

# 650kgf/cm<sup>2</sup> 고강도 콘크리트 한중 시공사례

## Field Application of High Strength Concrete under Cold Weather Conditions

정재동\*    노재호\*\*    한정호\*\*    조일호\*\*\*  
Jaung, Jae Dong    Noh, Jae Ho    Han, Chung Ho    Cho, Il Ho

### ABSTRACT

High strength concrete(65MPa) was used for construction of the bulk cement storage silo by using sliding form. This paper presents mix design, production, quality control and experience with field application of high strength concrete under cold weather conditions.

It is shown to be possible to produce high strength concrete of compressive strength of 50~60 MPa by using high-range water reducer to lower w/c ratio with appropriate quality control.

### 1. 서론

최근 국내에서도 고강도 콘크리트에 관한 연구가 활발하게 이루어지면서 시공사례도 점차 증가하기 시작하고 있다.

당 동양중앙연구소에서는 1989년 고강도 콘크리트에 관한 연구에 착수하여 1992년에 이르러서는 실구조물을 대상으로 수건의 현장적용에 성공한 바 있다. 그 결과 고강도 콘크리트의 제조와 품질관리, 시공등의 여러측면에서 문제점들이 없지 않았으나, 배합강도 500~600kgf/cm<sup>2</sup> 정도까지는 고성능감수제를 사용하여 물시멘트비를 낮추는 방법으로 일반 레미콘 플랜트의 설비 및 품질관리의 현수준을 다소 보완한다면 충분히 가능하다는 확신을 가질 수 있었다.

본 시공사례는 압축강도 600kgf/cm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트의 동절기 시공과정과 품질관리 결과를 정리한 것으로서 고강도 콘크리트의 실용화를 조금이나마 앞당기는 참고자료가 되었으면 한다.

### 2. 공사 개요

시멘트 저장용 사일로는 일반적으로 단면이 동일한 구조체의 연속시공이 가능한 슬라이딩폼(sliding form) 공법이 사용된다. 그러나 압축하중을 가장 많이 받고 구조적 안전성이 요구되는 개구부나 구조체 하부는 단면치수를 늘려 시공하기가 곤란하다. 따라서 사일로의 하부벽체나 개구부 기둥에 고강도 콘크리트를 채용함으로써 구조적 안전성을 높일수 있을 것으로 판단되었다.

본 공사에 적용한 배합강도 600kgf/cm<sup>2</sup> 고강도 콘크리트의 타설양은 약 250m<sup>3</sup>이며 사일로 높이에 따라 350, 270kgf/cm<sup>2</sup>의 순으로 강도를 낮추어 타설하였다.

아울러 금번 공사에서는 아직까지 국내에서 적용한 사례가 없는 분기관 공법을 채용함으로써 콘크리트 타설 작업시의 인력절감 및 공기단축을 시도하였으며 따라서 콘크리트의 작업성, 펌프압송성이 상당히 중요시 되었다.

또한 본 공사는 동절기 공사로서 콘크리트의 초기 동결방지 및 경화전 물성유지를 위하여 양생방법 등 시공상의 특별한 고려를 필요로 하였다. 표 1에 본 공사의 개요를 나타내었다.

\* 동양중앙연구소, 2차제품연구실장, 공박  
\*\*    同, 주임연구원  
\*\*    同, 주임연구원  
\*\*\*  同, 연구원

표 1. 공사 개요

명칭	내용	명칭	내용
위치	부산시 서구 암남동 655	공사 기간	1993.11.20. - 1994.7.20.
시공주	동양시멘트(주)	구조	철근콘크리트조
설계 및 시공	동양시멘트(주) 건설사업본부	시공법	슬라이딩폼 공법
규모	면적 : 1층면적 275 m <sup>2</sup> 계원 : 지름 18.7 m(외경), 높이 52.7 m 벽체두께 : G/L+10.585 m : 75 cm G/L+10.585 m - G/L+52.7 m : 35 cm		

### 3. 시험배합

#### (1) 배합설계

본공사에 적용할 콘크리트는 설계 기준 강도 500kgf/cm<sup>2</sup>, 배합강도 600kgf/cm<sup>2</sup>, 목표 슬럼프 21cm, 공기량 4±2% (용적계산 1%적용)로 초기 품질기준을 설정하고 적정 배합을 선정하고자 3차에 걸쳐 시험배합을 실시하였다.

