

고강도콘크리트의 제조, 유동화 및 강도발현 기구에 대한 고찰

김 기 형

〈여주대학 토목과 부교수〉

- | | |
|----------------|---------------------|
| 1. 머리말 | 4. 고강도콘크리트의 유동화 기구 |
| 2. 고강도콘크리트의 재료 | 5. 고강도콘크리트의 강도발현 기구 |
| 3. 고강도콘크리트의 제조 | 6. 맺음말 |

1. 머리말

콘크리트는 Smeaton(1756), Vicat(1818), Aspdin(1825) 등에 의하여 발명된 이후 1세기 동안 골재, 시멘트, 물의 혼합물로 머물러 있었다. 이 중에서 물은 시멘트의 수화작용을 돕고, 굳지 않은 콘크리트에 유동성을 주는 역할을 하여왔으나 많은 연구자들의 연구내용을 살펴보면 적정량을 초과한 물의 사용은 콘크리트의 강도와 내구성에 유익하지 않다는 사실을 밝혀 냈다. 이러한 사실로부터 현재 콘크리트의 공학적 성질을 개선하기 위해서는 물-시멘트비를 감소시키는 방법을 개선하는 것이 시급한 과제임을 알 수 있다.

고강도콘크리트에 대한 연구는 1960년대

서독과 일본에서 유동화제(Superplasticizer)와 고성능감수제(High Range Water Reducing Admixture)의 개발과 더불어 토목 건축 공사현장은 물론 콘크리트 공장제품 등 고강도콘크리트를 제조하는 대표적인 유효수단으로서 널리 응용되고 있으며 1960년 미국을 선두로 캐나다 일본 등의 지역에서 고강도콘크리트의 제조가 이루어져 실제 구조물의 설계 및 시공에 사용되어 왔으며 국내에서도 활발하게 연구가 진행되어 실구조물에 적용되고 있다.

건설시장의 개방과 국내 건설업체의 상황을 고려할 때 보다 우수한 품질의 고강도콘크리트의 개발은 매우 중요한 과제라 생각되므로 본 원고에서는 고강도콘크리트의 특성에 대한

이해와 실용화에 도움을 주고자 고강도콘크리트 구성재료의 성질, 제조방법, 유동화기구 및 강도발현기구에 대하여 참고문헌, 연구논문 등을 인용하여 내용을 정리하였다.

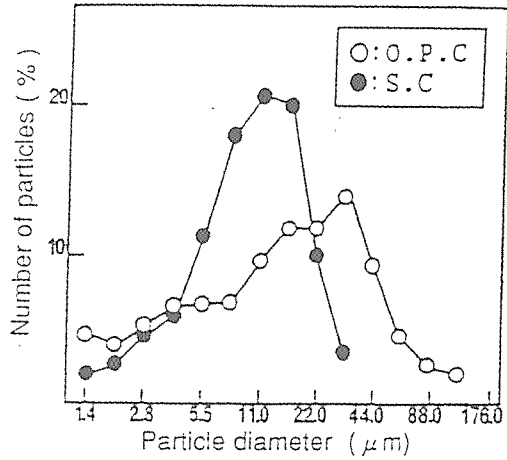
2. 고강도콘크리트용 재료

고강도콘크리트 제조용 재료는 근본적으로 보통콘크리트 제조용 재료와 크게 상이하지 않다.

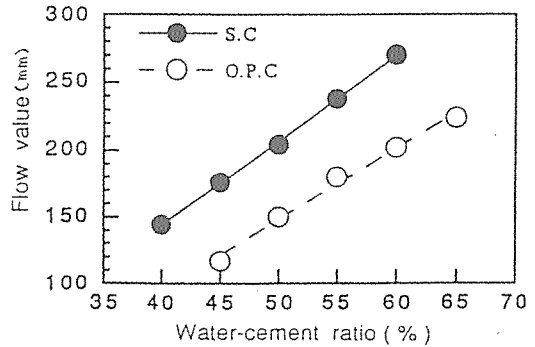
2.1 시멘트

고강도콘크리트용으로 사용되는 시멘트는 Zia 등에 의하면⁽¹⁾ 보통콘크리트와 마찬가지로 보통포틀랜드시멘트, 중용열포틀랜드시멘트 및 조강포틀랜드시멘트를 사용하여 재령 28일 압축강도 690 kgf/cm² 이상 요구되는 콘크리트는 보통 및 중용열포틀랜드시멘트나 혼합시멘트를 사용하며 혼화제나 혼화제를 조합하여 사용하기도 한다. 재령 1일 압축강도가 340kgf/cm² 이상 요구되는 콘크리트는 조강포틀랜드시멘트나 특수시멘트를 사용하고 촉진제를 사용한다. 타설후 4시간 압축강도가 210kgf/cm² 이상 요구되는 콘크리트의 경우는 초속경시멘트 또는 Pyrament를 혼합한 혼합시멘트를 사용하면 초기 및 극한강도가 우수하고 용빙제나 동결에 대한 저항성이 매우 우수한 시멘트콘크리트의 제조가 가능하다.

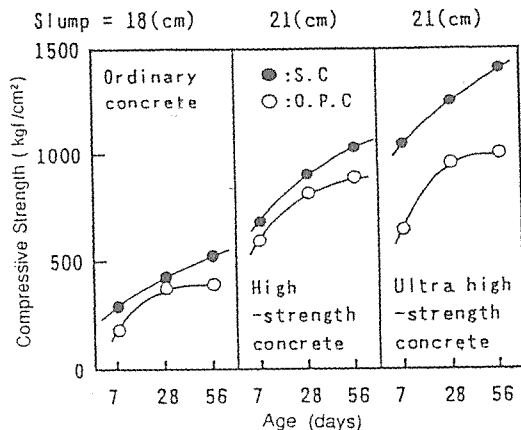
橘에 의하면⁽²⁾ 결합재로 포틀랜드시멘트만을 사용할 경우에는 1000kgf/cm² 정도 이상의 압축강도를 얻기 어려우며 시공성이 저하하기 때문에 초고강도콘크리트를 제조하기 위해서는 실리카흙 등을 혼화제로 사용함이 바람직하다고 한다. 그리고 최근의 시멘트 제조기술 중에는 시멘트의 형상이나 입도를 개질 조정하거나 시멘트클링커의 광물조성비율을 크게



(그림1) 시멘트의 입자분포



(그림2) 모르타의 물-시멘트비와 플로우값과의 관계



(그림3) 구형시멘트 사용 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

바꾸어 놓은 시멘트가 초고강도콘크리트 제조에 적합하다고 한다.

