

# 고강도 콘크리트 요소기술 확보를 위한 현장 적용성 검토에 관한 연구

A Study on the Investigation of Field Application Properties for Establishing Fundamental Technologies of High Strength Concrete



문형재\*  
Hyung-Jae Moon



차한일\*  
Han-Il Cha



우승민\*\*  
Seung-Min Woo



김영학\*\*\*  
Young-Hak Kim



이주호\*\*\*\*  
Joo-Ho Lee



고주환\*\*\*\*\*  
Joo-Hwan Ko

## 1. 연구개요

최근 도시집중화에 따른 인구과밀화와 시설의 집중으로 초고층 건축이 활성화되고 있으며, 관련기술의 시공능력이 그 나라의 기술력을 가능하는 척도가 되고 있어 초고층 건축에 관한 기술의 중요성이 부각되고 있다. 이러한 상황에서 현재 당사는 100층 이상 초고층 건축물 시공기술을 확보하기 위해 다양한 요소기술에 관한 연구를 진행하고 있다.

현재 당사가 계획중인 잠실제2롯데월드는 주변 레미콘 공장을 선정하여 고강도콘크리트를 반입해야 하므로 품질관리 측면에서 면밀한 사전 검토가 필요하며 특히 매트 기초 콘크리트 균열 저감을 위한 저발열 콘크리트 개발, 기동 축소량 해석에 사용하기 위한 콘크리트 재료특성 검토 등이 수행되어야 한다.

뿐만 아니라 현장 반입된 고강도콘크리트를 500m 높이까지 직접 압송하여 타설할 수 있는 기술 및 이를 위한 레미콘의 슬럼프

플로우 유지시간이 최소 2시간 이상을 유지해야 하며, 공정 단축을 위해 3day cycle을 도입할 경우 재령 15시간에 최소 10MPa 이상 강도가 발현되어야 하는 조기강도 확보가 필수적이다.

따라서 본 기술기사에서는 초고층 건축용 고강도콘크리트 개발 및 시공에 필요한 각종 요소기술에 관하여 잠실제2롯데월드 현장에서 검토되고 있는 고강도콘크리트의 각종 요소기술을 고찰하고자 한다.

## 2. 현장개요

고강도콘크리트 요소기술 적용 대상 현장은 송파구 신천동에 위치한 잠실제2롯데월드 현장(현장소장: 석희철 이사)으로 전경 및 조감도는 <사진 1> 및 <그림 1>과 같다. 잠실제2롯데월드 현장은 대지면적 11,608평, 연면적 220,159평으로 112층으로 높이가 555m로 계획되어 있다<표 1>. 2009년 4월 최종 허가가 승인되었으며, 현장 공정은 최초 토공사 착공 후 개략적으로 50개월 이상으로 계획하고 있다. 특히 본 현장에서는 수직부재 최대 80MPa급 고강도 콘크리트가 적용될 예정으로 전술한 바와 같이 고강도콘크리트 시공을 위한 각종 현장 검토가 사전에 필요한 상황이다.



사진 1. 대상 현장 전경



그림 1. 대상 현장 조감도

표 1. 현장 개요

구분	항목	내용
대지면적	지상층	26,372 평
	지하층	11,608 평
연면적	지상층	136,456 평
	지하층	83,703 평
계		220,159 평
구조	철골 철근 콘크리트조	
층수/높이		555m, 112층

\* 정희원, 롯데건설(주)기술연구소 건축도시연구부 선임연구원 doorbrother@hanmail.net  
 \*\* 정희원, 롯데건설(주)기술연구소 토목구조팀 책임연구원  
 \*\*\* 롯데건설 잠실제2롯데월드 현장 과장  
 \*\*\*\* 정희원, 롯데건설(주)기술연구소 기술연구팀장  
 \*\*\*\*\* 정희원, 롯데건설(주)기술연구소 건축사업본부 부사장

### 3. 수화열 저감을 위한 매스 콘크리트 시공기술 개발

#### 3.1 개요 및 기술개발

본 현장에 계획된 기초는 70m×70m×4m 이상의 대규모 매트기초로서 설계강도는 40MPa급으로 계획되어 있다. 일체화 타설시 품질편차에 의한 불량률 및 수화열에 의한 온도균열 발생 제어를 위해 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그, 플라이 애쉬를 사용한 저발열 3성분계 혼합시멘트를 개발하였고, 고강도 무다짐의 고유동(슬럼프 플로우 650±50mm)의 콘크리트를 개발하였다. 혼합시멘트의 단열온도 결과는 <그림 2>와 같다.

#### 3.2 현장 적용성 평가

##### 3.2.1 평가진행

실내실험을 통해 개발된 혼합시멘트의 현장적용성을 검토하기 위하여 4m×4m×4m의 mock up 구조물을 제작하였다.