실제시공에서 600kgf/cm<sup>2</sup>의 배합강도를 달성하기 위하여 물시멘트비 30~35%, 단위시멘트량 500~550 kg/m<sup>3</sup> 범위에서 목표 슬럼프 값을 얻기 위한 고성능감수제의 최적 첨가량과 잔골재율(s/a)을 구하였고 저온하에서의 강도 발현 성장과 응결등의 경화전 물성을 검토하였다. 최종 3차 시험배합은 현장 B/P에 적용하기 위한 실험으로 현지 부산공장에서 실시하였다.

#### (2) 사용재료 및 물성

시험 배합에 사용한 재료의 물리적 성질을 표 2와 3에 나타내었다.

#### (3) 시험배합 결과

동절기 외기온 조건(8~11℃)에서 실시한 시험 배합 결과 저온의 골재와 저온의 혼합수(13℃)를 사용한 경우 고성능감수제의 감수효과가 현저히 저하하는 현상이 관찰되었다. 이에 따라 콘크리트 제조시 외기온에 의하여 재료온도가 낮을 경우 목표 슬럼프 21cm를 얻기 위해 필요한 고성능감수제의 양이 상당히 증가할 것으로 예측되었다(그림 1 참조). 따라서 고성능감수제의 과잉 첨가를 방지하면서 목표 슬럼프를 얻기 위한 대책으로 온수를 혼합수로 사용할 필요가 있었다.

또한 콘크리트 강도 발현에도 외기온의 영향이 매우 큰 것으로 나타났는데(그림 2 참조), 시험체

표 2. 시멘트의 물리적 성질

비표면적 (브레인값) (cm <sup>2</sup> /g)	응결시간 (시간:분)		오토클레 이브 안정도 (%)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	초결	종결		3일	7일	28일
3.262	2:43	4:53	0.24	211	309	373

표 3. 골재 및 고성능감수제의 성질

사용 재료	성 질
잔골재	쇄척사(목포사) 및 하천사(나동사) 혼합사(7:3 혼합), 비중 2.55, 조립율 2.55, 흡수율 1.38%
굵은골재	쇄척(녹산産), 최대치수 25mm, 비중 2.58, 조립율 6.39, 흡수율 1.39%
고성능 감수제	나프탈렌계, 비중 1.21, pH 9.3, 고형분 41.9%

