

고성능 콘크리트의 제조 및 특성

문 한 영

(한양대 토목공학과 교수)

1. 머리말

1980년대 후반 캐나다, 미국, 일본 등에서는 고강도 콘크리트의 개념에서 進一步하여 우수한 施工性和 耐久性을 요구하는 高性能 콘크리트 (High Performance Concrete)에 관련된 연구 논문과 실제 구조물에 응용된 사례들이 발표되었다.

1994년 5월 프랑스 Nice에서 개최된 RILEM의 제1회 "The Role of Admixtures in High Performance Concrete" 위원회에서 위원장인 O. E. Gjorv 교수는 高性能 콘크리트를 고강도 콘크리트의 동의어 정도로 발표하였다.

일본 동경대학의 小澤 교수팀은 高性能 콘크리트를 다음과 같이 정의하였다.

첫째, 굳지 않은 상태에서 변형이 우수할 뿐만 아니라 재료분리 저항성이 풍부하여 진동기를 사용하지 않더라도 거푸집 속에 잘 채워지는 다짐이 필요없는 콘크리트.

둘째, 타설 직후 硬化收縮이나 수화에 의한 발열이 적고 또한 건조수축을 적게 되도록 하여 균열에 대한 저항성을 가지며 초기결함이 잘 생기지 않는 콘크리트.

셋째, 경화 후에는 탄산가스나 염소이온 등이 외부로부터 침투되더라도 충분히 저항할 수 있는 치밀한 微細構造를 가진 내구성 콘크리트.

한편 캐나다 Sherbrooke대학의 Aitcin 교수에 의하면 高性能 콘크리트에 사용되는 기본재료는 보통 콘크리트와 같으나 상이한 점은 배합이며 물-시멘트 비를 대폭 줄여 시멘트 수화물을 매우 치밀한 미세구조로 만듦으로써 거의 不透水性材料로 만든다는 개념이다.

미국 North Carolina-State University의 Zia

교수팀은 SHRP Contract C-205에서 고성능 콘크리트는 다음 3가지 요구조건을 만족해야 한다고 정의하고 있다.

첫째, 물-시멘트 비(포졸란 포함)는 35% 이하야 한다.

둘째, 내구성은 ASTM C 666에서 300짜이클의 동결융해작용을 받을 경우 내구성 지수가 최소 80% 이상이어야 한다.

셋째, 압축강도는 타설 4시간에 21Mpa 이상 (Very Early Strength Concrete), 24시간에 34Mpa 이상 (High Early Strength Concrete) 또는 28일에 69Mpa 이상 (Very High Strength Concrete) 되는 3조건 중에 한 조건을 만족해야 한다.

한편 고성능 콘크리트가 갖추어야 할 성질은 다음과 같다.

(1) 타설과 다짐시 재료분리 없이 작업이 용이할 것 (2) 장기재령에서 역학적 성질이 좋을 것 (3) 초기재령에서 강도가 높을 것 (4) 체적변화가 적을 것 (5) 가혹한 환경하에서도 사용성이 확보될 것 (6) 높은 인성을 가질 것

2. 고성능 콘크리트용 재료

고성능 콘크리트용 재료는 근본적으로 보통 콘크리트용 재료와 크게 상이하지는 않다.

2-1. 시멘트

고성능 콘크리트용으로 사용되는 시멘트는 Zia 등에 의하면⁽¹⁾ 보통 콘크리트와 마찬가지로 보통 포틀랜드시멘트, 중용열 포틀랜드시멘트 및 조강 포틀랜드시멘트로서 재령 28일 압축강도 69MPa

이상 요구되는 콘크리트(VHS Concrete)는 보통 및 중용열 포틀랜드시멘트나 혼합시멘트를 사용하며 혼화제나 혼화제를 조합하여 사용하기도 한다. 그래서 재령 1일 압축강도 34MPa 이상 요구되는 콘크리트(HES Concrete)는 조강 포틀랜드시멘트나 특수시멘트를 사용하며 촉진제를 사용한다. 그리고 타설후 4시간 압축강도 21MPa 이상 요구되는 콘크리트(VES Concrete)의 경우는 초속경시멘트 또는 Pyrament를 혼합한 혼합시멘트를 사용함으로써 초기강도와 극한강도가 우수하고 透水性이 좋고 融氷劑나 동결에 대한 저항성이 매우 우수한 시멘트 콘크리트의 제조가 가능하다.

橋에 의하면⁽⁸⁾ 결합제로 포틀랜드시멘트만을 사용할 경우 1000kg/cm² 정도의 강도가 한계이며 시공성이 저하하기 때문에 초고강도 콘크리트를 제조하기 위하여 실리카흙 등을 혼화제로 사용함이 바람직하다고 한다. 그리고 최근의 시멘트 제조기술 중에는 시멘트의 형상이나 입도를 改質 조정하거나 시멘트 클링커의 鑛物組成比率를 크게 바꾸어 놓은 시멘트가 초고강도 콘크리트 제조에 적합하다고 한다.

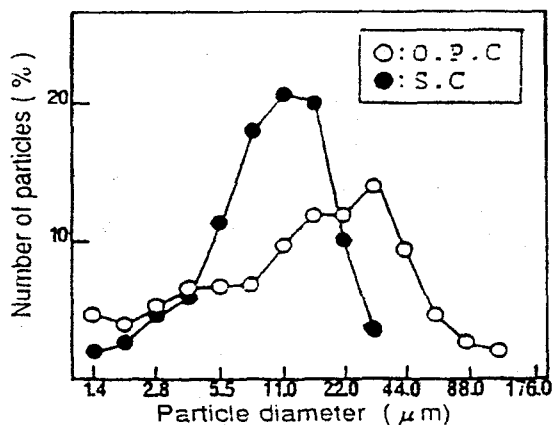
Tanigawa 교수에 의하면⁽⁹⁾ 고강도 콘크리트를 제조하기 위하여 몇몇 새로운 종류의 시멘트를 개발 중이며 그 가운데에서 대표적인 3종류의 시멘트를 예를 들고 있다. 高速氣流中 衝擊處理方法(High Speed Impact Treatment Method)으로 제조된 球形 시멘트(Spherical Cement), 입자크기의 분포를 조절한 시멘트(Particle Size Distribution Controlled Cement) 및 超低熱

시멘트(Super Low Heat Cement) 또는 벨라이트 포틀랜드시멘트(Belite Portland Cement)라고 한다. 球形 시멘트(S.C로 약함) 입자의 특성이라면 지금까지의 포틀랜드시멘트(O.P.C로 약함) 입자와 달리 모서리가 없이 둥근 형상을 가지며, 동일한 배합으로 모르터를 제조하여 플로우 시험을 해보면 현저히 유동성이 개선됨을 알 수 있다.

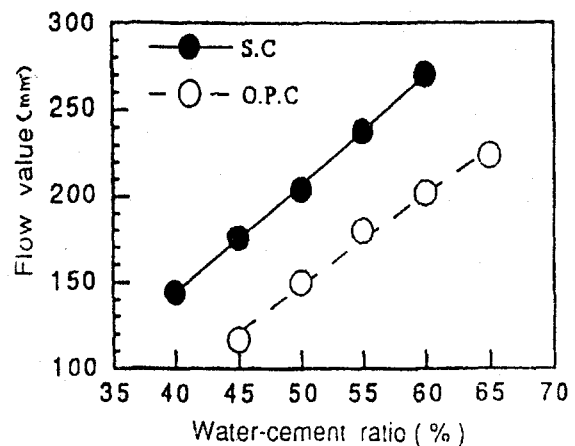
이들 두 시멘트의 입자크기 분포와 물-시멘트비에 따른 모르터의 플로우 시험결과를 비교한 것이 각각 <그림 1, 2>이다. <그림 1>에서 알 수 있듯이 최대입자는 직경 40 μ m이며, 비표면적은 감소되지만 겉보기 밀도는 증가하는 입도이다. 한편 <그림 2>에서 동일한 플로우 값으로 비교할 때 구형 시멘트 사용 모르터의 물-시멘트 비가 보통 시멘트 모르터보다 약 10% 정도 감소됨을 알 수 있다.

한편 Kitamura 등에 의하면⁽¹⁰⁾ <그림 3>에서와 같이 낮은 물-시멘트 비에서 구형 시멘트를 사용한 콘크리트는 시멘트 입자의 충전성이 양호하여 보통 콘크리트보다 밀실한 경화체가 되어 재령 56일에서 보통 콘크리트보다 압축강도가 약 10~50% 정도 크며, 최대 1,400kg/cm² 정도의 초고강도를 얻었으며, 재령 28일 후의 압축강도 증가율도 크게 나타났다.

