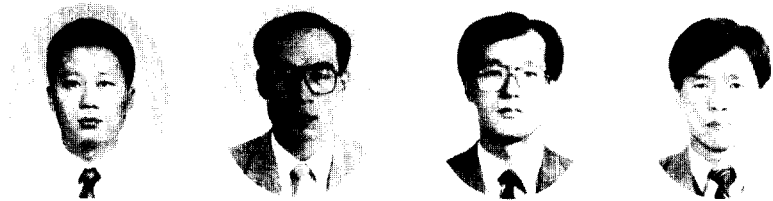


사무실 건축물에 플라이애쉬를 사용한 500kg/cm² 이상의 고강도콘크리트 시공

Construction of High-Strength Concrete over 500kg/cm² Utilizing Flyash in Office Building



이 승 훈* 오 정 근* 박 희 민** 신 성 우***

1. 序 論

1.1 배경

삼성종합건설(주) 기술연구소는 지난 3년간 ('90~'92년) 「고강도콘크리트의 개발 및 실용화」 프로젝트를 가지고 한양대학교 신성우교수팀과 산학협동을 통하여 강도 500kg/cm² 이상의 고강도콘크리트의 제조, 운반 및 타설에 관한 전반적인 실험 및 현장적용을 하였으며, 또한 고강도콘크리트에서 보,기둥, 보-기둥 접합부 등과 같은 구조부재의 거동을 규명하기 위한 실험을 함으로써 고강도콘크리트를 현장적용함에 따른 모든 제한준비를 끝마쳤다.

그러나 지난 '92년까지 건설부 제정 건축공사 표준시방서(1986년)에 나타난 고강도콘크리트의 정의는 270~360kg/cm² 범위로 한정되어 있어서

설계부터 시공까지 고강도콘크리트를 적용하는 진정한 의미의 고강도콘크리트 적용에 많은 제약이 있어왔다. 그러나 '93년에 들어서서 극한강설계에 기준하여 콘크리트의 설계강도를 420kg/cm²까지 허용함으로써 당 연구소는 건축구조물의 경우 국내에서 사무실 건축물에 처음으로 구조설계강도가 420kg/cm²이고 현장강도가 500kg/cm² 이상인 고강도콘크리트를 양재동 소재 삼성생명사옥 현장에 적용하는 기회를 마련하게 되었다. 따라서 본 프로젝트는 국내에서 420kg/cm² 이상의 고강도콘크리트로 설계 및 시공되는 최초의 건물로서 향후 이 분야의 발전에 계기가 될 것으로 보인다.

1.2 목적

본 프로젝트는 구조설계기준강도가 420kg/cm²로 그리고 현장강도가 500kg/cm² 이상으로 설계된 삼성생명 양재사옥 현장에 '91년 산본 아파트 현장에 적용한 '플라이애쉬를 첨가한 고강도콘크리트'를 보-기둥 강결점 구조의 사무실 건축

* 삼성종합건설 기술연구소 연구원
** 삼성종합건설 기술연구소 시험실 과장
*** 한양대학교 건축공학과 부교수

물에 처음으로 적용함에 있어 고강도콘크리트의 제조, 운반 및 타설에 따른 시공상의 제반 문제점을 밝히며, 또한 콘크리트의 수화온도를 측정하여 내부 수화온도와 외기온도의 차로 인한 열균열(thermal crack)에 대한 문제점을 밝히고 기둥으로부터 보방향으로의 고강도콘크리트의 내민길이에 따른 시공 및 구조적기둥을 규명함으로써 향후 초고층구조물에의 고강도콘크리트 적용에 관련된 제반 문제점 해결에 그 목적을 두었다. 이를 위한 구체적 내용은 아래와 같다.

첫째, 동양레미콘 뱃쳐플랜트(B/P)에서 당사가 결정한 최적배합비의 고강도콘크리트를 생산, 운반 및 타설함으로써 현장생산이 아닌 수송거리가 먼 일반 뱃쳐플랜트에서의 생산에 따른 문제점들을 분석하고 그 해결방안을 제시하고자 한다.

둘째, 기둥내부와 표면에서 발생하는 수화열에 의한 상승온도와 외기온도와의 차이를 측정하여 고강도콘크리트에서 큰 문제가 되고 있는 높은 수화열로 인한 열균열(thermal crack)문제를 플라이애쉬를 섞은 고강도콘크리트에서 그 해결방안을 제시하고자 한다.

셋째, 보-기둥 접합부에서 기둥에서 보측으로 고강도콘크리트의 내민길이가 확보에 따른 실구조물에서의 시공성 및 구조적 문제점 등을 검토하여 이에 대한 해결방안을 제시하고자 한다.

넷째, 기둥 및 보 내부에 각각 콘크리트 및 철근 재지를 설치하여 고강도콘크리트를 적용한 구조물의 이론적인 거동과 실제거동을 비교, 분석하여 앞으로 고강도콘크리트를 적용하는 고층 구조물의 설계에 대한 기초자료를 축적하고자 한다.

따라서 이번 양재동 삼성생명사옥은 국내에서는 처음으로 설계부터 시공까지 구조설계강도가 420kg/cm²이고, 현장시공강도가 500kg/cm² 이상인 고강도콘크리트를 사무실 건축물에 적용하여 지상 1층부터 6층까지 동일한 기둥 크기가 되도록하여 단면의 축소 및 거푸집의 효율적인 사용을 도모하였고, 콘크리트의 수화열과 콘크리트 및 철근의 변형율을 계측하여 접합부에서의 고강도콘크리트 내민길이에 따른 시공 및 구조적성능을 최초로 실구조물에서 규명하였다는 점에서 의의를 찾을 수 있겠다.

2. 공사개요

2.1 공사 개요

본 프로젝트의 대상인 삼성생명 양재사옥에 대한 개요는 아래의 표 1에 나타난 바와 같다.