<사진 2>와 같이 mock up 부재를 제작하고 온도센서를 매립한 뒤 각종 굳지않은 특성을 검토하였고, 계측기를 통해 콘크리트 온도를 측정하여 최고온도 71℃ 이하, 내외부 온도차 20℃ 이하의 저발열성에 대한 평가 및 코어링을 통한 압축강도 시험 등을 실시하였다.

##### 3.2.2 실험 결과

mock up test 결과, 펌프 압송 전 콘크리트의 슬럼프 플로우는 타설 전 645mm에서 펌프 압송 후에 635mm 내외로 슬럼프 플로우 유지시간은 일정하게 나타났다.

또한 <그림 3>과 같이 콘크리트의 최고온도는 63℃ 이하로, 내외부 온도차도 최대 18℃를 이하로 나타났으며, 코어링을 통

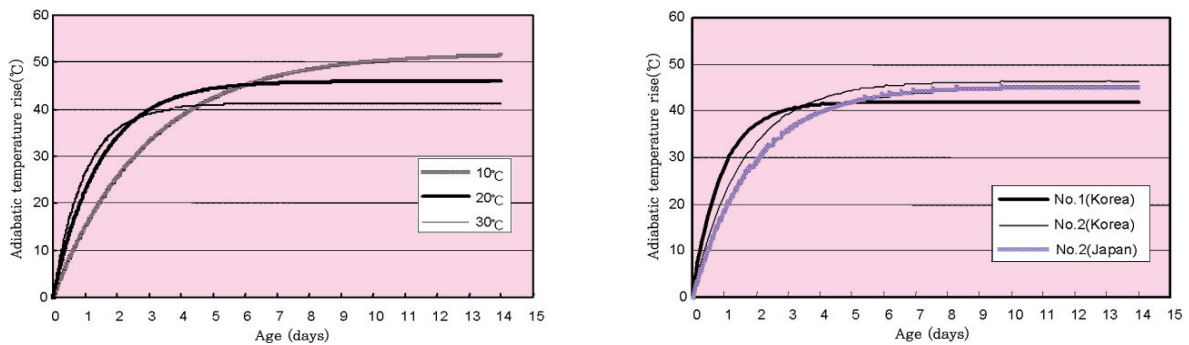


그림 2. 콘크리트 단열온도 상승시험 결과

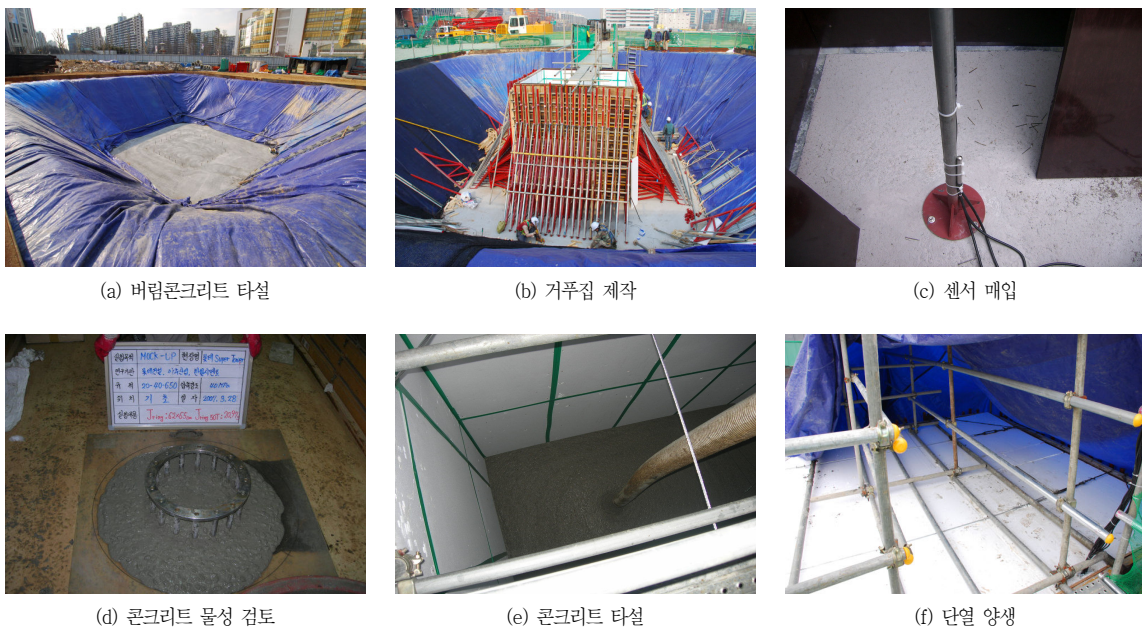


사진 2. 매트기초 테스트 수행 사진

해 채취한 시편으로 수행한 압축강도 시험 결과 <그림 4>와 같이 재령 28일에 50 MPa를 상회하였다.

