



03

기둥 축소량 제어를 위한 고강도 콘크리트의 수축변형 특성 평가

Shrinkage Properties Evaluation of High Strength Concrete for Control of Column Shortening

김규용 Gyu-yong Kim
충남대학교
건축공학과 교수

구경모 Kyung-mo Koo
충남대학교
사회기반시설연구소 연구원

문형재 Hyung-jae Moon
롯데건설 잠실제2롯데월드
현장 과장

1. 머리말

콘크리트의 변형률과 시간과의 관계는 지속응력의 크기에 따라 그 특성이 변화한다. 지속응력이 비교적 작은 경우는 변형률이 수렴하지만 지속응력이 큰 경우는 시간이 경과함에 따라 변형이 계속 증대하여 결국 콘크리트의 파괴를 발생시킨다. 이와 같이 일정한 지속응력하에 있는 콘크리트의 시간의존적 변형을 '크리프(그림 1)'라고 하며, 교량, 프리스트레스트 콘크리트 및 초고층 구조물의 설계, 유지관리시 반드시 고려하여야 하는 항목이다. 특히 최근에는 랜드마크의 성격을 갖는 초고층 건축물의 건설이 증가하고 있으며, 이러한 구조물들은 대부분 RC조로써 콘크리트의 크리프와 같은 비탄성변형량은 탄성변형량과 유사하거나 때로는 2배 이상 발생하기 때문에 이를 반영한 부재의 축소량 예측과 시공이 요구된다(그림 2)¹⁾. 이러한 축소량은 부재별, 배합별 차이를 나타낼 수 있고, 정확한 예측과 시공이 이루어지지 않는다면 슬래브의 위치를 변화시켜 칸막이, 기계적인 장비 및 마감재 등에 영향을 미친다. 뿐만 아니라 수직요소에 의해 지탱된 슬래브가 계획된 위치로부터 비틀어져 설계상에 고려되지 않은 응력을 발생시킴으로써 구조적 문제를 발생시키기도 한다²⁾.

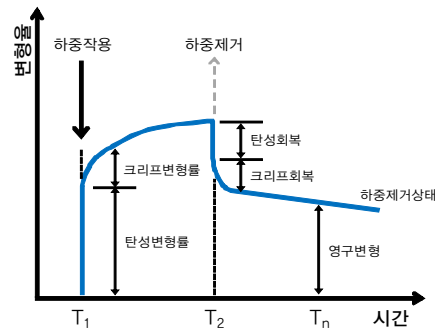


그림 1. 콘크리트의 크리프 변형 개요

본 특집기사에서는 초고층구조물 수직부재의 수축량 예측 프로세스에 대해 현재 건설 중인 제 2롯데월드 타워를 사례로 소개하고, 본 구조물에 적용된 고성능 콘크리트를 대상으로 재료시험을 통한 탄성계수 및 크리프 특성 등을 제시하며, 이를 고려한 수직부재 시공프로세스를 간략히 기술하고자 한다.

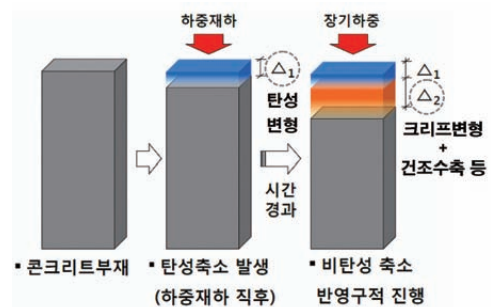


그림 2. 수직 부재 축소량의 구성

2. 초고층건축 수직부재의 수축제어 시공개요

초고층 구조물의 설계와 시공에서는 횡변위 제어, 콘크리트의 품

질 및 압송 기술, 조인트 관리 등 다양한 첨단 기술들이 요구된다. 그 중 축소량의 예측기술은 구조적 안전성과 사용성의 측면에서 반드시 고려되어야 할 사항이다. 구조적 안전성 측면에서는 구조물의 기울어짐 발생으로 인한 엘리베이터 운행 등 안전성뿐만 아니라 추가적으로 발생하는 응력에 따른 부재의 변형으로 인해 구조물 자체의 안전성도 위협받게 된다. 또한 사용성의 측면에서도 지속적인 축소량으로 인해 커튼월 등의 외장재 변형과 파기가 발생할 수 있고, 마감재의 파손으로 인한 하자과 경제적 손실이 발생하며, 슬래브의 경사발생으로 인한 거주자의 불편을 초래할 수 있다. 따라서 구조물의 수직부재에 대한 변형은 설계의 초기 단계부터 준공과 사용에 이르기까지 정확한 예측과 보정, 그리고 지속적인 모니터링을 통한 관리 등이 필요할 것이다.