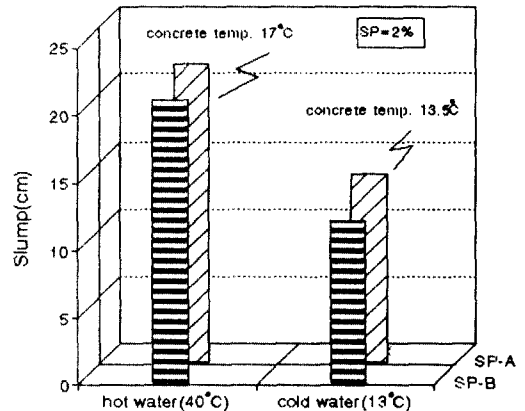


그림 1. 혼합수 온도에 따른 슬럼프 변화

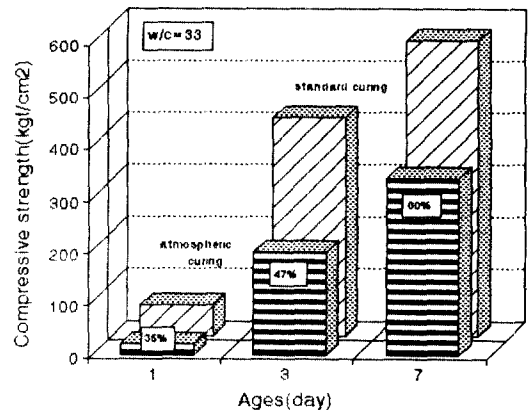


그림 2. 양생조건에 따른 압축강도 발현

에 따라서 재령 1일 압축강도가 60~80 kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 비교적 낮게 발현되거나, 야간에 영하의 기온에서 동결하여 하루가 지나도록 완전히 경화되지 않은 공시체도 발견되었다.

따라서 본 적용에서는 초기 온도저하에 대비하여 온수를 혼합수로 사용할 것과 콘크리트 타설 후 초기양생시 보온에 많은 주의가 요구될 것으로 판단되었다.(본 공사는 1월 하순으로 예정)

이상의 예비실험 결과로부터 현장 제조공정상의 변동요인, 시공시의 변동요인과 겨울철 공사임을 감안하여 재령 28일 압축강도가 약 670kgf/cm<sup>2</sup> 인 배합을 선정하였다.

#### 4. 제조 및 품질관리

##### (1) 콘크리트 현장배합

표 4에 적용 배합을 나타내었다.

표 4 콘크리트 현장배합표

W/C (%)	S/a (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )				고성능 감수제 (Cx%)
		물	시멘트	잔골재	굵은 골재	
33	40	175	530	659	1000	2.0

##### (2) 재료 계량 및 투입

혼합수는 대형 보일러로부터 수온 45℃로 조정하여 배관을 거쳐 계량 bin에서 직접 계량되었고 나머지 재료는 일반 레미콘 제조시와 동일한 방법으로 계량, 투입되었다. 레미콘 운반 트럭 1대분을 제조한 후에는 배관내 잔류수를 배수시켜 외기온에 의해 수온이 일시적으로 떨어지지 않도록 함으로써 혼합수의 온도를 일정하게 유지하도록 조치하였다. 또한 품질 변동 요인을 최소화하기 위하여 배척 플랜트 1기를 고강도 제조용으로 고정 사용였다.

##### (3) 혼합시간

고성능 감수제의 시멘트 분산효과는 혼합시간과 밀접한 관계가 있다. 따라서 고강도 콘크리

트를 균질하게 혼합시키기 위해서는 일반 콘크리트 제조의 경우보다 많은 혼합시간을 필요로 한다. 본 공사에서는 최소의 시간으로 적정 혼합 효율을 얻기 위하여 그동안의 현장 적용결과를 참고로 혼합시간을 80초로 하였다. 아울러 혼합시의 믹서 과부하를 방지하기 위하여 1회 배치(batch)량을 1m<sup>3</sup> 씩 총 7회에 나누어 혼합하였다. 이에 따라 레미콘 트럭 1대당(7m<sup>3</sup> 출하기준) 총 제조시간은 약 10-12분 정도 소요되었다.

##### (4) 세골재 표면수 변동

세골재의 표면수량은 고강도뿐만 아니라 보통 강도 콘크리트에서도 가장 큰 영향을 미치는 품질변동 요인이다. 콘크리트 제조시 표면수 변동에 따른 배합보정을 위하여 매 6시간 마다의 세골재 표면수 측정값(적외선 수분계에 의한)과 현장 도착시 슬럼프 및 펌프압송 상황을 참고하여 수시로 변동 적용하였다.

##### (5) 운반

레미콘 공장에서 시공현장까지의 거리는 약 500m 였으며, 운반시간에 따른 슬럼프 저하 현상은 없었다. 레미콘 운반 트럭은 2대로 한정하여 왕복운반하였고 출하량은 7m<sup>3</sup>을 기준으로 시공속도에 따라 평균 40~50분마다 1대씩 출하하였다.

