# 장거리 운반 고강도 콘크리트 제조 및 품질관리

## Production and Quality Control of Long Distance Delivered High Strength Concrete

박 연 동[1] 정 재 동[2] 박 기 청[3] 노 재 호[4]
Park, Yon-Dong Jaung, Jae-Dong Park, Ki-Cheong Noh, Jae-Ho
조 일 호[5] 방 희 상[6] 국 중 욱[7]
Cho, Il-Ho Bang, Hee-Sang Kook, Joong-Ug

ABSTRACT

High strength ready-mixed concrete with delivering time of about 90 minutes is successfully produced at ready-mixed concrete plant and placed columns and retaining walls of a tall building without any problems. The design strength of the concrete is 450 kgf/cm$^2$ and the required average compressive strength is 540 kgf/cm$^2$ according to ACI 363R-84 report with assumed coefficient of variation of 12%. For the producing of good quality concrete, many laboratary and field tests are carried out. As the results of this study, the slump loss of high strength concrete is largely influenced by kinds of superplasticizer. The measured pump pressure of high strength concrete with slump of 22cm is higher than that of normal strength concrete with slump of 18cm by about 20~30%. The measured average 28-day compressive strength of the concrete is 551 kgf/cm$^2$ and the coefficient of variation is 2.3%.

## 1. 서 론

콘크리트 배합 기술의 개발, 시멘트를 비롯한 각종 결합재의 개선, 고성능감수제의 개발 및 품질 개선에 따라 구조물에 사용되는 콘크리트의 강도는 점점 더 빠른 속도로 상승하고 있다. 미국이나 유럽 등지는 물론 우리나라보다 여러가지 면에서 기술력이 떨어지는 동남아에서도 압축강도 400 kgf/cm$^2$ 이상의 고강도 콘크리트가 상용화되고 있는 실정이며, 최근에 들어서는 압축강도 1000 kgf/cm$^2$ 이상의 고강도 콘크리트가 일부 고층 건물에 사용되고 있다.

그간 국내에서는 토목 구조물을 중심으로 압축강도 300~500 kgf/cm$^2$의 콘크리트가 일부 사용되었으나 건축 구조물에서는 작업성 문제, 운반거리 문제, 품질관리 문제 등으로 인하여 실적이 미미하였다. 그러

[1] 정회원, 동양중앙연구소 선임연구원, 공박
[2] 정회원, 대구대학교 건축공학과 교수, 공박
[3] 정회원, 동양중앙연구소 수석연구원
[4] 정회원, 동양중앙연구소 선임연구원
[5] 동양시멘트 대전공장 품질관리실 대리
[6] 동양시멘트 안양공장 품질관리실장
[7] 동양시멘트 건설사업본부 설계기획팀 과장

나, 최근 들어 고강도 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 구조물의 대형화, 고층화에 따른 경제성 문제, 레미콘 업계의 기술개발 등으로 인해 주상복합건물을 중심으로 하여 건축 구조물에서도 고강도 콘크리트가 본격적으로 사용되기 시작하고 있으며, 콘크리트 강도 수준도 점점 향상되고 있다.[1]

일반적으로 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 제조후 시간경과에 따른 작업성 손실이 심하고 품질관리가 어렵다. 본 연구에서는 이러한 고강도 콘크리트의 단점을 극복하고 사용성을 넓히기 위하여 실내실험 및 현장실험, 현장타설을 통하여 장거리 운반 고강도 콘크리트의 작업성 확보 및 품질관리에 대한 대책을 검토함과 동시에 개선책을 마련하였다.