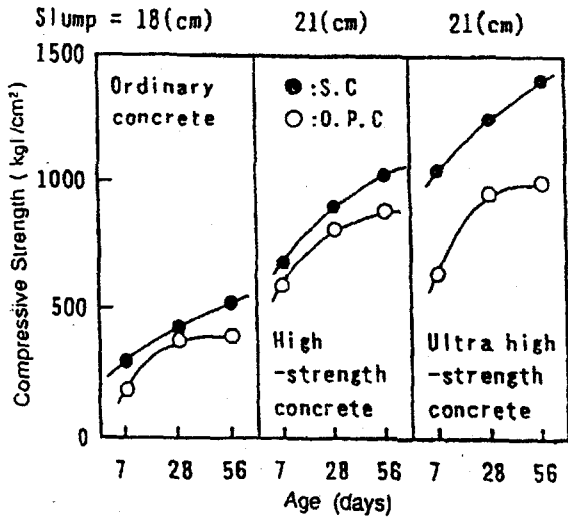
그리고 중성화 깊이를 CO₂ 농도 100%, 압력 3kg/cm² 하에서 촉진실험한 결과 보통 콘크리트는 96시간에 7mm인데 비하여 구형 시멘트 사용 콘크리트는 0mm의 좋은 결과를 얻었다.⁽⁹⁾ 또한 Tomosawa 등에 의하면⁽¹¹⁾ 시멘트 입자와 실리



<그림 1> 시멘트의 입자분포



<그림 2> 모르터의 물-시멘트비와 플로우값과의 관계



〈그림 3〉 구형시멘트 사용 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

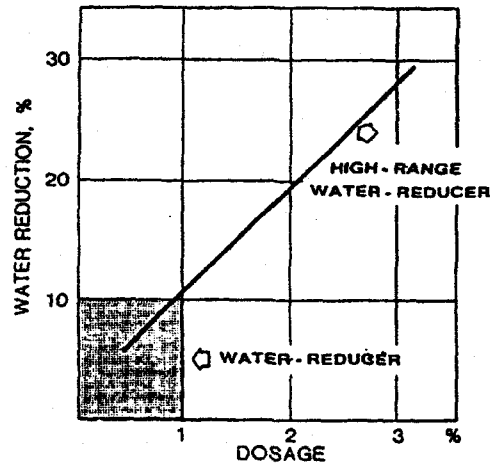
카흙, 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 등을 일정 비율로 섞어서 입자크기의 분포를 조절한 시멘트 (Particle Size Distribution Controlled Cement, PSDC)를 사용한 콘크리트의 물-결합재 비를 25% 이하로 낮추어 줌으로써 Slump Flow 70cm되는 초유동, 압축강도 1250kg/cm²되는 초고강도 콘크리트를 얻었다고 한다.

한편 고강도 콘크리트는 단위 시멘트량이 많으므로 수화반응시에 매우 많은 수화열이 발생하여 콘크리트 온도가 크게 상승하므로 특별한 주의를 요한다. 그래서 최근에는 수화열이 작고 고강도를 얻을 수 있는 고펀라이트 시멘트(High Belite Cement, HBC)가 개발되어 재령 7일에서는 강도발현이 작으나 재령 28일에서 시멘트-물 비가 4.0일 때는 1100kg/cm²의 고강도를 나타내었다.

2-2. 화학 혼화제

화학 혼화제는 콘크리트의 응결시간을 변화시키고, 소요의 워커빌리티를 만족시키기 위하여 수량을 저감시키며, 동결융해 및 화학약품에 대한 내구성을 증대시키고 아울러 보강철근의 부식 전위를 낮추어 주기 위한 목적 등으로 사용된다.

AE제의 경우, Air-void System으로 콘크리트의 凍結抵抗性을 향상시키기 위하여 주로 사용된다. 고성능 감수제(HRWR 또는 Superplasticizers)는 〈그림 4〉에서 알 수 있듯이 일반적인 감수제보다 성능이 우수하여 10~30%의 감수성능

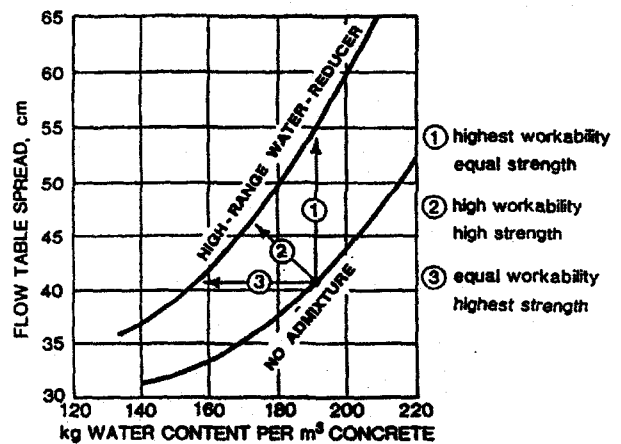


〈그림 4〉 감수제와 고성능 감수제의 감수성능 비교

을 나타내며 아울러 〈그림 5〉에서처럼 콘크리트의 유동성 향상 및 강도를 크게 향상시켜 주는 효과가 있는 혼화제이다.

고성능 감수제를 적정량 사용하면 응결시간이 빨라지기도 하지만 사용량이 지나치게 많게 되면 오히려 초기강도를 지연시킨다. 그런데 나프탈린 설폰산염 축합물 또는 멜라민 설폰산염 축합물을 주성분으로 하는 고성능 감수제는 단위수량을 크게 감소시켜주는 효과가 있을 뿐만 아니라 믹싱 후 경과시간 15~30분 정도에서는 유동성이 좋으나⁽⁷⁾ 그 이후 경과시간에 따른 슬럼프 손실 (Slump Loss)이 크기 때문에 지연제를 병용하는 방안 등을 강구해야 한다. (1, 12~14)

한편, 岸谷에 의하면⁽¹⁵⁾ 반응성 고분자를 주원료로 한 고성능 AE 감수제는 경과시간에 따른



〈그림 5〉 고성능 감수제의 효과

콘크리트의 유동성 손실을 현저히 감소시킨다고 하며 또한 Kinoshita 등도⁽¹⁶⁾ 새로운 종류의 고성능 AE 감수제는 시멘트의 분산성이 우수할 뿐만 아니라 보통 고성능 감수제보다 슬럼프를 유지하는 능력이 뛰어나며, 물-시멘트 비가 19%인 콘크리트의 압축강도가 재령 28일에 1,300~1,400kg/cm² 정도의 고강도를 나타낸다고 보고하였다.

2-3. 광물질 혼화재

대표적인 혼화재로서 플라이애쉬를 들 수 있으며 양질의 플라이애쉬를 사용하게 되면 고성능 콘크리트의 기술적인 면에서나 경제성 면에서도 매우 유리하다고 하며 굳지않은 콘크리트의 워커빌리티와 슬럼프를 유지하기 위하여 시멘트량의 20% 이상 대체하여 사용한다.⁽¹⁷⁾ 다만, 플라이애쉬를 사용하여 물-결합재 비를 대폭 낮추어 주면 포졸란 반응으로 인하여 수화반응이 늦어지는 탓으로 초기강도가 작은 것이 불리한 점이라 하겠다.⁽⁷⁾ 플라이애쉬를 ASTM C 618에서 Class F와 Class C로 분류하고 있으며, Class C 플라이애쉬는 일반적으로 Class F 플라이애쉬보다 칼슘성분이 많으며, Class C 플라이애쉬를 포틀랜드시멘트에 혼합 사용함으로써 시멘트계 재료와 같은 수화반응을 한다.⁽²⁾ 그리고 시멘트를 일부 Class F 플라이애쉬로 대체함으로써 황산염에 대한 내구성을 증진시키고 알칼리 골재반응을 감소시키며 적절한 양생으로 시멘트풀의 공극과 투수성을 줄여 주며, 아울러 수화열을 감소시켜 주는 역할을 한다. Bilodeau에 의하면⁽⁶⁾ 고성능 콘크리트용으로 플라이애쉬 혼합비 $F/(C+F) = 58\%$ 를 사용하여 재령 28일 및 91일에 각각 45Mpa 및 50Mpa의 압축강도를 얻었다고 한다.

