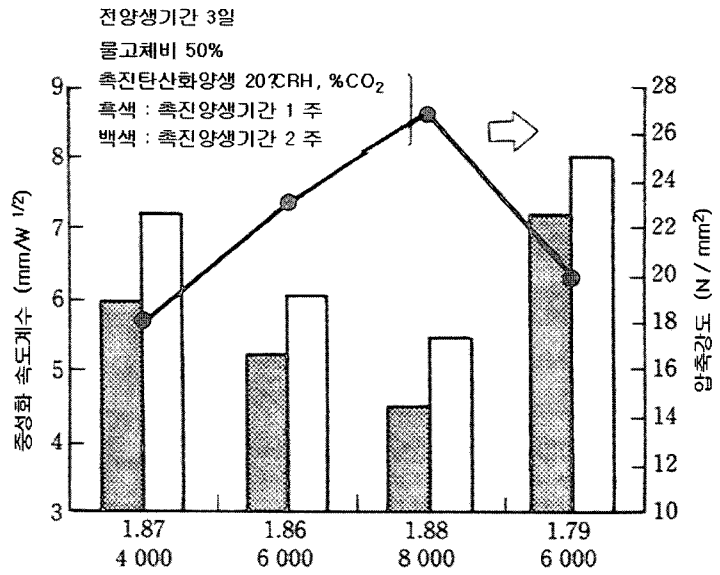


그림 2 고로슬래그 미분말의 성질과 성능

에는 소요 강도를 확보하기 위해 분말도가 높은 것이 좋다. 그러나 이러한 경우 <그림 2>에 나타내는 바와 같이 중성화 속도를 저감시키는 효과가 있기 때문에 신중히 검토하여야 한다. 따라서 내구성의 관점에서는 염기도가 높은 고로슬래그가 생산되는 것에 대하여 충분히 고려하여야 할 것이다. 플라이 애쉬 경우는 유리화율이 30~85% 범위로 변동폭이 큰 편이다. 또한 유리화율에 의해 유리부분의 염기도도 다르기 때문에 반응률도 다르며 재령 28~91일 사이의 경화체의 공기비율도 달라져 내구성의 영향도 변화하게 되어진다. 따라서 이와 같은 재료들을 콘크리트에 적용하고자 할 경우에는 재료 특성에 기초한 재료 설계 수법의 확립이 요구되어지며, 이러한 것이 내구성을 고려하기 위한 기초임을 알 수 있다.

#### 4. 시공 결함 방지를 위한 재료

블리딩 방지나 재료 분리 저항성을 향상시키는 것에 의해 시공 결함을 방지하는 것은 재료에 의한 대응도 가능하지만 타설 시 시공 기술에 의한 커버 또한 필요하다. 전절에서 말한 32.5 class의 시멘트를 사용하여 소요 강도를 확보하기 위해서는 보통 포틀랜드시멘트(52.5 N class)에 비해

시멘트량 즉 분체량이 증가하게 된다. 이러한 방법에 의해 재료 분리에 대한 저항성을 높이는 것이나 블리딩을 방지하는 것은 초기 결함 방지를 위해서는 중요하다. 유럽규격의 경우 이들 class 시멘트는 여러 종류의 다양한 원료를 사용하여 제조하여도 좋은 것으로 보고되고 있다. <그림 3>은 각종 시멘트를 사용하여 슬럼프 12cm, 공기량 4.5%, 강도를 24, 30, 36이라고 한 콘크리트의 블리딩률과 분리계수와의 관계를 나타낸 것이다. 분리계수는 일정 용적의 시료를 4각뿔형 콘에 낙하시키면서 일정 거리로 퍼진 시료 중 조골재 질량비를 측정된 것으로 큰 값을 나타낼수록 재료 분리되어지기 쉬운 것을 나타낸다. 그림에서 보면 여러 강도 레벨(level)의 콘크리트에 있어서 보통포틀랜드시멘트를 사용한 경우에 비하여 32.5나 42.5 class의 시멘트를 사용한 경우에는 현저하게 블리딩률이 감소하고 분리계수도 작은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또 단위 수량과 단위 시멘트량의 관계에 있어서도 32.5 N class를 사용하여 목표 설정한 강도를 확보하기 위해서는 어느 정도 분량의 시멘트가 필요하며 분체량이 확보되고 단위 수량도 내구성을 고려한 경우로 유지하여야 하는데 각 학회가 정하고 있는 수치보다는 작은 수치가 되어질 수도 있