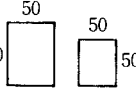
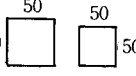
표 1 공사개요

명칭	내 용	명칭	내 용
위치	서초구 양재동 106-2, 3번지	공사기간	'92년 12월~'93년 12월
시공주	삼성생명 주식회사	건물구조	철근콘크리트조
설 계	삼우종합건축사사무소(주)	층 수	지하 2층, 지상 6층
시공회사	삼성중공업(주) 건설사업본부	용 도	사무실

2.2 설계 개요

본 프로젝트에서는 고강도콘크리트가 효과적인 압축부재인 기둥에만 구조설계기준강도가 420kg/cm²이고 현장강도가 500kg/cm² 이상인 고강도콘크리트를 적용하였으며, 보 및 슬래브에는 240kg/cm²의 보통강도 콘크리트로 시공하였다. 다음은 고강도를 사용한 기둥의 층별 설계강도 및 크기를 나타낸 것이다.

표 2 층별 설계강도 및 기둥의 크기

부재 구분	층 구분	강도(kg/cm ²)	부재의 크기(cm)
기둥	지하 1, 2층	240	70  50
	지상 1, 2층	420	60  50
	지상 3, 4층	300	
	지상 5, 6층	240	

3. 고강도콘크리트의 제조

3.1 재료의 선정 및 물성

고강도콘크리트의 제조를 위해서는 사용하는 각 재료에 대한 선택에서부터 세심한 주의를 기울여 요구하는 품질기준을 반드시 만족하는 것을 선택해야 한다. 본 프로젝트에서 사용된 재료는 당

사에서 제작한 「고강도콘크리트 시공지침서」의 기준에 적합한 것을 사용하였다.

고강도콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비해서 낮은 물-시멘트비를 가지므로 유동성이 감소되는 것을 막기 위하여 고유동화제(super-plasticizer)를 첨가하였다. 특히 본 프로젝트에서는 고강도콘크리트의 제조시에 시멘트량의 증가로 인한 수화열의 증가로 인해서 열균열이 발생하는 것을 방지하기 위하여 보통강도 콘크리트에서는 잘 사용되고 있지 않은 플라이애쉬(fly-ash)를 혼합재로서 사용하였다.

3.1.1 시멘트

시멘트는 동양시멘트에서 생산되고 있는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 그 물성은 표 3과 같다.

표 3 시멘트의 물성시험 결과

물리적 특성				화학적 특성			압축강도		
비중	분말도 (cm ² /g)	응결		강열감량 (%)	MgO	SO ₃	3일	7일	28일
		초결 (h:m)	종결 (h:m)						
3.15	3237	3:21	5:27	0.67	2.55	2.2	193	277	386

3.1.2 잔골재

잔골재는 인천 해사를 세척한 것으로 현재 동양시멘트 안양공장에서 사용하고 있는 것을 채취하여 고강도콘크리트의 생산에 앞서 사전 시험을 수행하였다. 「고강도콘크리트 시공지침서」에서 규정하고 있는 조립율은 워커빌리티나 압축강도의 발현을 위해서 2.5이상을 권하고 있으며 3.0 정도가 가장 좋은 것으로 나타났다. 사전 시험의 결과는 아래의 표 4에 잘 나타나 있으며 본 프로젝트에서 사용한 잔골재의 조립율은 2.92로 나타나 상당히 양호한 것으로 판명되었다.

표 4 잔골재의 물성시험 결과

종류	비중	흡수율	조립율	안정성	단위중량	비고
해사	2.606	0.78	2.92	1.39	1.658	-

3.1.3 굵은 골재

고강도콘크리트에 사용하는 굵은 골재는 콘크리트의 강도 및 워커빌리티에 미치는 영향이 크므로 세심한 주의가 요구 된다. 본 프로젝트에서 사용한 굵은 골재는 경기도 화성군 비봉 석산에서 채취한 것으로 최대크기가 25mm인 쇄석골재를 사용하였으며, 물성시험 결과는 표 5와 같다.

표 5 굵은골재의 물성시험 결과

종류	비중	흡수율	조립율	마모율	단위중량	안정성
쇄석	2.645	0.50	6.85	17.9	1.519	0.21

3.1.4 혼화재료

(1) 플라이애쉬 (fly-ash)

플라이애쉬는 화력발전소등의 연소보일러에서 부산되는 석탄재가 연소 폐가스중에 포함되어 집진기에 의해서 회수된 특징입도 범위에 속하는 포졸란계를 대표하는 혼화재 중의 하나로써 그 성질은 사용되는 탄의 종류(CaO 함량의 변화)와 연소의 구조, 운전상태, 집진기의 형태 등에 따라서 달라진다.

콘크리트에 플라이애쉬를 혼합하므로써 얻어지는 장점은 여러가지가 있으나 유동성의 개선, 장기강도의 개선, 수화열의 감소, 알카리 골재반응의 억제, 황산염에 대한 저항성, 콘크리트의 수밀성 향상 등을 들 수 있다.

본 시험에서 사용된 플라이애쉬는 충남 보령산으로 유연탄계이며 이대 대한 물성시험 결과는 표 6과 같다.

표 6 플라이애쉬의 물성시험 결과

구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	강열감량	습윤
KSL 5405	70 이하	70 이하	70 이하	-	5.0 이하	1.0 이하
Sample	55.6	26.41	5.36	0.05	4.90	0.20

(2) 고유동화제 (super-plasticizer)

고강도콘크리트는 낮은 물-시멘트비로 인해서 점성이 높아지고, 슬럼프가 줄어들기 때문에 콘크리트의 유동성을 증진시키기 위해서 고유동화제를 반드시 사용해야 한다. 이러한 고유동화제는 크게 멜라민계, 나프탈렌계, 변형 리그닌계의 세

가지로 나누어 지는데, 이번 프로젝트에서는 미국의 Grace사 제품인 나프탈렌계의 Super-20을 사용하였다.

고유동화제의 사용량은 반드시 시험배합에 의해서 결정되어야 하며 물에 희석하여 사용하는 경우는 희석시 사용하는 물을 배합수로 계산하여야 한다. 또한 같은 슬럼프를 가지더라도 고유동화제를 투여한 고강도콘크리트의 슬럼프 저하는 고유동화제를 투여하지 않은 보통강도 콘크리트의 슬럼프 저하보다 일정시간이 경과한 후에 훨씬 빠르게 일어나기 때문에 레미콘 공장으로부터 현장까지의 운반시간을 고려하여 시간경과에 따른 슬럼프 손실량을 계산하고 소요의 슬럼프를 얻을 수 있는 투여량을 결정하여야 한다. 또한 레미콘 트럭이 현장에 도착하자마자 슬럼프 시험을 하여 현장에서의 추가투여 여부를 결정하는 것도 반드시 거쳐야 하는 과정 중의 하나이다.