4. 기동축소량 해석을 위한 수축특성 평가 기술 개발

4.1 개요 및 실험진행

초고층 철근콘크리트 구조물은 크리프 및 건조수축 등의 재료 특성을 가지게 된다.

장기간에 걸친 수축변형은 수직부재의 안정성과 비구조 요소들의 변형을 유발시켜 사용성에 악영향을 끼치게 된다. 따라서 초고층 구조물에 적용되는 콘크리트의 수축특성을 사전에 파악하기 위하여 <사진 3>와 같은 과정으로 국내에서 시험체를 제작하

여 미국 시카고에 위치한 CTL사와 공동으로 크리프 및 건조수축 등의 재료특성을 평가하고 있다.

또한 실측값을 바탕으로 기존 예측식과의 비교 분석을 통해 당사 실험결과에 맞는 예측식을 도출하였고, 현재 기동축소량을 예측할 수 있는 프로그램을 개발 중에 있다.

4.2 평가 예측식 선정

본 기술기사에서는 고강도콘크리트의 수축특성에 대한 예측을 위하여 기존 ACI 209R 식 이외에 Bažant-Baweja B3 model, CEB MC99 model 및 GL2000 model 식을 활용해서 전체 건조수축 변형과 단위 응력당 전체 크리프 변형(compliance)에 대해 기존 실측값을 바탕으로 비교-검토를 실시하였다.

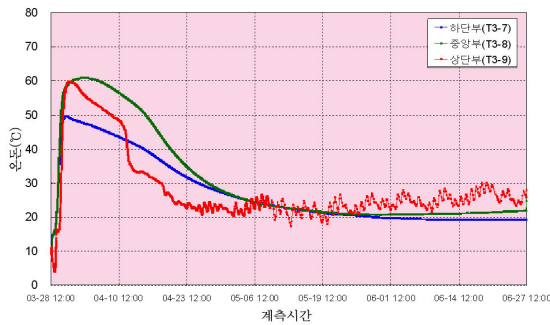


그림 3. 부재 수화온도 측정 결과

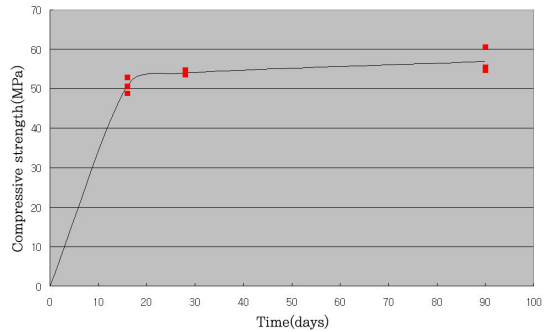


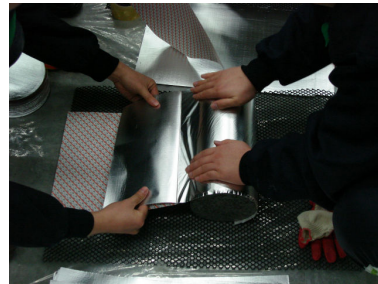
그림 4. 코어강도 측정 결과



(a) 공시체 제작



(b) 양생



(c) 해외발송용 시험체 밀봉



(d) 저장 및 해외발송



(e) 해외전문기관 전경



(f) 수축특성 평가 진행

사진 3. 수축특성 평가 준비 사진

### 4.3 실험결과

50, 60, 70 MPa에 대한 하중재령 7일에서의 건조수축 변형 (shrinkage strain)과 단위 응력당 전체 크리프 변형 (compliance)을 비교분석한 결과는 <그림 5>와 같이 50 MPa의 경우 B3 model과 GL 2000 model식이 전체 건조수축 변형과 가장 근접한 결과를 나타내고 있으며 단위 응력당 크리프 변형의 경우 ACI 209R model식이 실험값과 거의 일치하는 것을 확인하였다.

또한 <그림 6>과 같이 70 MPa의 경우 B3 model과 GL 2000 model식이 재료실험에 의한 전체 건조수축 변형과 근접한 결과를 나타내고 있으며 단위 응력당 크리프 변형의 경우 ACI 209R model 및 CEB MC99 model이 실험값과 거의 일치하게 나타났다. 이상의 결과를 정리하면 <표 2>와 같다.

표 2. 강도별 제안된 예측 모델식

강도	제안된 예측 모델식	
	shrinkage strains	compliance
50 MPa	B3 model & GL 2000 model	ACI 209R model
60 MPa		ACI 209R model & CEB MC99
70 MPa		

### 5. 직압타설을 위한 고강도콘크리트 펌프압송성 테스트 수행

#### 5.1 실험계획 및 진행

직압타설을 위한 고강도콘크리트 펌프압송성 테스트 수행은 잠실제2롯데월드 현장부지에서 50, 60 및 70 MPa 콘크리트 강도 별로 초고층 구조물에 타설될 실제 높이를 수평 길이로 가정하여, <그림 7>과 같은 lay-out을 수립하여 <표 3>과 같이 펌프압송성능, 펌핑 전후 고강도콘크리트의 각종 균지않은 특성 및 경화특성에 대해 측정하고자 하였다.

