초고강도 콘크리트 수평압송 시뮬레이션의 중요성
Importance of Horizontal Pumping Test of Ultra-high-strength Concrete

손유신 삼성물산㈜ 건설부문 선임연구원
이주하 삼성물산㈜ 건설부문 선임연구원
이승훈 삼성물산㈜ 건설부문 수석연구원

1. 머리말

한국은 초고층 주거건축 건설시장에서 세계 4위의 건립건수를 확보(2005년)하고 있으며, 내수시장이 매우 활성화 되어 있는 주요 초고층 국가이며, 2008년 서울, 부산, 인천 등 지자체를 중심으로 100~150층 규모의 초고층 구조물 건립이 계획되어 있으며 지역도시 특화정책으로서 도시경쟁력을 향상시키기 위한 초고층 복합빌딩의 국내 자체시장이 매우 활발하였으나 최근 경기 침체와 더불어 다소 누그러진 상태이다.

반면, 세계적 여러나라에서는 경쟁의 주체가 국가 단위에서 대도시권 단위로 옮겨감에 따라 BRICs 등 신흥국가를 중심으로 랜드마크적 수직복합도시 건립 경쟁이 가속화 되고 있다. 따라서 현 시점은 신흥국가를 중심으로 활성화 되는 초고층 건설시장을 기반으로 국내의 건설사가 말레이시아 KLCC, 대만 101 타워, 버즈 Khalipa 등 시공실적을 통해 기술을 보유하고 있는 기술력을 한층 강화시키고, 핵심요소기술에 대한 기술 개발 자립의 최적기 이다.

이러한 초고층 구조물 건설의 핵심요소기술에는 계획, 설계, 시공, 재료, 공사관리 등 여러분야가 있지만, '09년 국토해양부 건설교통 R&D 혁신 로드맵의 중점전략 10대 프로젝트 중 "초고층 복합빌딩시스템 사업단"을 중심으로 초고층 구조물 재료분야에서는 초고강도 콘크리트 개발 및 개발된 콘크리트의 점성을 저감시켜 압송성능을 상향시키는 연구를 추진하고 있으며, 동시에 초고층 구조물 급속시공 분야에서도 초고강도 콘크리트를 수직 압송하여 시공기간을 단축시키는 연구를 추진 중이다.

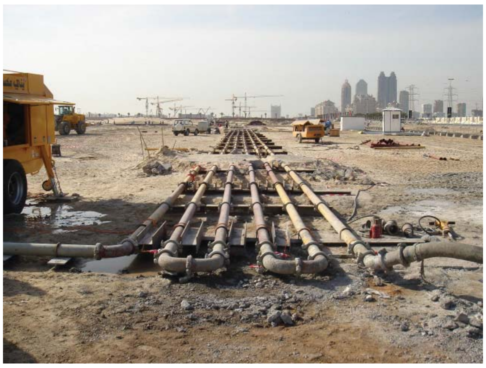
최근까지 국내에서는 초고강도 콘크리트의 연구개발 방향이 강도개발 및 내화성능확보 측면에 초점이 맞추어져 있었으나 Burj Khalipa 시공을 계기로 초고층 압송에 대한 관심이 증대되면서 초고강도 콘크리트의 연구 방향 전환되고 있는 시점이다. 이에 여러 시공사에서 80~200MPa까지 다양한 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대한 수평 압송 시험을 실시하고 있으며, 이를 통해 향후 초고층 구조물 시공 시의 기초자료로 활용하고자 연구하고 있다.

따라서 본 고에서는 Burj Khalipa 압송 사례와 국내에서 수행되었던 콘크리트 수평압송 실험 중 1.0km 압송 사례를 소개하면서 초고층 구조물 시공에 있어서 콘크리트 압송성능 확보의 중요성에 대하여 소개하고자 하였다.

2. Burj Khalilpa 콘크리트 펌핑 사례

2.1 사전 수평 펌핑 시뮬레이션

Burj khalipa에서는 본 구조물 수직 압송 전 콘크리트 펌프와 펌핑 시스템 성능을 확인하기 위하여 600m의 파이프를 수평으로 설치하여 사전 시뮬레이션을 실시하였으며 <Fig. 2.1>은 콘크리트 펌핑 사전 시뮬레이션 전경을 나타낸 것이다.



