

고강도콘크리트의 현장적용 방안

김 은 점

(서울산업대학교 토목공학과 교수)

1. 서론	3.4 응결
2. 콘크리트의 고강도화 방법	4. 고강도 콘크리트의 현장시공 방안
2.1 고강도화의 개념	4.1 재료
2.2 감수효과에 의한 고강도 발현	4.2 배합
2.3 고밀도화에 의한 고강도 발현	4.3 콘크리트의 제조
3. 굳지 않은 고강도 콘크리트의 성질	5. 시공사례
3.1 워커빌리티의 평가	5.1 고강도 PSC BEAM 교량의 시공
3.2 슬럼프의 시간적 변화	5.2 高止水性 연속지중벽의 시공
3.3 블리딩 및 침강현상	5.3 고층 RC건축물 기둥의 강관 콘크리트 시공

1. 서론

고강도콘크리트의 제조 기술은 PSC기술 발전과 함께 진행되어 왔다. 콘크리트는 프리스트레스 도입시에 변형에너지를 저장하는 역할을 하게 되며, 이에 따라 변형에너지를 다량으로 저장할 수 있는 고강도콘크리트가 역학적, 경제적으로 필요하게 되었다. 또한 고강도 콘크리트는 물-결합재비를 감소시키게 됨으로써 시멘트 경화체의 조직을 치밀하게 하고, 그로 인하여 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시킨다는 관점에서 매우 중요하다.

오늘날에는 프리캐스트 PSC제품의 콘크리트 강도는 600 kgf/cm²을 초과하고 있으며,

선진국에서는 PSC교량의 경우 설계기준강도 800 kgf/cm²의 고강도콘크리트를 사용한 PSC 트러스교가 건설된 바가 있다.

RC구조물에서도 특히 건축물의 고층화 추진에 따라 하층부의 RC기둥이 부담해야 하는 축력이 증가함으로써 보통 강도를 가지는 콘크리트로서는 기둥단면치수가 지나치게 커져 콘크리트의 고강도화가 필수적이다. 우리나라의 경우도 설계기준강도 700 kgf/cm²를 가지는 콘크리트를 현장 시공에 의해 RC 고층건물이 축조된 바가 있다. 미국이나 일본에서는 이미 800~1300 kgf/cm²의 고강도 콘크리트가 고층건축물에 사용되고 있다.

이와 같은 콘크리트의 고강도화는 구조물의

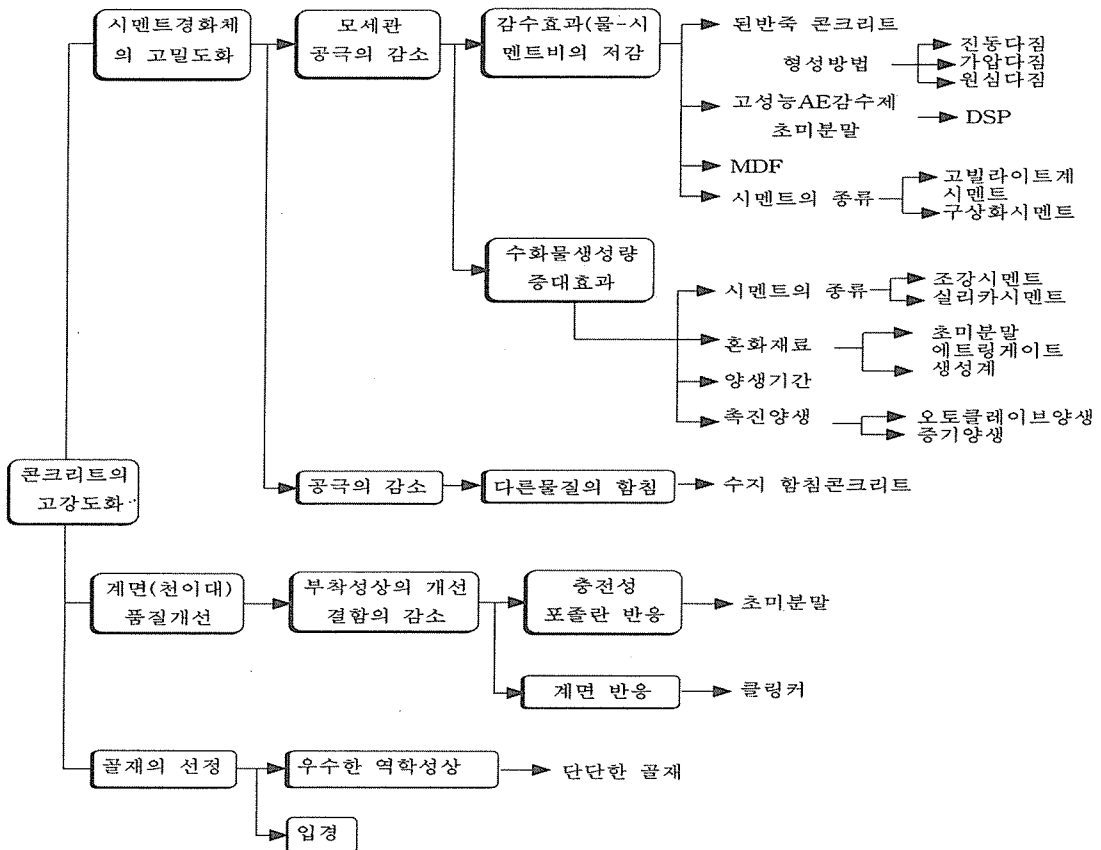
장대화 및 고층화의 요구와 이에 부응한 재료 및 시공법의 현저한 진보, 발전에 의한 것으로서 앞으로도 콘크리트의 고강도화가 지속적인 것으로 확대될 전망이다.

고강도콘크리트는 일반적으로 압축강도가 600 kgf/cm² 이상인 것을 지칭하는 것이 보통이지만, 국가의 기술여건이나 시방서 및 규준을 제정하는 주체의 특성에 따라 그 정의가 다를 수 있다. 한국콘크리트학회 제정 「콘크리트 표준시방서」에서는 설계기준강도 400 kgf/cm² 이상인 경우를 고강도콘크리트로 정의하고 있으며, 일본토목학회 제정 「고강도콘크리트 설계시공 지침(안)」에서는 설계기준강도 600~800 kgf/cm² 정도를 고강도콘크리

트로 다루고 있다.

또한 미국, 캐나다, 유럽 등에서는 여러 단체가 High Performance Concrete 프로젝트를 수행하고 있으며, 예를 들면 SHARP에서는 고강도콘크리트를 동결융해시험의 내구성지수 80% 이상, 물-시멘트비 35% 이하, 재령 28일에서의 압축강도가 69 MPa 이상인 것으로 정의하고 있다.

일반적으로 고강도콘크리트를 제조하는 데는 물-결합재비를 저하시키는 감수효과를 이용하는 것이 가장 중요하다. 콘크리트의 유동성을 확보하면서 유동성의 시간적 변화가 적은 최소의 물-결합재비를 가지는 콘크리트의 제조를 가능하게 하는 것은 고성능AE감수제



(그림 1) 콘크리트의 고강도화에 대한 어프로치

이며, 이것의 사용은 고강도콘크리트를 제조하는데 있어서 필수적이다.

콘크리트의 밀도를 높여 고강도화를 추구하는 경우에도 고성능AE감수제의 사용은 필수적이지만, 부가적으로 포졸란 반응성, 충전성 등의 효과를 가지는 여러 가지의 초미분말이나 공극에 에tring가이드를 생성시켜 경화체를 치밀하게 하는 무수 석고 등을 주성분으로 하는 에tring가이드 생성계 혼화재 등도 이용되고 있다.

한편, 콘크리트의 공극을 감소시켜 고강도를 얻는 방법으로서 모노머나 폴리머를 콘크리트 경화체에 함침시킨 후 중합시키는 수지 함침 콘크리트도 매설 거푸집의 보급 등과 관련하여 그 중요성이 증가되고 있다.

2. 콘크리트의 고강도화 방법

2.1 고강도화의 개념

콘크리트는 물, 시멘트, 골재, 혼화재료 등으로부터 이루어지는 복합재료이며, 고강도 콘크리트의 접근은 시멘트 경화체, 골재 특히 이들의 경계면인 천이대에서의 품질개선 등으로 분류할 수 있다. 이들의 관계는 [그림-1]과 같다. 즉 콘크리트의 고강도는 시멘트 페이스트의 강도, 골재의 강도, 시멘트 페이스트와 골재의 경계면에서의 부착강도 등의 3가지 요인에 의하여 정해진다. 콘크리트의 강도를 높이기 위해서는 이들의 강도를 개선시키는 것이 필요하지만, 이 가운데 시멘트 페이스트와 골재의 경계면에 대하여는 시멘트 자신의 강도를 개선함으로써 부착강도도 개선된다고 생각하기 때문에 시멘트 페이스트 자신의 강도를 개선시키는 것이 매우 중요하다.