실험 진행은 <사진 4>와 같은 순서로 진행하였고, 본 테스트에 사용된 펌프는 Putzmeister사의 BSA 14000SHP-D를 활용하였고, 사용된 배관은 직경 125 mm, 배관 두께 8.1 mm 파이프를 사용하였다.

표 3. 펌프압송 테스트 측정항목

대상강도 (MPa)	대상길이 (m)	펌프 성능 측정항목	펌핑 전후 콘크리트 측정항목	
			균지않은 특성	경화 특성
50MPa	520	펌프압 배관압 소음도	슬럼프 플로우 공기량	압축강도
60MPa	400		L 플로우 실험 V 로트 유하실험	휨강도
70MPa	120		U Box 충전실험	코어강도

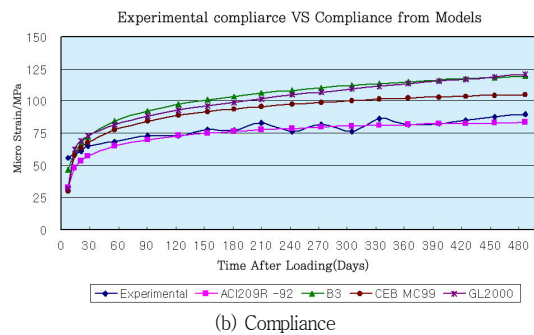
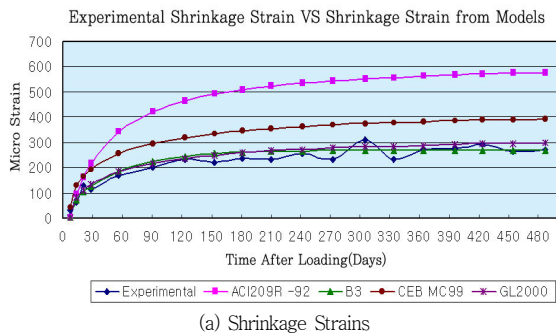


그림 5. 50 MPa 수축특성 평가 결과

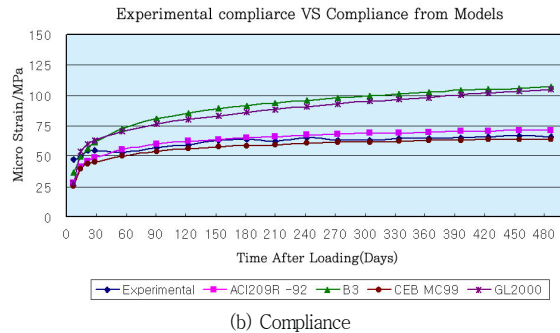
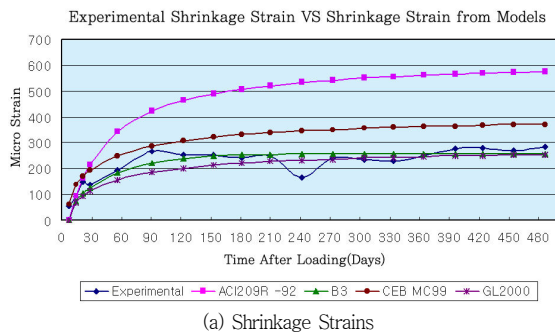


그림 6. 70 MPa 수축특성 평가 결과

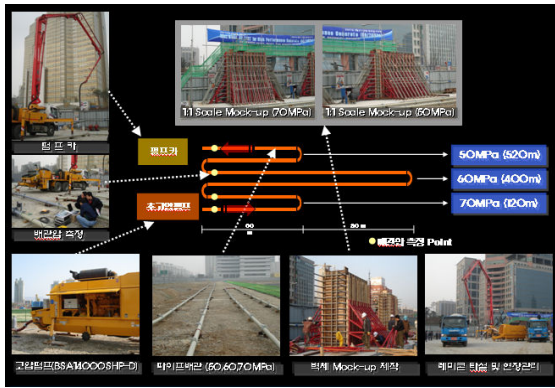


그림 7. 펌퍼빌리티 테스트 lay-out

5.2 실험결과

5.2.1 압송성능 측정 결과

각각의 콘크리트 강도별로 콘크리트의 마찰계수 및 시간당 이론 토출량은 <그림 8>과 같다. 콘크리트의 강도가 높을수록 마찰계수가 높게 나타났으며, 관내 손실량이 커져 콘크리트 슬럼프 저하의 과다 및 및 이론 토출량은 감소하였다. 또한 강도별로 파이프에 걸리는 최대 압력은 <그림 9>와 같다.