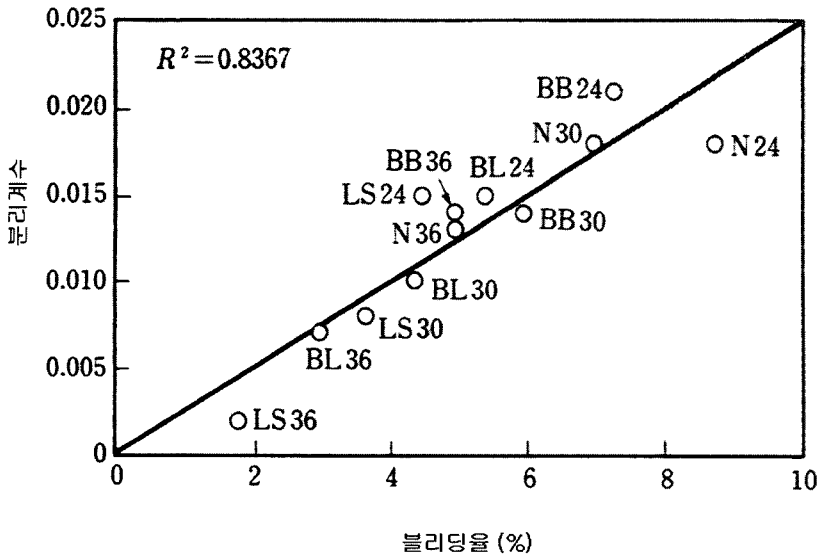


그림 3. 각종시멘트를 이용한 콘크리트의 재료분리 저항성

(예 LS30 : 영문은 시멘트의 종류, 숫자는 설계강도를 나타낸 것이다. BL : 고로슬래그와 석회석 미분말을 15 mass % 혼합한 32.5 N class, LS : 석회석미분말 30 mass % 혼합한 32.5 N class, BB : 고로시멘트 42.5 N class, N : 보통포틀랜드시멘트 52.5 N class)

다. 유럽규격에서의 52.5 class에 해당하는 보통 포틀랜드시멘트의 경우에는 설계강도를 저하시키게 하는 한 원인으로 시멘트 부족이 될 수도 있으며 단위 수량도 증가하여 시공 결함을 일으키기 쉽게 되어진다. 또한 내구성 측면에 있어서도 좋은 배합이 되지 않는 경우가 발생하기도 한다.

시공결함을 방지하는 측면에서는 고유동 콘크리트의 실용화도 중요하다. 시멘트 콘크리트에 분야에 있어서 사회적인 요구는 장수명화와 같이 콘크리트 구조물의 고

내구성화와 더불어 경제적으로 합리적인 시공이 요구되어지고 있는데 고유동 콘크리트의 경우 전체비용을 고려하여 볼 때 이러한 두 가지의 요구를 모두 만족시킬 수 있는 가능성이 높다. 이러한 고유동 콘크리트는 일반적으로 분체계, 병용계, 중점계제로 분류될 수 있으며 실용화와 관련하여서는 안정적인 유동성 확보를 위한 유동성 제어 기술의 확립이 절실히 요구된다. 특히 현재 주류가 되고 있는 폴리카르본산계의 고성능 AE감수제와 시멘트와의