시멘트 페이스트는 시멘트 수화생성물, 미반응 시멘트 입자, $10\mu\text{m}\sim 100\text{\AA}$ 이하의 크기

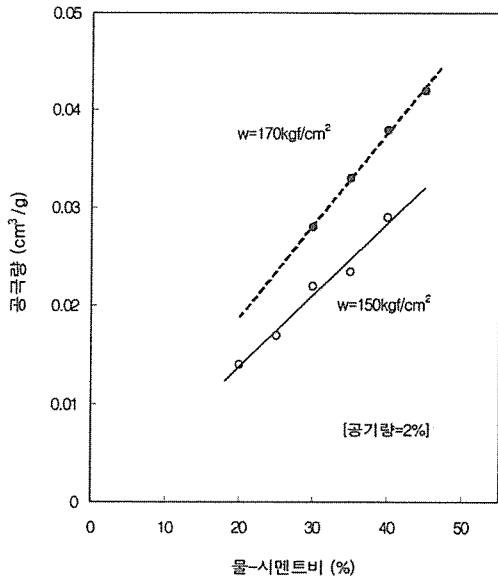
를 가지는 모세관 공극, 100\AA 이하의 크기를 가지는 겔공극 및 콘크리트를 비벌 때 유입되는 갇힌공기에 의한 비교적 큰 공극으로부터 구성된 많은 공극을 포함하는 다공질 재료이다. 시멘트 페이스트의 강도는 공극율에 크게 의존하지만, 그 강도에 영향을 주는 것은 주로 크기 100\AA 이상인 모세관 공극과 갇힌공기 등과 같은 비교적 큰 공극으로 알려져 있다.

따라서, 시멘트 페이스트의 강도를 높이기 위해서는 모세관 공극과 갇힌공기에 의한 공극을 감소시키는 것이 중요하다. 시멘트 페이스트의 공극을 감소시키는데는 물-결합재비의 저감 혹은 다른 재료의 충전이나 양생방법에 의한 시멘트 수화생성물량의 증가에 기초한 모세관 공극의 감소, 다른 재료의 충전이나 성형 방법에 의한 공극의 감소가 유효한 방법이다.

2.2 감수효과에 의한 고강도 발현

일반적으로 콘크리트를 제조하는데는 시공성에 적합한 워커빌리티를 확보하기 위해서 시멘트의 수화반응에 필요한 수량 보다 많은 물이 사용된다. 이 물은 수화에 관여하지 않으며 경화 후에는 공극수로서 존재하기 때문에 시멘트 경화체의 강도를 저하시키고 골재와 시멘트 페이스트의 경계면에 결함을 형성하여 부착을 저해시킴으로서 고강도화를 방해하는 주된 원인이 된다.

시멘트 경화체의 강도는 경화체의 공극량 및 그 분포와 밀접한 관계를 가지고 있다. 그림-2는 물-시멘트비와 공극량과의 관계를 나타낸 것이다. 공극량을 감소시키기 위해서는 물-시멘트비를 감소시키거나 혹은 물-시멘트비가 동일한 경우 단위수량을 감소시키는 것이 유효하다는 것을 알 수 있다. 물-시멘트비를 감소시키면 블리딩이나 자유수에 의한 골재표면에 형성되는 수막이 감소하기 때문에



(그림 2) 물-시멘트비와 공극량과의 관계

골재와 시멘트 페이스트와의 경계면에 결합이나 천이대의 형성을 막을 수 있어 콘크리트의 고강도화가 가능하다.

물-시멘트비를 저감시키는데는 단위시멘트량을 크게 하고 단위수량을 적게 할 필요가 있다. 이 경우 고성능AE감수제, 고성능감수제 혹은 유동화제 등의 감수성이 높은 혼화제를 사용해서 콘크리트의 유동성을 확보하여 거푸집 속에 밀실하게 충전시킬 필요가 있다.

또한 구상화시멘트, 고빌라이트계 시멘트 혹은 입도조정을 실시한 시멘트 등을 사용하면서 낮은 물-시멘트에서도 콘크리트의 유동성을 증가시킬 수 있는 방법도 생각할 수 있다.

이와 같이 혼화제나 특수시멘트를 사용하는 방법 외에 물-시멘트비를 감소시키는 방법으로서 가압다짐, 원심력 다짐 등의 성형방법을 사용하여 과잉수를 짜내는 방법, 된 반죽의 낮은 물-시멘트비를 가지는 콘크리트를 진동다짐에 의해 성형하는 방법 등이 있으며, 혼화제의 사용과 겸하여 시멘트 2차 제품의 제조에 널리 사용되고 있다.

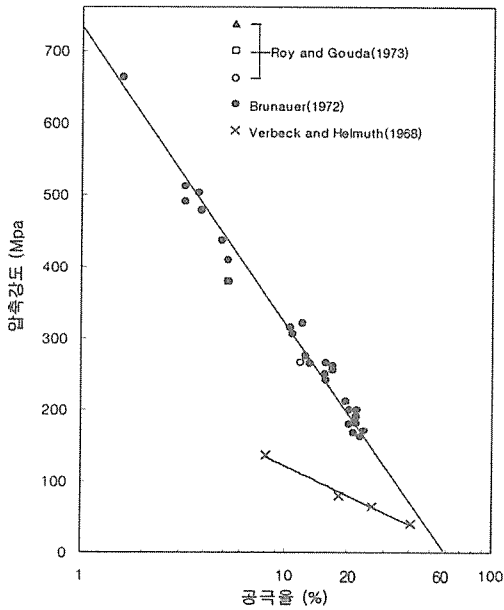
2.3 고밀도화에 의한 고강도 발현

물-시멘트비를 감소시키면 모세관공극은 현저하게 감소하여 시멘트 경화체는 치밀하게 된다. [그림 3]은 시멘트경화체의 공극율과 압축강도의 관계를 나타낸 것으로서 공극율이 감소할수록 강도는 향상되고 있음을 알 수 있다. 또 이 그림은 공극을 현저하게 감소시켜 콘크리트를 고밀도화시킬 경우 콘크리트의 도달 가능한 강도한계치를 제시하고 있다. 그러나 물-시멘트비를 감소시키더라도 시공성이 확보되지 않는다면, 고강도를 제조할 수 없다.

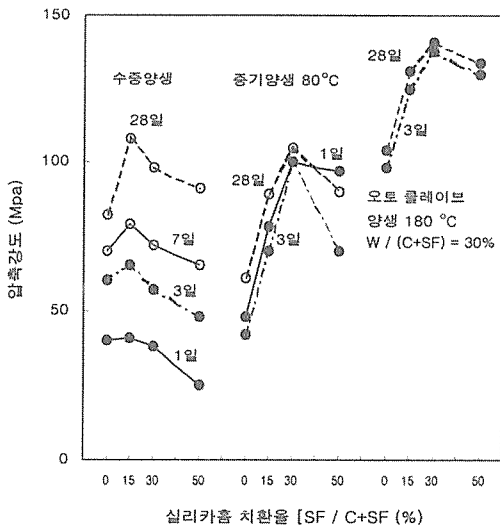
고성능AE감수제를 사용하면 30%까지의 낮은 물-시멘트비를 가지는 콘크리트에서도 작업성을 확보할 수 있다. 특히 고강도를 얻고 싶은 경우에는 다량의 고성능AE감수제와 초미분말을 조합시킨 DSP기술을 이용하는 것이 효과적이다. 이것을 고강도콘크리트에 적용하면, 작업성이 지속적으로 확보되어 물-시멘트비를 20%정도까지 저감시킬 수 있으므로 200 MPa 정도까지의 압축강도를 얻을 수 있다.

시멘트 입자의 1/10~1/100 정도의 크기를 가지는 실리카흄이나 브레인 비표면적이 약 6000cm²/g정도를 초과하는 고로슬래그 미분말 및 무수석고를 주성분으로 하는 에트링가이드 생성계 고강도콘크리트용 혼화제 등의 미립자 혼화제를 사용하는 것은 콘크리트의 수화생성량을 증가시키면서 모세관공극을 충전시키는 효과가 있어 시멘트 페이스트의 강도를 개선시킬 수 있다.

이 밖에 분급을 실시한 플라이애시 등 초미분말을 고강도용 혼화제로서 이용하는 많은 연구도 실시되고 있다. 이 초미분말의 이용에 의한 고강도 발현 메카니즘은 포졸란 반응이나 잠재수경성에 의한 수화물양의 증대와 마이크로필러 효과에 의한 입자의 충전성 향상에 의해 시멘트 경화체의 고밀도화가 이루어



(그림 3) 시멘트 경화체의 공극율과 압축강도



(그림 4) 실리카흄의 혼합량과 강도발현 성상의 관계

진다. 특히 물-결합재비를 줄여 25% 정도 이하로 한 경우에는 시멘트의 수화반응 진행이 어려우므로 실리카흄 등의 초미분말포졸란 반응이 강도증진에 효과가 있다.

