

초(超)성능에 도전하는 시멘트·콘크리트

최 상 흘 <한양대학교 교수, 공학박사>

『보다 강하게, 보다 가볍게, 그리고 보다 내구성을 갖게 이것은 시멘트·콘크리트가 지향하는 슬로건으로 이러한 초유동성(超流動性) 시멘트·콘크리트, 초저열(低熱) 시멘트·콘크리트 등 그 기능 앞에 초(超)자가 붙은 초내구성을 지향하는 시멘트·콘크리트가 등장하고 있다.』

콘크리트 구조물의 대형화·고층화 그리고 복잡화는 콘크리트에 요구되는 성능의 고도화를 요구하고 있으며, 최근들어 시멘트·콘크리트도 이 요구에 부응하여 초성능에 도전하고 있다.

‘더 빨리, 더 높이, 더 멀리’의 슬로건을 내걸은 올림픽은 인간이 이룰 수 있는 극한에 대한 도전으로 세계 기록 갱신으로 그 극한에의 도전에서 인간의 능력을 보여주고 있다. 또 이 올림픽에서 우리는 우리나라를 세계속의 한국으로 우리의 국제화를 앞당기고 얼어붙은 동서의 냉전을 녹이는데 큰 몫을 하였다.

‘보다 강하게, 보다 가볍게, 그리고 보다 내구성을 갖게’ 이것은 시멘트·콘크리트가 지향하는 슬로건으로 이는 시멘트·콘크리트,

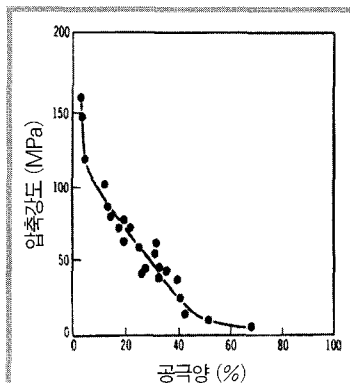
초유동성(超流動性) 시멘트·콘크리트, 초저열(低熱) 시멘트·콘크리트 등 그 기능 앞에 초(超)자가 붙은 초내구성을 지향하는 시멘트·콘크리트가 등장하고 있다. 이와 같은 초기능을 갖는 시멘트·콘크리트의 출현은 인류의 생활환경

을 보다 넉넉하고 편하고 윤택하게 하는데 큰 몫을 하고 있다.

초고강도 시멘트·콘크리트

콘크리트의 강도는 콘크리트를 구성하고 있는 구성재료의 강도와 재료들 사이의 계면 강도의 크기로 정해진다. 즉 시멘트 페이스트의 강도, 골재의 강도, 시멘트 페이스트와 골재의 접착강도로 결정된다.

시멘트 페이스트의 강도는 경화체의 공극과 밀접한 관계를 갖고 있는데 <그림-1> 강도를 높이기 위해서는 물·시멘트 비를 저감시켜야 하며 아직 굳지 않은 콘크리트의 유동성을 높여(초유동성-후술) 충전성을 높이고 경화체를 치밀화시키는 방법이 강구되고 있다. 최



<그림-1> 시멘트페이스트의 공극량과 압축강도와의 관계

근 개발되고 있는 방법으로는 시멘트의 형상, 입도분포, 시멘트의 광물조성 등에 관한 것을 들 수 있다.

① 시멘트 입도분포 조절

시멘트 입도 분포를 연속적으로 고르게 분포시켜 충전성을 높이므로 콘크리트의 고강도화를 시도한 것으로, 이를 위하여 포틀랜드 시멘트에 미분말로 실리카 폼, 플라이애쉬, 고로 슬래그 미분말 및 석회석 미분말 등을 적당한 비율로 혼합한다. 포틀랜드 시멘트의 일부를 이와 같은 시멘트 미분말재료를 40%이하의 범위로 혼합하고 물·시멘트 비를 20%로 하였을 때 100MPa 이상의 압축강도가 얻어졌다.