이러한 필요성에 준하여 제 2롯데월드 타워의 축소량 검토는 <그림 3>과 같은 과정을 통해 이루어졌다.

최초 계획단계에서는 최적화된 고성능 콘크리트의 배합을 설계하고, 이에 대한 기본물성을 검토함과 동시에 기존 문헌 조사를 통해 축소량을 예측·추정하였다. 또한 축소량 해석을 수행하여 공사단계에서 발생할 수 있는 문제점을 미리 예방하고자 하였다. 이와 같이 사전에 검토된 구조물의 변형거동을 반영하여 기본적인 시공기법을 구축하고, 응력에 대한 완화방안

을 수립하였다. 그러나 문헌의 조사와 수치적 해석만으로 수직부재의 축소량을 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 일이며, 재료시험을 통해 실험적·실증적 검토가 이루어져야 한다. 재료시험단계에서는 크리프 변형 및 건조수축 등의 다양한 평가를 실시하고, 도출된 고성능 콘크리트의 재료 물성치를 반영하여 본 해석을 진행하였다. 이렇게 예측된 결과를 현장의 시공공정에 반영하기 시작하며, 이후 기둥 구조물 등에 대한 축소량의 실측과 보정을 통한 재해석을 수차례 반복함으로써 높은 안전성을 확보할 수 있다.

3. 재료시험에 의한 고성능콘크리트의 변형특성 검토

3.1 고성능콘크리트의 역학적 특성

ACI 318 규준에서는 콘크리트 강도가 6 ksi 이하인 콘크리트에 대하여 시험을 통해 시간에 따른 압축강도 및 탄성계수를 식(1) 및 (2)와 같이 제안하고 있다.

$$f'_c(t) = \frac{t}{A+Bt} f'_c \dots\dots\dots (1)$$

$$E_c(t) = \alpha \times 10^{-6} \sqrt{\rho^3 f'_c(t)} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $f'_c(t)$ 는 재령에 따른 압축강도(MPa), f'_c 는 재령 28일 압축강도(MPa), $E_c(t)$ 는 재령에 따른 탄성계수(GPa), ρ 는 콘크리트 밀도(kg/m^3), A, B, α 는 실험상수이다.

그러나 탄성계수는 배합조건에 따라 그 특성이 다르고 탄성 변형에 직접적인 영향을 미치므로 현장콘크리트에 대한 탄성계수 시험을 실시해 시간에 따른 탄성계수 값을 도출하여 이를 축소량 예측 데이터로 사용함으로써 정확한 탄성 축소량 예측이 가능하다.