아래의 표 7는 유동성 확보를 위해서 본 프로젝트에서 사용한 고유동화제의 특성을 나타낸 것이다.

표 7 고유동화제의 특성

품명	규격	주성분	기술자시방서	비중	PH	형태	고형분 (%)	표준사용량
(*) Super-20	고유동화제	(**) N	ASTMC 494 TYPE A & D	1.202	8.12	암갈색 액체	40.7	시멘트 중량의 0.36~3%

주) (*) Super-20 : 미국 Grace사 제품

(**) N : Naphthalene 계

3.2 시험배합

설계기준강도 420kg/cm², 시공성을 고려한 슬럼프 18cm등의 조건을 만족하는 최적배합비를 결정하기 위하여 안양공장에서 쓰고있는 시멘트, 골재 및 플라이애쉬를 가지고 시험배합을 수행하였다. 이때 사용한 믹서는 강제교반식으로 그 용량은 0.2m³이다. 시험배합은 '91년 산본 아파트 현장에서 적용한 배합을 근거로 하여 본 프로젝트에 적합한 배합으로 수정하였으며, 각 시험배합에 따라 1,3,7,28일의 압축강도를 측정하기 위하여 Φ10 × 20cm 공시체를 재령별로 각각 3개씩 제작하였

다. 각 공시체의 압축강도시험 결과 아래의 표 8에 나타난 배합비가 본 프로젝트에 가장 적합한 최적 배합비로 결정되었다.

표 8 최적배합표

W/C	S/A	물 (kg)	시멘트 (kg)	조골재 (kg)	세골재 (kg)	F/A (%)	SP제 (%)	슬럼프 (cm)
33	40	175	450	969.3	663.6	79.0	1.00	20

4. 고강도콘크리트의 현장타설 및 품질관리

4.1 레미콘공장의 선정

레미콘공장의 선정은 공장의 생산여건, 현장까지의 운반시간 등을 고려하여 동양시멘트 안양공장을 선정하였다. 레미콘공장에서 현장까지의 거리는 약 20km정도로서 운반에 소요되는 예상시간은 40~60분 정도였다.

고강도콘크리트의 경우 낮은 물-시멘트비와 고유동화제의 첨가로 인해서 기존의 배합시간으로는 소요의 슬럼프를 만족하는 양질의 콘크리트를 생산하기가 어려우므로 बै처(Batcher)내에서의 배합시간을 약 2배로 늘여 주었다.

4.2 콘크리트의 제조 및 운반

고강도콘크리트의 생산에 앞서 사용하는 모든 재료에 대한 물성시험을 공장 자체에서도 수행하였으며, 시험배합시에 실시한 물성시험 결과와 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

안양공장에서 보유하고 있는 믹서는 용량이 2.3m³인 강제식믹서로서 재료의 투입순서는 시험실의 경우와는 다소 차이가 있었다. 시험실에서의 배합은 먼저 골재와 시멘트 및 플라이애쉬를 투입하여 일정시간 건비빔을 수행하고나서 물을 투여하여 다시 배합을 수행한 뒤 액상의 고유동화제를 투여하여 최종적으로 배합하는 순서를 따랐다. 그러나 레미콘공장에서 수행하고 있는 배합방법은 시험실의 경우와는 그 투입순서가 다르며 재료의 투입순서는 모래+물(고유동화제 포함) → 굵은

골재 → 플라이애쉬 → 시멘트의 순으로 하였다.

배합시간은 위에서도 언급했던 것처럼 기존의 보통강도 콘크리트에 비해서 약 2배로 늘여 주었다.

본 프로젝트에서는 고유동화제를 물과 혼합하여 투여하였으며 혼합재인 플라이애쉬는 현재 별도의 투입구가 없어서 인력으로 투여하였다. 그러나 앞으로는 별도의 투입구가 제작되어 자동계량으로 투입되는 것이 바람직하다고 생각된다.

고강도콘크리트를 현장까지 운반하기 위해서 일반적으로 사용되고 있는 레미콘 트럭을 사용하였으며, 본 프로젝트의 1일 타설 물량인 16m³를 3대의 레미콘 트럭에 나누어 운반하였다. 이는 7m³용 레미콘 트럭에 5~6m³정도의 레미콘만을 담아서 운반함으로써 현장 도착후에 운반시간, 온도, 현장여건 등에 의해서 고유동화제를 추가로 투여할 경우 추가 투여된 고유동화제가 기존의 콘크리트에 잘 혼합이 되도록 하기 위해서 이다.

1차 및 2차 타설시의 운반시간은 약 35~50분 정도 였으나 대기시간을 포함하여 타설하기까지 약 50~60분 정도의 시간이 소요되었다. 이 경우 출발시 측정 한 슬럼프에 비해서 약 3~5cm 정도의 슬럼프손실이 발생하여 현장에서 미리 준비한 고유동화제를 0.1~0.3% 정도 추가 투여함으로써 시공에 적합한 소량의 슬럼프를 얻을 수 있었다.

4.3 현장 시험

공장에서 생산된 고강도콘크리트를 현장까지 운반한 후 타설 직전에 슬럼프 및 공기량 측정시험을 수행하였다. 현장 도착후의 슬럼프 측정시험은 고유동화제의 추가 투여여부를 결정해야 함으로 반드시 실시하여야 한다. 또한 펌핑 후에도 슬럼프를 측정하여 펌핑 높이에 따른 슬럼프의 변화량을 측정해 볼 필요가 있다. 본 프로젝트에서는 지상 1층 및 2층의 높이에 타설을 한 경우의 슬럼프

표 9 슬럼프 및 공기량 측정 결과(고유동화제 첨가 후)

구분	1st Truck		2nd Truck		3rd Truck	
	Slump	Air	Slump	Air	Slump	Air
Pumping 전	20.0	0.5	18.0	0.4	21.0	0.6
Pumping 후	21.0	0.6	19.0	0.4	21.0	0.6

프 및 공기량의 변화를 측정 한 것으로 표 9는 고유동화제를 추가 투여한 후의 슬럼프 및 공기량의 변화를 측정 한 결과를 나타낸 것이다.