##### (6) 타설

콘크리트의 타설은 펌프카를 이용하여 분기관을 거쳐 원주방향의 순서로 설치되어있는 24개의 토출구(공기압 자동개폐장치 부착)를 통하여 타설하였다. 평균 펌프 압송압은 120 ~ 150 kgf/cm<sup>2</sup>로서 대부분 순조로이 압송되었으나 문제점이 발생하는 경우도 있었다.

펌프 압송시의 장애는 타설 대기시간이 길어진 경우에 타설배관내에 잔류되어 있는 콘크리트의 급격한 유동성 저하가 주원인일 것으로 추측되고 또한 고강도 콘크리트의 경우는 단위시멘트량이 많아 그 점성으로 인하여 펌프 압송압 손실이 커지기 때문으로 사료된다.

그러나 시공 속도면에 있어서는 고강도 콘크리트의 경우 평균 슬라이딩 상승속도가 27cm/hr 로서 일반 콘크리트의 슬라이딩 속도인 15cm/hr 에 비하여 약 2배 정도 단축시킬 수 있었다.

(7) 양생

시공시 급격한 대기온도 저하(영하 7-8℃)로 인하여 양생초기 콘크리트의 동결위험이 있었다. 따라서 거푸집(slip form) 미송판재 내부에 스티로폴로 보온하고 온수가 흐르도록 배관을 설치하여 콘크리트가 거푸집내에 존치되는 양생초기에(약 4-5시간 정도) 보온양생을 행하였다. 또한 사일로 내부 공간에 열풍기를 가동하였고 구조물 외벽에는 바람을 막기 위하여 양생천막을 설치하였다.

(8) 품질관리

현장 품질관리는 모든 레미콘 트럭에 대하여 슬럼프, 공기량 및 콘크리트 온도를 측정하였고 압축강도 관리용 공시체는 레미콘 트럭 2차마다 제작하여 재령별, 양생조건별(표준 수중양생용 및 현장 대기양생용)로 구분하여 관리하였다.

또한 180×90×25cm 크기의 모의부재를 제작하여 현장에서 봉함양생후 재령 28일의 코아 공시체(9개)를 채취하였고 사일로 구조체를 대상으로는 슈미트 해머에 의한 비파괴 시험을 행하였다. 그리고 사일로 바닥으로부터 높이 1m 지점에 열전대식 온도 센서를 매립(3점 매립, 외벽 10cm, 중심부, 내벽10cm)하여 수화열에 의한 콘크리트 온도상승을 측정하였다.

5. 품질관리 결과

현장 품질관리 시험결과를 표 5에 나타내었다.

표 5. 품질관리 시험결과

품질관리 항목	슬럼프	공기량	콘크리트 온도	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		수화온도상승(℃) (최고온도)		
				7일	28일	외측	중심부	내측
평균	22cm	23%	21℃	488	648	41.8	56.4	43.8

(1) 슬럼프, 온도, 공기량, 작업성

현장 도착시 슬럼프는 평균 21.7 cm 였고 콘크리트의 온도는 외기온도가 평균 0℃ 임에도 불구하고 평균 21℃ 로 거의 일정하게 유지할 수 있었다.(그림 3 참조) 이와 같은 결과로 부터 동절기에 있어서 일정 온도이상의 온수를 혼합수로 사용함으로써 콘크리트의 슬럼프와 온도를 안정적으로 관리할 수 있음을 알 수 있었다.