Tanigawa 교수에 의하면⁽³⁾ 고강도콘크리트의 제조를 위한 몇몇 새로운 종류의 시멘트가 개발 중이며 그 중에서도 대표적인 3종류의 시멘트를 예를 들고 있다. 고속기류중 충격처리방법(High Speed Impact Treatment Method)으로 제조된 구형시멘트(Spherical Cement), 입자크기의 분포를 조절한 시멘트(Particle Size Distribution Controlled Cement) 및 초저열시멘트(Super Low Heat Cement) 또는 벨라이트 포틀랜드시멘트(Belite Portland Cement)이다. 구형시멘트(S.C로 약함)는 지금까지의 포틀랜드시멘트(O.P.C로 약함) 입자와 다르게 모서리가 없이 입자가 둥근 형상을 가지며, 동일한 배합에서 모르터의 유동성이 현저히 개선됨을 알 수 있다.

시멘트의 입자크기 분포와 물-시멘트비에 따른 모르터의 플로우 시험결과를 비교한 것이 각각 [그림 1] 및 [그림 2]이다. [그림 1]에서 알 수 있듯이 구형시멘트의 최대입자는 직경 40 μ m이며, 비표면적은 감소되지만 겉보기 밀

도는 증가하는 입도이다. 한편 [그림 2]에서 동일한 플로우값에서 비교할 때 구형시멘트 사용 모르터의 물-시멘트비가 보통시멘트 모르터보다 약 10% 정도 감소됨을 알 수 있다.

한편 Kitamura 등에 의하면⁽⁴⁾ [그림 3]에서와 같이 낮은 물 시멘트비에서 구형시멘트를 사용한 콘크리트는 시멘트 입자의 충전성이 양호하여 보통콘크리트보다 밀실한 경화체가 되어 재령 56일에서 보통콘크리트보다 압축강도가 약 10~50% 정도 크며, 최대 1,400kgf/cm² 정도의 초고강도를 나타내고, 재령 28일 후의 압축강도 증가율도 크게 나타났다.

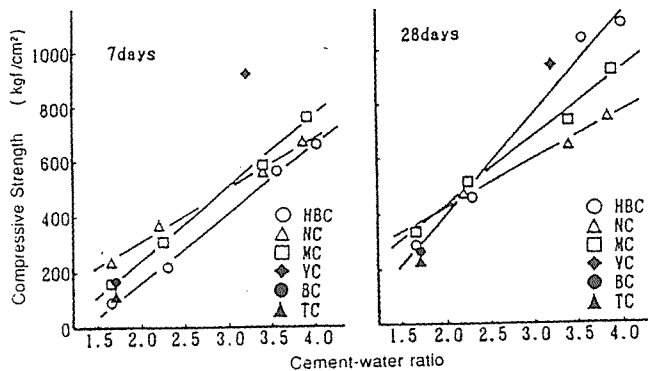
중성화 깊이를 CO₂ 농도 100%, 압력 3kgf/cm²로 측정한 실험한 결과 보통콘크리트는 96시간에 7mm인데 비하여 구형시멘트 사용 콘크리트는 0mm의 좋은 결과를 나타내었다.⁽³⁾

Tomosawa 등에 의하면⁽⁵⁾ 시멘트입자와 실리카흙, 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 등을 일정비율로 섞어서 입자크기의 분포를 조절한 시멘트(Particle Size Distribution Controlled Cement, PSDC)를 사용하고 물 결합재비를 25% 이하로 낮추어 주므로써

Slump Flow가 70 cm의 초유동, 압축강도가 1250kgf/cm²되는 초고강도콘크리트를 얻었다고 한다.

한편 고강도콘크리트는 단위시멘트량이 많으므로 수화반응시에 매우 많은 수화열이 발생하여 콘크리트 온도가 크게 상승하므로 특별한 주의를 요한다.

최근에는 수화열이 작고 고강도를 얻을 수



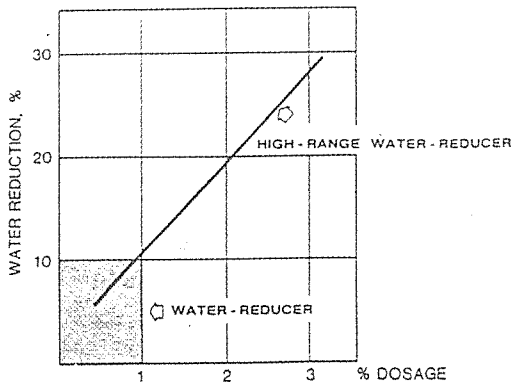
HBC : High Belite Cement
 MC : Moderate Heat Cement
 VC : High-early Strength Portland Cement
 BC : Binary Mixed Cement(NC20%+Blast Furnance Slag Cement80%)
 TC : Ternary Mixed Cement(NC20%+Blast Furnance Slag Cement50%+Flyash Cement 30%)
 NC : Ordinary Portland Cement

[그림 4] 콘크리트의 압축강도와 시멘트-물비와의 관계

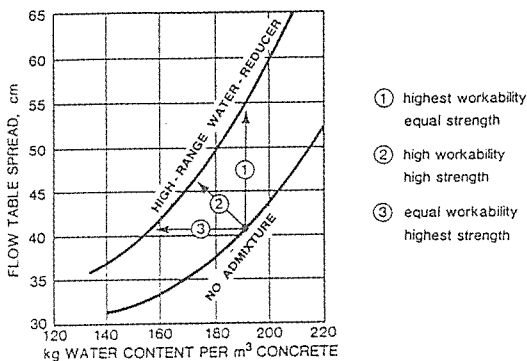
있는 고벨라이트시멘트(High Belite Cement, HBC)(C₂S가 약 50%임)가 개발되어 [그림 4]에서 알 수 있듯이 재령 7일에서는 강도발현이 작으나 재령 28일에서 시멘트-물비가 4.0일 때는 1100kgf/cm²의 고강도를 나타내었다.