위의 시험 결과에서 알 수 있듯이 펌핑 후의 슬럼프는 오히려 펌핑 전보다 약간 증가하였고, 공기량은 펌핑 전후에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

4.4 고강도콘크리트의 타설

1층 및 2층의 기둥과 보측에 대한 콘크리트의 타설은 기둥과 보를 분리하여 타설하는 「수직, 수평 분리타설공법」을 적용하였다. 먼저 기둥과 보측의 내민길이만큼 고강도콘크리트를 타설한 후, 보의 나머지 부분에 대해서 보통강도 콘크리트를 타설하였다. 이와같은 방법을 적용할 경우 기둥과 보측의 내민길이에 먼저 타설한 콘크리트가 굳기 전에 보의 나머지 부분에 콘크리트를 타설하여야 두 종류의 콘크리트 사이에 콜드 조인트(cold joint)가 발생하지 않는다. 따라서 기둥과 보에 대한 각각의 타설 시간을 예측하여 미리 적절한 타설 계획을 세워두는 것이 중요하다.

기둥에 고강도콘크리트를 타설한 경우에는 수직부재인 기둥으로부터 수평부재인 보측으로 60cm의 내민길이를 확보하여 쭈으로서 보 기둥 접합부가 구조적으로 안정적인 기둥을 할 수 있다. 이는 미국콘크리트학회(ACI)에서도 규정하고 있는 사항이며 당사 기술연구소에서도 '90~'92년 동안 한양대 신성우 교수팀과 공동 수행한 「고강도 콘크리트의 개발 및 실용화」 프로젝트의 과정에서 이미 확인한 바 있다.

본 프로젝트에서는 현장 여건을 고려하여 보의 길이 방향에 수직으로 나무조각을 세워서 내민길이를 확보하는 한편 높은 슬럼프에 의한 지나친 흐름을 방지하였다. 내민길이에 대한 기둥 및 보의 평면 및 단면은 아래 그림 1에 나타나 있다.

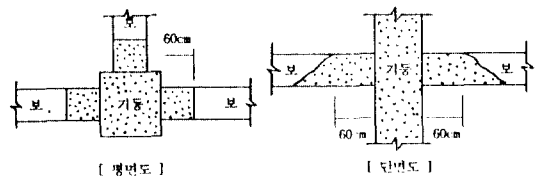


그림 1 내민길이에 대한 평면도 및 단면도

콘크리트의 타설은 펌프카를 이용하였으며, 이때의 압력은 보통강도 콘크리트의 경우 80~100 bar, 고강도콘크리트의 경우 150~180 bar 정도로서 보통강도 콘크리트에 비해서 고강도콘크리트를 타설할 때의 압력이 약 2배 정도로 증가하였다.

다짐작업은 봉형진동기를 사용하였으며 펌프 압송 전의 슬럼프는 약 18~21cm 정도였고, 펌프 압송 후의 슬럼프는 약 19~21cm 정도로써 펌프 압송 후의 슬럼프가 약간 증가하였으며 콘크리트의 타설은 전반적으로 용이하였다.

4.5 고강도콘크리트의 품질관리

고강도콘크리트의 품질관리는 콘크리트의 출하시 생산자와 현장도착 후의 시공자 모두에 의해서 수행되어야 한다. 본 프로젝트에서는 레미콘이 현장에 도착한 후에 슬럼프시험을 한 후 콘크리트를 압송하기 바로 전에 압축강도를 측정하기 위한 시험용공시체를 각 재령에 따라 5개씩 제작하였다. 압축강도시험은 아래의 표 10에 따라서 수행하였다.

표 10 콘크리트의 압축강도시험

강도시험의 목적	시험회수	공시체 제작시기	양생			시험	
			방법	장소	재령	장소	
현상배합 강도관리	1회/1일	펌핑전	수중양생	시험실	1, 3, 7, 28, 56	시험실	
		펌핑후	수중양생	시험실	1, 3, 7, 28, 56		
구조체 Conic의 강도관리	or 1회/150m ³	펌핑후	현장양생	현장내	7, 28, 56	시험실	
		펌핑후	현장양생	현장내	현상시 (1or3일)	시험실	

고강도콘크리트의 1일 총 타설물량은 16m³로서 3대의 레미콘 차량에 나누어 운반하였고, 시험용 공시체는 각 재령별로 5개씩 제작하여 그 평균값을 1회의 시험결과로 하였다.

공시체의 단면은 편심을 없애기 위하여 윗황 캡핑(capping)을 하였으며, 압축강도의 측정에는 200ton 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하였다.

표 11은 고강도콘크리트의 타설시에 제조한 공시체의 압축강도시험 결과를 나타낸 것이다.

표 11 압축강도시험 결과

구분	1일 강도	3일 강도	7일 강도	28일 강도	56일 강도
수중양생(펌핑전)	162	321	429	544	-
수중양생(펌핑후)	182	312	416	519	-
현상양생(펌핑후)		294	396	495	-

위의 결과에서 알 수 있듯이 재령 28일의 수중양생 공시체의 압축강도는 펌핑전이나 펌핑후 모두 다 구조설계기준강도인 420kg/cm² 뿐만 아니라 현장강도인 500kg/cm² 이상을 나타내었다. 또한 재령 7일의 강도는 재령 28일 강도의 약 80% 정도를 발현하고 있음을 알 수 있다. 그리고 재령 56일 강도는 1차 및 2차타설 모두 측정일자가 7월이므로 위의 표에서는 나타내지 않았다.