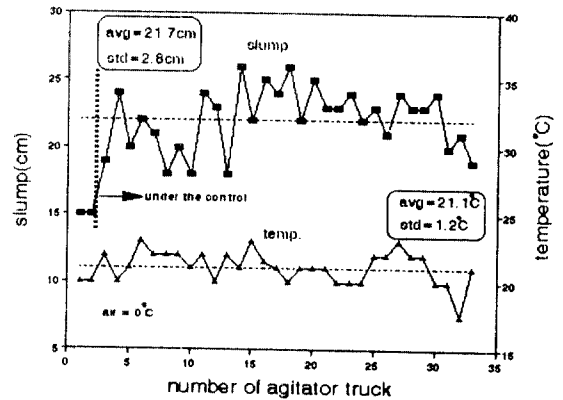


그림 3. 현장도착 슬럼프와 온도 변화

슬럼프는 현장 시공상황에 따라 고성능감수제 첨가율과 세골재의 표면수를 보정하여 조정하였고, 출하 초기의 조정 단계를 제외하고는 슬럼프가 18cm 이하로 떨어지는 경우는 없었다. 또한 공기량은 평균 2.3% 정도로 목표 공기량 범위내에서 큰 변동은 없었다.

그러나 콘크리트의 전반적인 작업성을 슬럼프 시험이나 육안관찰 및 현장 작업자(펌프공, 타설공, 다짐공 등)들의 반응을 종합하여 평가한다면 보통강도 콘크리트에 비하여 작업성의 변동폭이나 타설작업의 난이도가 비교적 큰 것으로 판단된다. 현장 작업자들이 고강도 콘크리트의 작업경험이 없었다는 것과 당시의 시공조건(외기온, 시공법)을 감안한다 할지라도 향후 작업성, 시공성의 개선은 고강도 콘크리트에 있어서 중요한 해결 과제로 다루어 져야 할 것이다.

(2) 수화열

수화열에 의한 콘크리트 온도상승은 중심부가 최고 56.4℃ 까지 상승하였고 이때 부재 표면 근

처(10cm 깊이)와 약 13~15℃ 정도의 온도차를 나타내었다.(그림 4 참조)

일반적으로 설계기준강도 300~450kgf/cm<sup>2</sup>, 단위시멘트량 320~430kgf/cm<sup>3</sup>, 단면폭 30~130cm 인 벽부재의 콘크리트 온도상승은 여름철 타설시 대략 70℃ 정도까지 상승한다고 보고되어 있으나<sup>(1)</sup> 급변 측정값은 이보다 낮은 온도를 기록하였다.

또한 최고온도에 도달하는 시간은 17-20시간 정도 소요되어 기존의 시공사례에서 보고된 값(9시간→8월시공<sup>(2)</sup>, 12-13시간→5월시공<sup>(3)</sup>)과는 큰 차이를 나타내었다. 이러한 결과들은 시공 당시의 외기온(평균기온 0℃)에 의한 영향이 가장 큰 원인일 것으로 추측된다.

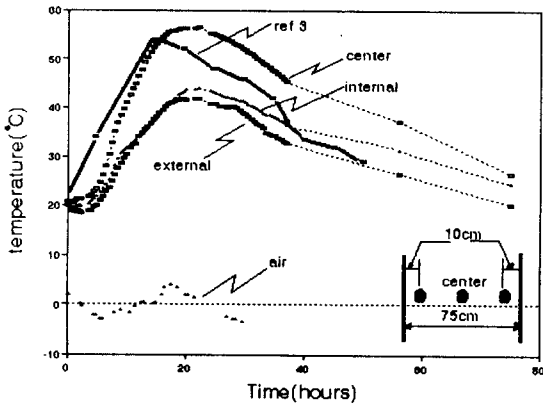


그림 4. 콘크리트 내부 수화온도 상승

### (3) 압축강도 시험결과

압축강도 시험결과 재령 28일에서 648 kgf/cm<sup>2</sup> 을 나타내어 목표강도 600 kgf/cm<sup>2</sup> 을 상회하였고 시험배합시의 강도에 가까운 값을 나타내었다. 또한 압축강도의 표준편차도 30 kgf/cm<sup>2</sup> 으로 비교적 작았다.(그림 5 참조)

저온하의 초기 양생조건이나 제조공정상의 많은 변동요인이 있었음에도 불구하고 이와 같이 양호한 결과를 얻을 수 있었던 원인은 시험시공이라는 특수조건하에서 설계, 제조, 시공의 긴밀한 협조와 엄격한 품질관리에 있었지만 다음과 같은 제조과정의 고려들도 품질 안정 요인으로 작용했다고 판단된다.