상호작용 규명은 고유동 콘크리트를 제조하기 위해서는 상당히 중요한 부분으로 많은 연구가 요구된다. 고성능 AE감수제를 사용한 경우에 있어 유동성을 제어하기 위해 요구되어지는 기술들로서는 고분자 구조와 관련하여 1) 초기수화의 영향 2) 분체특성과 흠착시 유동성 3) 미량 성분 또는 불순물의 흠착·분산 작용에의 영향 4) 특이 흠착 이온과 고분자의 흠착으로 인한 유동성과의 관계 등을 들 수 있다. 이러한 기술들은 고유동 콘크리트 제조를 위한 기본적인 데이터로 정리하여 각종의 문제가 발생할 경우 어떤 현상이 왜 이와 같이 발생되었는지 정리할 수 있다. 따라서 일시적인 문제발생의 대처를 위한 대응은 기술 축적에 장애가 되어지고 있음을 상기하여야 할 것이다. 최근에는 시멘트 플랜트에서 도시형 폐기물의 처리가 진행되어지고 있기 때문에 제조된 시멘트에서의 간극상분량이나 조성을 조절하는 방법이나 각종의 미량 성분을 어떻게 제어할 수 있는지가 중요하며, 환경 부하 저감 관점에 있어서는 혼합재를 사용한 경우의 제어 기술 확립이나 석고의 종류 등을 어떻게 관리할 수 있는지 고려해야 할 것이다. 이와 더불어 균열 저감 때문에 사용되어지는 팽창재 조성 등의 영향을 또한 어떻게 제어할 수 있는지 고려하여야 할 것이다. 유동성 제어 요소 기술로서는, 이들 고성능 AE감수제로 사용되는 고분자의 구조와 관련하여

표 2 고성능 AE감수제의 메커니즘에 기초한 유동성제어

항목	현상	제안된 메커니즘	메커니즘에 기초하여 제안된 대응책
미량성분의 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>황산염, 인산염, 탄산염 등의 난용성의 Ca염 형성에 의한 유동성 저하</li> <li>염화물이온으로부터의 영향은 조금 있음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>흠착저해(특이흠착이온이 있어 Ca<sup>+</sup>의 감소로부터 흠착사이트의 감소 또는 이온과의 경쟁흠착)</li> <li>고분자수축</li> <li>황산염은흠착저해와 수축</li> <li>탄산염은 흠착저해</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>고분자의구조제어</li> <li>Ca염의 첨가</li> <li>CaO 첨가</li> </ul>
혼화재, 혼합재의 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>석회석미분말에 주어진 점도광물의 혼입으로 부터의 유동성 저하</li> <li>플라이 애쉬 중의 미연소탄소부터의 유동성저하</li> <li>분체특성으로 인한 유동성 차이</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>점도에서의 고분자 흠착(골재에서 발생 가능성)</li> <li>미연탄소에 의한 고분자 흠착</li> <li>유동성과 형성계수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CaCO<sub>3</sub> 양의 규정</li> <li>미연소탄소의 처리</li> <li>채취방법</li> <li>선택흠착의 이용</li> <li>입도구성의 제어와 형성계수가 우수한 분체의 선정</li> </ul>
칼슘알루미늄에이트상의 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>칼슘알루미늄에이트상양의 증가에 의한 첨가량의증대</li> <li>폴리카르본산에서부터 초기수화촉진</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>초기 비표면적의 증가</li> <li>흠착, 수축량의증가</li> <li>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 공급 저해</li> <li>석고형태의 변화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>C<sub>3</sub>A량의 제어 · C<sub>4</sub>AF량의 증가</li> <li>석고형상의제어(반수석고의제어)</li> <li>유리 석회량 · 팽창제의 이용</li> <li>서냉슬래그의 이용</li> </ul>

표 3. 고강도혼화재를 이용한 콘크리트의 특성

강도 레벨	재료	물-결합재비	S/a	단위량(kg/m <sup>3</sup> )							압축강도 (N/mm <sup>2</sup> )	단열온도상승 $\Delta T = K(1 - e^{-at})$	
				W	C	S	G	LSP	Add	혼화제		K(°C)	a
35	N	65	48	182	280	880	960	-	-	1.68	35.4	38.4	0.86
	Add.	70	48	162	200	875	955	100	30	-	36.6	30.3	0.72
70	N	41	46	178	430	791	935	-	-	0.86	72.0	53.5	1.10
	Add.	42	46	145	300	857	1014	-	45	-	75.8	40.1	0.89