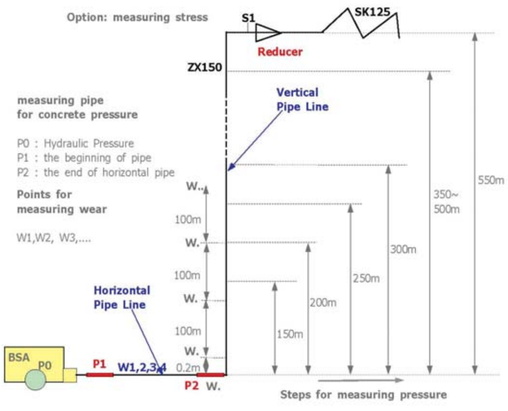
<Fig. 2.1> Pumping Simulation 전경

이러한 사전 시뮬레이션을 통하여 현지 여건을 고려한 콘크리트 압송전후 슬럼프 플로우의 변화량, 콘크리트 온도의 변화량 및 압축강도 변화량을 확인할 수 있었으며, 압송성능 모니터링 결과를 통해 압송 효율(시간당 토출량) 및 마찰계수를 통한 최대 압력등을 확인할 수 있었다.

2.2 Burj Khalipa 수직 펌핑 모니터링

실제 현장에서의 고층부 콘크리트의 압송 모니터링은 수평 펌핑 모니터링과 동일하게 두 가지로 구분하여 진행되는데, 하나는 압송 전 · 후의 콘크리트 물성변화를 고찰하는 것이고, 다른 하나는 배관 내의 압송압력을 측정하고 토출량을 측정하는 것이다.

이러한 압송 모니터링은 〈Fig. 2.2〉와 같이 150m 이후 50m 간격으로 고층부의 압송 높이에 따라 진행되었으며, 그 결과는 다음 상층부의 콘크리트 압송에 Feed-Back 되게 함으로써, 사전 현장 품질관리의 수단으로 활용되도록 하였다.



〈Fig. 2.2〉 수직압송 모니터링 개요

〈Fig. 2.3〉 콘크리트 Main 펌프

〈Fig. 2.3〉은 실제 현장에 적용된 콘크리트 펌프인 BSA 14000 SHPD의 전경을 나타낸 것이다.

콘크리트 압송은 '05년 9월 시작하여 07년 11월 RC골조의 마지막 코아 월 콘크리트까지 약 700일 동안 전체적으로 순조롭게 진행하였고 158층 (높이 601.7m) 콘크리트를 마지막으로 압송을 종료하였다.

세계 최고 높이의 콘크리트 압송 모니터링 결과, 콘크리트의 플로우는 660~680㎜, 최대 압송압력은 190~200bar, 토출량은 약 28~35㎥/h 로 나타났으며, 이는 수평 펌핑 시뮬레이션 결과에서 예측된 값과 유사한 결과를 나타낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

3. 초고강도 콘크리트 1.0km 수평 펌핑 테스트

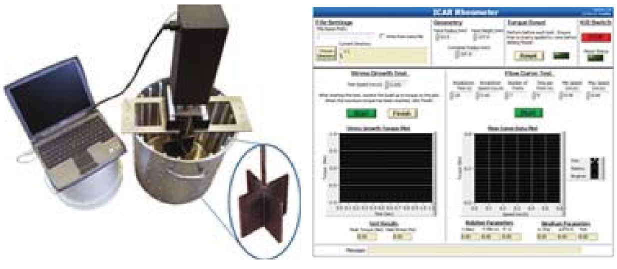
Burj khalipa의 압송 사례에서도 알 수 있는 바와 같이, 사전 시뮬레이션 실험을 통해 도출된 콘크리트의 압송 전후 특성과 예상 최대압력이 상당부분 일치하는 것을 고려할 때 초고강도 콘크리트의 수평압송 사전 시뮬레이션은 큰 의미를 가진다고 할 수 있다. 따라서 국내에서 최근 개발된 100, 150MPa 초고강도 콘크리트의 사전 압송 시뮬레이션 결과를 소개하면 다음과 같다.

3.1 개 요

본 실험에서는 향후 초고층 구조물 시공 시 적용이 가능할 것으로 예상되는 100MPa, 150MPa 콘크리트를 대상으로 1.0km 펌프 압송성능을 테스트하고자 하였다.

테스트 변수는 100MPa, 150MPa의 콘크리트에 대해서 각각 400, 700, 1000m에 대하여 테스트를 실시하였으며, 테스트 항목으로는 콘크리트의 기본물성 평가와 압송성능 평가로 구분하여 진행하였으며, 특히 콘크리트 물성평가는 압송 전 · 후의 비교 뿐만 아니라 정치(定置) 콘크리트에 대한 물성 평가도 함께 이루어졌다.