- \* 온수 사용 - 동절기 시공 콘크리트의 온도관리
- \* 배척 플랜트 및 운반트럭을 고정 사용함으로써

### 품질변동 요인 감소

- \* 혼합시간(mixing time)의 증가
- \* 표면수 변동의 적절한 대응관리

참고로 그림 6에 슬럼프 변동에 따른 압축강도 변동을 나타내었다. 재령 7일에서는 슬럼프와 압축강도간에 상관성이 약간 나타나고 있으며 재령 28일이 되면 큰 상관성을 보이지는 않았으나 슬럼프 변동에 가장 큰 영향을 미치는 세골재의 표면수 변동이 경화후 압축강도에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 재령 7일의 압축강도는 28일 강도의 평균 75% 정도로서 강도발현이 다소 늦게 나타났는데 이는 양생 초기의 저온에 기인한 것으로 판단된다.

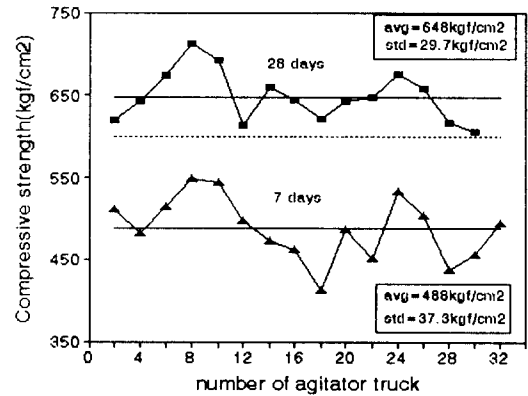


그림 5. 압축강도의 변동

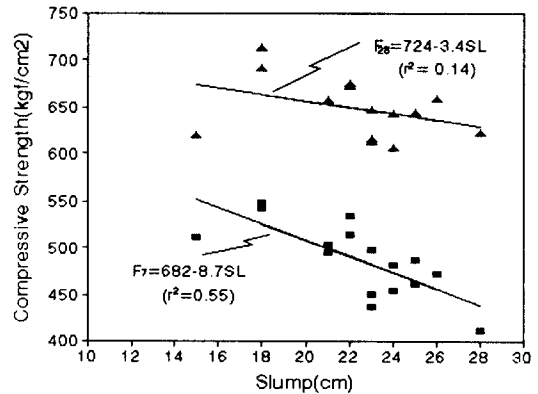


그림 6. 슬럼프와 압축강도와의 관계

압축강도 시험용 공시체를 대기중에 양생시킨 결과 재령 28일에서 520kgf/cm<sup>2</sup> 으로 수중양생

보다 약 80%의 강도발현을 나타내어 양생조건 즉 양생온도와 콘크리트의 습윤상태 유무의 영향을 나타내고 있음을 알 수 있다. (그림 7 참조)

시험방법에 따른 압축강도는 그림 7에 나타난 바와같이 수중양생 > 모의부재코어, 현장 대기양생 > 모의부재 비파괴 > 구조체 비파괴 의 순으로 나타났다. 현장에서 양생한 모의부재의 코어 평균 압축강도는 523kgf/cm<sup>2</sup> 으로 수중양생 공시체의 80% 정도로 나타나, 현장 대기양생 공시체와 거의 동일한 값을 나타내었다.