(N : 보통포틀랜드시멘트, Add : 고강도혼화제(감수제성분이 혼합되어 있음) LSP : 석회석 미분말, 슬럼프 : 5 cm, 공기량 3%)

정리할 필요가 있는데 고분자의 조성이나 분자 구조 등이 불분명 할 경우 발생되어진 현상에 대하여 여러 가지 의논을 하여도 무의미한 것이 되어지기 때문이다. 또한 시멘트 자체도 유동성 제어 관점에서는 품질 변동이 심하게 작용하는 것이기 때문에 요소 기술로서는 유동성에의 영향과 수화반응에의 영향을 분리해 의논할 수 있도록 정리할 필요성도 있다. 필자들은 유동성의 영향만을 고려하기 위해서는 수화반응을 일으키지 않는 석회석 미분말이 유용하다고 생각하고 있으며, 초기 수화 반응 모델로서는 C<sub>3</sub>A석고계를 받아들이고 있다. 이들 유동성을 제어하기 위한 연구는 고성능 AE감수제의 분산기구의 해석과 더불어 진행되어지고 있으며 매커니즘의 규명을 기초로 하여 명백하게 되어진 사항들을 필자 등의 연구를 중심으로 <표 2>에 정리하여 나타내었다. 결론적으로 이러한 연구 결과들을 통합해 나가는 것에 의해 유동성 제어 기술의 확립은 가능하게 되어 지리라 보인다.

5. 균열제어와 재료

염화물 이온이 콘크리트 중 균열에 미치는 영향 등이 평가 방법으로 받아들여지고, 콘크리트의 내구성에 영향을 미치게 하는 균열의 영향이 정량적으로 다뤄지고 있다. 시공 단계에서의 균열 제어와 관련하여 재료측면에서는 온도응력에 의한 균열 방지가 있는데 이것은 수화열에 의한 온도 상승을 억제하기 위한 것으로써 저열 포틀랜드 시멘트나 삼성분계 혼합시멘트가 사용되고 있다. 분체계 고유동 콘크리트와

같이 다량의 분체가 요구되어질 때에 수화에 의한 발열을 동반하지 않는 분체로 석회석 미분말이나 서냉고로슬래그가 이러한 용도로써 사용 가능하며, 특히 후자의 경우 유동성 유지 성능 개선이외에 중성화 억제 효과도 어느 정도 있는 것이 보고되고 있다. 고로시멘트도 본래는 수화열 억제 목적으로 사용 되게 되었지만 수화반응 검토하여 보면 최근 고로슬래그 미분말의 경우 포틀랜드시멘트와 다름없는 수화거동을 나타내고 있으며 반응도 빨라져 장기 강도 발현에 기여한다고 한다. 그러나 아직까지는 재료 설계에 구체적이지는 못한 점이 있어 향후 이러한 재료 본래의 특성을 가지는 고로시멘트의 재료 설계도 필요할 것으로 고려된다. 또한 무수석고계 고강도 혼합 재료를 사용하여 설계시 요구하는 역학적 특성을 갖추며, 수화열에 의한 온도 상승을 저감하는 방법도 제안되고 있다. <표 3>에 나타낸 바와 같이 이러한 종류의 혼합 재료를 사용하면 단위 시멘트량을 감소시켜도 소요 강도를 얻을 수 있으며 내마모성이나 염화물 이온의 침투에 대한 저항성도 뛰어나 균열을 고려하여 내구성을 향상시키기 위한 중요한 재료 중의 하나로 보여진다. 더욱이 이러한 혼화재료를 이용하고 콘크리트의 강도 레벨이 낮은 경우에는 분체량이 적어지기 때문에 석회석 미분말을 사용할 수도 있다.

