

김 용 부  
성균관대학교 건축공학과 명예교수  
by Kim Yong-Boo

# 브라질 고층 사무소 건축에 사용한 고성능 유색 콘크리트

## HPCC in Brazilian Office Tower

준공단계에 있는 브라질 상파울루의 e-Tower (이하 e-타워로 함)에 압축강도 125MPa\* (약 1250)의 고성능 고강도 유색콘크리트가 사용되었다. 건물의 최초 일곱개층의 다섯개 기둥에 사용된 HPCC는 일반 콘크리트 플랜트에서 일괄 처리되고 극심한 도시교통 때문에 현장에 가는 도중에 트럭에서 혼합되어 플랜트를 출발한 후 40~60분내에 타설되었다.

그러한 특별한 콘크리트는 브라질에서 처음으로 사용된 경험이다. 콘크리트는 거주공간을 최대화하고 콘크리트 타설을 쉽게하여 생산성을 증대시킬 목적으로 철저히 연구소의 도움으로 이루어졌다. 또한 콘크리트 기둥의 유색화는 건물의 거주와 그 외 주차공간에서 바라는 건축효과를 얻었다.

e-타워는 준공이 되면 800대의 주차공간, 두개의 일류식당, 하나의 컨벤션 및 비즈니스 센터, 하나의 올림픽 경기 규모 반정도의 수영장, 건강 헬스센터 및 옥상 헬리포트를 제공하는 현대 사무소 건물이 된다. 또한 건물은 "인공지능"공기조화시스템과 에너지 및 수계 절약 설비를 가진다. 162 높이에 42층 건물의 연면적은 52,000이다. 브라질의 다섯 개의 가장 높은 건물에 속하는 e-타워는 고층건물이며 The Council on Tall Buildings and Urban Habitat가 채택한 국제분류에 따라 "마천루"이다.

\* MPa = N/mm<sup>2</sup>, 1kN = 101.971kgf

## 브라질 콘크리트의 배경

브라질은 100 이상의 높은 건물을 건설한 전통을 가진 남미에서 콘크리트 기술이 가장 앞선 나라 중의 하나이다. 오랜 전통으로 75년전인 1929년에 브라질 기술자는 상파울루 거리에 당시로는 세계에서 가장 높은 106의 유명한 콘크리트 건물인 Martinelli Building을 설계하였다. 1960년에 당시로는 제일 높은 189의 콘크리트 사무소 건물인 Palacio Zarzur Kogan을 개관하였다.

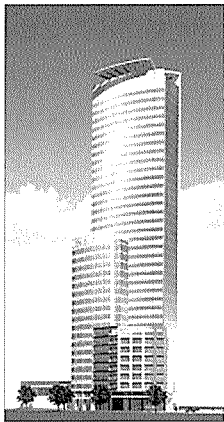


그림 e-tower의 투시도

## e-타워의 설계와 건설조건

e-타워는 폭 17, 길이 28, 깊이 2.8 규모의, 35MPa 강도로 된 큰 단일콘크리트 기초 블록으로 지지된다. 25°C의 주위온도에 대하여 약 15°C의 타설온도를 얻어 수화열을 조절하기 위하여 혼합수에 얼음을 사용하였다.

기초로 지탱되는 다섯 개의 주기둥은 각각 약 2500t의 하중을 받으며, 저층부에서 거주와 주차공간을 최대화하기 위하여 0.42 이하의 단면적을 갖는다.

이들 크기 한계에 대처하기 위하여 건축주, 시공자측 기술자, 구조설계 기술자, 레미콘 회사와 저자인 교수로 만든 팀은 적절한 고성능 콘크리트의 설계를 수용하였다.