## 2. 실내 실험

### 2.1 실험 계획

본 실험은 장거리 운반 고강도 레미콘의 작업성 및 강도 확보에 중점을 두었으며, 물-결합재비, 단위결합재량, 혼화재 종류 및 첨가량, 플라이애쉬 치환 여부 등을 변수로 두고 수행되었다. 고강도 콘크리트의 경우 단위시멘트량의 증가로 인해 매스 콘크리트에 타설시 수화열응력에 의한 균열 발생이 문제점으로 대두되고 있는데, 국내의 경우 플라이애쉬 사용이 가장 경제적으로 수화발열량을 저감시킬 수 있고, 현장적용시 출하공장인 동양시멘트 안양공장의 경우 플라이애쉬 전용 사일로가 설치되어 있으므로 본 실험에서는 플라이애쉬 사용을 기본 전제로 하였다.

현장 적용성을 고려하여 콘크리트 설계기준강도는 450 kgf/cm$^2$으로 정하였고, 배합강도는 고강도 콘크리트 위원회 보고서[2]에서 제시한 식에 따라 540 kgf/cm$^2$로 결정하였다(변동계수 12% 적용). 고강도 콘크리트의 높은 점성 특성으로 인한 작업성 확보를 위하여 현장타설시 슬럼프는 18cm 이상을 기준으로 정하였다.

25-450-18 규격의 장거리 운반 고강도 레미콘 제조를 위하여 필요한 물-결합재비, 단위수량, 잔골재율 등을 파악하기 위하여 표 1과 같이 기본 배합비를 정하고 실험을 수행하였다. 콘크리트의 물-결합재비는 30, 33, 36%로 하여 실험을 수행하였으며, 고성능감수제 종류에 따른 편차를 없애기 위하여 사용 고성능감수제는 한 종류로 하였다.

각 배합의 배합비는 표 1과 같고, TC33~TF36 배합은 10×20cm 공시체를 제작하여 3, 7, 28, 56, 90일 재령의 압축강도를 측정하였으며, T-1~T-4 배합은 3, 7, 28일 재령의 압축강도를 측정하였다.

표 1. 기본 배합비

| 공시체 기호 | W/B | S/a (%) | 결합재량 (kg/m$^3$) | 플라이애쉬(%) | SP (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| TC33 | 33 | 41 | 522.5 | 0 | 1.52 |
| TF33 | 33 | 40 | 522.5 | 15 | 1.72 |
| TC30 | 30 | 40 | 542.0 | 0 | 1.83 |
| TF30 | 30 | 39 | 542.0 | 10 | 2.03 |
| TC36 | 36 | 42 | 473.1 | 0 | 1.32 |
| TF36 | 36 | 41 | 473.1 | 20 | 1.52 |
| T-1 | 33 | 41 | 530.0 | 15 | 1.5 |
| T-2 | 33 | 43 | 530.0 | 15 | 1.5 |
| T-3 | 33 | 41 | 530.0 | 10 | 1.3 |
| T-4 | 33 | 41 | 530.0 | 20 | 1.4 |

기본배합 실험을 통하여 강도 및 작업성 조건을 만족시키는 배합을 일차 선정한 후 혼화제 종류 및 첨가량을 변화시켜 가면서 슬럼프 손실 실험을 수행하였는데, 현

장 실험 및 적용 전단계로서 최종 배합비 결정을 목적으로 하였다. 슬럼프 손실은 콘크리트 제조후 20분 간격으로 120분까지 측정하였다. 슬럼프 손실에 적용된 배합은 표 1의 T-1 배합이다.

2.2 사용 재료

실험에 사용된 재료의 물리적 성질은 표 2와 같다. 플라이애쉬는 보령화력발전소산 유연탄 플라이애쉬를 정제한 제품을 사용하였고, 고성능감수제는 기본배합 실험시 1종류의 고성능감수제를 사용하였으며, 슬럼프 손실 실험시에는 4종류의 고성능감수제를 사용하였다.