한편, 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag)은 고칼슘의 광물질 혼화재로서 미국에서는 슬래그-활성도 지수(Slag-activity Index)에 따라 Grade 80, 100 및 120으로 분류하고 있으며, 이 등급이 높을수록 일반적으로 시멘트에 의한 잠재수경성이 크다.

황산염 저항성이 요구될 때는 고로슬래그 미분말을 최소한 50% 이상 사용해야 하며 적절하게 사용함으로써 알칼리-실리카 팽창반응을 줄이는

데 효과가 있으며 또한 적절한 공기를 연행시켜 줌으로써 동결융해 저항성이 좋으며 투수성을 감소시켜주는 효과도 있다. 그리고 보통이나 낮은 온도에서 양생하면 고로슬래그 미분말을 혼합한 콘크리트의 초기강도가 상대적으로 낮으나 높은 온도로 양생하게 되면 초기강도를 발현한다.

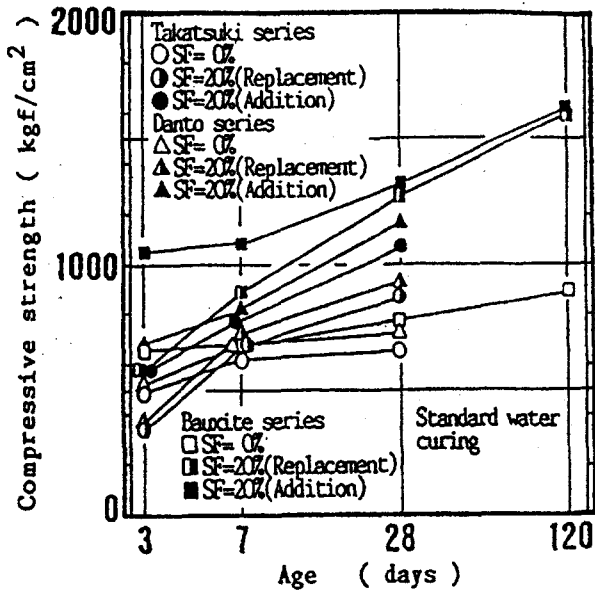
또한 실리카흄(Silica Fume)은 농축 실리카흄(Condensed Silica Fume) 또는 마이크로 실리카(Micro Silica)로도 불리며, 포틀랜드시멘트풀속에서 강한 포졸란 반응을 일으키는 유리질 실리카의 극히 작은 미립자로 구성된 광물질 혼화재이다.

실리카흄은 현장타설 콘크리트의 고강도나 내구성을 향상시키기 위하여 미국에서 사용되었으며 대개의 실리카흄은 50%의 물로써 슬러리 상태로 보관사용하기 때문에 플라이애쉬, 슬래그와 같은 일반적인 광물질 혼화재의 가격이 포틀랜드시멘트의 20~40% 정도인데 비하여 실리카흄은 최소 2~10배 정도 비싸다.

그리고 실리카흄을 사용하여 매우 낮은 물-시멘트 비의 콘크리트를 제조해야 하기 때문에 적절한 워커빌리티를 유지하기 위하여 고성능 감수제의 사용이 필수적이며 불리당을 감소시키는 효과가 있다.⁽²⁾ 또한 실리카흄은 포틀랜드시멘트 콘크리트의 화학적 침투에 여러가지 형태로 저항하여 내구성을 향상시키는데 매우 효과적이며, 알칼리-골재 반응에 대한 내구성을 개선하는데도 공헌한다. 실리카흄을 함유한 콘크리트의 투수성은 동일한 압축강도의 실리카흄을 함유하지 않은 콘크리트보다 작다고 보고하고 있다.

한편 시멘트풀과 골재 사이의 경계역에서 포졸란 효과 및 충전 효과로 강도가 향상됨을 알 수 있다. 그래서 고강도 콘크리트를 제조하기 위한 실리카흄의 최적 값은 결합재 양의 5~10% 정도라고 하며, 실리카흄은 10% 이상 혼합하면 휨강도가 오히려 감소되므로⁽¹³⁾ FIP에서는 실리카흄의 최대 사용량을 10% 정도로 규정하고 있다.⁽¹⁸⁾ 도로포장의 경우에는 5% 이상을 사용하지 않도록 권장하고 있다.⁽¹¹⁾

Takaki에 의하면⁽¹⁹⁾ <그림 6>에서와 같이 보오크사이트를 굵은 골재로 사용하여 물-결합재 비 18.6%, 실리카흄 20% 혼합콘크리트의 재령 120일의 최대 압축강도가 1,640kg/cm²에 달하는



〈그림 6〉 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령과 압축강도

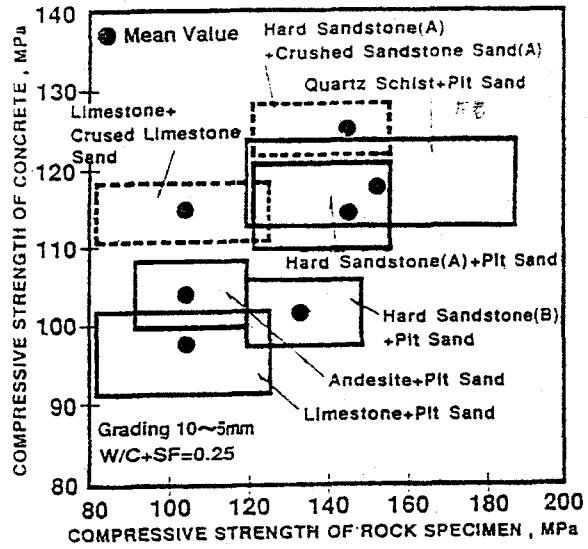
초고강도를 얻었다. 또한 실리카흙보다도 큰 비표면적(40~70m²/g)을 갖는 플라이애쉬흙이 개발되어 시멘트 입자 사이의 충전작용 및 포졸란 반응을 이용한 고강도의 발현에 이용한 예도 있다.

2-4. 골재

골재는 고성능 콘크리트내에서 매우 중요한 역할을 한다. 잔골재는 마무리 작업 뿐만 아니라 소요수량과 굵은 골재량의 결정에도 영향을 미친다. 그래서 잔골재의 조립율은 2.7~3.0이 적합하다고 한다.⁽⁷⁾

Kakizaki에 의하면⁽²⁰⁾ 암석 시험편과 그 암석을 굵은 골재로 사용한 콘크리트의 압축강도와와의 관계를 나타낸 것이 〈그림 7〉이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 석회암이나 안산암을 굵은 골재로 사용한 콘크리트의 압축강도와 암석의 강도는 거의 같으며 경질사암, 석영을 굵은 골재로 사용한 콘크리트의 경우 콘크리트의 최대 강도가 얻어졌으나, 오히려 암석의 강도에는 못 미치며 암석의 강도가 클수록 콘크리트의 압축강도가 크게 나타났다.

굵은 골재는 콘크리트 포장의 경우 소요수량, 압축 및 휨강도, 건조수축, 크리프 탄성계수 및 마모저항성에도 영향을 미친다. 또한 굵은 골재는 내구성을 고려해야 할 경우 중요한 역할을 하



〈그림 7〉 콘크리트와 암석 시험편의 압축강도

며 굵은 골재는 알칼리-실리카 반응에 중요한 영향을 미치게 된다.

굵은 골재의 공칭최대치수를 12mm 또는 10mm로 낮추어 주면 최적의 강도를 얻을 수 있으나 휨강도는 반대의 현상을 나타내며 더구나 크리프와 건조수축을 증가시킬 수 있다. 그래서 고강도를 얻기 위하여 최대 치수는 10~15mm 정도가 적합하다고 한다.⁽⁷⁾ 그리고 부순돌은 일반적으로 자갈과 같은 등근모양의 골재보다 골재와 시멘트풀과의 부착강도를 향상시키는데 유리하다고 한다.

2-5. 혼합수

고성능 콘크리트용 혼합수(Mixing Water)의 품질 기준은 보통 콘크리트와 크게 다를 바 없으며 혼합수는 시멘트와 마찬가지로 콘크리트를 구성하는 성분 중에서 가장 중요한 한 성분이다. 혼합수는 콘크리트를 믹싱할 때 다음과 같은 두 가지의 작용을 하게 된다.⁽¹⁾ 첫째는 콘크리트의 레올로지적인 성질을 나타내는 물리적 작용이며 다음은 수화작용을 촉진시키는데 공헌하는 화학적 작용이다. 고성능 콘크리트를 제조하기 위하여 필요로 하는 혼합수량의 한 예를 들어보면 각이진 모래를 사용할 경우 단위수량이 148kg/m³ 정도 소요되나 깨끗하고 등근 형상의 모래를 사용할 경우에는 131kg/m³ 정도로서 고강도를 얻을

수 있다고 한다.