팀은 브라질의 콘크리트 구조에 지정된 최고강도 콘크리트를 연구하였다. 이것을 상파울루에 있는 일반콘크리트 플랜트로부터 믹서트럭으로 공급되어야 한다. 프로젝트 건축가 Aflalo와 Gasperini가 유색콘크리트로서 기록 돌파의 높이가 되는 고강도 콘크리트

기둥에 색을 추가할 것을 결정하였을 때 도전은 더욱 흥미를 일으키게 되었다.

## 기술 및 경제적 국면

설계자는 e-타워의 전체적 형태를 결정하는 기술 및 경제적 문제와 최초의 다섯 개 층에서 기둥 크기를 줄여야 할 임계성 때문에 대안으로 고강도 콘크리트를 선택하였다. 유색 고강도 콘크리트는 총 간의 기둥에 사용되었다. 그중 4개는 지하 4개층의 지하 주차장과 주 출입층 및 추가 2개층 내의 긴 기둥에 자리 잡고 있다.

전체적으로 HPCC의 사용은 콘크리트량의 53%와 전체비용의 3%를 절약하였다. 재료는 또한 주차용 4개 층의 각층에 추가로 4대 분의 주차공간을 늘려 주었고 잠재적인 건물수익을 올리게 된다.

## 콘크리트 재료

재료를 선택함에 있어 다음 기준을 고려하였다. 포틀랜드 시멘트와 골재의 품질, 시멘트 혼합제와 혼화제 간의 친화성, 내구적인 색을 마련하고 콘크리트 강도를 손상시키지 않는 안료의 적합성, 지역에서의 공급성 그리고 비용 등이다.

모든 콘크리트 재료는 상파울루와 근교에서 조달되었다. 지역 굵은골재는 19mm의 최대공칭입경, 3.02의 밀도와 6.91의 조립율을 가진 단단하고 강한 현무암으로 이루어져 있다. 2.4mm의 최대입경, 2.67의 밀도와 2.04의 조립율을 가진 석영 잔골재가 사용되었다. 사용된 포틀랜드 시멘트는 ASTM C150 Type III와 유사한 Brazilian high-initial-strength Type V이다. 이에 약 23%의 용광로 슬래그, 13%의 실리카흙이나 15%의 메타카올린 유색을 위하여 4%의 붉은 무기안료 폴리카복시레이트에 근거한 1% 고성능 감수제 그리고 수화조절과 응결지연을 위한 0.45% 혼화제를 추가하였다. HPCC 혼합의 성질은 일개 층에 있는 총 다섯 기둥의 높은 생산성 타설을 거의 3시간에 할 수 있게 하였다.

## 색의 선택

건축가는 미를 위하여 색을 선정하였으나 도급자는 HPCC와 보통콘크리트의 혼돈을 피하기 위하여 콘크리트가 현장에 도착하였을 때 HPCC의 확인과 구분을 위하여 색을 사용하였다. 광물성 산화철은 HPCC의 적색의 주성분이 되는 것으로 건조분말로 공급되어 뱃칭플랜트에서 첨가되었다.

## HPCC의 혼합비율

연구실 시험은 이들 35개 고강도 기둥의 시공에 약 150가 소요되는 것에 비하여 1.5의 HPCC를 요구하였다. 콘크리트 혼합비율에는 초기 및 최종강도, 온도상승, 높은 시공연도, 몰탈 비율과 슬럼프 감소 등 고려해야 할 많은 인자가 있다. 요구조건에 대처하기 위하여 많은 콘크리트 혼합비율이 개발되어야 했고, 가장 적절한 비율을 선택하는데 도움을 주는 압축강도와 탄성계수가 조사되어야 했다. 140~200mm 사이의 슬럼프가 현장의 시공연도에 맞다는 것이 증명되었다. 기술자는 실제 타설 3개월 전에 실험실과 현장에서 시험용 기둥을 만들었다.

유색기둥은 언급한 것과 같이 저층부에 한정되었다. 그 윗층의 기둥강도는 위치에 따라 점차 감소되었는데, 최상 10개 층에서는 60MPa와 40MPa까지 되었다. <표 1>은 유색콘크리트 기둥에 사용한 혼합비율을 기록하고 있다.