5. 현장계측

콘크리트가 수화반응을 일으킬 때의 발열량은 시멘트의 종류, 물-시멘트비, 단면의 크기, 외기온도 등에 영향을 받는다. 고강도콘크리트는 물-시멘트비의 감소와 단위 체적당 시멘트량의 증가로 인해서 수화반응시에 발생하는 수화열이 상당히 증가하게 된다. 이러한 수화열의 증가는 기동내부 및 기동표면의 온도와 외기온도와의 차를 크게하여 열균열(thermal crack)을 발생시키는 원인이 된다. 따라서 '91년 산본 아파트 현장 타설시에는 시멘트의 15%를 플라이애쉬로 대체하여 내부온도 및 표면온도의 상승을 억제시킴으로써 고강도 콘크리트에서의 열균열문제를 해결하고자 하는 시도를 한 바 있었다.

본 프로젝트에서는 이러한 결과를 기초로하여 시멘트량의 15%를 플라이애쉬로 대체하였으며, 콘크리트의 수화온도를 측정하기 위하여 기동내부에는 온도와 변형율을 측정할 수 있는 매립형게이지를 설치하였고 기동 표면 바로 안쪽에는 온도 측정용 센서를 설치한 후 온도계측장치를 이용하여 콘크리트의 수화온도를 측정하였다.

또한, 그 결과를 보통강도 콘크리트의 경우와 비교하여 플라이애쉬를 일부 대체한 고강도콘크리트의 경우에 수화온도가 어느 정도의 값을 나타내는가를 분석하였다.

5.1 계측기 설치

콘크리트 타설후의 수화열에 의한 온도변화를 측정하기 위하여 지하 1층의 보통강도 콘크리트를 타설하는 기둥에 4개의 매립형 게이지를 설치하였다. 또한 지상 1층의 고강도콘크리트를 타설하는 기둥에도 같은 위치에 4개의 매립형 게이지를 설치하였으며 그 중 2개의 기둥의 사면에는 온도측정용 센서를 설치하였다. 본 프로젝트에 사용된 게이지는 콘크리트의 온도와 변형율을 동시에 측정할 수 있는 진동현 방식의 매립형 게이지와 콘크리트의 온도만을 측정할 수 있는 전기저항 방식의 센서로서 온도의 변화는 게이지 내부의 센서에서 저항을 측정함으로써 알 수 있다. 또한 콘크리트의 변형율은 게이지의 길이 변화에 따른 주파수의 변동에 의해서 측정할 수 있다.

그림 2는 본 프로젝트에서 사용한 콘크리트용 매립게이지의 형상과 기둥에 설치한 게이지의 위치를 나타낸 것이다.

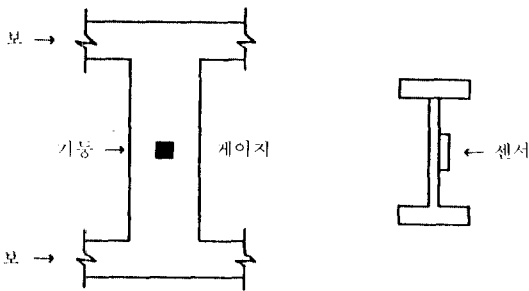
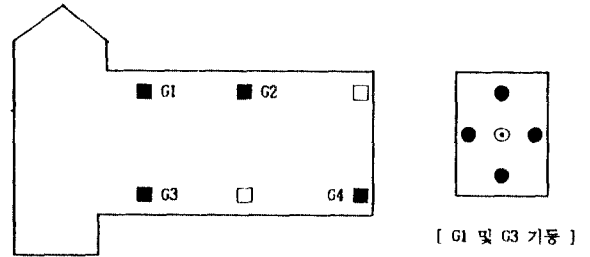


그림 2 콘크리트용 매립게이지의 형상과 기둥에서의 설치위치

그림 3은 매립게이지와 온도센서를 설치한 기둥의 위치 및 부착위치를 나타낸 것으로서, 게이지를 매립한 기둥의 단면 크기는 G1, G2, G3 기둥은 50×60cm이고, G4 기둥은 50×50cm이다.

그림 3에 나타난 게이지의 설치위치를 선정하는데 있어서 G1과 G3 기둥은 구조물 전체의 기둥이 대칭으로 이루어지는지를 알아보기 위해서이며, 지상 1층의 경우 내민길이를 G2, G3, G4에만 확보해줌으로써 내민길이가 있는 경우와 내민길이가 없는 경우의 차이점을 확인하고자 하였다.



- : 게이지를 매립한 기둥
- : 게이지를 매립하지 않은 기둥
- : 표면온도 측정용 센서
- ⊙ : 내부온도 측정용 게이지

그림 3 게이지 및 센서를 매립한 기둥의 위치 및 부착위치

지하 1층 및 지상 1층의 기둥에 설치한 게이지를 지하 2층에 설치한 계측기기까지 연결하기 위하여 슬래브 및 보 내부로 플라스틱 파이프를 배관하였고, 그 파이프 속으로 각 게이지와 계측기기를 연결해주는 연결선(lead wire)을 배선하였다. 이렇게 함으로써 콘크리트를 타설할 때나 타설 전·후에 연결선이 끊어지거나 피복이 벗겨지는 것을 사전에 예방할 수 있었다.

5.2 수화온도 측정 및 결과

각 기둥에 매립한 게이지와 지하 2층에 설치한 계측기를 연결하고, 씨리얼 포트(serial port)를 이용하여 계측기와 현장사무실에 설치한 컴퓨터를 연결함으로써 콘크리트의 수화온도와 변형율을 자동계측할 수 있게 하였다. 본 프로젝트에서는 현장 사무실에 있는 컴퓨터와 시공중인 건물의 지하에 설치한 계측기를 연결하기 위해서 약 40m의 연결선(lead wire)을 사용하였다.

측정에 사용한 계측기는 DataTaker DT 615로서 기둥 내부 및 표면의 수화온도와 기둥의 변형율을 측정할 수 있는 것으로서 기본 채널(channel)의 수는 10개이며 필요에 따라서 10개의 채널(channel)을 가진 확장 모듈(module)을 계속해서 추가로 연결할 수 있다. 그림 4는 수화온도와 변형율을 측정하기 위해서 현장에 설치한 게이지, 계측기 및 컴퓨터의 연결상태를 나타낸 것이다.