제2롯데월드타워에 적용된 고성능 콘크리트는 설계기준 강도

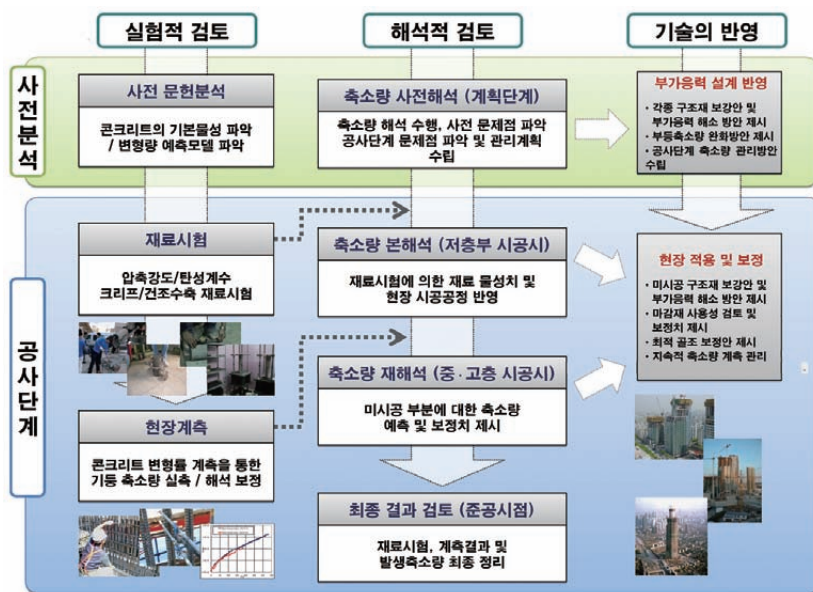


그림 3. 타워의 수직부재 변형 검토 절차

60, 70, 80 MPa의 수준으로 섬유혼입유무 및 양생조건, 골재의 종류 및 크기 등에 따라 압축강도 및 탄성계수가 평가되었다. 또한 <그림 4>와 같이 고성능 콘크리트에 대한 실험결과를 바탕으로 회귀분석하여 기존모델 식(1) 및 (2)을 기반으로 하는 압축강도 및 탄성계수 예측식을 제안해 해석에 적용하였다.

실험결과 석회암 골재를 사용한 콘크리트가 화강암골재를 사용한 콘크리트에 비해 상대적으로 높은 압축강도 및 탄성계수를 발현하였다. 또한 골재의 영향으로써 석회암 골재 13mm가 20mm 골재에 비해 높은 역학적 특성을 발현하였다. 재료적 실험결과를 바탕으로 ACI model 기반의 실험상수를 제시하였으며, 탄성계수의 경우 기존모델의 예측결과보다 다소 낮게 나타났다. 이러한 연구결과를 해석적 분석방법에 적용하였다.

3.2 고성능콘크리트의 변형특성

구조물 수직부재의 축소량은 탄성변형과 비탄성변형의 합으로 이루어지며, <표 1>과 같이 다양한 요인에

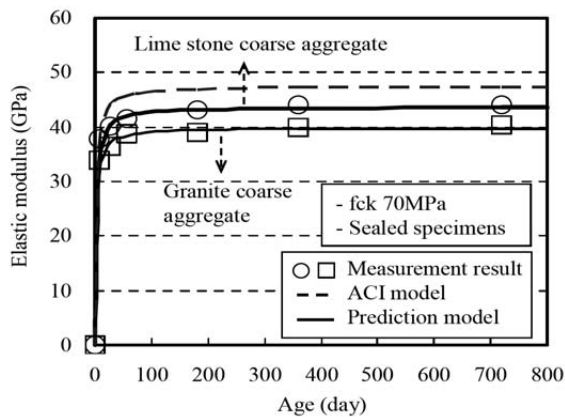


그림 4. 재령에 따른 탄성계수 거동과 예측식

표 1. 축소량의 영향요인

구분	영향요인	고려변수
콘크리트 성질	콘크리트 배합	단위시멘트량 / 물시멘트비 공기량 / 슬럼프 / 시멘트 종류
	양생	양생조건 양생온도
부재형상, 환경변수	주위환경	콘크리트 온도 상대습도
	형상	체적-표면적비
하중	하중, 재하이력	콘크리트 재령
	응력조건	하중지속기간 / 응력비

영향을 받는다. 비탄성 변형은 시간의존적 장기거동으로써 콘크리트의 물성, 현장 시공계획의 변화, 환경의 변화 및 시공공정의 변화 등의 다양한 변수가 존재하며, 이에 초기 예측이 어려워 시공시 재료시험 및 계측을 통한 모니터링이 필요하다. 이러한 크리프 거동에 따른 크리프계수를 예측하여 설계 또는 구조 해석 시에 반영하는 방식을 취하고 있으며, 크리프계수는 콘크리트의 강도, 부재의 크기 및 형상, 온습도조건, 하중재하시기 및 재하 하중크기 등과 같은 여러 변수의 영향에 따라 변화하게 된다.