[그림 4]는 실리카흄의 혼합량과 강도발현 성상의 관계에 대한 한 사례를 나타낸 것이다.

증기양생이나 오토클레이브양생에 의해 고강도가 발현되고 있지만, 최대강도를 나타내는 실리카흄의 혼합량이 존재하고 있으며, 이것은 C-S-H의 생성과 연관이 있다. 이와 같이 실리카흄이나 고로슬래그 비분말 등의 초미분말의 혼합은 포졸란반응 등에 의해 시멘트 경화체 조직을 치밀하게 하지만, 특히 골재 경계면의 천이대의 개선에도 효과가 있다.

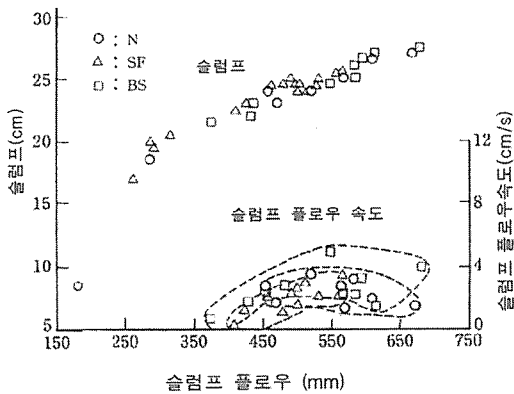
가압양생이나 오토클레이브양생은 수화생성물의 양을 증가시켜 시멘트 페이스트의 강도를 개선한다. 즉 가압양생은 콘크리트를 가압하면서 양생을 실시하기 때문에 시멘트의 수화반응을 촉진시켜 단기간에 고강도의 콘크리트를 얻을 수 있으며, 오토클레이브양생은 수열반응에 의해 생성되는 물질은 다르지만, 적당한 배합과 양생을 실시하면 고강도를 얻을 수 있다. 그러나, 이와 같은 양생을 실시하더라도 고성능AE감수제나 광물질의 미립자 혼화재를 동시에 사용하여 고강도콘크리트를 제조하는 것이 일반적이다.

3. 굳지 않은 고강도 콘크리트의 성질

3.1 워커빌리티의 평가

고강도콘크리트는 물-시멘트비가 작고 단위시멘트량이 많기 때문에 강도를 높일수록 콘크리트의 점성이 증가하여 슬럼프값을 크게 하더라도 재료분리에 대한 저항성이 큰 반면, 점성의 증가로 말미암아 슬럼프를 다소 크게 하더라도 펌프압송성 등의 시공성은 나빠진다. 슬럼프 21~23cm 정도를 가지는 고강도 콘크리트의 시공성은 보통의 강도를 가지는 슬럼프 12~15cm인 콘크리트의 시공성과 거의 동일한 정도를 나타낸다고 알려져 있다.

이와 같이 고강도콘크리트에서는 일반콘크리트와 같이 슬럼프로 워커빌리티를 평가하는



(그림 5) 슬럼프와 슬럼프플로우 및 슬럼프플로우 속도와의 관계

것이 곤란하므로 다른 측정방법의 적용이 필요하다. 또한, 유동성의 평가에 있어서도 슬럼프 보다는 슬럼프플로우값을 측정하는 것이 타당하며, 슬럼프플로우속도 등을 같이 사용할 것을 권하고 있다.

[그림 5]는 물-결합재비 15~40%, 단위수량 145~175 kg/m³의 범위에서 변화시킨 고강도콘크리트의 슬럼프와 슬럼프플로우값 및 슬럼프플로우 속도와의 관계에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 슬럼프와 슬럼프플로우값이 동일하더라도 실리카흄을 사용한 경우나 단위수량이 많은 경우는 콘크리트의 슬럼프플로우 속도가 빠르며, 유동성이 좋아진다는 것을 알 수 있다.

3.2 슬럼프의 시간적 변화

고강도콘크리트는 단위수량을 줄인 상태에서 시공이 가능한 유동성을 확보하기 위해 고성능AE감수제, 또는 유동화제의 사용이 반드시 필요하지만, 최근에는 새로이 개량 개발된 고강도콘크리트용 고성능AE감수제를 사용하는 경우가 많다. 고성능AE감수제는 높은 감수성과 슬럼프 유지 성능을 가지고 있으며, 일반적인 운반에 의한 슬럼프 저하는 매우 적다.

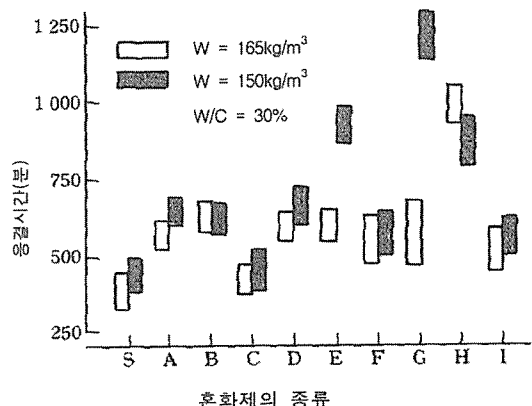
그러나, 출하시의 슬럼프가 다소 낮은 경우는 슬럼프 저하가 다소 커지는 경우가 있으며, 또 펌프압송시에 상당히 큰 수cm 정도의 슬럼프 저하가 발생하는 경우가 있으므로 주의가 요망된다.

3.3 블리딩 및 침강현상

고성능AE감수제나 유동화제를 사용한 낮은 물-시멘트비를 갖는 고강도콘크리트는 슬럼프가 커지더라도 블리딩이나 침강은 매우 적다. 그러나 오히려 슬래브 상면의 마무리가 곤란하게 되거나, 콘크리트 표면의 플라스틱 수축균열이 발생하기 쉬우므로 주의가 필요하다.

3.4 응결

고성능AE감수제에는 응결지연작용이 있으며 첨가량이 많으면 대폭적인 응결지연을 일으키는 수가 있다. 그림-6은 고성능AE감수제를 사용한 고강도콘크리트의 응결시험결과를 나타낸 것이다. 혼화제 중에는 응결시간이 매우 길어지는 것도 있으며, 또 단위수량이 작고 혼화제의 첨가량이 많은 것은 응결시간이 지연되는 경향이 있다는 것을 나타낸 것이다.



(그림 6) 혼화제의 종류와 응결시간

4. 고강도 콘크리트의 현장시공 방안

4.1 재료

4.1.1 시멘트

고강도콘크리트의 제조에 사용되는 시멘트로서는 포틀랜드시멘트 및 고로시멘트를 비롯하여 최근에는 구상화시멘트, 입도조정시멘트, 고빌라이트계 시멘트 및 실리카시멘트 등이 있다. [그림 7]은 여러 가지 시멘트에 대한 모르타르의 압축강도 시험 결과를 나타낸 것이다. 물-시멘트비가 30% 이하의 범위에서는 시멘트 종류에 의한 강도차는 작다. 여기서 제시하고 있는 모든 시멘트는 고강도콘크리트로서 필요한 강도를 얻을 수 있다.

[표 1]은 설계기준강도 600~1000kgf/cm² 급의 고강도콘크리트에 사용되는 시멘트 및 결합재에 대한 사례를 나타낸 것이다.

[표 1] 고강도콘크리트에 사용되는 결합재의 사례

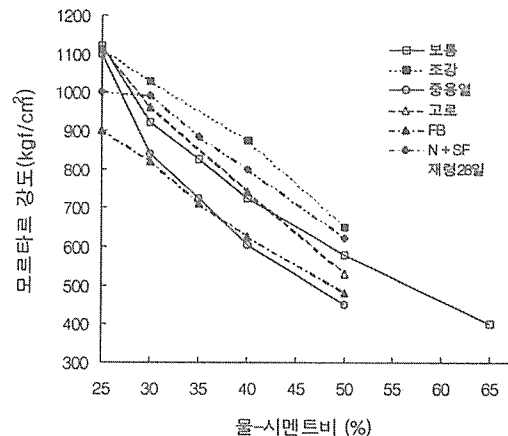
설계기준강도 (kgf/cm ²)	결 합 재
600	<ul style="list-style-type: none"> • 보통포틀랜드시멘트 • 저발열포틀랜드시멘트 • 보통포틀랜드시멘트+실리카흙 • 저발열포틀랜드시멘트+플라이애시
800	<ul style="list-style-type: none"> • 저발열포틀랜드시멘트 • 저발열포틀랜드시멘트+실리카흙 • 보통포틀랜드시멘트+슬래그·석고미분말+실리카흙
1000	<ul style="list-style-type: none"> • 저발열포틀랜드시멘트+실리카흙 • 플라이애시시멘트 B종+실리카흙 • 보통포틀랜드시멘트+슬래그·석고미분말+실리카흙

4.1.2 골재

[그림 8]은 단위굵은골재량과 콘크리트의

압축강도와와의 관계를 나타낸 것이다. 골재 자체의 강도가 약해 고강도콘크리트용 골재로서 적합하지 않은 것은 이 골재의 혼입량이 증가할수록 콘크리트의 강도는 저하하는 경향을 나타낸다. 또한 콘크리트의 압축강도와 굵은골재의 치수, 굵은골재량과의 사이에는 상관성이 없으며, 형상은 각진 골재가 유리하다.