Zia 등에 의하면⁽¹¹⁾ 물-시멘트 비가 35% 이하의 콘크리트를 습윤양생하게 되면 불연속 모세관이 생기게 되어 건습이나 동결융해의 반복작용 및 화학적 침식작용에 대한 내구성을 향상시켜 준다. 그러므로 고성능 콘크리트의 경우 물-시멘트 비는 35% 이하가 바람직하다고 한다. 한편 Aitcin 교수도⁽⁷⁾ 고성능 콘크리트를 제조하기 위하여 고성능 감수제를 사용하여 보통 콘크리트보다 30~50lb/m³ 정도 단위수량을 감소시키고 물-시멘트 비를 25~35%로 낮춰야 한다고 한다.

3. 고성능 콘크리트의 제조

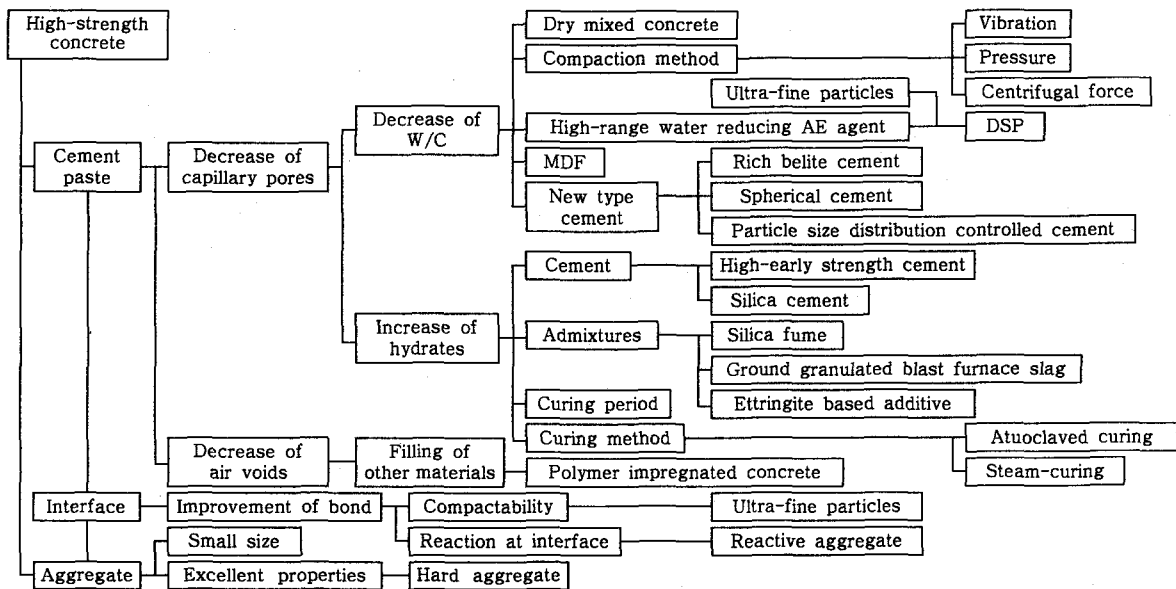
3-1. 고성능 콘크리트의 제조

고성능 콘크리트를 안정되게 제조, 공급하기 위해서는 재료의 입수에서부터 계량, 믹싱, 배출까지의 일련의 제조 시스템에 있어서 변동을 제어할 필요가 있겠으며, 이러한 전 제조공정을 숙련된 기술자에 의하여 보통 콘크리트의 제조시보다 더욱 철저하게 품질관리를 실시하는 것이 바람직하다. 앞에서 지적했듯이 고성능 감수제의 사용에 따른 유동성 손실이 큰 점이 시공상의 큰 장애요인이 되기 때문에, 현장에서 발생하는 슬럼프 손실을 줄이기 위한 대책의 일환으로 고성

능 감수제를 지연첨가(Delayed Addition of HRWR) 내지는 分割添加하는 방법 등에 대하여 검토하여 방안을 강구해야 한다. 또한 골재의 품질을 일정하게 관리해야 하는 것도 안정된 품질의 고성능 콘크리트를 제조하기 위한 필수불가결한 요소이므로 岡村 교수는 골재의 관리 포인트를 다음과 같이 요구하고 있다.⁽²³⁾

- (1) 잔골재의 표면수를 일정하게 유지할 것,
- (2) 골재 입도의 변동을 적게 할 것, (3) 굵은 골재의 石粉의 양을 관리할 것, (4) 잔골재 중의 泥分의 양을 관리할 것, (5) 굵은 골재의 表面水를 안정시키고 잔골재의 표면수를 연속하여 측정할 수 있는 水分計를 개발할 것.

橋⁽⁸⁾도 초고강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 시멘트 클링커의 광물조성 비율을 바꿀 필요가 있을 뿐만 아니라 시멘트 입자의 형상을 바꾸어 주고 입도 조절을 해야 하며 실리카흄이나 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬 등의 사용이 반드시 필요하며 골재는 자체의 강도, 입도분포, 입형, 최대치수, 유해물 함유량 및 표면상태 등을 고려해야 하며 골재 표면수의 변동이 생기지 않도록 철저하게 잘 관리해야 한다고 지적하고 있다. 그리고 실리카흄과 같은 미립분의 분산이 불충분할 가능성이 있기 때문에 믹싱시간을 보통 콘크리트 제조시보다 50% 정도 증가시켜 줄 필요가 있다고 한다.



<그림 8> 고강도 콘크리트의 제조방법

Tanigawa 교수는⁽⁹⁾ 고강도 콘크리트를 제조하기 위하여 <그림 8>에서와 같이 많은 요인들을 열거하고 있으며 크게는 다음 세가지 조건을 만족해야 한다고 한다.

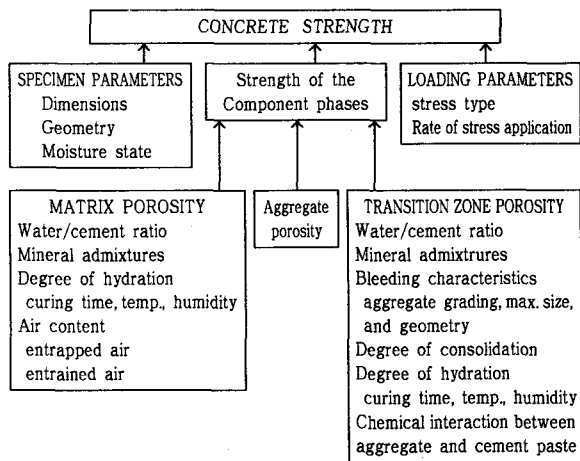
(1) 결합재 성질을 개선할 것, (2) 골재의 성질을 개선할 것, (3) 결합재와 골재 界面의 부착력을 개선할 것. 이 외에도 양생방법이 콘크리트 강도에 미치는 영향이 크기 때문에 충분한 습윤 양생이 될 수 있도록 조치를 취해야 한다. 예를 들어보면 물-시멘트 비 30% 정도의 실리카흙을 혼합한 고강도 콘크리트의 경우 수화반응이 늦기 때문에 재령 7일 정도에서 충분한 강도의 증진이 되지 않는다고 한다. 그래서 실리카흙 혼합 콘크리트의 경우, 양생조건에 따라 특히 초기에 건조시킬 경우 동일한 물-시멘트 비의 보통 콘크리트보다 초기건조에 따른 강도의 손실이 크며, 양생조건이 강도에 미치는 영향이 매우 민감하다고 한다.⁽¹¹⁾

3-2. 고성능 콘크리트의 강도 발현

일반적으로 콘크리트의 고강도 발현에 영향을 미치는 요인은 <그림 9>와 같다.

여기에서는 주로 고성능 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 혼화재료의 효과와 콘크리트 중 시멘트 페이스트와 골재와의 부착강도의 개선을 중심으로 고강도 발현 메카니즘을 고찰하겠다.