이에 본 크리프 시험에서는 <그림 5, 사진 1>과 같이 압축강도(고강도), 재하재령과 및 양생조건(기본크리프(Basic creep- Sealed 조건) 및 건조크리프(Drying creep-Unsealed 조건)을 주요인자로 설정하여 실험을 실시하였다. <그림 6>과 같이 약 2년까지 측정된 크리프 변형을 바탕으로 예측을 시행하고자 하였으며, 거동의 유사성, 배합 및 시험방법의 반영도, 해석 틀

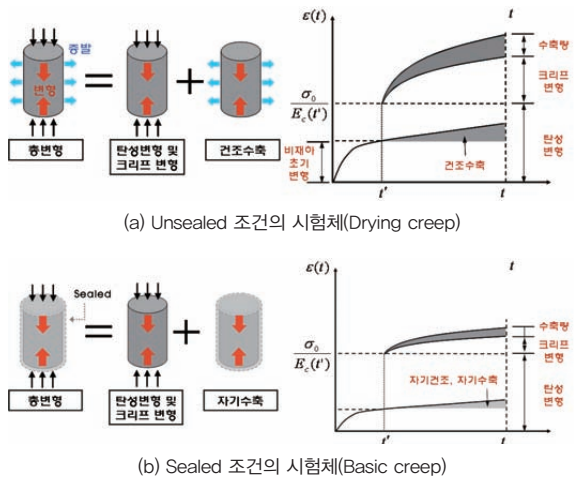


그림 5. 건조/자기수축의 조건을 고려한 콘크리트 크리프 변형의 개요

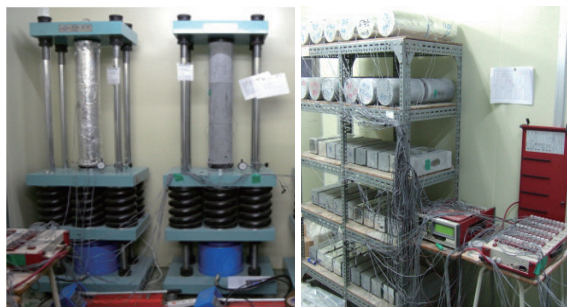


사진 1. 콘크리트 변형시험 전경

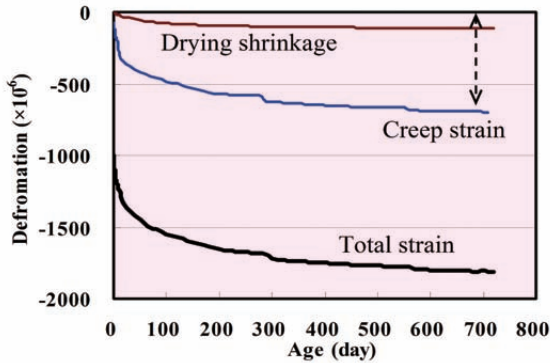


그림 6. 크리프 시험전경(100ton급 크리프 시험기)

등을 고려하여 식(3) 및 (4)의 ACI-209 모델을 바탕으로 <그림 7>과 같이 회귀분석을 통한 모델상수를 도출하였다.

$$v_t = \frac{t^{0.6}}{10+t^{0.6}} v_u \dots\dots\dots (3)$$

$$v_u = a\gamma_c \dots\dots\dots (4)$$

여기서, v_t 는 재령에 따른 크리프 계수, v_u 는 극한 크리프 계수, t 는 하중 재하 이후의 시간(day), γ_c 는 시험조건(하중재하시험, 습도, 시험체 치수 등)별 계수값들의 곱, a 는 실험상수로서 ACI 모델에서는 2.35이다.

<그림 8>은 실험에 의해 평가된 고성능 콘크리트의 크리프 계수에 대해 국내 크리프 연구논문⁴⁾과 비교한 것이다. 본고에서는 시험 요인과 유사한 조건만을 대상으로 비교 검토한 것이다. f_{ck} 30 MPa 이상의 콘크리트에 대해 Unsealed 및 28일 재하 조건에서의 크리프계수는 압축강도의 증가에 따라 일정하게 감소하는