<그림 10>은 동일 길이선상에서 콘크리트 강도에 따른 초기 배관압과 120m지점 도달시 배관압의 차이를 측정한 것으로 50 MPa의 경우 배관압이 18% 감소하여, 60 및 70MPa의 감소율 42%, 77%에 비해 상대적으로 작게 나타났으며, 마찰계수 또한 낮게 나타났다. 배관압 감소는 마찰계수의 증가를 발생시키

고 이는 시간당 타설량을 감소시키기 때문에 배관압 감소율을 최소화하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

5.2.2 굳지않은 특성

펌핑 전후 콘크리트 물성 검토 결과는 <그림 11>과 같다. 최초 공장 B/P 생산 및 현장 도착후 펌핑 전까지 고강도콘크리트의 슬럼프 플로우는 목표 요구성능인  $65 \pm 5$  cm을 만족하였으나, 펌핑 후 30% 정도의 플로우 loss가 발생하였다. 또한 공기량의 경우 펌핑 전까지 대부분  $3.0 \pm 1.0\%$  내의 범위로 나타났고, 펌핑 후에 있어서는 50 MPa의 상승효과가 45%로 가장 큰 것으로 나타났는데 이는 흡입과정에서 콘크리트 투입시 피스톤 내부에 100% 충전이 이루어지지 못하여 갇힌 공기(entrapped air)가 추가로 투입된 것으로 판단된다.

V로트 유하시간 측정 결과 강도구분에 관계없이 유사한 경향을 나타내었다.

5.2.3 경화특성

실험결과 <그림 12>와 같이 강도수준에 관계없이 압축강도가 모두 28일 설계강도를 만족하는 것으로 나타났고, 91일까지 강도를 측정한 결과 50 MPa의 경우 지속적으로 강도가 상승한 반면 60 MPa 및 70 MPa의 경우 강도발현율이 상대적으로 저하하는 것으로 나타났다. 양생방법에 따른 강도 측정 결과, 20°C 실내양생을 실시한 시험체의 경우 5 ~ 10°C인 현장양생에 비해 약 4 ~ 10% 정도 높은 강도를 발현하였고, 펌핑 전후에



사진 4. 펌프압송성 테스트 수행 사진

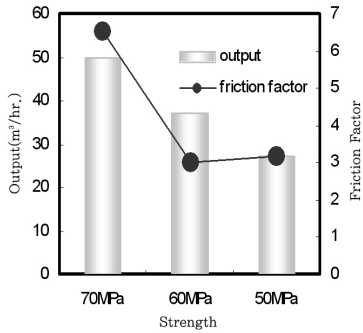


그림 8. 강도별 마찰계수에 따른 토출량 비교

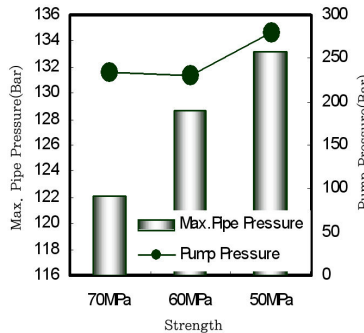


그림 9. 최대 파이프 압력에 따른 펌프압력 비교

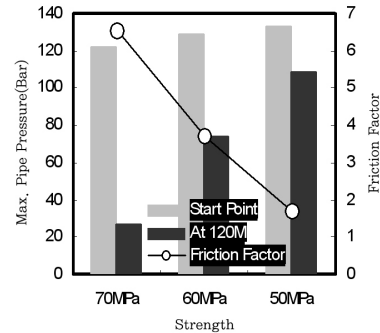
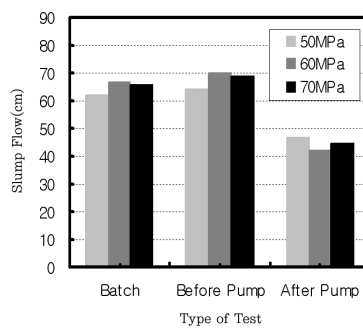
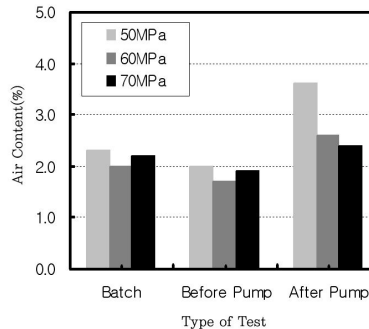