2.2 화학혼화제

화학혼화제는 콘크리트의 응결시간을 변화시키고, 소요의 워커빌리티를 만족시키기 위하여 수량을 저감시키며, 동결융해 및 화학약품에 대한 내구성을 증대시키고 아울러 보강철근의 부식전위를 낮추어 주기 위한 목적으로 사용된다.



[그림 5] 감수제와 고성능감수제의 감수성능 비교



[그림 6] 고성능감수제의 효과

고성능감수제는 [그림 5]에서 알 수 있듯이 일반적인 감수제보다 성능이 우수하여 10~30%의 감수성능을 나타내며 아울러 [그림 6]에서 처럼 콘크리트의 유동성 향상 및 강도를 크게 향상시켜 주는 효과가 있는 혼화제이다.

고성능감수제를 적정량 사용하면 응결시간이 빨라지기도 하지만 사용량이 지나치게 많게 되면 오히려 조기강도를 지연시키고 믹싱 후 경과시간 15~30분 정도에서는 유동성이 좋으나⁽⁶⁾ 그 이후 경과시간에 따른 슬럼프 손실(Slump Loss)이 크기 때문에 주의가 필요하다.

한편, 반응성 고분자를 주 원료로한 고성능 AE감수제는 경과시간에 따른 콘크리트의 유동성 손실을 현저히 감소시킨다고 하며 또한 Kinoshita 등⁽⁷⁾ 도 새로운 종류의 고성능 AE감수제는 시멘트의 분산성이 우수할 뿐만 아니라 보통 고성능감수제보다 슬럼프를 유지하는 능력이 뛰어나며, 물 시멘트비 19%인 콘크리트의 압축강도가 재령 28일에 1,300~1,400kgf/cm² 정도의 고강도를 나타낸다고 보고하였다.

2.3 광물질혼화제

광물질혼화제는 고강도콘크리트의 성능을 개선하는데 중요한 역할을 하며 내구성과 강도특성을 향상시키는 데도 사용된다.

양질의 플라이애쉬를 사용하게 되면 고강도콘크리트의 기술적인 면에서나 경제성 면에서도 매우 유리하다고 하며 굳지않은 콘크리트의 워커빌리티와 슬럼프를 유지하기 위하여 시멘트량의 20% 이상 대체하여 사용한다. 다만, 플라이애쉬를 사용하여 물-결합재비를 대폭 낮추어 주면 포졸란 반응으로 인하여 수화반응이 늦어지는 탓으로 조기강도가 작은 것이 불리한 점이라 하겠다.⁽⁶⁾

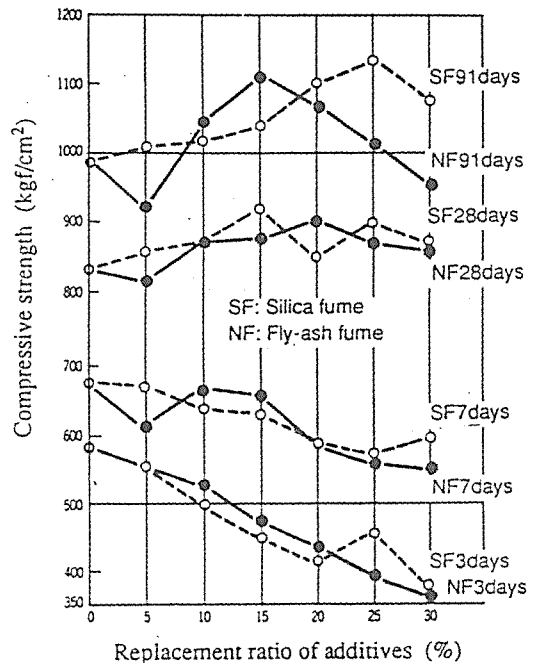
Class F 플라이애쉬는 실리카와 알루미나 화합물로 되어 있으며 칼슘성분이 극히 제한되어 있어 그 자체는 시멘트질이 아니지만 포졸란 반응을 가지고 있다. 한편 Class C 플라이애쉬는 일반적으로 Class F 플라이애쉬보다 칼슘성분이 많으며, Class C 플라이애쉬를 포트랜드시멘트에 혼합 사용하므로써 시멘트계 재료와 같은 수화반응을 한다.⁽⁸⁾ 그리고 시멘트를 일부 Class F 플라이애쉬로 대체하므로써 황산염에 대한 내구성을 증진시키고 알칼리 골재반응을 감소시키며 적절한 양생으로 시멘트풀의 공극과 투수성을 줄여 주며, 아울러 수화열을 감소시켜 주는 역할을 한다. 매스 콘크리트의 경우 플라이애쉬를 시멘트 중량에 대하여 60~100% 대체하여 성공한 예가 있으며 일반적으로는 총 결합재량의 15~30% 정도 대체하여 사용한다.

한편, 고로슬래그 미분말 (Ground Granulated Blast Furnace Slag)은 고칼슘의 광물질 혼화재로서 결합재량에 25~70% 정도 사용하지만 일반적으로는 40~60% 정도를 혼합 사용한다. 황산염 저항성이 요구될 때는 고로슬래그 미분말을 최소한 50% 이상 사용해야 하며 적절하게 사용하면 알칼리-실리카 팽창반응을 줄이는데도 효과가 있으며 또한 적절한 공기를 연행시켜 주므로써 동결융해 저항성이 좋고 투수성을 감소시켜주는 효과도 있다. 보통이나 낮은 온도에서 양생하면 고로슬래그 미분말을 혼합한 콘크리트의 초기강도가 상대적으로 낮으나 높은 온도로 양생하게 되면 초기강도를 발현한다.