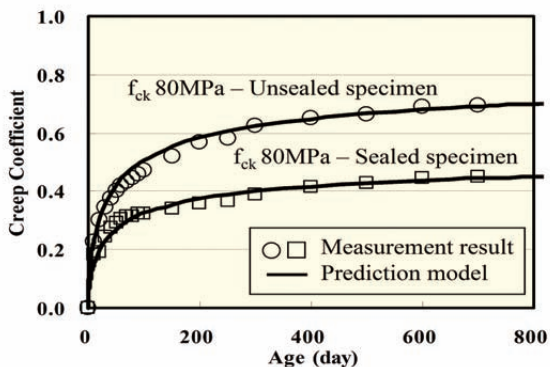


그림 7. 크리프 계수의 실측값과 예측값

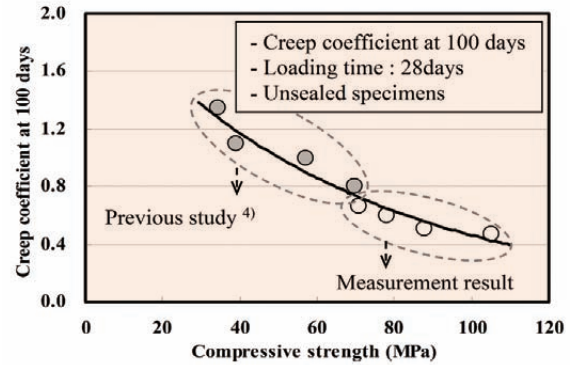


그림 8. 크리프계수에 대한 실험결과 및 선행연구와의 비교 검토

경향을 보였다. 이와 같이 기존 실험결과와 비교하였을 때 일정관계를 유지한다는 점에서 실험결과의 활용 가능성을 확보할 수 있었다.

모든 시험조건에 대해 2년간의 크리프 변형을 측정 한 후 회귀분석을 통해 수정모델의 상수들을 도출하였다. <그림 9>는 재하재령시의 압축강도와 예측된 극한 크리프계수와 관계를 나타낸 것으로 재하재령에 관계없이 재하시의 압축강도가 높을수록 극한 크리프계수는 감소하는 경향을 나타내었다. ACI 모델에서는 다양한 재료적 요인을 반영하고 있으나 물결합재비 또는 압축강도의 반영에 한계를 나타내었다. 그 결과 측정결과와 다소 차이를 나타내었으며, 이에 <그림 9>의 상관관계를 반영하여 상수 a 의 값을 최종 도출하였다

- f_{ck} 60 ~ 80 MPa의 범위조건

- 1) Unsealed 조건의 경우, $a = 0.95 \sim 2.0$
- 2) Sealed 조건의 경우, $a = 0.9 \sim 1.2$

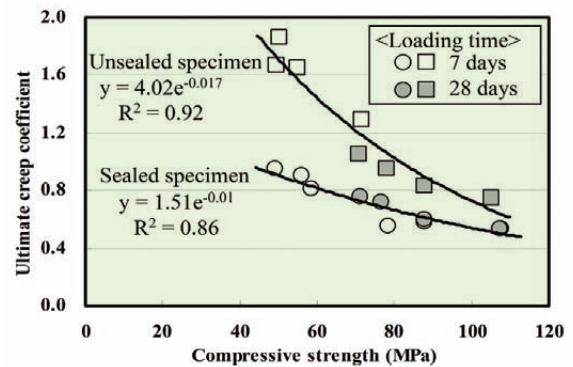


그림 9. 재하재령시 압축강도에 따른 극한크리프계수

제2롯데월드에서 적용된 고성능 콘크리트는 내화성을 확보하기 위해 폴리믹스 섬유(나이론섬유 + 폴리프로필렌섬유 + 폴리에틸렌 분말의 조합)를 약 0.1% 혼입하였으며, 그 섬유 혼입 유무에 따른 크리프 변형의 차이는 나타나지 않았다.

한편, 콘크리트의 비탄성변형에는 크리프 변형 외에도 자기수축 및 건조수축 등이 있으며, 이에 대한 재료시험은 KS에 준하여 <그림 10>과 같이 진행하였다. 건조수축의 경우 ACI 모델과 유사한 거동을 나타내었으며, 이를 기준으로 수정모델을 제시하였다. 그러나 자기수축의 경우 초기 7일 이전에 약 85% 이상 발현되는 특성을 나타내었으며, 이러한 거동은 Miyazawa⁵⁾ 등이 제시한 예측식과 유사하여 수정모델을 제안하여 반영하였다(사진 2).