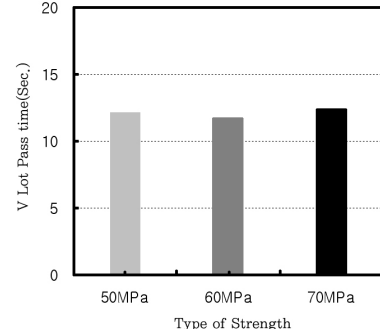
그림 10. 동일지점에서의 파이프 압력



(a) 슬럼프 플로우 변화



(b) 공기량 변화



(c) V 로트 유하시간 변화

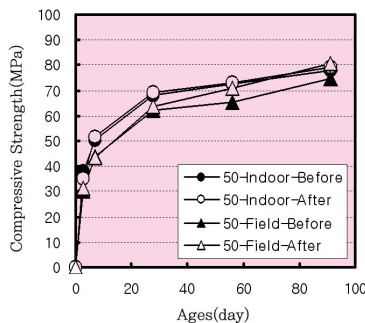
그림 11. 펌핑 전후 콘크리트 굳지않은 특성 검토 결과

다른 콘크리트 강도 차이는 펌핑 후가 펌핑 전에 비해 약 3 ~ 5% 정도 높게 발견되었다. 이는 펌핑과정에서 콘크리트 내부의 단위수량이 감소하였고, 펌핑 압력에 의한 압밀 작용으로 인하여 콘크리트 내부 조직이 치밀해졌기 때문인 것으로 판단된다.

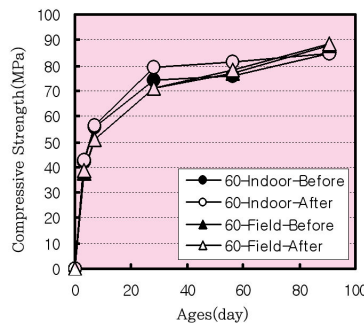
6. 시공효율화를 위한 1:1 Scale Mock-up Test

6.1 실험계획 및 진행

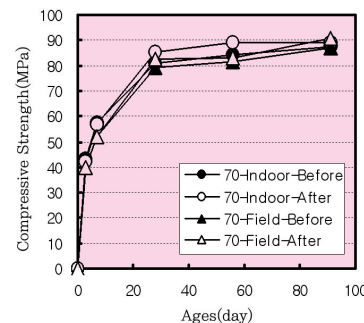
현재 콘크리트표준시방서에서는 하단이 구속된 500mm 이상의 벽체 형식 구조물을 매스 콘크리트로 규정하고 있다. 일반적으로 초고층 건축물의 경우 내부코어의 최소 두께가 600mm 이상이며, 철근간격이 조밀할 것으로 예상되기 때문에 고유동 콘크리트의 철근배근 상태에 따른 벽체 충전성 검증 여부가 반드시 선행되어야 한다. 따라서 본 현장에서는 <그림 13>과 같은 1:1 scale의 거푸집을 제작하여 <표 4>와 같은 측정항목에 대한 실험을 계획하였다. 펌프압송 테스트와 같은 날 진행된 1:1 Mock-up



(a) 50 MPa



(b) 60 MPa



(c) 70 MPa

그림 12. 재령별 콘크리트의 압축강도

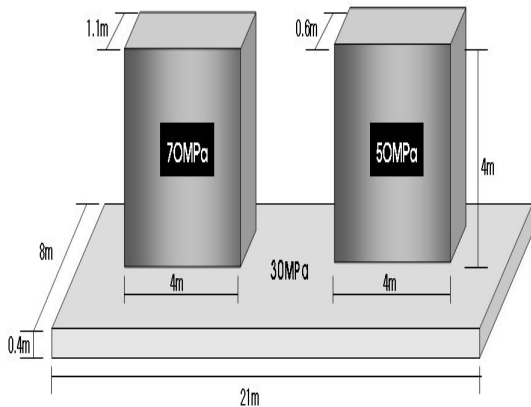


그림 13. 1:1 Mock-up Test Lay out

표 4. 1:1 Mock-up Test 실험계획

측정 항목	측정 계획
거푸집 측압	- 상/중/하부로 나뉜 높이별로 측압계 매립 후 측정
수화온도	- mock-up에 총 6군데 온도계 매립 - 상/중/하부지점에 각각 설치
코어강도	- 상/하부로 나뉜 3개씩 측정 후 평균값/재령 28, 91, 180일 측정
거푸집 충전상태	- 배근상태에 따른 거푸집 충전상태 육안 관찰
균열발생유무	- 육안 관찰

Test 실험 장면은 <사진 5>와 같은 순서로 진행하였다.

## 6.2 실험결과 및 고찰

### 6.2.1 코어강도 및 건조수축 측정 결과

코어강도 측정결과는 <그림 14>와 같이 재령 28일에 70MPa의 경우 73MPa, 50MPa의 경우 60MPa로서 강도에 관계없이 모두 목표설계기준강도 이상을 발현하였다. 재령 180일에서 코어강도는 50MPa는 69MPa, 70MPa는 80MPa로 28일 대비 각각 116%, 110% 압축강도가 높게 발현되었다.

한편 구조체 부위에 따른 강도 발현 여부는 타설시 콘크리트의 충전에 따른 압밀효과로 하부에서 채취한 코어의 압축강도가 상부에서 채취한 코어의 압축강도에 비해 다소 높게 나타났다.