표 2. 사용재료의 물리적 성질

| 종 류 | 물리적 성질 |
|---|---|
| 시멘트 | 보통 포틀랜드 시멘트<br>비중 : 3.15, 비표면적 : 3315 $cm^2/g$ |
| 플라이애쉬 | 보령화력발전소산<br>비중 : 21.7, 비표면적 : 4025 $cm^2/g$ |
| 잔골재 | 비중 : 2.58, 조립율 : 2.66 |
| 굵은 골재 | 최대크기 : 25mm, 비중 : 2.61<br>조립율 : 6.82 |
| 고성능 감수제 | 나프탈린계, ASTM C 494<br>type F 및 G, 4종류 |

2.3 실험결과 및 고찰

기본 배합에 대한 압축강도 실험결과는 표 3과 같다. 그림 1은 물-결합재비 30, 33, 36% 배합의 장기강도 발현특성을 나타낸 것인데, 일반적으로 알려진 바와 같이 플라이애쉬를 사용하게 되면 재령 28일 강도는 감소하나 90일 이상의 장기재령에서는 강도역전현상이 발생함을 알 수 있다. 또한, 물-결합재비가 3% 증가함에 따라 압축강도가 50 $kgf/cm^2$ 정도 감소하여 고강도 영역에서 콘크리트의 압축강도가 물-결합재비에 상당히 민감하게 반응함을 알 수 있다.

표 3. 기본배합 압축강도 실험 결과

| 공시체 기호 | 압 축 강 도 ($kgf/cm^2$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3일 | 7일 | 28일 | 56일 | 90일 | 180일 |
| TC33 | 507 | 561 | 656 | 693 | 745 | 764 |
| TF33 | 435 | 481 | 602 | 660 | 704 | 749 |
| TC30 | 546 | 605 | 710 | 748 | 758 | 813 |
| TF30 | 528 | 563 | 670 | 721 | 790 | 839 |
| TC36 | 460 | 534 | 616 | 682 | 692 | 703 |
| TF36 | 325 | 401 | 535 | 614 | 655 | 721 |
| T-1 | 403 | 497 | 622 | - | - | - |
| T-2 | 424 | 514 | 643 | - | - | - |
| T-3 | 444 | 552 | 675 | - | - | - |
| T-4 | 401 | 517 | 645 | - | - | - |

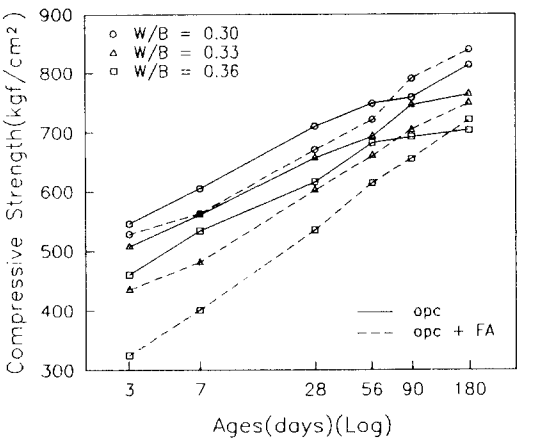


그림 1. 플라이애쉬 사용 여부에 따른 장기강도 발현 특성

고성능감수제 종류 및 첨가량, 첨가방법에 따른 슬럼프 손실 실험결과를 표 4에 나타내었는데, 고성능감수제 종류에 따라

슬럼프 유지 성능에 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 또한, 기존의 연구들[3]도 시멘트 종류 및 배합에 따라 각 고성능감수제의 슬럼프 손실 저감효과가 다르게 나타나므로 사용 고성능감수제 선정시 충분한 실험을 통하여 그 효과 및 특성을 규명한 후 결정하여야 할 것이다. 특히, 고강도 콘크리트의 경우 베이스 콘크리트의 슬럼프가 0cm에 가깝고 슬럼프 손실 억제가 품질관리에 있어 중요한 요인중의 하나이므로 더욱 세심한 주의가 요망된다.