표 1 : e-타워의 기둥에 사용한 고성능 유색콘크리트의 혼합 비율

재료	혼합량(kg/m <sup>3</sup> )	비고
시멘트	460 시멘트 + 163 슬래그	ASTM C150 Type III + 슬래그
실리카흙 혹은 메타카올린	93	-
잔골재	550	석영
굵은골재	1027	현무암
안료	25	산화철
고성능 감수제	6.2	폴리카복시레이트
응결 지연제	3.2	카르복시릭산
물	135	물결합제비 0.19

## HPCC의 타설과 양생

HPCC는 플랜트에서 현장까지 트럭 내에

서 혼합되었는데, 슬럼프시험과 타설 전에 현장에서 최소 8분 동안 계속 혼합되었다. 노동자는 크레인과 덤퍼버킷으로 HPCC를 거푸집 속에 충전하였고, 투입식 진동기로 콘크리트를 다졌다. 뽁뽁한 철근간격에도 불구하고 거푸집은 깨끗하고 평평한 콘크리트 표면을 노출시키기 위하여 72시간~96시간 후에 제거되었다. 또한 HPCC는 좋은 접착력을 나타내고 기동철근의 상부부터 바닥까지 자유중력타설이 가능하였다.

기둥의 길이는 주된 층의 바닥부터 천정까지 5.5m이다. 노동자는 다음날에 슬래브와 보의 접합점에서 기둥의 꼭대기를 타설하였다. 슬래브와 보의 콘크리트 강도는 40MPa인데 이들 부재는 최소 72시간 동안 거푸집 속에서 양생되었다. HPCC의 압축강도가 15MPa가 초과할 때까지 지속적인 양생이 필요하였다. HPCC는 0.19의 물결합재비(w/cm<sup>3</sup>)를 가지며 거푸집을 제거하였을 때 압축강도는 50MPa 이상이 되었다. 그 후 수분 양생을 하는 것은 불필요하다.

### HPCC의 관리

HPCC의 품질을 관리하기 위하여 일반적인 인 조사를 슬럼프시험을 하였고, 실린더(100×200mm와 150×300mm)와 큐브(150mm) 공시체가 압축강도, 탄성계수 그 외에 온도 관찰을 위하여 만들어졌다. 슬럼프 시험으로 결정된 HPCC의 시공연도는 결정적인 요인이 되지 못하였다. 왜냐하면 콘크리트 슬럼프는 140~200mm까지 변할 수 있었고, 또한 주위 온도와 상대습도에 의해 영향을 받았기 때문이다.

연구자는 콘크리트가 구조에 타설된 것과 마찬가지로 공시체를 만들었는데 샘플 콘크리트는 트럭 호퍼의 배출구에서 직접 채취하였다. 각각의 콘크리트 믹서트럭은 약 4의 콘크리트만 운반하였다. 모든 트럭은 검사를 받았다.

150×300mm 실린더(ASTM C 39)로 결정된 HPCC의 28일 압축강도 의 평균치는 124.8 MPa, 최고치와 최소치는 149MPa와 109.8MPa였다. 표준편차는 6.1 MPa, 표준변동율은 4.9%였다. 28일 평균 탄성계수(ASTM C 469)는 47.7GPa, 표준편차는 4.2GPa, 표준변동율은 8.7%였다.

e-타워에 사용한 HPCC는 보충하는 건축물에 또한 사용한 30MPa 콘크리트와 비교될 수 있다. <표 2>는 e-타워와 보충하는 건축물에 사용한 콘크리트의 성질을 비교한다. 고성능 콘크리트의 개발과 옳은 사용법을 장려하고 활성화하고 있는 브라질 시멘트협회는 프로젝트의 중요한 파트너로서 연구 시험을 수행하였다.

e-타워에 HPCC를 사용한 주요한 이점은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 구조적인 안전을 제공하는 고강도
- 조기 거푸집 제거를 허용하는 조기강도
- 고도의 내구성
- 높은 생산성과 재작업이 없는 쉽고 빠른 프로젝트 시공
- 보다 낮은 콘크리트 기동 크리프
- 보다 높은 탄성계수와 이에 따른 보다 적은 변형
- 건물의 사용공간 증대 등이다.