그림 5는 지하 1층의 G3 기둥에 타설된 보통강

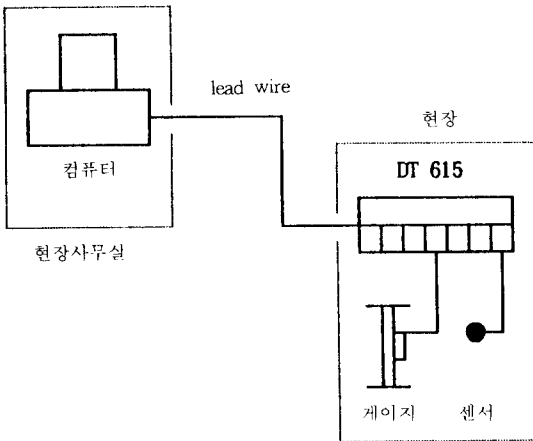


그림 4 컴퓨터와 계측장치의 연결상태

도 콘크리트의 내부수화온도와 지상 1층의 G3 기둥에 타설된 고강도콘크리트의 내부수화온도를 측정된 결과를 5시간 간격으로 비교한 값을 나타내고 있다. 또한 그 아래쪽에는 각각에 대한 대기온도의 측정값이 나타나 있다.

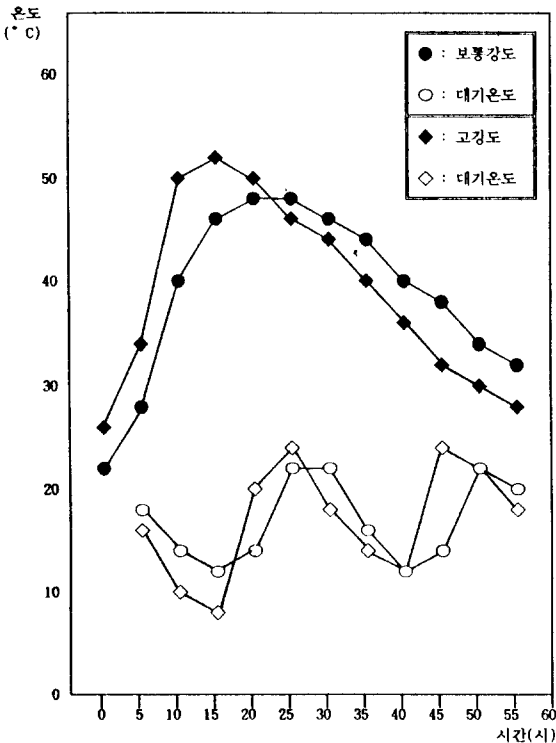


그림 5 보통강도 콘크리트와 고강도콘크리트의 수화온도 값 비교(G3 기둥)

그림 6은 지상 1층의 고강도콘크리트 기둥중에서 거푸집을 보온막으로 감싸준 경우(G1)와 그렇지 않은 경우(G3)의 내부수화온도와 표면온도의 변화를 비교한 것이다.

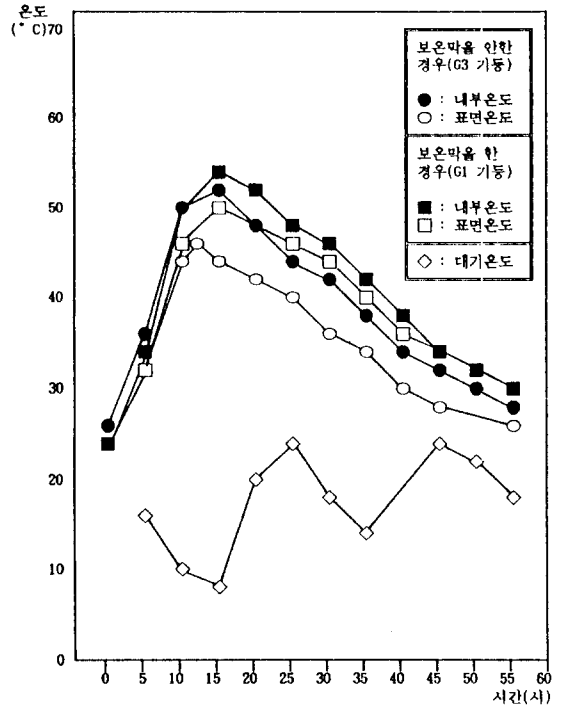


그림 6 보온막을 한 기둥(G1)과 보온막을 하지 않은 기둥(G3)의 내부온도 및 표면온도의 측정값

내부 수화온도의 측정값은 기둥에 따라서 약간의 차이를 나타내었다. 지하 1층의 보통강도 콘크리트의 경우에는 약 45~50℃ 정도의 최대온도를 나타내었고, 최대온도에 도달하는 데는 17.5~20시간 정도가 걸렸다. 또한 지상 1층의 고강도콘크리트의 경우에는 약 52~54℃ 정도의 최대온도를 나타내었고, 최대온도에 도달하는 데는 12~13시간 정도의 시간이 소요되었다. 따라서 보통강도 콘크리트와 고강도콘크리트의 내부수화온도는 2~9℃ 정도의 차이를 나타내었으며 최대온도에 도달하는 시간은 약 4.5~8시간 정도의 차이를 나타내었다.

고강도콘크리트 기둥의 표면온도는 보온막으로 감싼 경우에는 약 48~49℃ 정도의 최대온도를 나타내었으며 최대온도에 도달하는데는 14시간 정도의 시간이 소요되었다. 그러나 보온막으로 감싸지 않은 기둥은 약 40~46℃ 정도의 최대온도를 나타내었으며 최대온도에 도달하는데는 내부온도와 마찬가지로 12~13시간 정도의 시간이 소요되었다.

위의 결과를 분석해보면 15%의 플라이애쉬로 시멘트를 대체하였고, 내부수화온도가 최대온도에 도달했을 때의 대기온도가 약 10℃ 정도로 다소 낮았다는 점이 고강도콘크리트의 내부수화온도의 상승을 크게 억제하였다고 판단된다. 따라서 고강도콘크리트의 문제점중의 하나인 수화온도의 상승으로 인한 열균열은 대기온도가 상온일 경우에는 플라이애쉬를 첨가하는 것만으로도 충분히 해결될 수 있는 것으로 생각된다. 또한 같은 고강도콘크리트 기둥이라도 보온막으로 감싸준 기둥의 표면온도는 내부온도와 거의 비슷한 값을 나타내었는데 이는 기둥내부와 표면과의 온도차를 줄임으로써 양생과정에서의 구조물 자체의 열 응력의 차를 줄일수 있으므로 앞으로 고강도콘크리트의 양생방법은 재고의 가치가 있는 것으로 생각되어 진다.