압축강도, 탄성계수, 크리프 및 수축변형 등에 대한 실험결과는 해석적 검토 부분에 반영되었다. 수행한 실험결과가 한정적인 관계로 보다 명확한 결과를 도출하기에는 한계가 있었다. 향후 초고층 구조물의 수직 부재에 대해 보다 정확한 수축변형량 예측을 위해서는 다양한 연구를 통한 데이터의 축적과 국내의 재료에 적합한 모델의 개발이 필요하다.

4. 기동축소량의 해석, 계측 및 시공보정기술

4.1 재료특성평가 해석 반영

타워와 같이 복잡한 구조물의 기동 축소량 산정을 위해서는 현장 공정, 공사 진행에 따른 하중의 변화, 재료특성의 시간의존적 성질 및 주변 부재들간의 상호 영향 등 다양한 요소들을 고려해야 되기 때문에 단순 계산식의 적용보다는 해석 S/W를 이용한 접근이 필수적이다. 본 프로젝트의 경우 타워의 기동축소량 산정을 위하여 시공단계 해석과 재료의 시간의존적 성질을 동시에 반영할 수 있는 midas/GEN을 활용하였으며, midas/GEN의 시공단계 및 재료물성치 입력 화면을

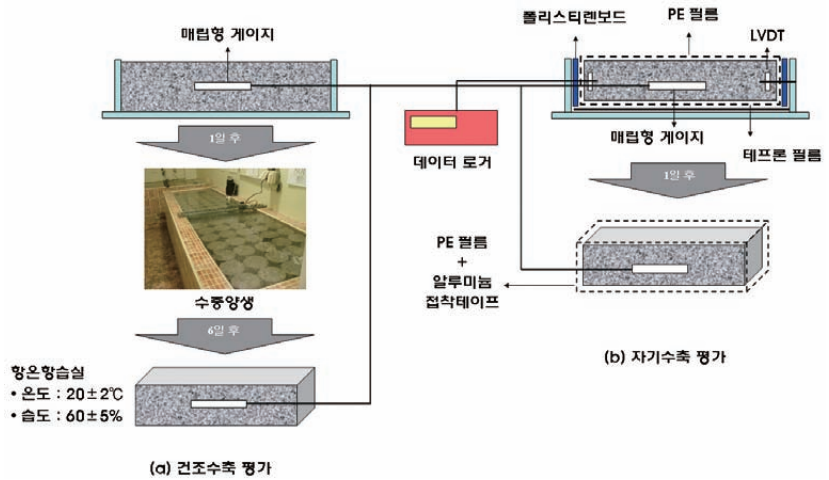


그림 10. 콘크리트의 건조 및 자기수축 평가방법 모식도

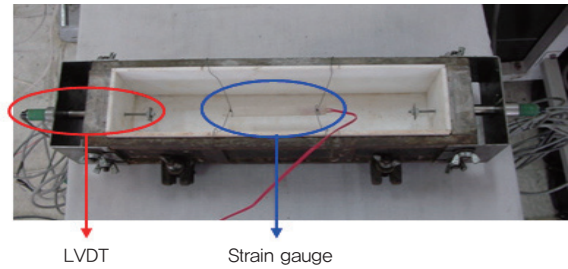
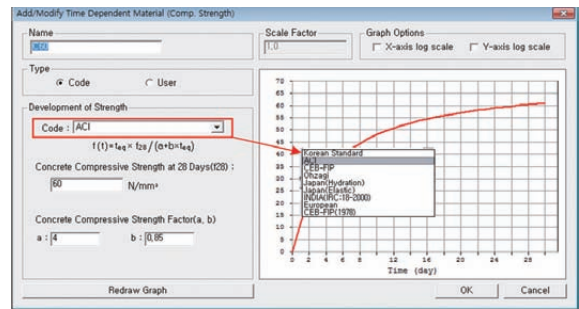
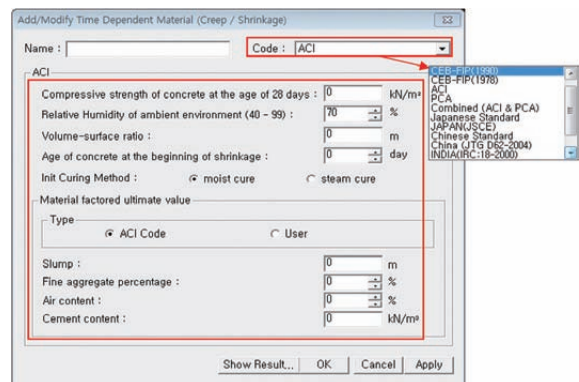