또 실리카 폼과 같은 초미분말을 사용하여 치밀화 시키는 DSP(densified system containing homogeneously arranged ultra-fine particle) 시멘트도 있

다. 이는 초미립자의 microfiller 효과 및 구형입자의 경우 ball bearing효과로 경화체를 치밀화시키고 그리고 수화시 pozzolan효과도 장기재령에 걸친 치밀화조직을 형성하여 고강도화 한다.

② 시멘트입자의 구상화

시멘트입자를 둥글게 함으로써 유동성을 향상시키고 또 입자의 요철을 줄임으로써 입자에 구속되지 않는 자유수분을 증가시켜 역시 유동성 증가로 충전성의 향상을 도모한다.

고속기류 속에서 충격법으로 시멘트 입자를 구상화시키는 방법이 개발되었는데 <그림-2>는 이렇게 얻은 시멘트 입자로 둥근 정도는 구를 1로 하였을 때 0.85(보통 포틀랜드시멘트는 0.67)이며 그 입자크기는 3~40 μ m이다.

③ 시멘트 구성광물의 조절

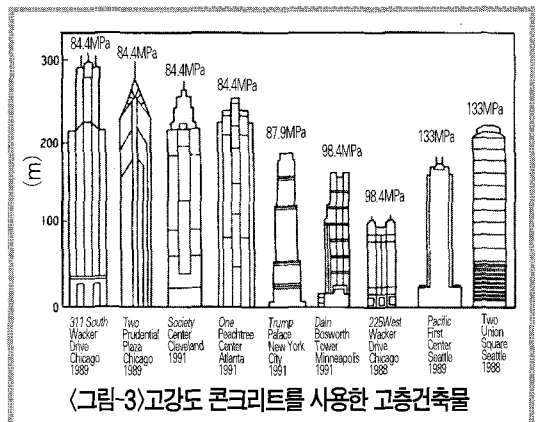
콘크리트의 고강도화를 위하여 단위 시멘트 양을 많이 할 경우 수화시 발열량이 많아져 경화체의 온도 균열이 염려된다. 이 대책으로 저발열 시멘트가 연구되었는데(후술), 상대적으로 수화열이 적은

C₂S를 주성분으로 하는 belite계 시멘트에 관심이 집중되고 있다. C₂S보다 C₂S의 양을 많이 함으로써 수화열량을 줄이고 중장기 강도 증진을 꾀하며, 한편 유기혼화제의 흡착속도가 빠른 C₂A 등의 양도 아주 적게한 고 belite시멘트는 혼화제의 효과를 충분히 발휘시켜 낮은 물·시멘트 비로 유동성을 확보하여 경화체의 고강도화를 이룩코자 한 것이다.

이러한 초고강도 시멘트의 개발은 초고층 빌딩의 건설을 가능케 하고 있다.

초유동성 시멘트 · 콘크리트

초고강도 시멘트 · 콘크리트의 개발과 함께 자기 충전성을 갖는 초유동 시멘트 · 콘크리트의 연구도 활발히 행하여지고 있으며 이미 실용화되고 있다.



콘크리트는 굵은 골재를 모르타르로 싸고 있고, 모르타르는 잔골재를 시멘트페이스트로 싸고 있으며, 시멘트페이스트는 이들 골재사이의 틈바구니를 메꾸고 있다. 바꾸어 말하면 콘크리트는 페이스트와 같은 가소성 매체속에 시멘트 잔골재 및 굵은 골재가 분산되어 있는 상태로, 분산되어있는 이들 입자크기를 비교하면 시멘트(1~102 μ m) < 잔골재(102~103 μ m) < 굵은 골재(1~102mm) 순으로 구성하고 있는 입자의 분포 범위가 넓다.

입자에 물을 가할때 입자의 크기에 따라 유동성은 다르다. 콘크리트에서 유동성을 높이기 위하여는 분체(시멘트와 잔골재 중 미립자)와 물로 이루어진 페이스트가 적절한 점성을 갖고 적당량의 골재가 있는 것이 중요하다. 시멘트페이스트의 적당한 점성을 위해서는 고성능 AE감수제나 증점제(增粘

劑) 등 혼화제를 첨가하거나 페이스트중의 분체량을 증가시키는데, 분체의 특성을 고려하여야하며 특히 시멘트의 영향은 크다.