표 4. 슬럼프 손실 실험결과

| SP종류 (첨가량) | 슬럼프 (cm) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0분 | 20분. | 40분 | 60분 | 80분 | 100분 | 120분 |
| A(1.3%) | 22.0 | 20.6 | 18.7 | 13.2 | 11.0 | 11.8 | - |
| B(1.3%) | 21.2 | 23.5 | 22.0 | 21.0 | 18.0 | 11.5 | 11.8 |
| C(1.5%) | 24.4 | 20.5 | 19.8 | 15.0 | 11.7 | 6.3 | - |
| D(1.3%) | 24.4 | 18.0 | 11.0 | 6.7 | - | - | - |
| A(1.8%) | 23.4 | 20.7 | 21.7 | 21.9 | 22.8 | 22.4 | 23.8 |
| B(1.8%) | 24.0 | 23.0 | 24.4 | 21.8 | 17.5 | 16.5 | 12.0 |

본 실험의 조건에서는 A 및 B 고성능감수제가 슬럼프 유지 성능이 비교적 우수한 것으로 나타났으며, 특히 A 고성능감수제의 경우 과량 첨가시 그 효과가 더욱 뚜렷하게 나타났다. 따라서, 장거리 고강도 레미콘 제조시에는 경제성 등을 고려하여 슬럼프 손실이 가장 적은 배합 및 고성능감수제를 선택하고, 운반 및 대기시간을 고려하여 고성능감수제 첨가량을 결정하는 것이 품질관리의 중요한 요인으로 판단된다. 또한, 본 실험의 결과에는 나타나 있지 않으나 콘크리트의 슬럼프 손실 정도는 베이스 콘크리트의 슬럼프와 밀접한 관계가 있고 동일 강도 콘크리트의 경우 단위수량에 크게 좌우된다. 한편, 단위수량이 증가하게 되면 건조수축이나 크리이프 등 콘크리트의 경화 후 물성을 악화시키므로 적절한 작업성 확보를 위해서는 단위수량 결정에 신중을 기해야 할 것이다.

## 3. 실기 실험 및 현장 적용

### 3.1 개요

고강도 콘크리트 현장 적용 대상 구조물은 서울 삼성동에 위치한 동양투금사옥이었으며, 고강도 콘크리트가 타설된 부재는 지하 2층 기둥 및 옹벽 일부이다. 동양시멘트 안양공장에서 삼성동 현장까지는 레미콘 차량으로 약 50분 정도 소요되는 거리이나 장거리 운반 고강도 레미콘 현장적용의 효과를 극대화시키기 위하여 차량이 가장 붐비는 토요일 아침 출근시간대에 레미콘 출하를 계획하였다.

실내 실험 결과와 현장타설전에 실시한 2회의 현장(안양공장)실험 결과를 토대로 하여 동양투금사옥에 25-450-18 고강도 레미콘을 제조, 공급하였다.

### 3.2 실기 실험

양질의 고강도 레미콘을 차질없이 공급하기 위하여 실내실험결과를 토대로 하여 안양공장에서 레미콘 실기실험을 수행하였다. 실험 결과, 고강도 레미콘의 최초 슬럼프를 높게하여 제조할 경우, 1시간 30분까지는 유동성이 양호하나 2시간 정도 경과할 경우, 시공조건이 까다로울 때는 고성능감수제를 후첨가(0.1~0.3%)할 필요가 있을 것으로 판단되었다. 또한, 고성능감수제를 레미콘 차량에 후첨가할 경우, 레미콘 적재량을 6m$^3$ 이하로 하면 레미콘 차량 아지테이터 고속교반시 전체적으로 균일하게 슬럼프가 증가되는 현상을 보였다. 표 5는 실기실험 고강도 레미콘 슬럼프 손실 실험결과이다.

표 5. 고강도 레미콘 슬럼프 손실 실험(실기실험 결과)

| 경과시간 (분) | 즉시 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 슬럼프 (cm) | 22.6 | 23.5 | 21.2 | 21.2 | 19.0 | 19.0 | 15.0 |

* 120분 경과후 고성능감수제 0.2~0.3% 후첨가하면 슬럼프 20~22cm로 증가

실내실험 및 레미콘 실기실험을 통하여 동양투금사옥에 적용할 고강도 콘크리트 배합비를 다음 표 6과 같이 결정하였다.