고강도 콘크리트의 고강도 발현에 있어서 가장



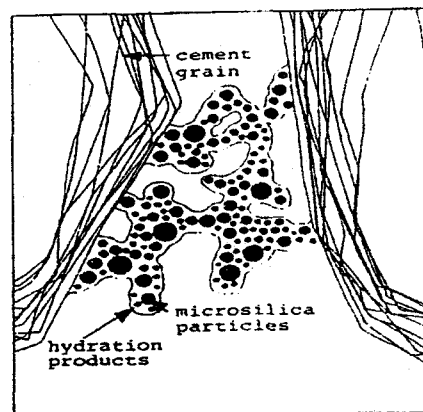
<그림 9> 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 요인

취약한 점은 결합재인 시멘트 페이스트와 골재와의 부착성이 작은 점이다. 즉, 양자의 계면에서의 결합력이 작기 때문에 고강도 콘크리트의 강도를 지배하는 주요 요인이 되고 있다. 골재와 시멘트 페이스트의 계면(Transition Zone)을 미시적으로 살펴보면 시멘트의 대표적인 수화생성물인 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 결정이 많이 포함되어 있다.

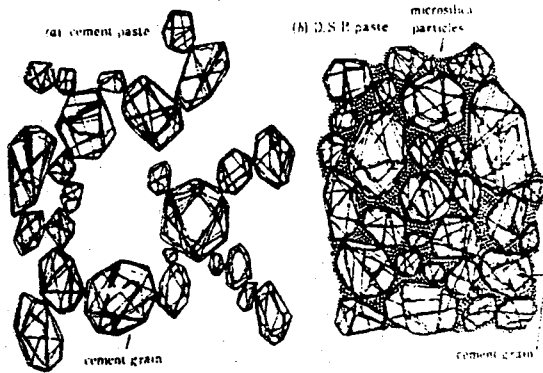
그러므로 다른 부분보다도 상당히 다공질의 구조로 되어 있어 강도면에서 취약하다. 따라서 시멘트 페이스트와 골재의 부착력을 증진시키기 위해서는 이 Transition Zone에 존재하는 많은 공극을 다른 재료로 충전하는 것이 필요하다. 예를 들면 실리카흙같은 초미분말을 사용하면 포졸란 반응에 의하여 Transition Zone에 존재하는 수산화칼슘과 반응하여 규산칼슘 수화물(대표적으로 C-S-H) 등을 생성하여 공극을 충전하기 때문에 시멘트 페이스트와 골재와의 부착이 개선된다. 이와 비슷한 현상으로서 시멘트 입자 사이의 공극을 실리카흙을 사용하여 충전하는 작용을 모델화한 것이 <그림 10>이다.

한편 이 원리를 이용하여 <그림 11>과 같이 DSP(Densified System Containing Homogeneously Arranged Ultra-fine Particles) 재료를 이용하여 압축강도가 2000kg/cm² 정도의 초고강도 콘크리트를 제조하기도 한다. 즉, 실리카흙을 사용하여 고성능 콘크리트를 제조하는 메카니즘은 <그림 12>와 같이 정리될 수 있다.

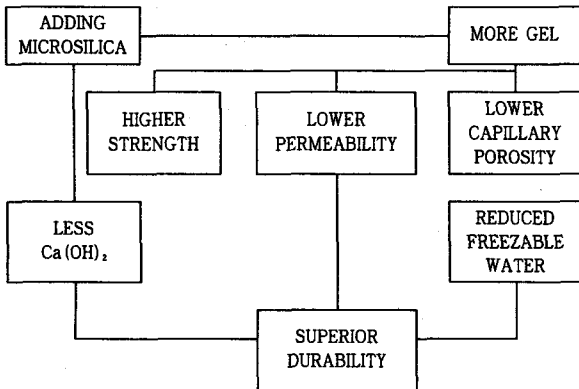
한편 시멘트 화학적인 면에서 고강도 발현 메카니즘을 살펴보면 다음과 같다.



<그림 10> 실리카흙 입자의 충전작용



〈그림 11〉 시멘트 페이스트와 DSP의 구조비교



〈그림 12〉 실리카흙의 고강도 발현

콘크리트 중의 대표적인 시멘트 수화생성물은 수산화칼슘, C-S-H, 알루미늄이테계 수화물 등이다. 이 중에서도 C-S-H는 콘크리트의 강도증진과 밀접한 관계를 나타내며 대체로 C-S-H의 양이 많을수록 콘크리트의 강도가 크게 나타난다고 한다.⁽²¹⁾ 즉, 수화생성물 중 많은 양을 차지하고 있는 수산화칼슘을 C-S-H로 전환할 필요가 있음을 알 수 있다.

4. 고성능 콘크리트의 특성

4-1. 굳지않은 콘크리트의 성질

(1) 슬럼프 손실

고성능 감수제를 사용하여 제조한 굳지않은 고강도용 콘크리트의 유동성 손실은 일반적으로 보통 콘크리트보다 현저하게 크다. 그러나 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말, 실리카흙 같은 광물질

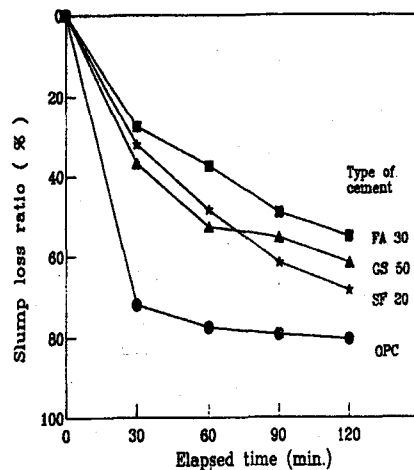
혼화재를 사용하고 석고를 첨가함으로써 유동성 손실을 얼마간 감소시킬 수가 있다고 한다.⁽²²⁾

〈그림 13〉은 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 및 실리카흙을 사용하고 석고를 2% 첨가하여 제조한 굳지않은 고강도용 콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프 손실률을 측정하여 나타낸 것이다.

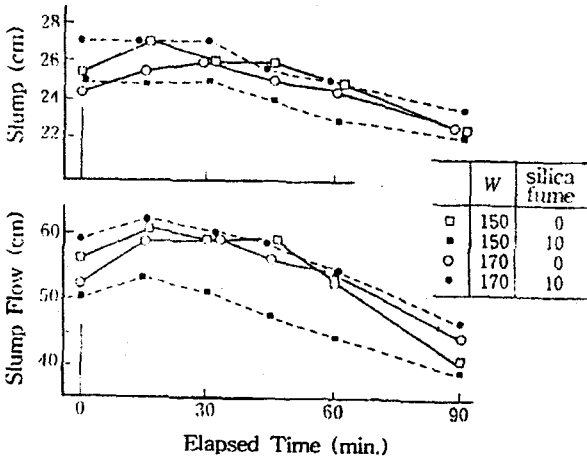
혼화재와 석고를 혼합 사용함으로써 유동성 손실의 저감에 매우 효과적임을 알 수 있다. 그 이유는 석고첨가에 따른 시멘트 중 C₃A의 초기수화 반응억제 및 시멘트 입자의 응집저해 작용에 따른 슬럼프손실 저감효과와 혼화재 혼합사용에 따른 수화 지연 현상 때문으로 판단된다.

플라이애쉬는 입자 모양이 구형이고, 표면이 매끄러워 시멘트 입자간 물리적인 마찰 감소작용 및 시멘트 입자의 응집을 분쇄하는 역할을 하고, 고로슬래그 미분말은 시멘트 입자와 같이 각이 많이 진 형태이나, 시멘트 입자의 응집을 희석시키는 역할을 하여 유동성에 유리하게 작용한다는 연구보고가 있으며,⁽²²⁾ 입자가 미세한 실리카흙은 시멘트 입자 간격에 충전함으로써 시멘트 입자간의 윤활작용 등을 하기 때문으로 생각된다.

한편 최근에는 고성능 AE 감수제를 사용한 고유동 콘크리트에 있어서 유동성 손실을 저감시키는 것과 관련된 보고가 많으며, 또한 양호한 결과가 얻어지고 있다.^(26, 27) 한 예로서 大川 裕의 연구결과에 의하면⁽²⁸⁾ 〈그림 14〉에서 알 수 있듯이 고유동 콘크리트의 경과시간에 따른 유동성은 혼합 후 25~30분까지는 유동성이 서서히 커지며



〈그림 13〉 혼화재 사용 콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프 손실률



〈그림 14〉 경과시간에 따른 콘크리트의 슬럼프와 슬럼프 플로우

그 후로는 서서히 작아지나 현저한 유동성 손실 경향은 나타나지 않음을 알 수 있다.