자기 수축이나 건조 수축에 의한 균열 방지 재료로서는 유기계의 수축 저감 제와 팽창재를 들 수 있다. 물론 건조 수축 저감이라고 하는 관점에서는 고성능 AE감수제 등의 사용에 의해 단위 수량을 가능한 적게 하는 것도 중요하다. 건조수축 저

감 제로서는 일반식이 R<sub>1</sub>(AO)nR<sub>2</sub>(R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> : 수소기, 알킬기나 페닐기, A : 탄소수 2 ~ 3의 alkylene기나 2종류의 다른 alkylene기)로 표현되어지며 유기화합물이 많이 사용되어진다. 첨가량은 시멘트에 대해 1 ~ 3% 정도이며, 폴리카본산계 고성능 AE감수제의 구조 중에서 수축 저감 작용을 나타내는 관능기를 도입하여 감수성과 수축 저감 작용을 동시에 가진 것도 개발되고 있다. 수축 저감제의 작용 기구는 주로 모세관 공극들의 표면장력을 저하시켜 모세관장력이 감소하고 건조 수축이 저감 되는 것으로 설명된다.

콘크리트의 건조 수축 등에 있어서는 균열 저감 및 균열 내력의 향상을 목적으로 팽창재가 개발되어지고 있으며 실용화되어지고 있는 추세이다. 팽창재를 혼합한 수축보상용 콘크리트의 팽창율(JIS A 6202 부속서의 2 A법에 의한 ; 재령 7일)은 일본의 경우 150 × 10<sup>-6</sup> ~ 250 × 10<sup>-6</sup>을 표준으로 하고 있다. 일반적으로는 팽창력의 크기는 팽창재의 사용량에 의해 제어되며 콘크리트중의 단위 팽창재량이 기준이 된다. 또한 수축 보상용 콘크리트의 경우에는 30 kg/m<sup>3</sup> 정도로 정하고 있는 경우가 많다. 현재 일본에서는 아원, 유리석회 및 무수석고를 주성분하며 에트린자이트(CaO : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CaSO<sub>4</sub> = 3 : 1 : 3)와 성분이 유사한 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SO<sub>3</sub>(칼슘설포알루미네이트(CSA))계 팽창재와 생석회를 주성분으로 하는 CaO-SO<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>(생석회(FLE))계 팽창재가 실용화되어 사용되어지고 있으며, 최근에는 수화반응 해석에 기초하는 재료 설계에 의해 유리 석회 함유량을 높은 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SO<sub>3</sub>계 팽창재(HL-CSA)도

개발되고 있다. <그림 4>는 이러한 팽창재를 혼합한 콘크리트의 길이변화를 나타낸 그림으로 종래 것보다 혼합 분량을 6할 정도 내라도 같은 정도의 팽창 성능을 나타내는 것을 확인 할 수 있으며 고로시멘트등을 사용한 경우에도 보통시멘트 같은 정도의 팽창 특성을 나타내는 등 우수한 성능을 가지고 있는 재료들 또한 보고되고 있다.

더욱이 수처리 시설 등과 같은 메스 콘크리트에서는 유기혼화제를 병용한 수화열 억제형 팽창재가 저열포틀랜드시멘트등과 함께 이용되고 있다. 이러한 팽창재들의 경우 에트린자이트를 팽창 작용 주체로 하는 CSA계에서도 수산화칼슘을 발생하며, 수산화칼슘을 팽창 작용 주체로 하는 FLE 계에서도 다량의 에트린자이트를 생성할 수 있다. 따라서 이러한 두 가지 팽창재를 혼합한 시멘트는 수화시 경화체 상 조성이 유사하며 장기 내구성 등에 있어서도 거의 동등한 수준을 보여줄 것으로 보여진다. 자유팽창시에는 경화체의 미세관 공극이 팽창재 혼합에 의해 증가하고 있는 것보다는 새로이 생성된 수화물이 공극을 가지는 응집체를 형성하여 큰 체적을 유지하게 되며 팽창한다고 고려할 수 있다. 팽창재를 혼합해 무구속 조건으로 양생한 경

화체와 일정 시간 구속한 경화체 사이에서 10 μm 이상의 큰 공극 차가 나타나는 등 형틀에 의해 구속한 경우의 쪽이 10 μm 이상 공극이 감소하고 있다고 보고되어지고 있다. 즉 구속 조건하에서의 팽창재 혼합에 의한 체적의 팽창은 보다 큰 공극을 감소시키는 효과를 보여주며 경화체는 치밀화되게 되어진다.