표 6. 현장적용 배합비

| 배합 기호.. | W/B (%) | S/a (%) | 결합재량 ($kg/m^3$) | 플라이 애쉬(%) | S.P. (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| AY-S | 33 | 42 | 530.0 | 15 | 1.8~2.1 |

3.3 출하 및 품질관리

레미콘 제조시에는 당일 출하전 세골재 표면수를 적외선 수분계로 측정한 다음 B/P에서 표면수 보정을 실시하여 최초 레미콘을 제조하였으며, 운반 및 대기시간을 고려하여 최초 슬럼프를 25cm 정도로 하여 출하를 실시하였다. 표 7은 공장 및 타설현장에서의 슬럼프 측정결과이다. 이때, 레미콘의 온도는 약 30℃ 였으며, 현장도착후 측정된 레미콘의 슬럼프는 모두 18cm 이상(1호차의 경우 17cm)으로 요구되는 작업성을 만족하였으나 원활한 작업을 위하여 현장관계자들이 더 높은 슬럼프를 요청함에 따라 고성능감수제를 0.1~0.2% 후첨가하여 슬럼프를 22cm 이상으로 높여 펌프카를 통하여 타설하였다.

시공조건으로서 배관길이는 약 60m 정도였으며, 펌프카 게이지 압력을 측정한 결과 25-240-18 규격의 일반 레미콘은 100 bar 정도의 압력이 걸린 반면 고강도 레미콘의 경우 100~150 bar 정도의 압력(평균 120 bar)이 걸려 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비하여 20% 정도 높은 압력이 걸렸다. 고강도 레미콘이 보통강도 레미콘에 비하여 슬럼프 및 슬럼프 플로우가 높은 값을 가짐에도 불구하고 높은 압력이 걸린 이유는 고강도 콘크리트 특유의 높은 점성 때문으로 판단되며, 향후 고강도 레미콘 시공시 유의할 점으로 판단된다.

표 7. 타설 레미콘 슬럼프 측정 결과

| 차량 번호 | 운반 시간 (분) | 대기 시간 (분) | 슬럼프 (cm) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 출하직후 | 타설직전 |
| 1 | 58 | 10 | 25.5 | 17.0 |
| 2 | 55 | 10 | 26.0 | 20.6 |
| 3 | 75 | 10 | 25.5 | 18.0 |
| 4 | 60 | 30 | 24.5 | 21.0 |
| 5 | 69 | 10 | 26.5 | 21.0 |
| 6 | 76 | 24 | 27.0 | 19.0 |
| 7 | 80 | 28 | 26.0 | 19.0 |
| 8 | 70 | 55 | 25.5 | - |

고강도 레미콘의 경우, 높은 점성으로 인하여 펌프압력은 높게 걸리는 반면, 골재분리에 대한 저항성은 뛰어나므로 고강도 레미콘 시공시 높은 슬럼프값으로 타설하는 것이 바람직할 것으로 사료되며, 일반 현장에서 느끼는 작업성을 기준으로 할 때 동일한 작업성을 발휘하기 위해서는 300 $kgf/cm^2$ 대의 고강도 콘크리트는 슬럼프가 3cm, 400 $kgf/cm^2$ 대의 고강도 콘크리트는 슬럼프가 5cm 정도 높아야 할 것으로 판단된다.