① 시멘트의 특성과 고유동화

혼화제는 먼저 C₃A나 C₄AF에 흡착하고 나중에 C₃A나 C₂S에 흡착하므로 시멘트중의 C₃A 및 C₄AF의 양에 따라 고성능 감수제의 흡착성이 달라진다. 즉 C₃A나 C₄AF가 많으면 시멘트 입자에의 혼화제의 흡착이 불균일해져 분산작용이 발휘되지 않는다. <그림-4>는 광물조성이 다른 시멘트에 고성능 감수제를 첨가한 경우의 rheology 특성을 보이고 있는데 고유동 콘크리트용 시멘트로서는 고 belite 시멘트나 중용열 시멘트가 좋음을 알 수 있다.

또 시멘트의 비표면적, 입도 분

포와 입자의 모양 그리고 충전율도 rheology 특성에 영향을 미친다.

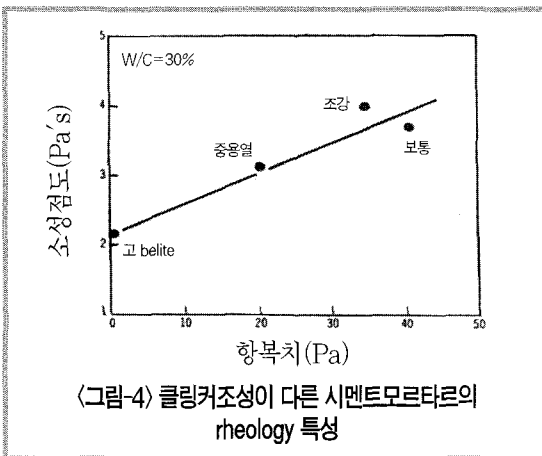
② 분체에 의한 고유동화

콘크리트중의 분체량을 증가시킴으로서 고유동 콘크리트를 만들 수 있다. 이때 분체는 고성능 AE감수제의 분산효과에 적응하는 성질을 갖고 있어야 한다.

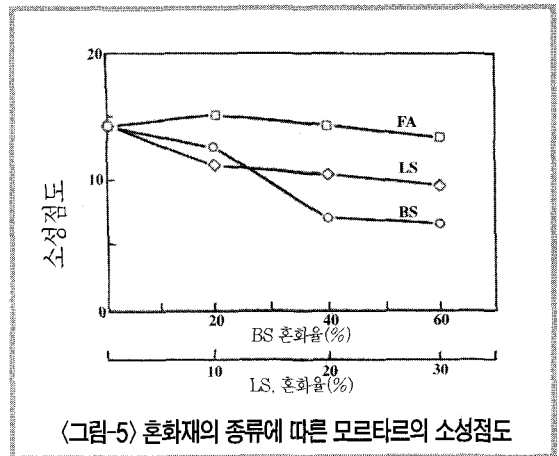
이런 분체로서 플라이 애쉬, 고로슬래그 미분말 및 석회석 미분말 등이 있는데, 이들은 수화발열을 저감시키며 내구성도 향상시킨다. <그림-5>는 보통 포틀랜드 시멘트에 이들 혼화제를 첨가한 경우의 소성점도를 보이고 있다.

③ 분체 및 증점제의 첨가제에 의한 고유동화

증점제의 첨가로 콘크리트의 유동성을 향상시키는 것은 수중불분리(水中不分離) 콘크리트 수법의



<그림-4> 클링커조성이 다른 시멘트모르타르의 rheology 특성



<그림-5> 혼화제의 종류에 따른 모르타르의 소성점도

연장으로 재료분리저항성을 준다. 증점제를 고성능 감수제와 함께 첨가한 경우 낮은 항복치를 유지하면서 소성 점도만 커져서 고유동 콘크리트에 적당한 rheology성상으로 된다. 분체와 증점제를 함께 활용하므로써 작은 골재의 표면수와 입도(조립)에 의한 변동을 조절한 고유동콘크리트도 나오고 있다.