한편 〈그림 15〉에서는 펌프 압송 전후의 유동성 변화를 나타낸 것으로서 펌프 압송 후 일반적으로 유동성이 저하함을 알 수 있다. 이러한 현상은 펌프 압송전의 콘크리트가 유동성이 클수록 작으며 고성능 AE 감수제 제품의 종류에 따라 서로 다르게 나타난다고 한다.

(2) 블리딩율

고유동성을 갖는 콘크리트의 블리딩율은 〈그림 16〉에서 알 수 있듯이 유동성이 동일하다고 하여도 고성능 AE 감수제의 사용량 증가와 더불어 증대한다고 한다. (29)

그러나 고유동 콘크리트는 점성이 크고 일반적으로 시멘트질 재료량이 많아서 자유수량이 적기 때문에 콘크리트의 재료분리를 억제하는 것이 가능하다고 한다.

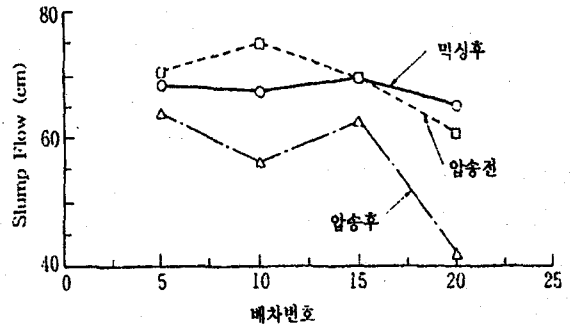
(3) 응결시간

고유동성을 갖는 콘크리트는 시공에 있어서 타설 구조물 및 공정 등에 따라서 콘크리트의 응결 시간을 고려할 필요가 있다. 고유동 콘크리트의 경우는 보통 콘크리트의 경우와 비교해서 큰 유동성을 얻기 위하여 고성능 AE 감수제의 사용량이 많으므로 응결시간이 지연되는 경향이 있다. 특히 콘크리트의 온도가 낮은 겨울철에는 이와 같은 경향이 크다고 한다. 고유동 콘크리트의 응결시간은 시멘트질 재료의 종류, 양, 고성능 AE 감수제의

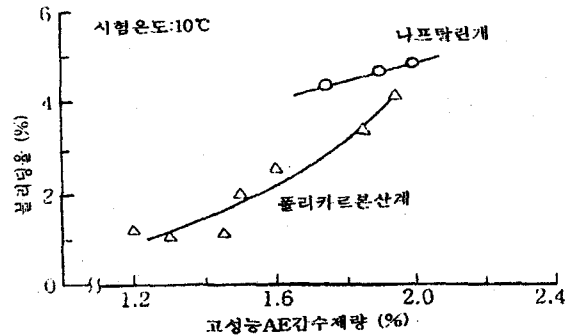
종류 등에 따라서도 다르게 나타난다. (26, 27)

(4) 온도변화 특성

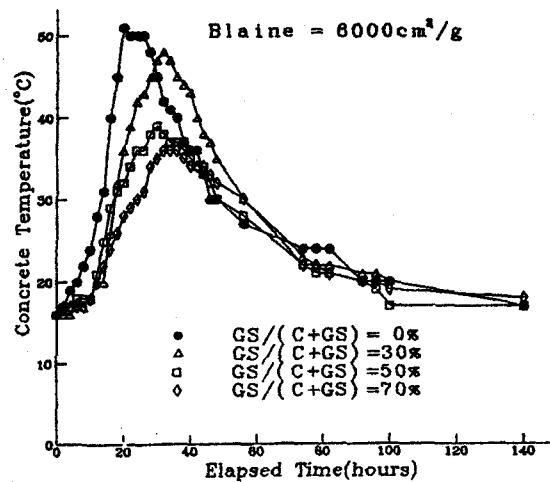
고강도용 콘크리트는 단위시멘트량이 크고 물-시멘트 비가 매우 작으므로 시멘트 수화열에 의한 콘크리트의 온도가 매우 높아 콘크리트 구조물에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 (30) 온도



〈그림 15〉 펌프 압송 전후의 콘크리트의 슬럼프 플로우의 변화



〈그림 16〉 콘크리트의 블리딩시험 결과



〈그림 17〉 고로슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 온도 변화

실리카흙 혼합 콘크리트의 강도

<표 1>

Cement Content (kg/cm ³)	W (C+SF) (%)	SF (C+SF) (%)	Comp. Strength (kg/cm ²)				Tensile Strength (kg/cm ²)
			3days	7days	28days	91days	
750	23	0	510	625	781	872	49.5
		10	588	748	967	1052	53.5
		20	576	749	1024	1107	56.2

를 저감시키기 위한 방안이 필요하다. <그림 17>은 고로슬래그 미분말을 사용하여 제조한 콘크리트의 온도변화를 측정된 예를 나타낸 것이다. 고로슬래그 미분말의 혼합율이 증가함에 따라 콘크리트의 내부온도가 현저히 감소하나, 응결지연으로 인한 초기강도 감소문제가 생길 수 있으므로 충분한 검토가 요망된다.

4-2. 경화한 콘크리트의 성질

(1) 강도 특성

시멘트, 골재, 혼화제의 종류 및 형태가 고강도 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 앞절에서 일부 설명하였다.

실리카흙 및 고로슬래그 미분말 혼합 고강도 콘크리트의 재령별 압축강도와 인장강도 및 탄성계수를 KS 규정에 따라 측정하여 정리한 것이 <표 1>과 <표 2>이다. ^(24, 25)

<표 1>에서 물-결합재 비가 작고, 실리카흙 혼합율이 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도가 증가함을 알 수 있으며, 단위결합재량 750kg, 실리카흙 20% 혼합한 경우 재령 28일 압축강도가 1,024 kg/cm²의 고강도를 나타내었다.

<표 2>에서 고로슬래그 미분말을 혼합한 콘크리트의 재령 3, 7일에서의 압축강도는 보통 콘크

리트보다 작았으나, 재령 91일의 장기재령에서는 고로슬래그 미분말의 분말도가 클수록 압축강도가 크게 나타났으며, 단위결합재량 700kg, 물-결합재 비 23%, 고로슬래그 미분말 혼합율 50%에서 재령 90일 압축강도가 1,045kg/cm²의 고강도를 나타내었다.

<그림 18>은 실리카흙과 고로슬래그 미분말을 사용하여 제조한 고강도 콘크리트의 압축강도와 결합재-물 비와의 관계를 나타낸 것이다.

결합재-물 비가 4보다 작을 때까지는 결합재-물 비의 증가와 더불어 압축강도가 선형으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 4보다 큰 경우에는 압축강도의 증가가 거의 없으며 이 영역에서의 콘크리트의 압축강도는 사용골재의 특성에 현저히 의존한다고 한다. ⁽³¹⁾

(2) 응력-변형을 곡선

고강도 콘크리트의 응력-변형을 곡선의 경우 압축강도가 고강도화할수록 곡선의 기울기가 급해지며 파괴시에는 징후가 없이 갑작스럽게 파괴되는 취성파괴현상을 나타낸다.

(3) 건조수축

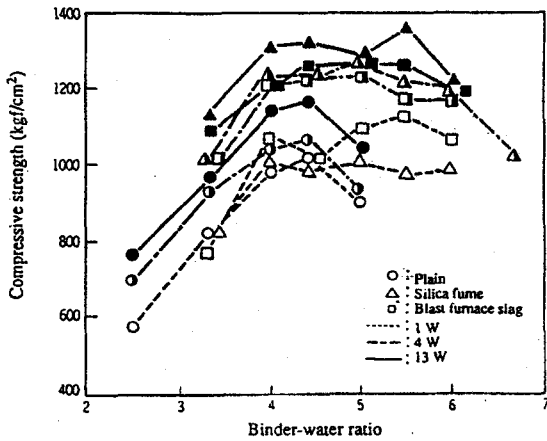
<그림 19>의 경우와 같이 물-시멘트 비의 증가에 따라서는 거의 비례적으로 건조수축이 증가

고로슬래그 미분말 혼합 콘크리트의 강도

<표 2>

Cement Content (kg/cm ³)	Cement Type	W (C+GS) (%)	GS (C+GS) (%)	Comp. Strength (kg/cm ²)				Tensile Strength (kg/cm ²)
				3days	7days	28days	91days	
700	OPC	23	0	449	619	750	814	53.75
			30	442	572	785	1037	61.20
	GS	23	50	373	564	800	1045	63.32
			70	287	495	781	1026	65.05

(OPC : 보통포틀랜드시멘트, GS : 고로슬래그 미분말, 비표면적 6000cm²/g)