그림 2는 실시공된 고강도 레미콘의 압축강도 결과이다. 출하된 레미콘은 설계기준강도 450 $kgf/cm^2$, 분산계수 12%로 가정하여 배합강도 540 $kgf/cm^2$로 설계되었는데, 실측정된 압축강도의 평균값은 배합강도보다 10 $kgf/cm^2$ 정도 높게 나와 요구하는 품질조건을 만족시켰다. 분산계수는

2.3%로서 품질관리 상한치로 설정한 12%보다 훨씬 낮았는데, 동일한 날짜에 제조된 점을 고려하더라도 품질관리가 매우 잘 된 것으로 사료된다. 또한, 타설 당일 공장 출하물량이 많아 고강도 레미콘을 연속적으로 제조하지 못하고 보통강도 레미콘과 병행하여 제조(1회 고강도 레미콘 제조후 1~2회 보통강도 레미콘 제조, 보통강도 레미콘 제조후 다시 고강도 레미콘 제조를 반복)하였음에도 불구하고 품질관리상에 문제점이 발견되지 않아 고강도 레미콘 출하간격이 길 경우에도 레미콘 공장 출하 물량의 감소없이 양질의 고강도 레미콘을 충분히 공급할 수 있을 것으로 판단된다.

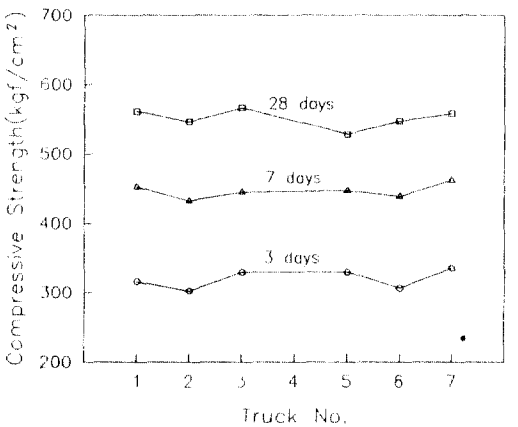


그림 2. 실시공 레미콘 압축강도 실험결과

## 4. 결 론

장거리 운반 고강도 레미콘 제조 및 현장시공 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 원재료 및 배합을 최적으로 선택하고, 적절한 품질관리가 된다면, 고강도 레미콘 제조후 1시간 30분 이후에도 적절한 작업성을 확보할 수 있다.
2) 적절한 품질관리가 시행된다면 현재의 설비만으로도 안정적인 고강도 레미콘 제조 및 품질관리가 가능하다.
3) 레미콘 공장에서 고강도 콘크리트를 제조시 뱃치간의 품질변동에 신속히 대처하여 강도 및 작업성 편차를 줄이는 품질관리에 대한 방안 및 기술축적이 필요하다.
4) 고성능감수제는 시멘트 종류 및 온도 등에 따라 그 효과가 상이하게 나타나는 경우가 많고 슬럼프 손실 지연 효과의 차이도 크므로 사전 실험 및 검토는 필수적이다.
5) 콘크리트는 배합조건 뿐만 아니라 외부조건(타설, 운반시간, 온도 등)에 따라 강도를 비롯한 품질에 큰 차이가 있고, 고강도 콘크리트의 경우 이러한 현상이 더욱 확연히 나타나므로 각 조건에 따른 배합설계, 품질관리방안, 혼화재 선정 등에 대한 연구 및 주의가 필요하다.


## 감사의 글

본 고강도 레미콘 제조 및 현장적용에 많은 도움을 주신 당사 건설사업본부 동양투금사옥현장 소장님을 비롯한 관계자 여러분, 안양공장 품질관리실 인원, 당연구소 김기철, 박성화, 이범식 연구원에게 깊은 감사를 드립니다.


## 참고문헌


1) 신성우외 8인, "초고층 주상복합 건물에의 초고강도 콘크리트의 시공 및 구조적 성능," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제6권, 제2호, 1994, pp. 313-318.
2) ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete," (ACI 363R-84), American Concrete Institute, Detroit, 1984, 48 pp.
3) 김진근, 김상식, 오병환, 신성우, "고강도, 유동화 및 섬유 콘크리트의 개발과 역학적 특성에 관한 연구," 과학기술처, 1990. 6, 306 pp.