팽창재와 수축 저감제를 사용함에 있어 물-시멘트비를 저감한 경우에 있어 자기 수축이나 건조 수축 저감에 효과가 있으며 또한 저열포틀랜드시멘트 등의 이용에 의한 발열 특성을 제어하는 것으로도 균열 저항성을 높이고, 섬밀한 고내구성 콘크리트도 제조할 수 있다. 더욱이 25% 이하의 현저하게 물-결합재비가 낮아지면 미반응 시멘트나 미반응 팽창재 등이 잔존하는 경우도 발생하기 때문에 팽창재의 종류 및 혼합 분량 등 장기 안정성에 관련하여 신중하게 고려하여야 할 것이다.

### 6. 초장기 내구성을 고려하는 경우

1000년을 초월하는 장기 내구성을 고려하는 재료의 경우 탄산화 반응을 적극적으로 활용하는 것도 필요하게 된다. 이러

한 경우 보강재는 전혀 다른 발상이 요구되어진다. 오늘날 수 천년 경과한 콘크리트는 세계의 여러 곳에서 발견되고 있는데 초장기 내구성을 고려하는 경우 이러한 재료들은 중요한 정보를 제공하고 있다. 이스라엘·남아프리카의 Yiftahel에서는 기원전 7000년 정도로 추정되는 콘크리트가 발견되기도 하였는데 이러한 재료는 석회에 석회석을 골재로 사용하고 표면을 연마하여 40 N/mm<sup>2</sup> 정도의 고강도를 가지는 석회콘크리트이다. 「당시의 콘크리트는 대단히 고밀도였으며 결과적으로 고강도이었던 것이 중성화를 현저하게 늦추어 현재까지 남아 있게 한 것이다.」라는 보고가 있지만 XRD의 결과를 보면 대부분이 탄산칼슘인 것으로 보아 다음과 같이 해석하는 것이 바람직하다고 고려된다. 즉 치밀하게 문쳐진 석회 콘크리트가 최종적으로 중성화하여 석회석에 가까운 상태로 변화되어진 것으로 고려하는 것이 좀 더 타당할 것이다. 또한 중국의 대지만 유적에서는 약 5000년 전에 구축되었으리라 추정되는 대형 주거지가 발견되기도 하였으며 주위의 암석 상태를 고려하여 본 결과 그 소재가 수경성 시멘트를 사용한 현대의 콘크리트에 필적한 만한 것이 사용되었을 가능성이 높은 것으로 보고되고 있다. 이 고대 콘크리트에 사용된 시멘트는 탄산칼슘과 점토를 주성분으로 한 돌(요강석)을 소성한 것으로서 그 압축 강도가 현재에서도 12 N/mm<sup>2</sup> 이상의 값을 나타내고 있으며 인공 경량 골재 등까지도 사용되어 졌던 것으로 보여진다. 유적에서는 1000도 정도 소성이 가능할 것으로 추정되는 가마도 발견되었으며 원료인 요강석을 이 가마에 의해 소성하여 시멘트로 사용하였으리라 추정되어진다. 요강석은 분말X선회절에 의하면 탄산칼슘, 석영, 장석, 운모와 점토 광물인 몬토리로나이트로 구성되어져 있으며 평균 조성은 현재의 포틀랜드시멘트와 큰 차이가 없는 것으로 보고된다. 요강석을 사용한 고대 시멘트의 재현 실험으로 1000°C에서 소성한 시료의 경우 상당한 분량의 CaO와 석영이 반응해 β-C<sub>2</sub>S나