<표 2>에서는 사용된 HPCC와 보통 즉 더욱 전통적인 콘크리트 사이의 성질을 비교하였다.

생콘크리트와 경화콘크리트 양쪽의 결과는 우수함을 증명하였고, 건물이 완성됨에 따라 프로젝트는 성공적이라고 평가되었다. 필요 조건을 충족한 적용된 콘크리트 기술은 HPCC로 이들 결과를 얻을 수 있게 하였다. 마찬가지로 엄격한 재료선택 과정과 우수한 품질관리로 이들 결과를 얻을 수 있었다. 모두가 선택된 콘크리트팀간의 긴밀한 협동으로 가능했다.

현재 고성능 콘크리트는 남미 전체의 공학 기술 직업의 중요성은 물론 건축에 영향을 주기 위한 호기를 제공한다. 라이프 사이클과 유지관리비를 고려한 설계와 건설 그리고 콘크리트 건물의 내용년수를 향상시키는 것은 투자를 확대할 수 있고, 원자재를 절약할 수 있으며, 브라질 사람의 자부심을 높일 수 있다. ■

표 2 : 30MPa 보통 구조용 콘크리트와 비교한 HPCC의 성질

성 질	HPCC f <sub>c</sub> = 125MPa (약 1250kg/cm <sup>2</sup> )		보통콘크리트 f <sub>c</sub> = 30MPa (약 300kg/cm <sup>2</sup> )	
	7일	28일	7일	28일
압축강도 (ASTM C 39)	111 MPa	125 MPa	18 MPa	36 MPa
	141 MPa	155 MPa	41 MPa	44 MPa
	47 GPa	10.0 GPa	33 GPa	3.3 GPa
	10.0 GPa	3.3 MPa	3.3 MPa	3.3 MPa
탄성계수 (ASTM C 469)	47 GPa	47 GPa	33 GPa	33 GPa
휨강도 (ASTM C 496)	28일	10.0 GPa	3.3 MPa	3.3 MPa
탄화깊이, 25°C 상대습도 65% CO <sub>2</sub> 5%	9일	0	28mm	28mm
ASTM C 642	흡수	0.35%	5.1%	5.1%
	비등후의 흡수	0.41%	5.8%	5.8%
	기공부피	1.0%	13.2%	13.2%
	비등후의 기공부피	1.1%	15.1%	15.1%
	밀도	2500kg/m <sup>3</sup>	2320kg/m <sup>3</sup>	2320kg/m <sup>3</sup>
ASTM C 1403	모세관흡수, 72시간 후	1.2kg/m <sup>2</sup>	12.0kg/m <sup>2</sup>	12.0kg/m <sup>2</sup>
	물의 최대 내부상승, 72시간 후	0mm	99.0mm	99.0mm
클라리드 이온 침투 (ASTM C 1202)	43C	8000C	8000C	8000C
초음파 속도 (ASTM C 597)	4950m/s	3250m/s	3250m/s	3250m/s
햄머 시험 (ASTM C 805)	52	27	27	27

이 글은 2003년 12월호 concrete international에 소개된 Paulo Helene의 기사를 번역한 것이다. 외국 콘크리트 선진 기술의 동향을 이해하는데 도움이 되었으면 한다. 고성능 유색콘크리트(high-performance colored concrete, 이하 HPCC로 함)는 강도, 세장한 기동, 유용공간의 증대 및 미를 제공하였다. (필자 주)

\* cm : cementitious material