고강도콘크리트의 건조수축 측정결과는 <그림 15>와 같이 재령 28일 이후부터 수렴하기 시작하여 재령 91일에서  $-200 \times 10^{-6}$ 의 값을 나타내었다.

### 6.2.2 수화온도 측정 결과

수화온도 측정결과는 <그림 16>과 같이 70MPa의 경우 수화 최대온도는 80.5℃ 정도로 나타났고, 내외부 온도차이는 최대 31.9℃로 나타났다. 탈형 후 표면에서 내외부 온도차이로 인한 균열은 발생하지 않았는데, 이는 70MPa의 경우 거푸집 탈형시까지는 3일간의 양생기간을 거쳤고, 수화최고온도 이후에 최대 간격이 벌어져서 온도 팽창에 의한 균열 저항성이 확보된 것으로 판단된다. 한편 50MPa의 수화최대온도는 최대 57.3℃, 내외



(a) 버림콘크리트 타설



(b) 기초 제작



(c) 벽체 철근 설치



(d) 거푸집 제작 완료



(e) 콘크리트 타설



(f) 코어링 실시

사진 5. 1:1 Mock-up 테스트 수행 사진

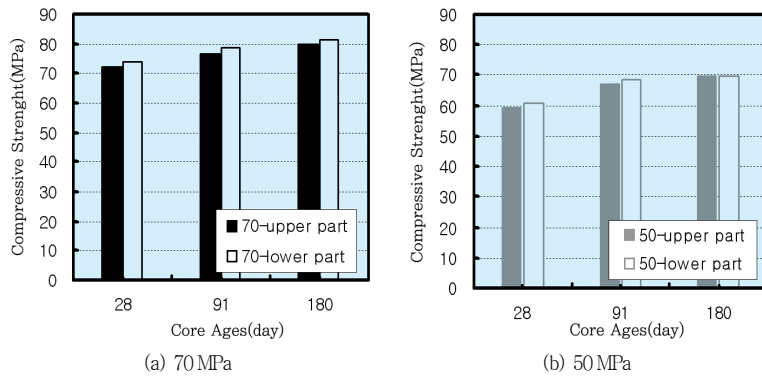


그림 14. 코어강도 측정 결과

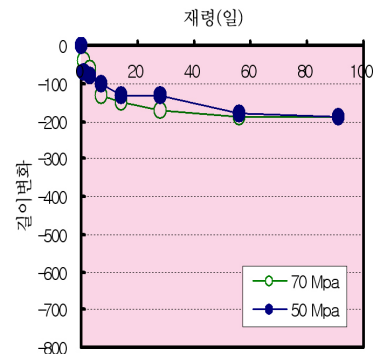


그림 15. 건조수축량 측정 결과

부 온도차이는 최대 10.5℃ 정도로 나타났고, 중앙부와 상하부 온도편차는 유사하게 나타났다.

7. 결 론

500 m 이상 초고층 건축물 시공을 위한 수화열저감 매스 콘크리트 기술, 기동축소량 해석을 위한 재료특성 평가 기술, 직압타설을 위한 펌프압송성 기술, 시공효율화를 위한 1:1 mock-up test 평가 기술 등의 고강도콘크리트 현장 적용성 검토에 관한 연구 결론은 다음과 같다.

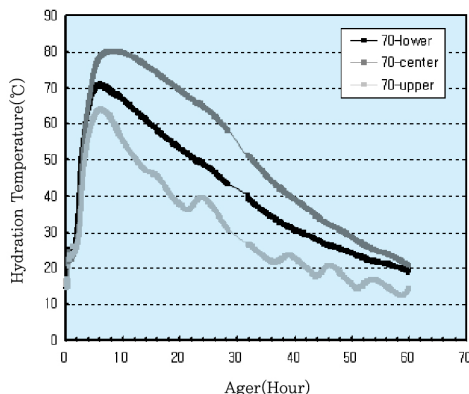
- (1) 매트기초용 mock-up test 결과, 펌프 압송 전 콘크리트의 슬럼프 플로우는 타설 전 645 mm에서 펌프 압송 후에 635 mm 내외로 슬럼프 플로우 유지시간은 일정하게 나타났다. 또한 콘크리트의 최고온도는 63℃ 이하로, 내외부 온도차도 최대 18℃를 이하로 나타났으며, 코어링을 통해 채취한 시편으로 수행한 압축강도 시험 결과 재령

28일에 50 MPa를 상회하였다.