실리카흄은 농축 실리카흄 (Condensed Silica Fume) 또는 마이크로 실리카 (Micro Silica)로도 불리며, 시멘트 풀 속에서 강한 포졸란 반응을 일으키는 유리질 실리카의 극히 작은 미립자로 구성된 광물질 혼화제이다. 실리카흄의 비표면적은 매우 커서 포트랜드시

멘트의 50배 정도이며 이 높은 비표면적이 콘크리트의 수량을 크게 증가시키는 결정적인 요인이 된다. 실리카흄을 사용하여 매우 낮은 물 시멘트비의 콘크리트를 제조하기 위해서는 고성능감수제의 사용이 필수적이다. 또한 실리카흄은 포트랜드시멘트 콘크리트의 화학적 침투에 여러가지 형태로 저항하여 내구성을 향상시키는데 매우 효과적이며, 알칼리 골재 반응에 대한 내구성을 개선하는 데도 공헌한다. 실리카흄을 함유한 콘크리트의 투수성은 동일한 압축강도의 실리카흄을 함유하지 않은 콘크리트보다 작다고 보고하고 있으며 시멘트 풀과 골재사이의 경계역에서 포졸란효과 및 충전효과로 강도가 향상된다.

고강도콘크리트를 제조하기 위한 실리카흄의 최적 사용량은 결합재량의 5~10% 정도이며, 실리카흄을 10% 이상 혼합하면 휨강도가 오히려 감소되므로 FIP에서는 실리카흄의 최대사용량을 10% 정도로 규정하고 있다.⁽⁹⁾ 도



(그림7) 콘크리트의 압축강도와 혼화제의 혼합률과의 관계

로포장의 경우에는 5%이상을 사용하지 않도록 권장하고 있다.⁽¹⁾

한편 [그림 7]에서와 같이 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 고강도콘크리트에서 매우 중요한 역할을 한다. 잔골재는 마무리작업 뿐만 아니라 소요수량과 굵은골재량의 결정에도 영향을 미친다. 그래서 잔골재의 조립률은 2.7~3.0이 적합하다

Kakizaki에 의하면⁽¹⁰⁾ 석회암이나 안산암을 굵은골재로 사용한 콘크리트의 압축강도와 암석의 강도는 거의 같으며 경질사암, 석영을 굵은골재로 사용한 콘크리트의 경우 콘크리트의 최대강도가 얻어졌으나, 오히려 암석의 강도에는 미치지 못하며 암석의 강도가 클수록 콘크리트의 압축강도가 크게 나타났다고 한다.

굵은골재는 콘크리트 포장의 경우 소요수량, 압축 및 휨강도, 건조수축, 크리프 탄성계수 및 마모저항성에도 영향을 미친다. 또한 굵은골재는 내구성을 고려해야 할 경우 중요한 역할을 하며 굵은골재는 알칼리 실리카 반응에 중요한 영향을 미치게 된다.

굵은골재의 최대치수를 12mm 또는 10mm로 낮추어 주면 최적의 강도를 얻을 수 있으나 휨강도는 반대의 현상을 나타내며 더구나 크리프와 건조수축을 증가시킬 수 있다. 그래서 고강도를 얻기 위하여 최대치수는 10~15mm 정도가 적합하다고 한다.⁽⁶⁾ 그리고 부순돌 골재는 일반적으로 자갈과 같은 둥근모양의 골재보다 골재와 시멘트 풀과의 부착강도를 향상시키는데 유리하다

2.5 혼합수

고강도콘크리트용 혼합수의 품질 기준은 보통콘크리트와 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. 첫째는 콘크리트의 레올로지적인 성질을 나타내는 물리적 작용이며 다음은 수화작용을 촉진시키는데 공헌하는 화학적 작용이다. 고강도콘크리트의 제조에 필요한 혼합수량의 한 예를 들어보면, 각이진 모래를 사용할 경우에는 단위수량이 148kg/m³ 정도 소요되나 깨끗하고 둥근 형상의 모래를 사용할 경우에는 131kg/m³ 정도로서 고강도를 얻을 수 있다고 한다.

Zia 등에 의하면⁽¹⁾ 물 시멘트비 35% 이하의 콘크리트를 습윤 양생하게 되면 불연속 모세관이 생기게 되어 건, 습이나 동결융해의 반복 작용 및 화학적 침식작용에 대한 내구성을 향상시켜 주므로 고강도콘크리트의 경우 물 시멘트비는 35%이하가 바람직하다고 한다.

3. 고강도콘크리트의 제조

고강도콘크리트를 안정되게 제조 공급하기 위해서는 재료의 입수에서부터 계량, 믹싱 및 배출까지의 일련의 제조시스템에 있어서 변동을 제어할 필요가 있으며, 전체 제조공정을 숙련된 기술자에 의하여 보통콘크리트의 제조시보다 더욱 철저하게 품질관리를 실시하는 것이 바람직하다. 고성능감수제의 사용에 따른 유동성 손실이 큰 점이 시공상의 큰 장애요인이 되기 때문에, 현장에서 발생하는 슬럼프 손실을 줄이기 위한 대책의 일환으로 고성능감수제를 지연첨가(Delayed Addition of

HRWR) 내지는 분할 첨가하는 방법 및 슬럼프 손실 저감형 고성능감수제 사용 등에 대한 방안을 강구해야 한다. 또한 골재의 품질을 일정하게 관리해야 하는 것도 안정된 품질의 고강도콘크리트를 제조하기 위한 필수 불가결한 요소이므로 岡村 교수는 골재의 관리 포인트를 다음과 같이 요구하고 있다.⁽¹¹⁾

- (1) 잔골재의 표면수를 일정하게 유지할 것
- (2) 골재 입도의 변동을 적게 할 것
- (3) 굵은 골재의 석분의 양을 관리할 것
- (4) 잔골재 중의 泥分의 양을 관리할 것
- (5) 굵은 골재의 표면수를 안정시키고 잔골재의 표면수를 연속하여 측정할 수 있는 수분계를 개발할 것