설계기준강도가 1200 kgf/cm² 정도인 고강도콘크리트를 제조하기 위해서는 골재 및 혼화제의 선정이 중요하다. 특히 세립분을 제거한 조립율이 큰 잔골재를 사용하는 것은 콘크리트의 강도를 저하시키는 일없이 유동성을 개선시킬 수가 있다.

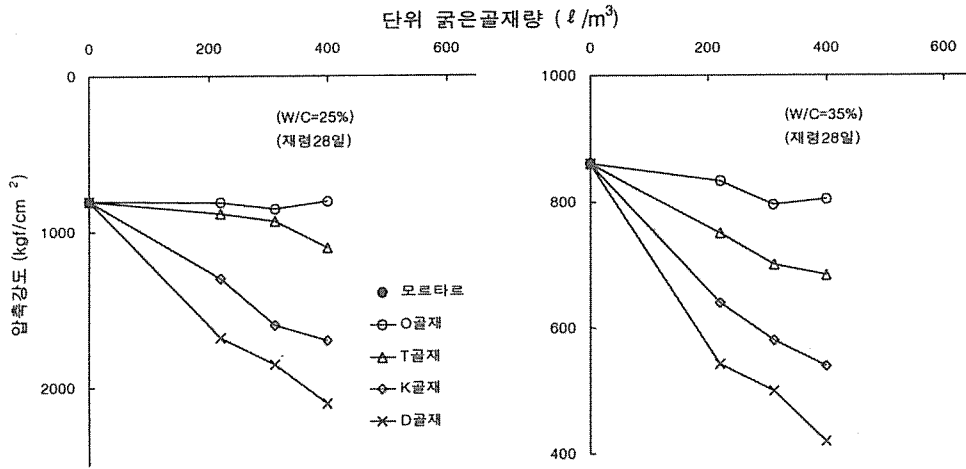


(그림 7) 여러 가지 시멘트의 물-시멘트비별모르타르 강도발현

4.1.3 고성능AE감수제

(1) 고강도화를 위한 혼화제의 종류

주로 콘크리트 공장제품이나 유동화의 소재로서 사용된 고성능감수제는 나프탈린계와 멜라민계가 주류를 이루고 있으며, 최근에는 폴리카르본산계의 사용이 증가하고 있다. 고성능AE감수제는 고성능감수제의 내용을 포괄하고 있는 것과 새로 개발된 소재를 베이스로 하는 것이 있으며, 현재 시판되고 있는 것으로



(그림 8) 단위굵은 골재량의 콘크리트 압축강도와와의 관계

서는 나프탈린계, 폴리카르본산계, 메라민계 및 아미노슬폰산계 등 대략 4종류가 있다. 또한 이들은 슬럼프 저하를 억제하는 메커니즘에 따라 세분되며, 응결시간에 따라 표준형과 지연형으로 분류되는 경우도 있다.

(2) 고강도콘크리트용 혼화제의 품질기준

고강도콘크리트용 혼화제로서는 낮은 물-시멘트비 조건하에서 높은 감수성과 고유동성이 요구되고 있다. 과도한 응결지연성도 시공상 바람직하지 않으며, 내동해성을 높이기 위해서는 적절한 지름을 가지는 일정한 기포를 연행시킬 필요가 있다.

강도 60 MPa 급의 고강도콘크리트는 배합이나 결합재의 종류를 잘 선택함으로써 일반적인 고성능AE감수제나 고성능감수제를 사용하여 소량의 유동성을 가지는 콘크리트를 제조할 수가 있다. 그러나, 일반적인 고성능 AE감수제는 무기미립자에 대하여 고도의 분산력을 가지고 있어 높은 감수효과를 나타내지만, 초고강도를 대상으로 하는 콘크리트의 물-결합재비(25%이하)에서는 소량의 유동성을 얻기 위해 사용량을 크게 증대시키거나 비

비기 시간을 길게 해야 하는 등의 문제가 있다. 이러한 경우에는 초고강도를 대상으로 하는 강력한 감수성을 가지는 고성능AE감수제를 사용하는 것이 좋다.

[표 2]는 일본건설성 건축연구소에서 수행한 종합기술개발 프로젝트「New RC」내용 가운데 강도 36~60 MPa급의 고강도콘크리트를 대상으로 한 화학혼화제의 품질기준을 제시한 것이다.

(표 2) New RC 고강도 혼화제의 품질기준

항목		New RC 성능기준
목표 슬럼프값(cm) (목표 슬럼프 플로우 값(cm))		23±2 (65 이하)
응결시간 (시:분)	시작	5:00~2:00
	종결	15:00 이내
압축강도비 (%)	3일	100이상
	7일	100이상
	28일	100이상
길이변화비(%)		110이하
동결응해에 대한 저항성 (상대동탄성계수 %)		85이상
시간적변화 (60분 후)	슬럼프(cm)	5.0이하
	공기량(%)	±1.5이내

[표 3] New RC 품질기준(안)배합조건

항 목	기준콘크리트 (AE감수제)	시험 콘크리트
단위수량(kg/m ³)	205±10	165
물-시멘트비(%)	30	30
목표 슬럼프(cm)	6±2	23±2
목표슬럼프플로우값(cm)	-	65이하
목표 공기량(%)	3.5±1	3.5±1
단위겉은골재 겉보기용적(m ³ /m ³)	0.60~0.63	0.60~0.63

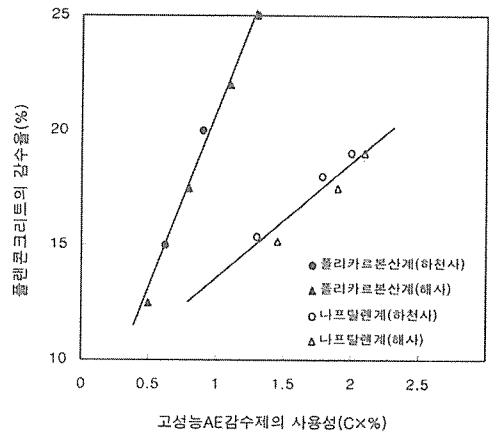
(3) 고성능AE감수제의 성능특성

동일한 배합에서 동일한 슬럼프를 얻기 위한 고성능AE감수제의 사용량은 혼화제의 제품에 따라 다르며, 동일한 혼화제라 하더라도 콘크리트의 온도, 재료의 종류, 배합 및 비비기 방법 등에 따라 달라진다. 일반적으로 동일한 슬럼프값을 얻는데 필요한 고성능AE감수제의 사용량은 멜라린계 및 나프탈린계가 거의 동일한 정도로서 가장 많으며, 폴리카르본산계가 가장 적고 아미노슬폰산계가 그 중간 정도가 된다.

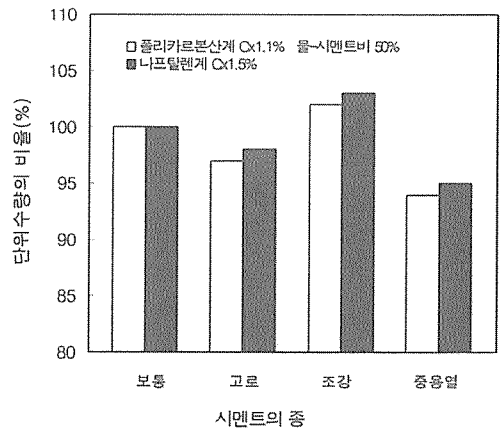
[그림 9]는 나프탈린계 및 폴리카르본산계의 고성능AE감수제 사용량과 감수효과와의 관계를 나타낸 것이다. 폴리카르본산계 고성능AE감수제 쪽이 훨씬 큰 감수효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

[그림 10]은 고성능AE감수제의 사용량을 일정하게 한 경우 시멘트의 종류에 따른 단위수량의 변화를 나타낸 것이다. [그림 11]은 고빌라이트계 시멘트 및 보통포틀랜드시멘트를 사용한 고강도콘크리트의 고성능AE감수제와 슬럼프플로우의 관계를 나타낸 것이다. 고빌라이트시멘트가 보통포틀랜드시멘트 보다 단위수량이 10 kg/m³ 적음에도 불구하고 고성능AE감수제의 사용량은 고빌라이트시멘트 쪽이 적음을 알 수 있다.