6. 비파괴시험

비파괴시험은 경화한 콘크리트의 강도를 비파괴적으로 추정하는 방법으로서 그 목적은 실제 구조물에서 콘크리트 코어(core)를 채취함으로써 구조물의 강도가 저하될 경우 코어(core)를 채취하지 않고 콘크리트의 강도를 추정하기 위해서 실시한다.

비파괴시험에는 여러가지 방법이 있지만 본 프로젝트에서는 콘크리트 표면을 타격할 때 생기는 반발의 정도로서 콘크리트의 강도를 추정하는 슈미트햄머법을 이용하여 재령 28일의 구조체(기둥) 콘크리트의 강도를 추정하였다.

지상 1층과 지상 2층에 타설한 총 12개의 고강도콘크리트 기둥에 대해서 각 기둥마다 36점의 측정점을 3cm 간격의 바둑판 모양으로 측정을 하였다.

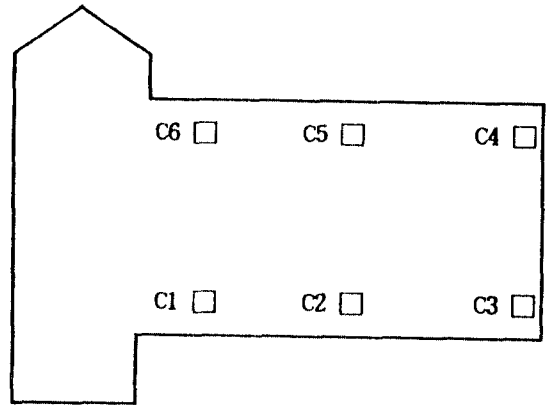


그림 7 비파괴시험을 수행한 기둥의 위치 (지상 1층 및 지상 2층)

그림 7은 지상 1층과 2층의 측정 기둥의 위치를 나타낸 것이다.

슈미트햄머에 의해서 측정된 반발경도는 타격하는 각도에 의해서 그 값을 보정하고, 이 보정된 값을 다음의 여러 제안식들에 대입함으로써 구조체 콘크리트의 강도를 추정하게 된다. 콘크리트의 강도 추정을 위해서 현재 쓰이고 있는 식들은 아래와 같다.

- 한국건축학회 제안식 :

$$f'_c = (19xR_0 - 311) \alpha \quad (1)$$

- 일본건축학회 제안식 :

$$f'_c = (7.3xR_0 + 100) \alpha \quad (2)$$

- 일본재료학회 제안식 :

$$f'_c = (13xR_0 - 184) \alpha \quad (3)$$

- 동경도 건축재료검사소 제안식 :

$$f'_c = (10xR_0 - 110) \alpha \quad (4)$$

여기서, f'_c : 비파괴시험에 의한 콘크리트의 추정강도

R_0 : 반발경도

α : 재령에 의한 보정값

표 12는 기둥에 타설한 고강도콘크리트의 재령 28일 강도를 위의 네가지 식들에 의해서 추정된 값을 나타낸 것이고, 그림 8은 표 12에 나타난 값들을 도식화 한 것이다.

위의 표 12와 그림 8에 나타난 바와 같이 기둥의 추정강도값은 각 식들에 대해서도 각각 큰 차이를

표 12 비파괴시험 결과(재령 28日)

층 구분	기둥구분	(1) 식	(2) 식	(3) 식	(4) 식
1층	C1	581.0	438.8	425.8	358.5
	C2	465.3	394.4	346.7	297.6
	C3	538.1	422.3	396.5	335.9
	C4	599.7	446.0	438.6	368.4
	C5	596.0	444.6	436.0	366.4
	C6	556.8	429.5	409.2	345.8
2층	C1	536.8	446.3	398.8	341.3
	C2	688.5	504.6	502.6	421.1
	C3	538.9	447.1	400.2	342.4
	C4	565.9	457.5	418.7	356.6
	C5	509.8	436.0	380.3	327.0
	C6	495.3	430.4	370.4	319.4

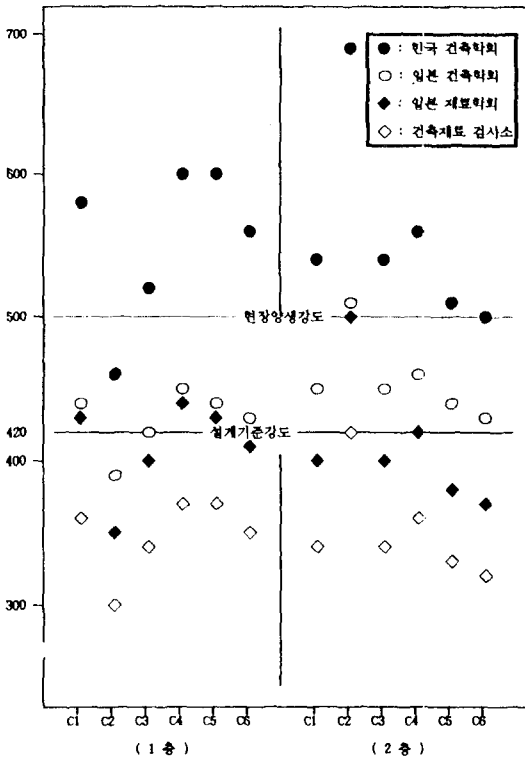


그림 8 각 기둥의 강도추정값(지상 1층 및 2층)

나타내고 있는데, 이들 값중에서 설계기준강도와 현장양생강도의 영역을 나타내는 점선사이에 드는 값이 비파괴시험의 결과에 대해서 가장 신뢰할 수 있는 값으로 사료된다.