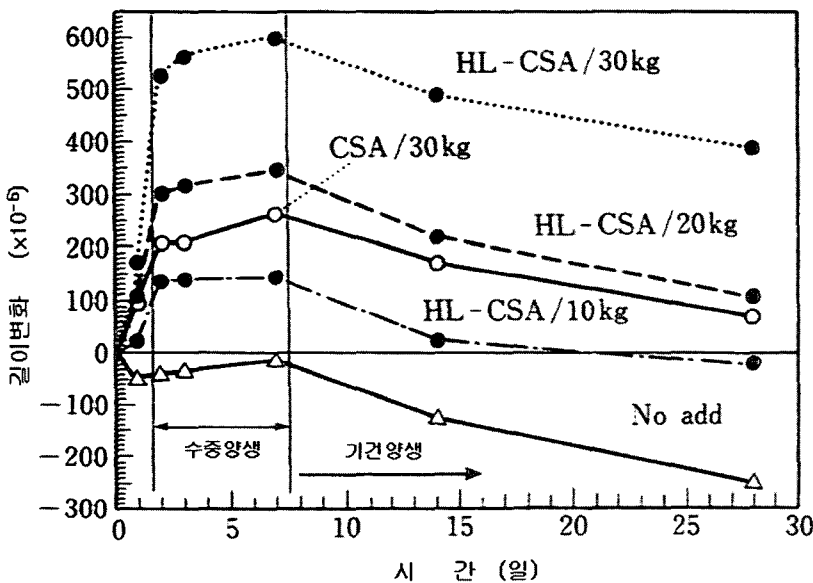


그림 4. 팽창재를 혼합한 콘크리트의 길이변화

(슬럼프 18 cm, 공기량 4.5%, 물-결합재비 55%, S/a 44%, 단위수량 170 kg/m<sup>3</sup>, 단위결합재량 310 kg/m<sup>3</sup>의 콘크리트)

게레나이트를 생성하고 있는 것을 알 수 있으며, 고대에 있어서도 수경성 화합물을 얻을 수 있었던 가능성이 높은 것을 알 수 있다. 이러한 것을 보아 5000년 전 중국에서도 고벨라이트계 시멘트에 가까운 수경성 시멘트의 제조가 재료적이나 기술적으로도 가능하였던 것을 추정할 수도 있는 것을 알 수 있다. 또한 5000년을 경과한 콘크리트의 경우 전면적에서 탄산화가 진행되어지고 있으며, 수 천년이 경과되도록 콘크리트의 초장기 내구성을 고려하여야 하는 경우에는 탄산화 반응을 적극적으로 이용하는 재료 설계도 중요하게 고려되어야 할 것으로 보여진다. 또한 구조물의 경우 주어지는 환경에 의하여 탄산칼슘의 용탈 현상 또한 발생하기 때문에 환경 조건의 평가도 요구되어진다.

현재 콘크리트계 재료 중에서 저열포틀랜드시멘트는 위에서 언급한 시멘트와 유사한 시멘트이다. 벨라이트를 다량으로 함유한 저열포틀랜드시멘트를 사용하여, 물-시멘트비 50%, 결합재-모래비를 2로 하고, 수중 양생 후 20°C, 60% RH, 탄산가스 농도 10%하에서 촉진 탄산화 반응을 하여 압축 강도는 100 N/mm<sup>2</sup> 정도, 곡강도는 20 N/mm<sup>2</sup> 정도가 되었을 경우 물-시멘트비 50%의 수중양생으로는 얻을 수 없는 고강도를 발현하는 것을 알 수 있다.

일반적으로 고로시멘트나 보통시멘트에서는 탄산화 반응을 시행하여도 이와 같이 고강도가 얻어지지 않는다. <그림 5>를 보면 알라이트의 경우 수중양생과 탄산화 양생 중 반응률은 거의 같은 경향을 나타내고 있는데 반해 벨라이트는 탄산화 양생 중에서 급격하게 반응이 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 탄산화 양생에서의 주요 생성물은 탄산칼슘, 바테라이트의 탄산칼슘과 겔(gel)상의 수화물로 주로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 겔상 수화물 조성을 추정하여 보면 C<sub>0.77</sub>SAC<sub>0.15</sub>H<sub>2.18</sub>이 된다. 이 재료는 클링커 제조시에 발생하는 탄산가스량의 약 52%를 고정화시키는 것