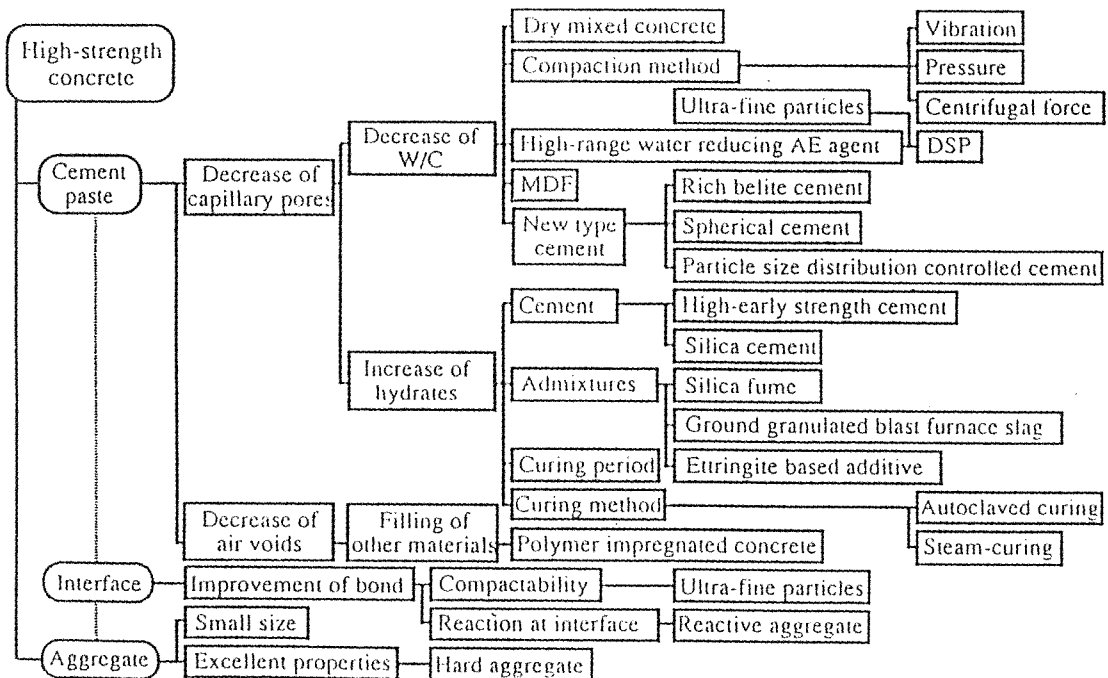
橘⁽²⁾도 초고강도콘크리트를 제조하기 위해서는 시멘트 클링커의 광물조성 비율을 바꿀 필요가 있을 뿐만 아니라 시멘트 입자의 형상을 바꾸어 주고 입도 조정을 해야 하며 실리카흙이나 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬 등

의 사용이 반드시 필요하며 골재는 자체의 강도, 입도분포, 입형, 최대치수 유해물 함유량 및 표면상태 등을 고려해야 되고 골재 표면수의 변동이 생기지 않도록 철저하게 잘 관리해야 한다고 지적하고 있다. 그리고 실리카흙과 같은 미립분은 분산이 불충분할 가능성이 있기 때문에 믹싱시간을 보통콘크리트 제조시보다 50% 정도 증가시켜 줄 필요가 있다.

고강도콘크리트를 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 계면의 부착력을 개선할 것

이 외에도 양생방법이 콘크리트 강도에 미치는 영향이 크기 때문에 충분한 습윤양생이 될 수 있도록 조치를 취해야 한다. 예를 들어보면 물 시멘트비 30%정도의 실리카흙을 혼합



(그림 8) 고강도 콘크리트의 제조방법

한 고강도콘크리트의 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 시멘트비의 보통 콘크리트보다 초기건조에 따른 강도의 손실이 크며, 양생조건이 강도에 미치는 영향이 매우 민감하다고 한다.⁽¹¹⁾

그리고 주지하는 바와 같이 고강도콘크리트를 제조하기 위하여 가장 필요한 장비는 믹서라 하겠으며 강제식 믹서와 같이 성능이 우수한 믹서가 고강도콘크리트를 제조하는 데 필수적이라 하겠다.

4. 고강도콘크리트의 유동화 기구

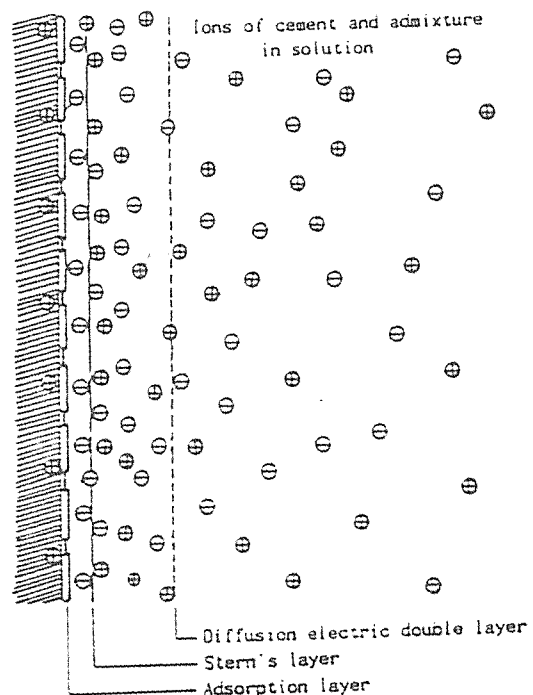
고성능감수제가 콘크리트의 유동성을 크게 증대시키는 이유는 고성능감수제가 시멘트 입자의 계면활성 작용으로 인하여 시멘트 입자가 잘 분산하므로써 시멘트 입자간의 마찰이 감소됨에 따라 시멘트풀의 유동성이 증대되기 때문이다.⁽¹²⁾

고성능감수제를 사용한 시멘트풀의 유동화 기구를 고찰해 보면 다음과 같다.