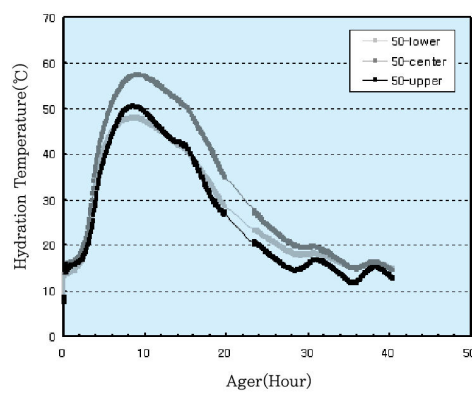
- (2) 50, 60, 70 MPa에 대한 건조수축 변형(shrinkage strain)과 단위 응력당 전체 크리프 변형(compliance)을 비교분석한 결과 <표 5>와 같은 강도별 예측모델을 제안하였다.
- (3) 초고층 직압 타설을 위한 고강도콘크리트 펌퍼빌리티 테스트 결과로서 마찰계수가 높을수록 관내 손실량이 커져 콘크리트 토출량은 감소하였고, 배관길이가 길수록 초기 파이프 압력은 높게 나타나며, 펌프압력도 증가하였다. 따

표 5. 강도별 제안된 예측 모델식

강도	제안된 예측 모델식	
	shrinkage strains	compliance
50 MPa	B3 model & GL 2000 model	ACI 209R model
60 MPa		ACI 209R model & CEB MC99
70 MPa		



(a) 70 MPa




(b) 50 MPa

그림 16. Core Wall 수화온도 측정 결과



라서 향후 시공시 파이프 직경 및 콘크리트의 점성을 낮출 수 있는 방안 등에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

- (4) mock-up test 결과 코어강도 측정 결과는 제령 28일 강도에 관계없이 모두 목표설계기준강도 이상을 발현하였고, 벽체 수화최고 온도는 70 MPa에서 80.4℃, 50 MPa에서 57.4℃로 발생하였고, 내외부 차이는 70 MPa은 31.9℃, 50 MPa은 10.5℃ 정도 발생하였으며, 표면에 실제 균열은 발생하지 않았다. 

참고문헌

1. 전준영, “고유동/고강도 콘크리트의 물성에 미치는 혼합재의 영향성 검토”, 제28회 시멘트 심포지엄, 2001, pp.113 ~ 121.
2. 김은겸, 최재진, 전찬기, 이호석, “일본의 고유동 콘크리트 개발 및 사용현황”, 한국콘크리트 학회지, Vol. 14, No. 4, 2002, pp. 66 ~ 71.
3. ACI Committee 209, Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete, American Concrete Institute.
4. Bradley D. Townsend, “Creep and Shrinkage of a High Strength Concrete Mixture”, MS Thesis Submitted to Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2003.
5. Hanil Cha, Concrete Test for Creep and Shrinkage Properties on High Strength Concrete, KCI 2008.
6. 지석원, 서치호, “초고층 건축물에서 콘크리트 펌프 압송 기술의 발전”, 대한건축학회지, Vol. 50, No. 4, 2006. 04, pp. 66 ~ 71.
7. 김영균, “펌프 압송에 의한 굳지않은 콘크리트의 특성 변화에 관한 실험적 연구”, 건국대학교 대학원 석사학위논문, 2005.
8. 전성식, 김상현, 지석원, 서치호, 김옥중, 이도범, “펌프압송 시 압력 변화에 따른 콘크리트 물성변화 규명을 위한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회 논문집(III), 2006, pp. 613 ~ 616.
9. 이승환, 윤용호, 정용욱, “Mass 콘크리트의 수화열 저감을 위한 Fly-ash 사용 Mock-up Test 및 현장 적용 실험”, 한국레미콘공업협회지, Vol. 70, 2002. 01, pp. 35 ~ 47.
10. 김규동, 이승훈, 김명식, 손유신, 김한준, “초고층 빌딩 적용을 위한 설계강도 800kg/cm<sup>2</sup> 고강도 콘크리트의 개발”, 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회 논문집, Vol. 14, No. 1, 2002, pp. 55 ~ 60.

담당 편집위원 : 이상수(한밭대학교) [sslee111@hanbat.ac.kr](mailto:sslee111@hanbat.ac.kr)

◇◇◇ 정직 회원 복권 안내 ◇◇◇

우리 학회 창립 20주년을 맞아 2009년 제2차 이사회(2009. 2. 19) 의결로 자격 정지 및 상실 회원에 대하여 아래와 같은 조건으로 회원 자격을 복권하여 학회 활동 활성화에 기여하고자 하오니 회원 여러분의 많은 관심 바랍니다.

♣ 대상 : 정회원 · 특별회원 · 도서관 회원

① 정회원

- 종신 회비 또는 2년 분 연회비 100,000원을 납부할 경우 미납 회비 전액 면제하고 회원 자격 복권함.  
다만, 학회지 · 논문집은 소급하여 지급하지 않음.

② 특별 · 도서관 회원

- 금년회비를 납부할 경우 미납 회비 전액 면제하고 회원 자격 복권함.  
다만, 학회지·논문집은 소급하여 지급하지 않음.

③ 준회원(해당 없음)

♣ 시행 기한 : 2009. 06. 30까지

♣ 문의처 : 학회 사무국 안선애 과장(전화 02-568-5985 ~ 7)