모의부재와 구조체를 대상으로 슈미트 해머에 의한 비파괴 시험의 추정 압축강도는 실구조물에 대한 시험값이 가장 작게 나타났으며(표 7참조), 추정 압축강도는 제안된 추정식에 따라서 큰 차이를 나타내어 슈미트 해머를 사용한 압축강도 추정은 향후 많은 데이터의 축척과 연구가 필요한 것으로 사료된다.

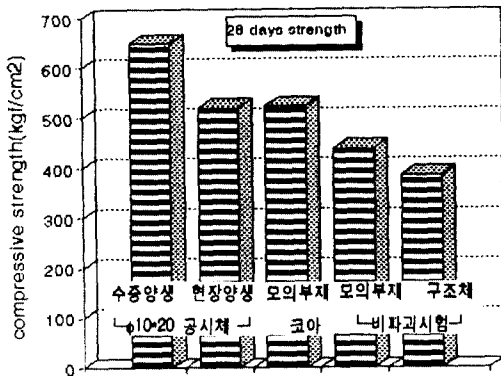


그림 7. 양생조건 및 시험방법에 따른 강도

표 7. 비파괴 시험결과

모의부재		사일로	
타격개소	4	타격개소	13
타격회수	25회이상	타격회수	25회이상
평균 반발경도	44	평균 반발경도	38
추정압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	① 421 ② 525	추정압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	① 377 ② 411
재령계수	1.04	재령계수	1.02
보정압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	① 438 ② 546	보정압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	① 385 ② 419

\* 압축강도 추정식

① 일본건축학회공동실험결과  $f_c = 7.3R_o + 100$

② 한국건축학회  $f_c = 19R_o - 311$

## 6. 맺음말

본 보고는 1994년1월 당사 시멘트 사일로 건설 공사에 배합강도 600kgf/cm<sup>2</sup> 고강도 콘크리트의 적용 과정 및 결과를 정리한 것이다. 본 사례를 통하여 현재 각 레미콘 공장의 품질관리 및 설비 능력으로도 압축강도 600 kgf/cm<sup>2</sup> 수준까지는 고성능감수제를 사용하여 물시멘트비를 줄이고 적절한 품질관리를 행함으로써 충분히 품질을 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

그러나 콘크리트의 품질변동 요인을 최소화하고 안정적으로 품질을 확보하기 위해서는 표면수 변동에 대한 대책과 함께 동결기의 온수사용설비, 하절기 냉각설비 및 콘크리트 물성개선을 위한 각종 혼합재와 혼화제의 투입설비 등도 고려해 나가야 할 것으로 생각된다. 이는 향후 고강도, 고성능등의 고품질 콘크리트뿐만 아니라 일반 콘크리트의 품질을 향상시키는 기본적 조건이 될 것으로 판단된다.

또한 앞으로 고강도 콘크리트의 시공성과 관련된 문제점들을 보완해야 할 것으로 판단되며, 끝으로 본 사례가 일선 건설관련 종사자들에게 콘크리트 강도의 심리적 한계를 극복하는 또하나의 계기가 되길 기대하며 아울러 고강도 콘크리트의 확대보급과 콘크리트의 성능향상을 위하여 관련 연구자들의 광범위한 연구가 계속되길 기대한다.

(감사의 말씀 ; 본 현장적용에 적극 협조해 주신 동양시멘트 건설사업본부, 동양시멘트 부산 공장 및 형주건설 관계자 여러분께 깊은 감사드립니다.)

### <참고문헌>

- 1) 日本建築學會 ; 高強度コンクリートの技術の現状, p.110, 1991.
- 2) 박철립, 권영호 ; 건축구조물에 고강도 콘크리트 현장적용, 콘크리트 학회지, Vol.5, No.4, 1993.12
- 3) 이승훈 외 3인 ; 사무실 건축물에 플라이애쉬를 사용한 500kgf/cm<sup>2</sup>이상의 고강도 콘크리트 시공, 콘크리트 학회지, Vol.5, No.2, 1993.6