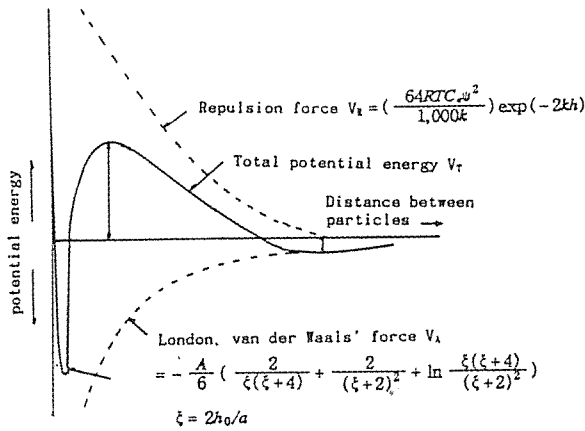
시멘트 풀은 분산질인 시멘트 입자와 분산매인 물로 이루어진 분산계(Suspension)로서 생각할 수가 있다. 분산계속의 시멘트 입자는 매우 큰 비표면적, 즉 큰 표면에너지와 가지고 있어서 이를 저하시키기 위하여 용액중으로부터 각종의 물질을 흡수한다고 한다. 시멘트와 같이 미립자화된 입자는 그 표면에너지를 감소시키기 위하여 응집하는 경향이 강하여 입자가 단독으로 분산된 상태로 존재하는 것이 아니라 서로 응집된 상태로 되어 유동성이 작은 상태가 된다. 그러므로 분산계의 안정화, 즉 유동화를 시키기 위해서는 분산질인 시

멘트 입자와 분산매체인 물 사이의 계면에 제 3의 물질을 작용시켜 시멘트 1차 입자가 2차 입자로 응집하는 것을 방지해야 한다. 시멘트 분산제로서 첨가되는 고성능감수제는 시멘트 입자에 전하를 부여하여 그 전기적 반발력으로 입자의 응집을 방해하여 [그림 9]와 같이 시멘트 입자 표면에 확산전기 2중층을 형성한다. 이 대전층의 전위가 서로 비슷한 입자끼리는 정전기적인 상호반발력이 생겨 응집한 시멘트 입자가 분산되어 시멘트풀이 유동화하게 된다.

시멘트 입자는 물과 접촉한 후 수화생성물로 덮혀지기 때문에 짧은 시간 동안은 수화반응이 활발하지 않은 수화발열 단계중 2단계인 유도기 (Induction Period)로 간주하여 시멘트 입자를 소수성 콜로이드 입자로 생각할 수가 있기 때문에 소수성 콜로이드의 안정화 이론(DLVO 이론)을 적용시킬 수가 있다고



(그림 9) 시멘트 입자의 확산전기 2중층 모델

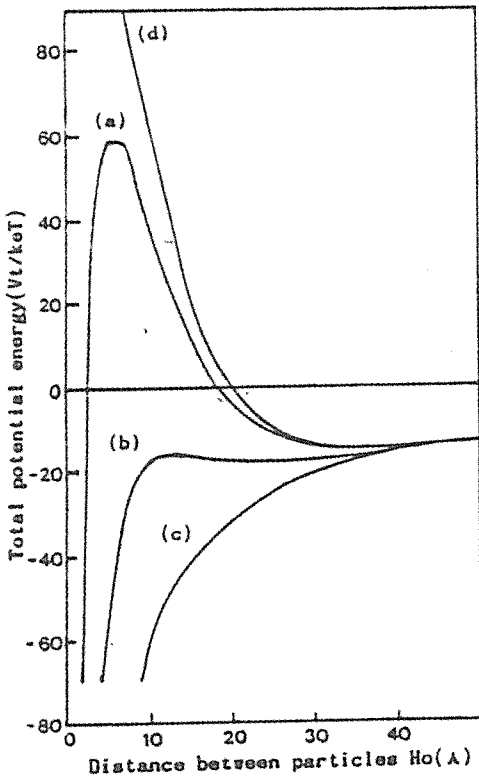


- R:기체정수
- T:온도
- C_s:벌크상의 이온농도
- 1/k:전기 이중층
- 2h₀:입자 표면간의 거리
- ε:전지전하
- ψ:Stern전위
- k:볼츠만 상수
- 2h₀:입자 표면간의 최단거리
- a:입자 반경
- A:Hamaker정수

$$V_T = V_R + V_A$$

(VA)이 작용하게 되어 입자의 응집분산은 이들 힘의 총화인 포텐셜에너지(VT)로서 결정된다. 이와 같이 시멘트 입자의 상호작용에 따른 포텐셜에너지의 변화를 나타낸 것이 [그림 11]이다.

(그림 10) 시멘트 입자의 상호작용



(그림 11) 시멘트 입자의 포텐셜에너지 곡선

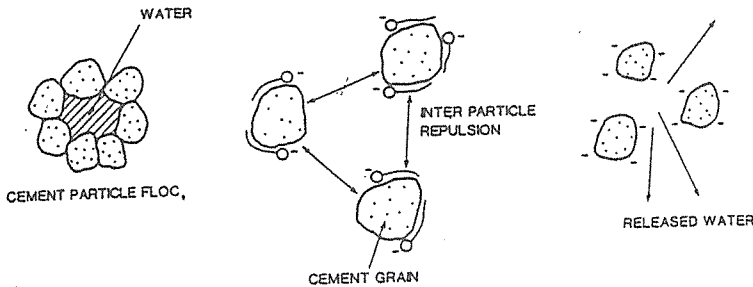
보고하고 있다.⁽¹²⁾

즉, 전기 이중층을 가진 2개의 입자가 접근하면 [그림 10]과 같이 정전기적 반발력(VR)이 생기며 또한 London van der Waals인력

(그림 11)의 (a)와 같이 VT의 극대값이 존재하면 시멘트 입자가 서로 접근하기가 어려워 응집이 발생하지 않지만 (b), (c)와 같이 VT의 극대값이 없으면 시멘트 입자가 응집하게 되어 시멘트풀의 유동성이 저하하게 된다. (d)는 고성능감수제를 첨가하여 시멘트풀을 유동화한 경우의 예를 나타낸 것으로서 (a), (b), (c)의 경우와 비교해 볼 때 입자간 거리가 짧을 경우 큰 반발력이 작용하고 있어서 고성능감수제의 시멘트 입자 분산효과가 매우 크게 작용하므로서 유동성이 양호함을 시사하고 있다. 이와 같은 현상을 모델화한 것이 [그림 12]이다. 고성능감수제를 첨가하므로써 시멘트 입자표면에 음전하가 발생하여 반발력에 의하여 고유동화가 이루어진다고 볼 수 있겠다.