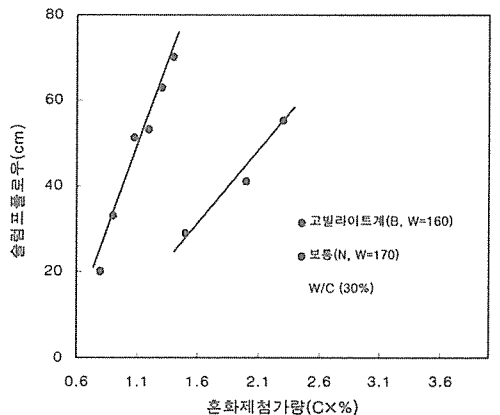
굳지 않은 고강도콘크리트의 성질은 일반 콘크리트와는 다르게 점성이 높으며, 의외로



(그림 9) 고성능 AE감수제의 종류별 감수효과



(그림 10) 시멘트 종류별 단위수량의 감소효과



(그림 11) 고성능 AE감수제의 첨가량과 슬럼프플로우와의 관계

슬럼프를 다루는데 어려운 부분이 있다. 이와 같은 경향은 물-시멘트비가 낮을수록 현저하므로 되도록 점성이 높아지지 않도록 혼화제를 선정하던가 적당한 혼화제를 병용하는 것이 좋다.

콘크리트의 응결은 전체적으로 지연되는 경향이 있지만, 혼화제의 제품에 따라 다르다. 또 혼화제의 사용량을 증가시킬수록 응결지연 현상은 커지며 일반적으로 저온일수록 지연의 정도는 커진다.

4.1.4 혼화제

시멘트와 치환하여 결합재의 일부가 되는 고강도콘크리트용 혼화제로서는 실리카흙, 플라이애시흙, 고로슬래그 미분말, 에트링가이드계 특수혼화제 등이 적용되고 있다. 강도 60 MPa 이하인 고강도콘크리트는 실리카흙이나 고로슬래그 미분말 등의 혼화제를 사용하지 않더라도 제조가 가능하다. 그러나, 60 MPa를 초과하는 고강도콘크리트의 경우에는 이들의 혼화제를 조합하여 사용해야 소정의 고강도를 얻을 수 있다.

4.2 배합

4.2.1 배합강도

배합강도의 결정은 일반 콘크리트의 경우와 마찬가지로 다음의 두 식에 의한 값 중 큰 값을 적용한다.

$$f_{cr} \geq f_{ck} + 1.64s$$

$$f_{cr} \geq 0.85f_{ck} + 3s$$

여기서, s는 압축강도의 표준편차를 나타낸다. 콘크리트 압축강도의 표준편차는 실제 사용한 콘크리트의 실적으로부터 결정한다. 다만, 공사 초기에 그 값을 추정하기가 불가능하거나 중요하지 않은 소규모의 공사에서는

0.15 f_{ck} 를 적용한다.

4.2.2 물-결합재비 및 단위결합재량

물-결합재비는 소요의 강도와 내구성 등을 고려하여 50% 이하로 한다. 배합강도에 따른 재료의 선정방법 및 물-시멘트비 혹은 물-결합재비의 개략적인 값은 [표 4]에 나타낸 바와 같다. 단위결합재량은 콘크리트의 워커빌리티, 분리저항성 및 내구성을 확보하기 위해 어느 정도 이상의 값이 필요하게 되며, 물-결합재비 45%, 단위수량 165 kg/m³의 경우를 가정하여 350 kg/m³ 이상 사용할 것을 권장한다.

[표 4] 강도 수준에 대응하는 물-결합재비의 참고치

설계기준강도 (kgf/cm ²)	배합강도(개략치) (kgf/cm ²)	물-시멘트비 또는 물-결합재비(%)
39~48	48~60	30~40 정도
54~60	70~85	25~30(혼화제 사용)
80	100~110	20~25(혼화제 사용)

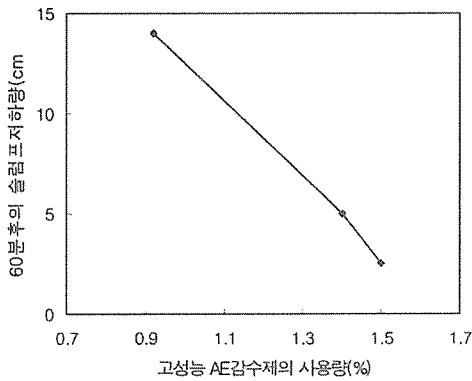
4.2.3 단위수량

단위수량은 180 kg/m³ 이하로 하고, 혼화제를 과도하게 첨가하지 않도록 정한다. 고강도콘크리트의 단위수량에 대한 적절한 값은 물-결합재비에 따라 [표 5]와 같은 값을 제시할 수 있다.

혼화제의 사용량은 권장하는 표준사용량을 기준으로 소정의 워커빌리티가 얻어지도록 시험에 의해 정한다. 표준사용량을 크게 초과하면 재료분리가 생기거나 응결이 지연되거나 건조수축이 커지는 등의 나쁜 영향이 생기며, 대

[표 5] 고강도콘크리트의 단위수량의 참고값

물-결합재비(%)	단위수량(kg/m ³)
45	165~175
30~40	160~170
25	155~165
22	150~160



(그림 -12) 고성능 AE감수제의 사용량과 슬럼프 감소량

폭적으로 적게 할 경우에는 슬럼프의 시간적 변화가 커지는 수가 있으므로 주의해야 한다.

그림-12는 고성능AE감수제의 사용량과 슬럼프 감소량과의 관계를 나타낸 것이다.

4.2.4 단위 굵은골재의 겉보기 용적

골재량을 정하는 방법으로서는 단위 굵은골재의 겉보기 용적에 근거하는 방법과 잔골재율에 근거를 두는 방법이 있지만, 슬럼프가 큰 콘크리트의 경우에는 굵은골재의 양을 확보한다는 차원에서 단위 굵은골재의 겉보기 용적에 기초하는 방법을 취하는 경우가 많다. 단위 굵은골재의 겉보기 용적은 슬럼프의 증가와 함께 감소하며, 또 물-시멘트비나 혼화제의 종류에 따라서도 달라지므로, 물-시멘트비가 작은 콘크리트나 분산성이 높은 혼화제 일수록 큰 값을 취한다. 고강도콘크리트에 있어서도 동일한 경향을 나타내지만, 물-결합재비 및 슬럼프(또는 슬럼프 플로우값)에 따라 단위 굵은골재의 겉보기 용적에 대한 표준치를 정하기는 매우 어렵다. [표 6]은 고강도콘크리트의

[표 6] 단위 굵은골재의 겉보기 용적에 대한 참고치

슬럼프(cm)	단위 굵은 골재의 겉보기 용적(m ³ /m ³)
18	0.60~0.64
21	0.59~0.63

슬럼프별 단위 굵은골재의 겉보기 용적에 대한 참고치를 제시한 것이다.

4.2.5 공기량

공기량은 2~4.5%의 범위의 값으로 한다. 단 동해를 받을 우려가 있는 경우에는 4.5%를 표준으로 한다.

4.3 콘크리트의 제조

4.3.1 레디믹스트콘크리트 공장의 선정

고강도콘크리트는 현 시점에서 모든 레디믹스트콘크리트 공장에서 제조가 가능한 것이 아니므로 레디믹스트콘크리트 공장을 선정하는 것은 매우 중요하다. 그러므로 레디믹스트콘크리트 공장을 선정할 때에는 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다.

- ① KS표시 허가를 가지고 있는 공장이며, 제조설비가 양호할 것.
- ② 규정을 만족하는 재질의 재료를 조달할 수 있으며, 그 저장 및 관리 방법이 양호할 것.
- ③ 콘크리트와 관련된 지식을 충분히 가지고 있는 기술자가 상주할 것
- ④ 콘크리트의 비비기로부터 최고 120분 이내에 치기를 종료시킬 수 있는 운송거리일 것.
- ⑤ 호칭강도 400 kgf/cm²의 고강도콘크리트 제조실적이 있을 것.
- ⑥ 고강도콘크리트를 제조하려는 의욕이 있을 것.

이상의 항목은 현행 레디믹스트콘크리트의 공동판매체제의 관점에서 생각하면 장애가 되는 내용도 포함되어 있다. 따라서 시공자는 공사착수에 앞서 빠른 시기에 그 지역의 한국레미콘공업협동조합연합회와 상담하여 공사현장 주변의 공장을 대상으로 현지조사를 실시한 후, 고강도콘크리트 제조능력이 높은 공장을 선정할 필요가 있다.

고강도콘크리트의 출하실적이 있는 공장은 그다지 많지 않다. 그러므로 실적이 없는 공장은 공장의 보유기술, 축적자료, 새로운 정보에 대한 정열 등을 고려하여 시험 비비기 등을 통해 고강도콘크리트를 제조할 능력이 있는지의 여부를 판단해야 한다. 그래서 시공자가 이니셔티브를 취해 생산자와의 충분한 협의를 통해서 서로를 신뢰하고 협력관계를 유지하면서 고강도콘크리트를 함께 제조하게 된다. 특히 고강도콘크리트는 생산자의 마음가짐과 의욕이 무엇 보다도 중요한 사항이다.