굳지 않은 콘크리트에 대해서는 슬럼프플로우 측정과 함



(a) 레오미터 구성 장비 (b) Software User Interface

〈Fig. 3.1〉 레오미터 소개

께 50cm및 60cm 플로우 도달시간의 차, 소성점도, 콘크리트 압송 전 · 후 온도 및 공기량을 측정하였다. 소성점도 측정을 위해서는 〈Fig. 3.1〉의 레오미터를 사용하였으며, 소프트웨어와 연동하여 Stress Growth Test와 Flow Curve Test의 2가지 실험을 수행하였다.

또한 압송성 평가에서는 펌프와 배관에 작용하는 압력을 계측하였으며, 토출량 측정을 위해서는 1.2×1.2×1.0m의 거푸집을 제작하여 거푸집 내부에 미리 설치해 둔 눈금자를 통해 시간당 타설되는 콘크리트 토출량을 측정하였다.

3.2 콘크리트 펌프 및 배관

본 실험에서 사용된 초고강도 콘크리트의 점성은 일반 콘크리트에 비해 상당히 높고, 압송 거리 역시 1.0km 이상의 장거리인 점을 고려하여 Burj Khalipa 시공 시에도 사용된 것과 동일한 모델의 초고압 콘크리트 펌프를 사용하였다. 약 50m의 직선구간을 총 20개 라인 설치하였으며, 직선부에는 3m 파이프가 사용되었으며, 각 직선구간 라인간에 연결하는 곡선부에는 반경 1m의 90° 곡관(曲管) 두 개를 사용하였다. 배관총길이는 1.0km로 계획하였다. 콘크리트 배관 내 압력을 측정은 총 5개 지점(0, 100, 300, 600, 900m)에 압력계를 설치하여 콘크리트 압송에 따른 압력변화를 측정하였다.

<Fig. 3.2> 압력센서 및 동적변위 측정기

3.3 압송 테스트 결과

초고강도 콘크리트를 사용한 수평압송 성능 시험결과, 슬럼프플로우는 증가하였고 소성점도는 감소하는 경향을 나타내어 점성은 저감된 것으로 판단되며, 공기량은 100MPa에서는 증가, 150MPa에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 기존의 문헌자료와 부분적으로 상충되는 결과를 나타내어 콘크리트 강도별, 사용 혼화제 등 사용재료별 펌핑 전후의 콘크리트 성능이 달라짐을 알 수 있는 근거가 되는 것이다.

압력측정결과에서는 최대 200bar를 나타내어 저압방식을 적용하는 경우 최대 압력의 85% 수준에 해당되는 값이며, 이때의 토출량은 강도에 따라 20m3/hr 전후를 나타내어 다소 토출량을 증가시킬 필요가 있을 것으로 판단되었다.

따라서 펌핑 전후의 성능 평가를 통해 최종적으로 요구되는 콘크리트 물성을 구현할 수 있는 사용재료의 최적화가 중요하며, 초고층 구조물 적용 시 소요의 높이까지 원활한 펌핑과 소요의 토출량을 만족시키기 위해서는 소성점도를 현재수준에서 낮출 필요가 있음을 확인할 수 있었다.

4. 맺음말

초고층 구조물에서 초고강도 콘크리트의 압송 기술은 급속시공과 관련된 핵심기술로 전체 공기에 절대적인 영향을 주는 요소로 중요한 기술이며, 이를 달성하기 위해서는 압송가능 여부를 사전에 예측할 수 있는 수평 압송 테스트가 필수적이며, 이를 통해서 적용할 콘크리트의 사용재료 선정 및 콘크리트 요구 성능을 결정할 수 있고 나아가서는 압송 장비 선정의 기준을 제시할 수 있게 된다.

따라서 초고층 구조물의 압송 기술은 단순한 시공기술이 아닌 재료기술과의 접목이 중요하며, 수평 펌핑 시뮬레이션을 통해 확인하고, 본 시공 시에는 지속적인 계측과 이를 통한 시뮬레이션을 통하여 도전해야 하는 새로운 목표인 것이다. 현재까지 세계적으로 최고 압송 높이는 삼성건설에서 시공한 Burj Kalipa의 601.7m 이며, 향후에도 이를 달성하기 위한 새로운 콘크리트 재료유동학 기술의 개발과 압송 시공 기술의 개발은 계속될 것으로 기대된다.

참고문헌

"초고층복합빌딩 사업단 사전 상세 기획연구"보고서, 한국건설교통기술평가원, 2009

감사의 글

이 기사는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2010년도 첨단도시개발사업(09 첨단도시 A01)의 초고층복합빌딩연구개발사업에 의해 연구가 진행되고 있습니다.

· 손유신 e-mail : yssohn@samsung.com