이와 같은 고유동화 콘크리트의 출현으로 고강도 콘크리트에의 적용은 물론 현수교의 교각과 같은 대규모 공사나 층진이 어려운 복잡한 구조물에도 다짐 공정없이 콘크리트 타설이 가능해지고 있다.

초저발열 시멘트 · 콘크리트

시멘트에 물을 가하면 수화하면서 열을 내어 온도가 올라간다. 이 수화열은 보통공사에서는 별로 문제되지 않으나 큰 부피를 갖는 대규모 공사에서는 수화열이 축적되어 무시할 수 없을 만큼 되며, 온도 상승이 원인이 되어 균열이 발생할 수도 있다.

시멘트 · 콘크리트의 수화과정에서 발생하는 이와 같은 온도응력에 의한 시공불량 원인을 없애기 위하여 수화열이 적은 시멘트가 개발되었다. 지금까지의 수화열이 적은 시멘트는 중용열 시멘트, 저열 시멘트 등이 있었으나, 최근의 구조물 대형화 및 시공법의 다양화는

지금까지보다 더 수화열이 적으면서 강도 발현성도 있는 초저발열 시멘트 · 콘크리트가 요망되고 있다. 이와 같은 용도의 저발열 시멘트로서는 포틀랜드 시멘트-고로슬래그계 시멘트, 포틀랜드 시멘트-고로슬래그-플라이애쉬계 시멘트, 고belite계 시멘트 등이 있다.

① 혼합시멘트계

혼합시멘트계의 저발열 시멘트는 고로슬래그나 플라이애쉬의 혼합으로 수화열을 저감시키며 혼화제의 pozzolan반응으로 강도 발현성의 저하를 보상하려는 것이다.

보통 포틀랜드 시멘트-고로슬래그(2성분)계의 경우 고로슬래그 첨가량이 70%내외로 이것을 넘으면 수화열과 모르타르 강도가 급격히 저하하는데 수화열 저하와 강도 저하사이에서 강도를 유지하며 수화열만을 저하하는 적정 슬래그 혼합량이 존재할 것으로 보인다.

포틀랜드 시멘트 고로슬래그-플라이애쉬(3성분)계의 경우 시멘트를 20~30%, 고로 슬래그를 40~60%, 플라이애쉬를 15~30%의 범위로, 중용열 포틀랜드 시멘트를 사용할 경우 시멘트를 40%, 고로 슬래그를 30%, 플라이애쉬를 30% 정도로 할때 수화열 억제효과가 크다. 3성분계 시멘트의 경우 특히 혼합제의 품질, 혼합물의 변동에 영향이 크므로 품질관리에 주의를 요한다.

② belite계 시멘트

포틀랜드 시멘트의 구성광물의 수화열은 C_3A , C_3S 가 크므로 이들 광물을 적게하여 상대적으로 C_2S 의 비율을 크게 하므로써 수화열을 적게하면서 강도도 유지하려는 것이다.

초기강도를 확보하면서 저수화열을 위한 belite 함량의 상한은 60%정도로, 이때의 수화열은 28일 재령에서 250J 정도이다. 또, 고belite시멘트에 고로 슬래그를 첨가함으로써 초기강도를 개선할 수 있다.

이와같은 초저발열 시멘트 · 콘크리트는 고성능 AE감수제의 첨가로 낮은 물 · 시멘트 비로도 우수한 유동성이 얻어지므로, 저발열은 물론 고유동, 고강도를 지향하는 콘크리트로의 개발이 연구되고 있다.

초기능에 도전하는 시멘트에는 이외에도 초조강 시멘트 · 콘크리트(클링커에 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$, $C_4A_3\bar{S}$ 등 성분을 함유한 것, alite 미분말을 많이 함유한 것 등), 초경량 시멘트 · 콘크리트(Foam mix-ed light weight concrete) 등도 있다.

이와 같은 초기능화에의 도전은 시멘트 · 콘크리트의 물성향상과 시공성의 향상을 지향하고 있음을 볼 수 있다. 또한 이와 같은 도전은 자원 재활용, 환경문제와도 연계되어 앞으로의 연구에 기대하는 바가 크다. 