4.3.2 실내 시험 비비기

공사현장 주변의 레디믹스트콘크리트 공장 가운데 고강도콘크리트의 제조가 가능할 것이라고 판단되는 몇 개소의 공장에 대해 시험 비비기를 실시한다. 각각의 공장이 보유하고 있는 재료를 사용하여 실제의 기기와 동일한 타일의 약 50~100L 용량의 믹서를 사용하여 실시한다. 시험 비비기는 필요로 하는 설계기준 강도가 얻어지는 물-시멘트비를 포함하여 되도록 넓은 범위에 대하여 실시한다. 이 단계에서 고성능AE감수제와 시멘트, 잔골재 및 굵은골재와의 상호 성질을 검토하여 고성능AE

감수제를 지정하는 경우가 있다.

[그림 13]은 실내시험의 한 예를 나타낸 것이다. 동일한 물-시멘트비를 가지더라도 공장에 따라 큰 차이가 나고 있는 경우도 있음을 알 수 있다. 특히, 고강도 영역에 있어서의 강도발현이 나쁜 공장은 사용재료를 변경하거나 선정대상에서 제외시키는 등의 결단이 필요하다.

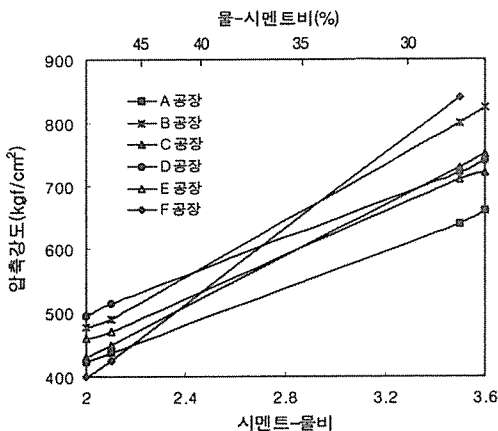
4.3.3 재료의 저장과 품질관리

고강도콘크리트를 제조할 때까지의 각 재료의 저장 및 품질관리가 중요하다. 고강도콘크리트는 특히 단위수량의 관리가 중요하다. 이를 위해 잔골재의 표면수량의 측정회수를 통상의 경우보다 증가시키던가, 재료의 품질이 변동될 때마다 측정하는 등의 조치가 필요하다. 또한, 오퍼레이터의 판단으로 $\pm 5\%/wt$ 의 표면수의 조절을 허용하는 경우도 있지만, 단일한 수량의 조절은 적극적으로 피하는 것이 좋다. 최근에는 골재의 표면수율을 배치마다 측정하는 방법인 전자파법, 정전용량법, 중성자법 등을 이용한 새로운 장치가 개발되어 이미 설치되어 있는 플랜트도 있다. 이와 같은 설비가 있는 경우는 배치마다의 측정도 가능하므로 보다 세밀한 관리가 가능하다.

특수한 골재를 사용할 경우는, 일반적으로 사용하는 골재와 구별하여 저장할 필요가 있다. 또, 골재의 저장설비는 지붕이나 덮개 등이 있는 것으로서 골재의 종류, 입도별 저장이 가능하며, 하부에 고인 물이 배수가 잘 되도록 하는 것이 좋다.

4.3.4 비비기 방법의 검토

제조설비 가운데 특히 중요한 것은 믹서이다. 고강도콘크리트는 보통의 강도를 가지는 콘크리트에 비하여 단위시멘트량이 많으며, 필연적으로 혼화제의 사용량도 많아진다. 따라서 이로 인하여 점성이 높은 콘크리트가 되



(그림 13) 실내 시험비비기 강도에 의한 레미콘 공장의 비교

므로 충분한 비비기 성능을 가지는 믹서가 필요하게 된다. 현장에서는 강제식 2축 믹서, 강제식 팬형 믹서가 주로 사용되고 있다. 또 일괄적으로 비비될 경우에는 충분한 비비기가 어려운 경우도 있으므로 모르타르를 먼저 비비거나 분할 비비기의 채용, 혼화제의 후첨가 방식 등도 필요하다면 사전에 검토해 놓는 것이 좋다.

고강도콘크리트는 콘크리트를 비비 때의 믹서 최대부하전류가 그 믹서의 허용부하전류를 초과하지 않는 범위 내에서 비비기량을 정한다. 고강도콘크리트의 경우 점성이 높아지는 경우가 있으므로 믹서의 공칭 비비기량의 60~70% 정도 또는 그 이하로 하는 것이 바람직하다.

비비기 시간은 보통 강도의 콘크리트 보다 길어지므로 배차계획, 치기계획과 아울러 사전에 충분한 협의를 해 놓는 것이 중요하다.

고강도콘크리트는 단위시멘트량이 많아지므로 치기가 끝난 후 수화열에 의한 콘크리트 온도상승량이 커져 온도균열이 발생하거나 장기 강도발현이 나빠지는 경우가 있다. 이 때문에 최근에는 치기가 끝난 후의 콘크리트 온도상승량이나 상승속도의 저감대책으로서 저발열형 포틀랜드시멘트를 채용하는 경우가 계속적으로 증가하고 있으므로 필요에 따라 검토하는 것이 좋다.

또, 고강도콘크리트를 매스콘크리트나 서중콘크리트에 사용할 경우에는 제조단계에서도 유효한 온도상승 억제대책을 강구하는 수도 있다. 최근 콘크리트 온도를 적극적으로 낮추는 방법으로서 액체질소를 냉매로 하여 콘크리트 치기온도를 낮추는 프리쿨링공법이 실용화되고 있다. 프리쿨링의 시기로서는 비비기 전의 잔골재 및 굵은골재를 냉각하는 방법, 비비기 도중 콘크리트를 믹서 내에서 냉각하는 방법, 또 운반된 콘크리트를 치기 전에 트럭교

반장치에서 냉각하는 방법 등이 있다. 이들은 비용의 문제는 있지만, 온도제어 효과가 매우 크므로 프리쿨링의 필요성이 높은 것에 대하여는 고려할 가치가 있다.

4.3.5 현장 믹서를 사용한 시험 비비기

현장 믹서에 의한 시험 비비기는 앞서 나타낸 비비기 방법이 거의 확립된 상태에서 실시하는 것이 바람직하다. 현장 믹서를 사용한 비비기는 실내 시험 비비기에서 얻은 시멘트-물비와 압축강도와와의 관계식을 기초하여 필요로 하는 물-시멘트비를 정하기 위한 것이다. 또 현장 믹서로 비빈 콘크리트를 사용하여 실물 크기의 실험을 실시하는 경우도 있다. 시험비비의 주된 목적은 다음과 같다.

① 실제와 동일한 믹서에 의한 비비기 성능의 파악(비비기량, 비비기 시간 등)

② 굳지 않은 콘크리트의 물리적 성질에 관한 시간적 변화의 파악(슬럼프플로우값, 공기량 등)

③ 강도발현 성상의 파악(압축강도)

특히, 굳지 않은 콘크리트의 물리적 성질에 관한 시간적 변화는 실제와 동일한 믹서로 비빈 후, 트럭교반장치에 적재하여 운반하면서 파악하는 것이 좋다. 또, 고성능 AE감수제의 분산작용이나 감수효과는 실내 시험비비의 결과와 상당히 달라지는 경우도 있으므로 워커빌리티를 잘 관찰하여 배합에 feedback시킬 필요가 있다.

4.3.6 운반

트럭교반장치에 적재하는 고강도콘크리트의 양은 치기 부위나 치기 방법 등을 고려한 후, 운반중 품질의 변화, 특히 워커빌리티에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 정한다. 또, 고강도콘크리트의 운반은 비비고 나서 120분 이내에 치기가 종료될 수 있는 범위 내에서 되

도록 짧게 하고, 출하 피치도 치기 능력을 고려하여 정하도록 한다. 콘크리트를 칠 때 마다 출하 및 치기시간을 기록한 관리표를 작성하는 것도 하나의 방법이라고 생각된다. 관리표를 작성함으로써 시간 손실의 원인 및 그 해결책을 발견할 수가 있으며, 다음 번 이후의 콘크리트 운반에 feedback시킬 수가 있다.

고강도콘크리트는 점성이 높기 때문에 트럭 교반장치의 드럼내에 부착하기 쉬우며, 경화하면 떼어내기 어려우므로 치기가 끝나면 되도록 조기에 씻어내는 것이 좋다. 그러나, 트럭교반장치에 새 콘크리트를 적재하는 경우에는 씻어낼 때 잔류하는 물을 충분히 배출시켜야 한다.

5. 시공사례

고강도콘크리트의 제조는 콘크리트 성능의 향상 및 경제적인 관점에서 선진국을 중심으로 일찍부터 시작되었다. 미국의 경우 1984년에 980 kgf/cm², 1988년에 1330 kgf/cm² 급의 고강도콘크리트를 실 구조물 축조에 적용하였으며, 일본의 경우 건설성 주도 1988년부터 6년간 New RC 프로젝트를 수행하여 400~600 kgf/cm² 급의 고강도콘크리트를 실용화한 바가 있다.