사진 2. 자기수축 및 건조수축 평가



(a) 탄성계수 입력창



(b) 콘크리트 장기변형(건조수축, 크리프) 특성 입력창

그림 11. 시간의존적 재료물성치 입력창

〈그림 11〉에 나타내었다.

특히, 현장 시공단계의 정밀 적용을 위해서 코어, 메가기둥 및 아웃리저 등의 주요 골조들이 시공순서를 현장 공사 현황에 맞추어 적용하였으며, 누적 하중도 슬래브와 같은 골조하중 및 커튼월, 경량벽체, 바닥/천정 마감하중 등으로 세분화하여 단계별로 해석에 적용하였다. 아웃리저와 같이 강한 강성으로 코어, 기둥간의 부등축소량 결과에 영향을 줄 수 있는 요소의 경우 현장의 Delay Joint 계획을 반영하여 추후 실제 축소량 발생양상을 예측하는 방법을 적용하였다.

4.2 기둥축소량 계측 개요

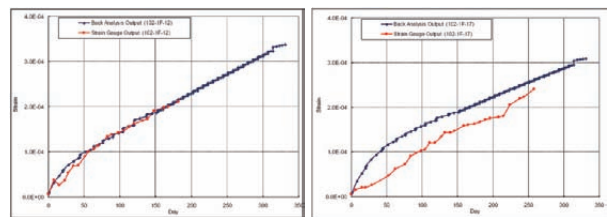
일반적으로 기둥축소량 예측치는 콘크리트 재료의 역학적 특성을 실험을 통해 파악하고 실질적인 공사 Schedule, 하중재하이력, 현지의 환경적 요인, 그리고 계측된 콘크리트 재료특성 값 등을 반영하여 계산한 이론적인 수축값 등을 고려한 해석을 통해 구할 수 있으나 이러한 예측치는 현장에서 발생하는 여러 환경적, 시공적 변화요인을 완벽하게 반영할 수는 없기 때문에 해석 결과와 실제 축소량과의 차이가 나타나게 된다.

실제로 여러 재료들이 혼합된 콘크리트의 특성상 각 수직 부재에 타설되는 콘크리트의 배합은 계절적 또는 레미콘 업체들에 따라 차이가 발생할 수 있고, 초기 보양의 차이, 온도, 습도와 같은 환경적 차이나 시공 오차에 의한 콘크리트 단면 형상의 차이, 시공 공정 변경에 따른 하중 재하 이력의 차이 및 응력 조건의 차이 등 수많은 영향요소들은 예측이 불가능한 경우가 많으며, 이로 인하여 현장 실측 결과는 해석 결과와의 차이를 나타내게 된다. 또한, 초기에 가정했던 하중조건외 변동과 시공중 일시적인 하중재하로 인한 오차도 기둥 축소량의 중요한 변동 원인을 제공한다⁶⁾. 그러므로 건물에서 발생하는 기둥 축소량에 대해서 건물의 구조적 안정성과 사용성을 확보하기 위해서는 기둥 축소량의 현장 발생량을 정확히 확인하고, 시공 시 해석을 통한 예측치를 계측을 통한 실제 축소량과 〈그림 12〉와 같이 비교 검토하여 향후 양상을 재검토 하는 과정이 필요하다. 현재 타워의 경우 8개의 메가기둥과 내측 및 외측 코어벽체의 위치별로 축소량 계측을 수행 중에 있으며, 계측결과에 따라 해석결과 및 골조 보정계획

을 지속적으로 보완하여 현장에 반영하고 있다.