〈그림 18〉 고강도 콘크리트의 압축강도와 결합재-물비와의 관계

하고 있음을 알 수 있다. 한편 고강도 콘크리트의 건조수축은 사용한 굵은 골재의 탄성계수에 큰 영향을 받는다고 한다.⁽³²⁾

(4) 크리프

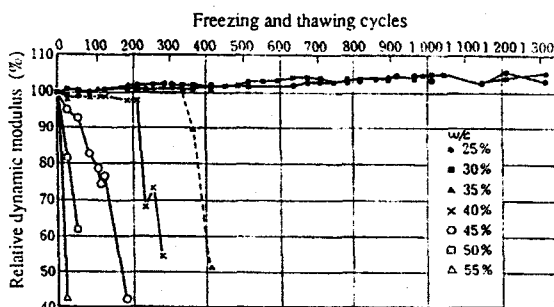
고강도 콘크리트의 크리프는 압축강도의 증가와 더불어 감소하며 연구보고에 의하면 압축강도가 1000kg/cm²일 때의 크리프 양은 400kg/cm²일 때의 1/6 정도라고 한다.⁽³³⁾

(5) 중성화

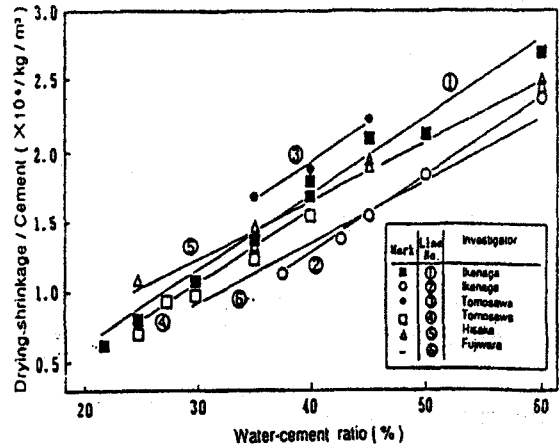
고강도 콘크리트의 물-시멘트 비와 콘크리트의 중성화 깊이와의 관계를 살펴보면, 중성화 깊이는 물-시멘트 비가 감소함에 따라 현저히 작아지며, 물-시멘트 비가 25%보다 작은 초고강도 콘크리트에서는 중성화 현상이 거의 일어나지 않는다고 한다.

(6) 동결융해 저항성

〈그림 20〉은 AE제를 사용하지 않고 제조한 콘



〈그림 20〉 상대동탄성계수와 동결융해 사이클수와의 관계



〈그림 19〉 콘크리트의 건조수축과 물-시멘트비의 관계

크리트의 상대동탄성계수와 동결융해 사이클수와 의 관계를 나타낸 것이다. 물-시멘트 비가 작은 고강도 콘크리트의 경우 300 사이클 이상에서도 동탄성계수가 거의 감소되지 않음을 알 수 있다.

(7) 알카리 실리카 반응

반응성 골재를 사용하여 제조한 모르타의 팽창과 재형과의 관계를 살펴보면, 고강도 콘크리트의 경우 보통 콘크리트보다 시멘트량이 많기 때문에 알카리 실리카 반응의 정도가 더 크다. 알카리 실리카 반응을 억제하기 위해서는 고로슬래그 미분말, 실리카흄 및 플라이애쉬를 적정량 혼합사용하는 것이 효과적이라고 한다.

5. 고성능 콘크리트의 활용

일반적으로 고강도 콘크리트를 안전하게 제조할 수 있는 방법은 공장에서 제조되는 프리캐스트 제품으로서 말뚝, 전주, 침목, 슬래브 및 세그먼트 등을 들 수 있겠으나 일반적으로 현장에서 건설되는 콘크리트 구조물에 사용되는 콘크리트의 재령 28일 압축강도의 범위는 20~40MPa 정도이다. 여기서는 고성능 콘크리트가 구조물에 응용된 실적에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

5-1. 고층건물 및 교량

최근에 와서 고층건물이나 교량 등 콘크리트 구조를 건설시 100MPa 정도의 고강도가 적용되고 있다. 근년에 와서 세계 각국에서 건설된 콘크리트 교량 및 고층건물용 콘크리트의 설계강도

를 나타낸 것이 <표 3> 및 <표 4>이다.

이들 표에서 알 수 있듯이 1970년대에 이미 800kg/cm² 정도의 고강도 콘크리트가 구조물에 적용되고 있으며 최근 몇년 사이에는 고층 철근 콘크리트 구조물에 1,000kg/cm² 이상되는 초고강도 콘크리트가 시험적으로 현장 구조물에 응용되고 있는 실정이다.

5-2. 원자로 용기

Ithurraide에 의하면⁽⁵⁾ 프랑스 전력회사(Elec-

고성능 콘크리트를 사용한 건물의 배합설계 및 설계강도 <표 3>

건물명(연도)	Water Tower Place Chicago (1975)	La Laurentienne Montreal (1984)	Scotia Plaza Toronto (1987)	Two Union Square Seattle (1988)
Water-Binder ratio	0.35	0.27	0.31	0.25
Cement (kg/m ³)	505	500	315	513
Water (kg/m ³)	195	135	145	130
Fly ash (kg/m ³)	60	-	-	-
Blast furnace slag (kg/m ³)	-	-	137	-
Silica fume (kg/m ³)	-	30	36	43
Fine agg. (kg/m ³)	630	700	745	685
Coarse agg. (kg/m ³)	1,030	1,100	1,130	1,080
Water reducer (ml/m ³)	975	-	900	-
Retarding agent (l/m ³)	-	1.8	-	-
Superplasticizer (l/m ³)	-	14	5.9	15.7
σ ₂₈ (MPa)	65	93	83	119
σ ₉₁ (MPa)	79	107	93	145

고강도 콘크리트를 사용한 교량

<표 4>

교량명	연도	최대지간 (m)	콘크리트 설계강도 (MPa)
Ootanabe Railway Bridge (Japan)	1973	24	79
Akkagawa Railway Bridge (Japan)	1976	46	79
Tower Road Bridge (USA)	1981	49	62
Pont du Pertuiset (France)	1988	110	65
Helgelandsbrua (Norway)	1990	425	65
Highway 19 Pedestrian Walkways (USA)	1992	-	70

tricit de France)에서는 프랑스 원자로 용기의 氣密性을 강화하기위하여 콘크리트 구조물 건축 시 적은 시멘트량 260~280kg/m³과 30~49kg/m³의 많은 실리카흙 충전재나 플라이애쉬와 같은 혼화재 110~130kg/m³를 사용하여 고성능 콘크리트 제조를 목표로 하고 있다.

이때 고성능 콘크리트의 워커빌리티는 슬럼프 20cm 정도, 재령 28일 압축강도 약 75MPa 정도, 크리프는 보통 콘크리트보다 작으며 초기 수화열에 의한 조기 건조수축 때문에 구조물에 발생하는 균열의 위험을 줄이고자 한다.

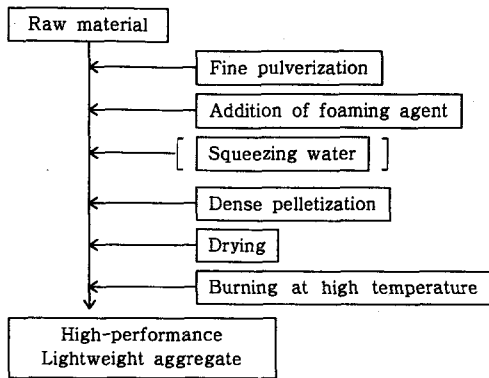
5-3. 고성능 인공경량골재 사용 해양 구조물

Tachibana 등은⁽³⁴⁾ 고성능 인공경량골재를 사용하여 약 140MPa 정도의 경량 콘크리트를 제조하고자 새로운 고성능 인공경량골재 제조방법을 개발하였다.

이 경량골재의 중요한 특성은 골재가 가진 내부의 큰 공극 또는 균열을 없애주고 그리고 細孔의 대부분을 균일하게 細孔化하는데 있다. 그렇게 함으로써 만약 건조한 골재를 사용했을 때라도 골재가 혼합수를 흡수하는 양이 극단적으로 줄여 줄 수 있기 때문에 펌프 타설시 워커빌리티에 큰 지장을 주지 않고 타설이 가능하다. 더구나 골재의 강도를 개선시키고 물-결합재 비를 대폭 낮추어 줌으로써 약 140MPa의 고강도 경량 콘크리트가 가능하다고 한다. 고성능 인공경량골재의 제조공정을 나타낸 것이 <그림 21>이다.