우리나라에서는 일찍부터 PSC부재 제작에 400 kgf/cm² 급의 고강도콘크리트가 실용화되었으며, 1998년에 한국도로공사와 쌍용양회공업(주), 동아건설산업(주)의 공동연구로서 수행된 콘크리트 장경간 보 개발에 대한 연구에서 고강도 PSC BEAM교량의 실용화가 추진되어 600~800 kgf/cm²급의 고강도콘크리트가 출현하였다.

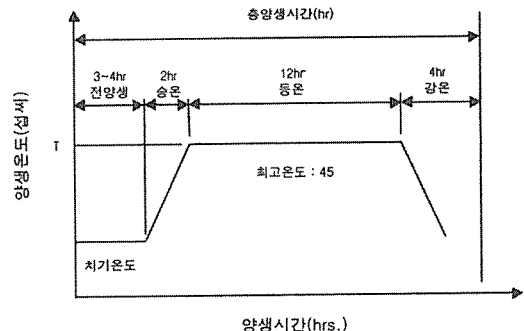
1990년 분당신도시 고층아파트의 일부에 500 kgf/cm² 급의 고강도콘크리트가 실용화된 이래, 1993년 (주)대우 및 삼성물산(주)에

서 700 kgf/cm² 급, 1994년에 삼성물산(주)에서 1200 kgf/cm² 급의 고강도콘크리트를 제조하였다. 또한, 1996년에는 삼성물산(주)에서 콘크리트 충전 합성강관 구조물의 건설에 420~560 kgf/cm² 급의 고강도-초유동콘크리트를 사용하였다.

5.1 고강도 PSC BEAM교량의 시공

한국도로공사 도로연구소에서 수행한 중부내륙 고속도로(여주-충주간)제1공구 상에 위치한 금당교(시험주교상)의 PSC BEAM 제작에 700 kgf/cm²급 고강도콘크리트를 적용하였다. 시험용 PSC BEAM 제작에 사용된 고강도콘크리트의 배합은 [표 7]과 같으며, 설계기준강도 700 kgf/cm²에 대한 배합강도는 805 kgf/cm²를 사용하였다. 결합재로서는 보통포틀랜드시멘트에 플라이애시를 5%치환하여 사용한 경우와 조강시멘트만을 사용한 경우 2가지로 하였다.

PSC BEAM은 증기양생을 실시하였으며, 그의 주기는 [그림 14]와 같다. 거푸집 탈형은 증기양생에 의한 콘크리트 내부온도가 외부온도와 거의 같아지는 시점에서 실시하였으며, 탈형 후 콘크리트 표면조사를 실시한 결과 수화열에 의한 온도균열 발생은 없는 것으로 나타났다.



(그림 14) 증기양생의 주기

[표 7] 고강도콘크리트의 배합

사용시멘트	W/P (%)	s/a (%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위량(kg/m ³)				
					물 (W)	결합재 (P)	잔골재 (S)	굵은 골재 (G)	고성능 감수제
보통포틀랜드시멘트	24.5	34	18±3	3±1	167	682.5	501	991	2.0%
조강시멘트	30.2	35	18±3	3±1	160	530	583	1165	1.5%

5.2 高止水性 연속지중벽의 시공

일본의 동경개스(주)에서 주요시설인 TP1 LPG 및 지하식 저조에서 고지수성 연속지중벽의 시공에 설계기준강도 400 kgf/cm² 및 600 kgf/cm²의 고강도-고유동콘크리트를 사용하였다. 결합재로서는 저발열성과 저수축성, 장기강도 발현의 안정성을 고려하여 고빌라이트계 저발열 포틀랜드시멘트에 플라이애시를 9% 혼합한 시멘트를 사용하였다.

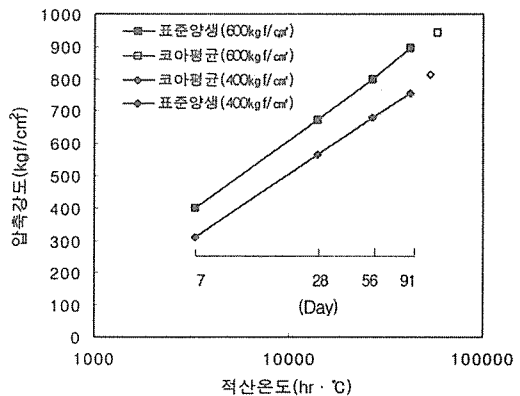
고성능AE감수제는 폴리카르본산계를 사용하였으며, 비빈 후 1.5시간동안 소정의 유동성이 확보되도록 하였다. 또 골재의 표면수율 변동 등의 재료 변동에 의한 콘크리트의 품질 변동을 억제하기 위해 분리저감제를 첨가하였다.

이 구조물은 벽두께가 1m로서 두껍고 또 고강도콘크리트이므로 매스콘크리트로서의 시공관리가 필요하다. 특히 연속지중벽과 같은 벽체식 구조는 수화열에 의한 변형을 먼저 친 콘크리트가 구축하는 이른바 외부구축의 영향이 크게 작용하므로 벽체에 관통균열이 발생할 우려가 매우 높다. 이와 같은 온도균열은 구조물의 지수성을 저하시키는 것은 물론, 충분

한 장기강도 확보의 차원에서도 온도상승량을 적극적으로 낮추는 쪽이 바람직하므로 결합재에 저발열형 시멘트를 적용한 것이다. 이들의 배합에 대하여는 수화열에 의한 열응력해석을 실시하였으며, 온도균열지수가 1.2 이상인 것을 확인한 후 선정하였다.

콘크리트의 배합 및 사용재료는 [표 8]과 같다.

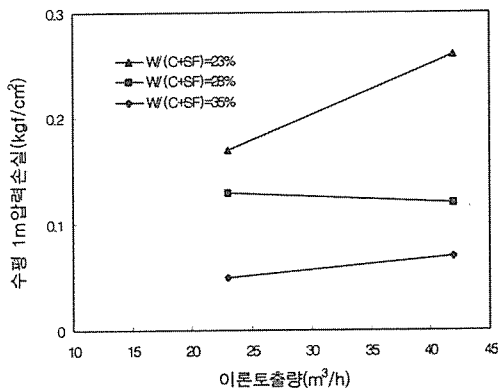
콘크리트의 품질관리시험에는 공장출하시 및 현장도착시에 슬럼프플로우시험, 공기량시험 및 콘크리트의 온도 측정 등을 실시하였다. 시험빈도는 콘크리트의 제조개시 및 배합이



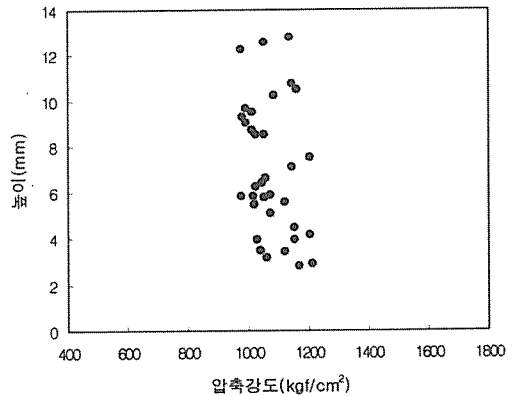
(그림 15) 콘크리트의 압축강도 발현 상황

[표 8] 고강도콘크리트의 배합

설계기준강도 (kgf/cm ²)	W/P (%)	s/a (%)	슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	단위량(kg/m ³)					
					물 (W)	결합재 (P)	잔골재 (S)	굵은 골재 (G)	고성능 AE감수제	분리 저감제
600	30.0	49.3	65±5	4±1	168	560	783	840	13.7	0.5
400	35.1	51.8	63±5	4±1	165	470	868	840	10.8	0.5



(그림 16) 콘크리트 압송시 펌프관내 압력손실



(그림 17) 콘크리트의 코아 압축강도

바뀔 때마다 래디믹스트콘크리트 최초 3대에 대하여는 연속하여 굳지 않은 콘크리트의 성상을 확인하였으며, 그 이후에는 50m³마다 관리에 필요한 시험을 실시하였다.

또, 강도확인을 위한 시험체는 150m³ 마다 제작하였다. [그림 15]는 표준양생을 실시한 공시체 강도와 코아 강도 측정 결과를 나타낸 것이다. 재령 91일 시점에서의 강도는 모두 설계기준강도를 초과함으로써 충분한 소정의 강도가 얻어지고 있음을 알 수 있다.

5.3 고층 RC건축물 기둥의 강관 콘크리트 시공

일본 오오사카에 건설된 지상 40층 건물 중 33층까지의 기둥을 충전형 강관 콘크리트로 시공한 것으로서, 설계기준강도 800 kgf/cm² 급의 고강도콘크리트로 강관 내부에 콘크리트 펌프를 사용하여 채운 것이다.