한편 시멘트풀의 유동성에 영향을 미치는 주요 인자로서는 시멘트 입자간의 응집 분산 특성외에도 분산매인 물 또는 용액의 Rheology성질, 시멘트 입자경 분포에 의한 입자의 충전성, 초기 수화생성물의 종류와 양, C₃S 수화 가속기의 반응개시 시간,⁽¹³⁾ 고성능감수제 종류 및 첨가시기 등의 많은 요인이 영향을 미친다고 한다.

이와 같이 고강도용 콘크리트의 유동성을 개선하기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해



(그림 12) 고성능 감수제에 의한 시멘트입자의 분산

여 실행되고 있으며 앞으로도 계속 발전할 것으로 전망된다.

5. 고강도콘크리트의 강도발현 기구

콘크리트의 고강도 발현에 영향을 미치는 요인은 [그림 13]과 같다.

여기에서는 주로 고강도콘크리트의 강도에 영향을 미치는 혼화재료의 효과와 콘크리트중 시멘트 페이스트와 골재와의 부착강도의 개선을 중심으로 고강도 발현 메카니즘을 고찰한다.

고강도콘크리트의 고강도 발현에 있어서 가장 취약한 약점은 결합재인 시멘트 페이스트와 골재와의 부착성이 작은 점이다. 즉 양자의 계면에서의 결합력이 작기 때문에 고강도콘크리트의 강도를 지배하는 주요 요인이 되고 있다. 골재와 시멘트 페이스트의 계면(Transition Zone)을 미시적으로 살펴보면 [그림 14]에서 알 수 있듯이 대부분 시멘트의 대표적인 수화 생성물인 수산화칼슘(Ca(OH)₂)결정이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다.

그러므로 다른 부분보다

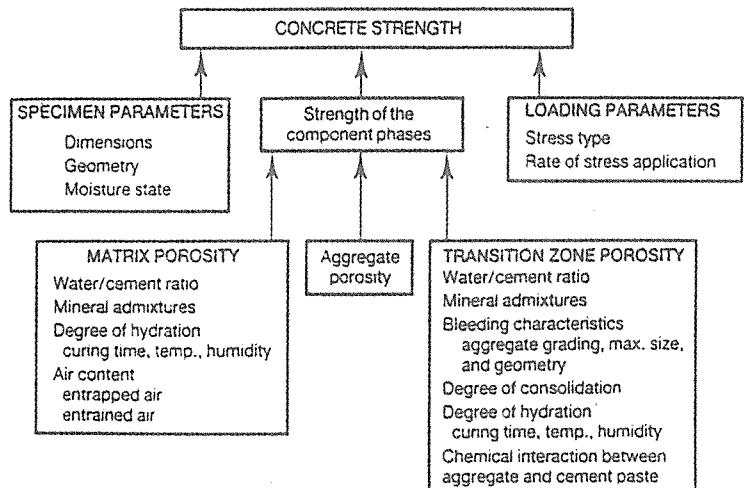
도 상당히 다공질의 구조로 되어 있어 강도면에서 취약하다. 따라서 시멘트 페이스트와 골재의 부착력을 증진시키기 위해서는 이 Transition Zone에 존재하는 많은 공극을 다른 재료로 충전하는 것이 필요하다. 예를 들면 실리카흄같은 초미분말을 사용하면 포졸란 반응에 의해

여 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 실리카흄을 사용하여 충전하는 작용을 모델화한 것이 [그림 15]이다.

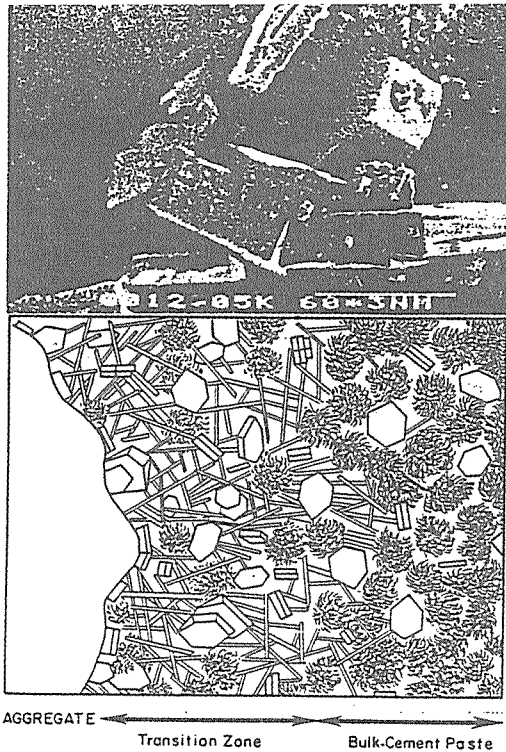
즉 실리카흄을 사용하여 고성능콘크리트를 제조하는 메카니즘은 [그림 16]과 같이 정리될 수 있다.

한편 시멘트 화학적인 면에서 고강도 발현 메카니즘을 살펴보면 다음과 같다.

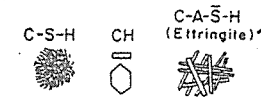
콘크리트중의 대표적인 시멘트 수화생성물



(그림 13) 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 요인

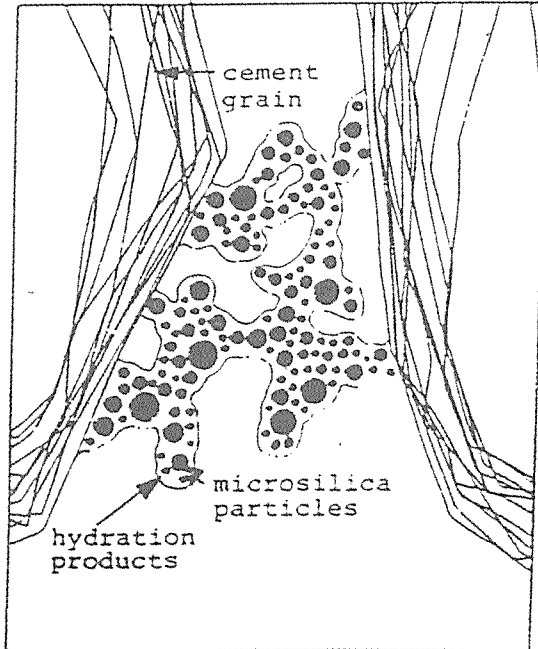


(a) Scanning electron micrograph of the calcium hydroxide crystals in the transition zone.