아래의 그림 9에 나타난 X-Y 좌표는 위에서 나

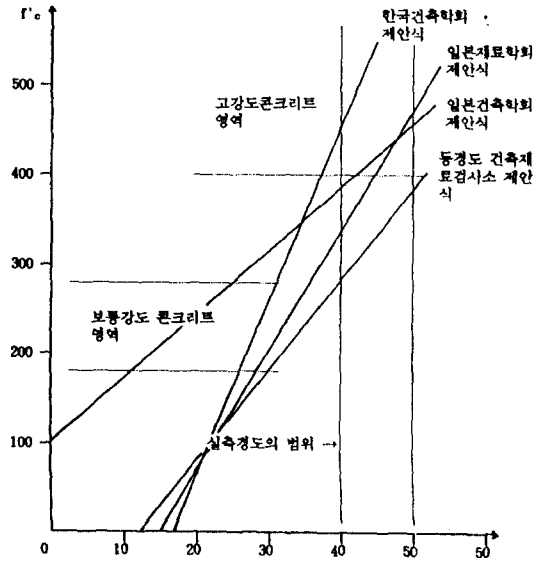


그림 9 강도추정식을 도식화한 그래프와 실측강도의 범위

타낸 강도추정식들을 도식화하고 이를 실제측한 강도값의 범위와 비교함으로써 고강도콘크리트의 경우에 어떠한 식이 타당성이 있는가를 검토하기 위한 것이다.

고강도콘크리트의 경우 비파괴시험을 수행한 결과에 대해서 어떠한 식이 가장 적합한가를 나타낼 수 있는 확실한 자료가 없으므로 앞으로 많은 자료의 축적이 필요할 것이다. 위의 그래프에서도 알 수 있듯이 보통강도 콘크리트에서는 한국건축학회 제안식이나 일본재료학회 제안식이 적당한 값을 나타내고 있지만, 고강도콘크리트의 경우에는 현장양생 공시체의 강도측정값을 근거로 비파괴시험으로 인한 강도추정값을 분석해본 결과 보정강도의 값이 40이상인 것을 감안하면 한국건축학회 제안식은 콘크리트의 추정강도를 다소 크게 평가하고 있으며 일본건축학회 제안식과 일본재료학회 제안식은 콘크리트의 강도추정값을 다소 작게 평가하고 있음을 알 수 있다.

7. 결 론

이번 프로젝트의 대상은 지하 2층, 지상 6층의 철근콘크리트 건축구조물로서 기둥부재에 고강도

콘크리트를 적용함으로써 얻을 수 있는 잇점은 크지 않지만 국내 건축구조물에 사용되고 있는 콘크리트의 설계기준강도가 아직도 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 미만인 것을 감안하면 본 프로젝트에서 사용된 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 구조설계기준강도와 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 현장양생강도는 국내의 건축구조물에 대한 고강도콘크리트의 응용이라는 측면에서 획을 긋는 시발점이라고 볼 수 있다.

본 프로젝트는 고강도콘크리트의 제조, 운반, 시공 및 제반시험을 수행하는 것을 그 목적으로 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 지난 3년간은 당사 बै처 플랜트(batcher plant)에서 고강도콘크리트를 생산함으로써 수송거리가 단축되는 등 여건이 좋은 환경속에서 현장 적용을 해왔다. 그러나 이번 프로젝트에서는 동양 레미콘을 통하여 콘크리트를 현장에 공급함으로써 좀 더 실제적인 레미콘생산 및 공급체계속에서 시공을 하였으므로, 이에 대한 모든 결과가 보다 현실적이라고 할 수 있다.

둘째, 고강도콘크리트는 낮은 물-시멘트비를 가지고 있기 때문에, 레미콘을 생산하기 전에 골재의 표면수에 의한 배합수 보정을 할 때 약간의 오차에 의해서도 전체 물-시멘트비에 상당한 영향을 미치게 되므로 정확한 배합수 보정이 필요하다.

셋째, 공장에서 생산된 고강도콘크리트를 현장까지 운반하는데 많은 시간이 걸릴 경우 슬럼프저하가 급격하게 발생하므로 생산공장을 선정할 때는 운반거리 및 교통여건을 고려한 운반시간을 정확하게 파악하여야 한다. 본 프로젝트에서는 고유동화제로서 Super-20을 사용하였고, 이때의 운반시간은 약 40분 전후로서 슬럼프저하에는 큰 문제가 없었기 때문에 동양시멘트 안양공장을 선정하

였다. 일반적으로 슬럼프저하를 고려한 최대 운반시간은 약 1시간 정도가 적절한 것으로 생각된다.

넷째, 고강도콘크리트를 수직부재에만 사용할 경우 보축으로 최소한 60cm의 내민길이가 확보되어야 하며, 이때 펌핑후 타설시의 슬럼프를 가능한 18cm 이내로 조절하여 내민길이가 자연스럽게 확보되도록 해야 한다.

다섯째, 플라이애쉬를 15% 대체한 고강도콘크리트의 경우 기둥의 크기가 60×50 cm인 기둥내부의 최대온도는 약 $52^\circ\text{C} \sim 54^\circ\text{C}$ 정도이고, 기둥의 크기가 50×50 cm인 기둥내부의 최대온도는 약 52°C 정도로서 단면의 크기에 따라서 약간의 차이가 있음을 알 수 있었으며, 전체적으로도 수화온도가 상당히 낮아졌음을 알 수 있었다. 따라서 앞으로는 고강도콘크리트 제조시에 플라이애쉬를 일부 대체하는 것이 수화열의 감소나 재료비의 절감이라는 측면에서 바람직한 것으로 생각된다.

여섯째, 현장양생공시체의 압축강도값과 비파괴시험을 통한 압축강도 추정값을 비교해 보면 콘크리트의 강도가 $400\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상일 경우에는 한국건축학회에서 제안한 비파괴검사(슈미트햄머법) 추정강도값은 실제의 콘크리트 강도보다 다소 크게 평가되고 있으며, 일본건축학회와 일본재료학회의 제안식은 다소 작게 평가되고 있는 것으로 판명되었으므로 이에 대한 보정이 요구된다. □

본 연구를 성공적으로 끝마칠 수 있도록 많은 도움을 주신 삼성중공업 양재현장의 박상기 소장님과 레미콘 공급이 원활하게 되도록 힘써주신 동양시멘트 중앙연구소의 정재동 실장께 감사드립니다.