[그림 16]은 콘크리트펌프의 이론 토출량과 배관의 수평거리 1m당 압력손실 관계를 나타낸 것이다. 물-결합재비 23%인 콘크리트라 하더라도 토출량 30m³/h에서 수평압력손실이 약 0.2 kgf/cm²/m가 된다. 그러므로 시험에 사용된 펌프의 최대토출압이 125

kgf/cm²이므로 수평환산거리 500m까지의 압송이 가능하다. 실제 시공시 펌프압송에 의한 압력손실 평균치는 배관길이 1m당 설계기준강도 800 kgf/cm²(물-결합재비 23%)인 경우 0.28 kgf/cm²/m로서 이론치 0.2 kgf/cm²/m와 유사한 결과를 나타낸 것으로 보고되고 있다.

[그림 17]은 물-결합재비 23%인 고강도콘크리트를 압입하여 채운 강관기둥에서 채취한 재령 28일에서의 코아공시체 시험결과를 나타낸 것이다. 코아압축강도는 모두 설계기준강도 800 kgf/cm²을 초과하고 있다.

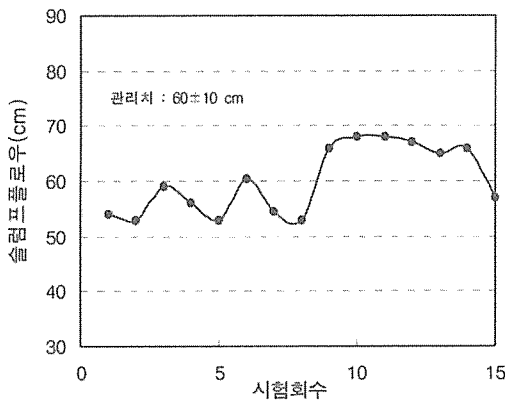
이상의 시험결과를 토대로 선정된 고강도콘크리트의 배합은 [표 9]와 같으며, 설계기준강도 600 kgf/cm² 및 800 kgf/cm²에 대한 배합강도는 각각 896 kgf/cm² 및 1093 kgf/cm²로 정하였다.

[그림 18]은 콘크리트 내리기 시점에서의 슬럼프플로우 측정결과를 나타낸 것이다. 설계기준강도 600 kgf/cm² 및 800 kgf/cm² 모두 관리치 10cm의 범위에 들고 있음을 알 수 있다.

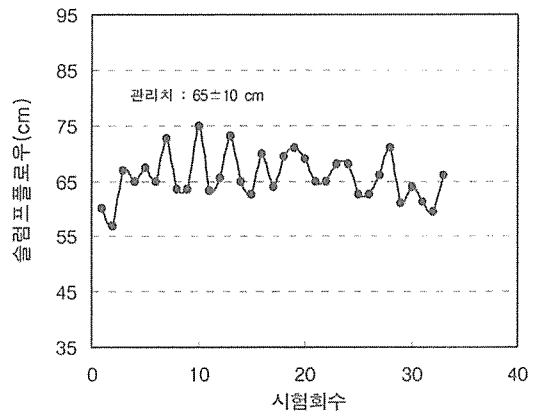
[그림 19]는 구조체 강도관리를 위한 표준양생 시험체의 압축강도에 대한 시험결과를 치기 일자마다 정리한 것이다. 시험결과, 모두

[표 9] 고강도콘크리트의 배합

설계기준강도 (kgf/cm ²)	W/P (%)	s/a (%)	슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	단위량(kg/m ³)					
					물 (W)	결합재(P)		잔골재 (S)	굵은 골재 (G)	고성능 AE감수제
						시멘트	실리카흙			
600	31.0	48.6	60±5	1.5±0.5	175	516	49	782	841	1.8
800	23.0	42.2	60±5	1.5±0.5	175	688	73	613	841	2.1

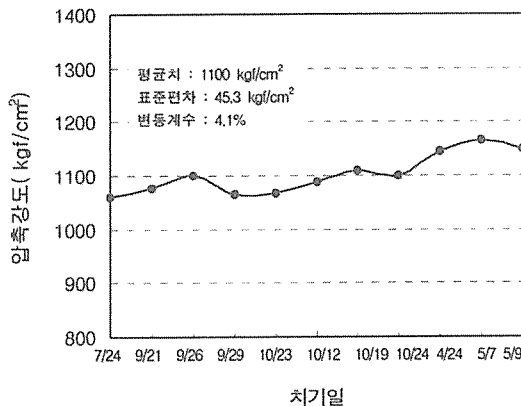


(a) $f_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$

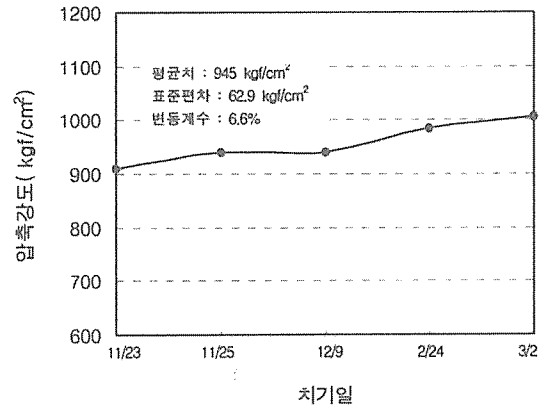


(b) $f_c = 800 \text{ kgf/cm}^2$

[그림 18] 시공시 콘크리트의 슬럼프플로우 측정



(a) $f_c = 800 \text{ kgf/cm}^2$



(b) $f_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$

[그림 19] 시공시 콘크리트의 압축강도 관리

강도 관리치(설계기준강도 600 kgf/cm²인 경우 748 kgf/cm², 800 kgf/cm²인 경우 918

kgf/cm²)를 충분히 만족하고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 한국콘크리트학회, 제12장 “고강도콘크리트,” 콘크리트표준시방서, pp151~156, 1999년.
2. 한국도로공사 도로연구소, “콘크리트 장경간보 개발에 대한 연구,” 1998년도 연구보고서.
3. 이규정, 정원기, 이형준, 업태선, “고강도 PC BEAM교량의 실용화,” 한국콘크리트학회지, 제10권 4호, pp46~52, 1998. 8
4. 신성우, 노병용, “700 kgf/cm² 이상의 초고강도 콘크리트 최적배합비 도출 및 현장적용,” 한국콘크리트학회지, 제7권 2호, pp60~70, 1995. 4.
5. 김성환, 박원구, 최응규, “고강도-초유동 콘크리트 충전 합성강관 구조물의 시공 및 품질관리,” 한국콘크리트학회지, 제8권 4호, pp86~93, 1996. 8.
6. 김원섭, 김세현, 신성우, “도곡동 캐릭터 199 프로젝트에 대한 고강도 콘크리트의 적용 및 품질관리,” 한국콘크리트학회지, 제8권 3호, pp70~77, 1996. 6.
7. 日本土木學會, 高強度コンクリート設計施工指針(案), 콘크리트-라이브러리-第47號 471980. 4月.
8. 奎田佳寬, “FC=600kgf/cm²가 고強度でなくなる時,” 日本セメント-コンクリート, No.546, pp46~58, 1992. 8.
9. 飛坂基夫, “高性能(AE)減水劑を用いた高強度-高品質コンクリートの諸性質,” 日本セメント-コンクリート, No.548, pp9~18, 1992. 10.
10. 日本土木學會, “高性能AE減水劑を用いたコンクリートの施工指針(案),” 콘크리트라이브러리-第74號-1993.
11. 奎田佳寬, “コンクリート最新技術, (1) 高強度コンクリート,” 日本コンクリート工學, Vol. 32, No.10, pp81~89, 1994. 4.
12. 一瀬賢一 等, “高強度コンクリートの製造,” 日本コンクリート工學, Vol. 32, No.7, pp37~40, 1994. 7.
13. 友澤史紀 等, “高強度コンクリートの開發,” 콘크리트工學, Vol. 32, No.10, pp11~19, 1994. 10.
14. 上村克郎 等, “高強度鐵筋コンクリート造(New RC)の施工法,” 日本コンクリート工學, Vol. 32, No.10, pp45~54, 1994. 10.
15. 鳴瀬浩康, “高強度コンクリート用セメント,” セメント・コンクリート, No. 594, pp30~34, 1996. 8.
16. 高木貞人 等, “高強度-高流動コンクリートによる高止水性連續地中壁の施工,” 日本コンクリート工學會, Vol. 34, No.12, pp26~28, 1996. 12.
17. 岩清水隆 等, “FC=800kgf/cm²の超高強度コンクリートを用いた鋼管コンクリートの施工,” 日本コンクリート工學, Vol. 35, No.5, pp19~24, 1997. 5.
18. 黒羽健嗣, “高強度コンクリート,” 日本コンクリート工學, Vol. 37, No.6, pp31~35, 1999. 6.