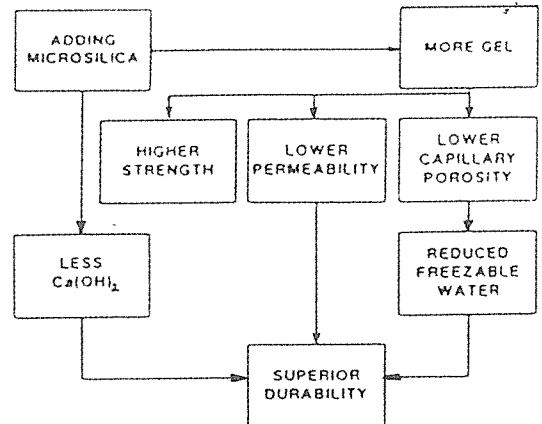
(b) Diagrammatic representation of the transition zone and bulk cement paste in concrete. [Photograph courtesy of P. Monteiro, diagram courtesy of C. Normand, University of California, Berkeley.]

(그림. 14) 시멘트 페이스트와 골재 계면의 미세구조



(그림 15) 실리카흙 입자의 충전작용

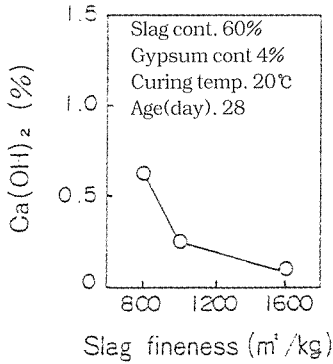
이 그림에서 알 수 있듯이 고로슬래그 미분말의 분말도가 클수록, 첨가량이 많을수록 수산화칼슘량이 감소하는 것으로 보아 고로슬래그 미분말이 포졸란 반응에 의하여 수산화칼



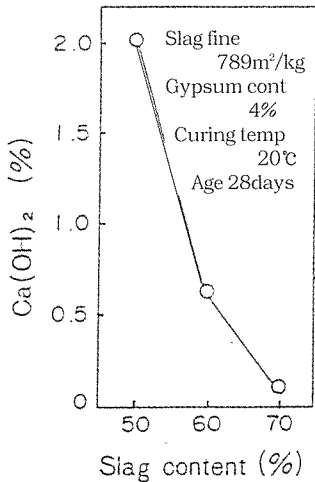
(그림 16) 실리카흙의 고강도 발현

은 수산화칼슘, C-S-H, 알루미늄에이트계 수화물 등이다. 이 중에서도 C-S-H는 콘크리트의 강도 증진과 밀접한 관계를 나타내며 대체로 C-S-H의 양이 많을수록 콘크리트의 강도가 크게 나타난다.⁽¹⁴⁾ 즉 수화생성물중 많은 양을 차지하고 있는 수산화칼슘을 C-S-H로 전환할 필요가 있음을 알 수 있다.

혼화재의 포졸란반응의 한 예로서 고로슬래그 미분말을 사용했을 경우 채령 28일에서의 수산화칼슘양의 변화⁽¹⁵⁾를 나타낸 것이 [그림 17], [그림 18]이다.



(그림 17) Ca(OH)₂에 영향을 미치는 고로슬래그 미분말 분말도



(그림 18) Ca(OH)₂에 영향을 미치는 고로슬래그 미분말 첨가량
 습과 반응하여 C-S-H를 생산하고 있음을 알 수 있으며 그로 인하여 콘크리트의 고강도 발현에 기여하고 있음을 추정할 수 있다.

6. 맺음말

콘크리트 재료는 건설관계 구조물을 위시하여 특수한 용도에 이르기 까지 널리 응용되고 있어 철강재와 더불어 토목 건축용 재료로서 빼놓고 생각할 수 없는 중요한 건설용 기본재료이다.

특히 건설기술이 발전함에 따라 콘크리트

재료가 초고층건물, 장대교량, 거대한 댐, 심해수중의 해양구조물, 원자력 발전소 및 초저온 액체를 저장하는 용기 등에 적용되므로써 콘크리트 재료에도 매우 고기능화, 고품질화 및 고내구성이 요구되고 있다. 이러한 시대적 요청에 부응하기 위하여 일부 선진국에서는 콘크리트의 품질을 개선하기 위한 방안으로 콘크리트의 고강도화에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있는 실정이다.

고강도콘크리트의 실용화는 콘크리트 공학 분야에서 새로운 기술의 전환점이 될 뿐만 아니라 고품질화, 고기능화, 고성능화를 위한 건설용 재료로서 중요한 역할을 할 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

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. 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.
3. 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.
4. Kitamura, M. 외 4명, "Properties of Concrete Using Spherical Cement", Proceeding of Cement Association of Japan, Vol.45, 1991.
5. Tomosawa, F. 외 3명, "Development and Evaluation of Binders for High

Strength Concrete”, Proceeding of Cement Association of Japan, Vol.46, 1992.

6. 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.

7. 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.

8. J. Armaghani 외 3명, “High Performance Concrete in Florida Bridges”, High Performance Concrete in Severe Environments, ACI SP-140, 1993.

9. FIP Commission on Concrete, “Condensed Silica Fume in Concrete”, State of Art Report, Federation International de La Precontrainte, 1988.

10. 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.

11. 岡村 甫, 小澤一雅, “コンクリート製造方法”, 콘크리트工學, Vol.31, No.3, 1993.3.

12. 문한영, 김기형, “고성능감수제를 사용한 시멘트복합체의 유동성 손실에 대한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제 4권, 제 2호, 1992.6.

13. 노재성, 고강도콘크리트 제조를 위한 국내의 혼화제 제조현황 및 특성, 혼화제 기구, KCI 국제워크숍, 1993.10.

14. Farrokh F. Radjy, “Microsilica Concrete : A Technological Breakthrough Commercialized”, Materials Research Society Symposia Proceedings, Vol.42

15. K. Sakai and H. Watanabe, “High Performance Concrete: Low-Heat and High-Strength”, High Performance Concrete, Proceedings ACI International Conference, Singapore, 1994.