고성능 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성을 확인하기 위하여, 경량골재를 절대건조상태로 만들어 북극지방 연해 플랫폼을 경량골재 콘크리트로서 축조하였다. 이때 콘크리트는 압력을 받는 상태하에 있으므로 골재의 흡수력이 커지기 때문에 버킷로서 콘크리트를 타설하였다. 비록 이러한 상황하에서도 乾燥한 고성능 인공경량골재를 사용하여 제조한 콘크리트를 펌프로서 타설이 가능하였다.

이 외에도 해양 환경하에 노출된 고성능 콘크리트의 鹽化物 침투성,⁽³⁵⁾ 고성능 콘크리트 중의 철근의 부식,⁽³⁶⁾ 플로리다 연안 1200 마일에 가설된 3,000개가 넘는 교량 중 고성능 콘크리트의 투수성에 관한 연구,⁽²⁾ 고속도로 구조물 현장에



〈그림 21〉 고성능 인공경량골재의 제조과정

적용한 고성능 콘크리트 관련 연구,⁽³⁾ 시카고 강에 있는 터널의 홍수 통제용 구조물을 고성능 콘크리트로 사용하여 보수한 예,⁽⁴⁾ 그리고 수중 콘크리트 구조물의 보수에도 고성능 콘크리트가 적용된 예를 자세히 소개하고 있으며,⁽³⁷⁾ 일일이 열거할 수 없을 정도로 많은 연구성과와 응용실적이 발표되고 있다.

〈참 고 문 헌〉

1. Paul Zia, M.L. Leming, and S.H. Ahmad, "High Performance Concretes" : A State-of-the-Art Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Jan. 1991.
2. J. Armaghani 외 3명, "High Performance Concrete in Florida Bridges", High Performance Concrete in Severe Environments, ACI SP-140, 1993.
3. J.J. Schemmel and M.L. Leming, "High performance Concrete for Highway Application : Field Results", High Performance Concrete in Severe Environments, ACI SP-140, 1993.
4. J. Moreno and G. Detwiler, "High Performance Concrete to Plug the Flooding of the Chicago Tunnels", High Performance Concrete in Severe Environments, ACI SP-140, 1993.
5. Ithurraide, G.J.B. and Oliver, J., "High Performance Concrete for French Nuclear Reactor Containment Vessels", Utilization of High Strength Concrete Proceeding

- Volume 1. Symposium in Lillehammer, Norway, June 20-24, 1993.
6. A. Bilodeau and V.M. Malhotra, "Concrete Incorporating High Volumes of ASTM Class F FLY Ashes : Mechanical Properties and Resistance to Deicing Salt Scaling and to Chloride-Ion Penetration." Proceeding 4th International Conference. Istanbul, Turkey, May 1992. ACI SP-132 Volume. 1
7. P.C. Aitcin, "Achieving and Testing High Performance Concrete", KCI International Workshop on the Product, Properties, and Application of High Strength Concrete Using Superplasticizer, KCI, Oct, 1993.
8. 橋 大介, 山崎庸行, "超高強度コンクリート", 콘크리트工學, Vol. 31, No. 3, 1993. 3.
9. Yasuo Tanigawa, "State-of-the-Art on High Strength Concrete in Japan", KCI International Workshop on the Product, Properties, and Application of High Strength Concrete Using Superplasticizer, KCI, Oct, 1993.
10. Kitamura, M. 외 4명, "Properties of Concrete Using Spherical Cement", Proceeding of Cement Association of Japan, Vol. 45, 1991.
11. Tomosawa, F. 외 3명, "Development and Evaluation of Binders for High Strength Concrete", Proceeding of Cement Association of Japan, Vol. 46, 1992.
12. 문한영, 김기형, "고성능 감수제를 사용한 시멘트 복합체의 유동성 손실에 대한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제4권, 제2호, 1992. 6.
13. 문한영, 김기형, "고성능 감수제를 사용한 콘크리트의 유동성 손실을 저감시키기 위한 연구", 대한토목학회 논문집, 제12권, 제3호, 1992. 9.
14. 문한영, 김기형, 문대중, "고강도 콘크리트의 유동성 손실에 영향을 미치는 요인에 대한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 1992. 11.
15. 岸谷孝一 외 3명, "新高性能AE減水劑によるコンクリートのスランプコントロール, セメント・コンクリート, No. 478, Dec. 1986.
16. Kinoshita, M. 외 2명, "Chemical Structure and Performance of a New Type High

- Range Water Reducing Agent for Ultra High Strength Concrete", Proceeding of Cement Association of Japan, Vol. 47, 1993.
17. 문한영, 서정우, "콘크리트용 혼화제로서 국산 플라이애쉬의 품질에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제7권, 제3호, 1987. 9.
 18. FIP Commission on Concrete, "Condensed Silica Fume in Concrete", State of Art Report, Federation International de La Precontrainte, 1988.
 19. Takaki, N. and Akashi, T., "Properties of High Strength Silica Fume Concrete", Trans. of Japan Concrete Institute, Vol. 10, 1988.
 20. Kakizaki, M. and Edashiro, H., "Effect of Coarse Aggregate Quality on Compressive Strength Characteristics of Ultra High Strength Concrete" Concrete Research and Technology, Vol. 4, No. 2, July, 1993.
 21. Farrokh F. Radjy, "Microsilica Concrete : A Technological Breakthrough Commercialized", Materials Research Society Symposia Proceedings, Vol. 42.
 22. 김기형, "고강도 콘크리트의 유동성 손실 최소화 와 강도 향상을 위한 연구", 박사학위논문, 한양대학교 대학원, 1993. 12.
 23. 岡村 甫, 小澤一雅, "コンクリート製造方法", 콘크리트工学, Vol. 31, No. 3, 1993. 3.
 24. 문대중, "실리카흙을 혼합한 고강도 콘크리트의 제 성질에 대한 실험적 연구", 석사학위논문, 한양대학교 대학원, 1993. 12.
 25. 송용규, "고로슬래그 미분말을 혼합한 고강도 콘크리트의 기초적 성질에 대한 연구", 석사학위논문, 한양대학교 대학원, 1995. 6.
 26. 山口昇三, "ポリカルボン酸系 高性能AE減水劑を用いた超流動コンクリートの研究" 日本建築學會 學術講演概要集, A, 1992. 8.
 27. 壓司芳之, "高流動コンクリートのフレッシュ狀態の性狀に及ぼす使用材や配合の影響", 콘크리트工学 年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, 1992. 6.
 28. 大川 裕, "高強度コンクリートのポンプ 壓送性に関する實驗研究(その2. 調合選定に関する基礎實驗)", 日本建築學會 學術講演概要集, A, 1990. 10.
 29. 高田 誠, "高流動コンクリートの諸性質に及ぼす高性能AE減水劑の影響", 土木學會 47回 年次學術講演會 講演概要集, 1992. 9.
 30. 문한영, 문대중, 신승호, "실리카흙을 혼합한 고강도 콘크리트의 강도 향상을 위한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, 제14권, 제5호, 1994. 9.
 31. Masuda, Y., "The Concrete Which Design Strength is 600kgf/cm² Will Not be a High Strength Concrete-A Target of the New RC Project", Cement and Concrete, No. 546, 1992. 8.
 32. Ikenaga, H., Ishigami, S., 외 2명, "Study on Drying Shrinkage on High Strength Concrete", Proc. of Cement Association of Japan, Vol. 46, 1992.
 33. Concrete Committee in the New RC Project, "Report on Results Obtained in 1992", 1993. 3.
 34. Tachibana, D. 외 4명, "High Strength Lightweight Concrete Using High Performance Artificial Lightweight Aggregate", Utilization of High Strength Concrete Proceeding Volume 2. Symposium in Lillehammer, Norway, June 20-24, 1993.
 35. Maage, M. 외 2명, "Chloride Penetration in High Performance Concrete Exposed to Marine Environment", Utilization of High Strength Concrete Proceeding Volume 2. Symposium in Lillehammer, Norway, June 20-24, 1993.
 36. Petterson K.H., "Corrosion of Steel in High Performance Concrete", Utilization of High Strength Concrete Proceeding Volume 2. Symposium in Lillehammer, Norway, June 20-24, 1993.
 37. N. Hansen 외 2명, "Advances in Underwater Concreting : St. Luice Plant Intake Velocity Cap Rehabilitation", High Performance Concrete in Severe Environments, ACI SP-140, 1993.