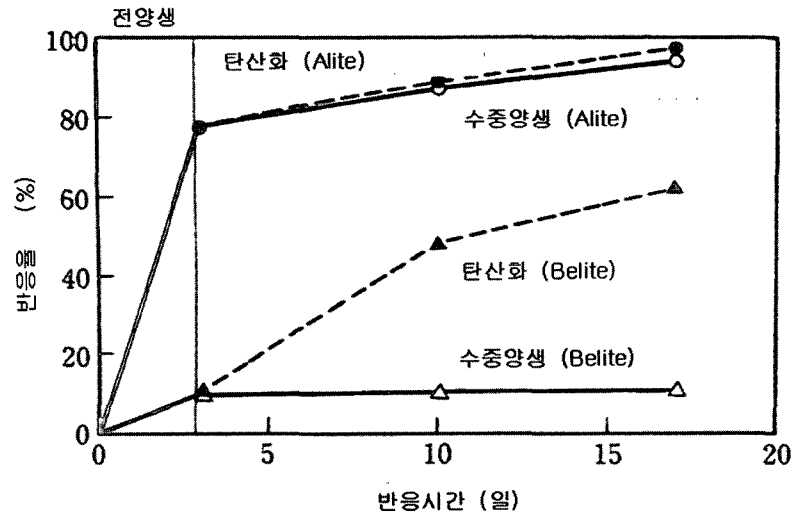


그림 5. 촉진탄산화 양생 환경에 있는 저열포틀랜드시멘트의 반응

(알라이트 30.0%, 벨라이트 53.2%의 저열포틀랜드시멘트, 물-시멘트비 50%, 20°C, 수중양생 3일 후 20°C, RH 60%, CO<sub>2</sub> 농도 10%에서 촉진탄산화)

이 가능하기 때문에 환경 부하 저감 관점에서에서도 유효하다. 즉 벨라이트가 높은 화학 조성의 시멘트에서는 탄산화 중에도 반응이 촉진되어 콘크리트가 치밀화하는 것을 알 수 있으며 따라서 탄산화한 콘크리트도 시멘트의 조성에 따라서는 장기적 안정성을 확보할 수 있는 가능성이 있음을 알 수 있다. 결론적으로 콘크리트의 장수명화를 목적으로 하는 것에 있어서는 적극적인 활용도 필요할 것으로 보여지며, 또한 보강재의 경우에 있어서는 기존의 발상과는 다른 제안이 필요할 것으로 보인다.

### 7. 맺음말

지금까지 구조물의 장수명화와 관련된 콘크리트 재료에 대해서 언급하였다. 이미 언급한 재료이외에도 많은 재료들이 장수명화를 위해 제안되어 지고있는 추세이다. 그러나 화학적 침식 등과 관련된 장수명화에 있어서는 본고에 언급되었던 기술로 대응하는 경우 산성비에 대한 저항성 등은 문제가 되어지지 않으나 하수나 화학 공장 등에서 발생하는 강산 등에 의한 경우에는 콘크리트 재료만으로 장수명화를 실

현하기에는 곤란한 경우도 있다. 이러한 경우에는 유기계 재료를 적절하게 이용하고 유지 관리를 충실히 함으로써 장수명화를 실현할 필요가 있으며, 아울러 이와 같은 재료를 어떻게 활용하고 설계·시공해 나갈 것인지 중요하다. 이러한 재료는 통상적인 콘크리트에 비해 경제성에 있어서 문제가 되어지는 경우도 많기 때문에 라이프사이클이나 보상을 고려한 경제성 평가 시스템 또한 제안되어야 할 것으로 보여진다. 따라서 재료를 제공하는 측면에서는 이와 같은 재료를 활용하기 쉽게 하기 위해서 품질 변동을 없애는 제조상의 노력도 필요할 것이며, 산업 부산물 등을 효과적으로 사용할 수 있도록 한 재료 설계 수법이나 품질관리 시스템이 확립되도록 노력하여야 할 것이다. 또한 시멘트 산업이 고온 화학 플랜트 산업임을 고려하면 도시형 폐기물의 감용처리 시스템과 관련하여 그 유용성을 증가시킬 수 있을 것으로 보여지며 따라서 시멘트 산업은 순환형 사회에 공헌할 수 있게 되며, 지구 환경 문제에 있어서도 고로슬래그나 filler 시멘트와 같은 혼합시멘트를 사용함으로써 CO<sub>2</sub>발생량을 저감시키는 효과를 낼 수 있을 것이다. □