4.3 기둥축소량 시공보정기술

기둥축소량을 고려한 시공보정 적용 방안은 〈그림 13〉과 같다. 일반적으로 공사진행상황에 따른 보정을 실시하게 되는데, 500 m급 초고층 프로젝트에서 예상되는 축소량은 매층 1~3 mm 정도로 미세한 발생이 예상되는데 이를 매층 시공시 반영하기에는 시공오차 등으로 인해 효율적인 시공이 불가능하다. 따라서 구조물 변형 실측값에 대한 해석 및 계측값을 토대로 보정층을 선정하여 보정이전층까지의 누적 축소량을 보정량으로 산정해 시공하며, 일반적으로 코어 월에 비해 메가칼럼의 축소량이 상대적으로 크게 발생하므로 이를 고려하여 매층 보정레벨은 코어 월에 비해 메가칼럼구간을 상대적으로 높게 산정한다. 시간의 경과에 따른 침하량이 반영되기 때문에 축소량이 최상층부가 아니라 중간층에서 가장 크게 발현되는 부분에 대해서도 검토한다. 이러한 보정레벨을 확보하기 위하여 실제 시공시 ACS 거푸집을 사용할 경우 캠버를 적용



(a) 계측을 통한 해석 검증 (b) 오차 발생시 원인분석

그림 12. 기둥축소량 예측 값과의 비교/검증

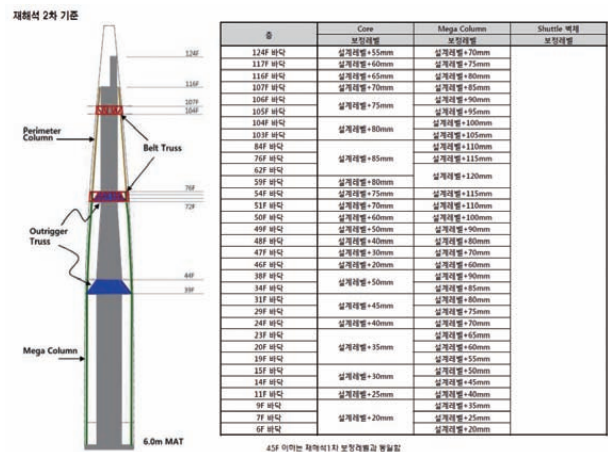



그림 13. 기둥축소량을 감안한 보정 계획

시켜 소요 보정량만큼 ACS 거푸집을 추가로 상승시켜 타설 높이를 조정한다.

5. 맺음말

본고에서는 제 2롯데월드 타워를 대상으로 고성능 콘크리트의 크리프 특성과 이를 반영한 해석 및 시공 기술에 대해 개략적으로 기술하였다. 고성능 콘크리트의 적용이 점차적으로 증대되고 있으나 크리프 특성에 대한 데이터는 충분하지 않은 실정으로 이에 대한 지속적인 관심과 연구가 필요하다. 또한 재료시험의 결과가 있더라도 실구조물의 정확한 예측과 시공, 또는 복합적인 분석 등의 설계 기술은 외국의 기술에 비해 아직 부족한 상황이다.

향후 국내 초고층 구조물의 발전을 위해 초고층 구조물의 재료분야 전문가 및 엔지니어들에 대해 육성 및 지원이 필요하고, 선진 업체들과의 유기적인 협업관계와 체계적인 시스템의 구축이 요구된다고 판단된다. 

담당 편집위원 : 김재요(광운대학교) kimjyo@kw.ac.kr

참고문헌

1. 차수원, 오병환, '콘크리트의 크리프와 구조물의 거동에 관한 의견', 콘크리트학회지, Vol. 15, No. 1, 2003, 1, pp. 89 ~ 94.
2. 정은호, 김형래, '매개변수에 따른 기동축소량 변화에 관한 연구', 콘크리트학회 논문집, Vol. 12, No. 4, 2000, 8, pp. 59 ~ 67.
3. Fintel M, Ghosh S and lycngar H, "Column Shortening in Tall Structure—Prediction and Compensation", Portland Cement Association, Stokie, Ill, 1987, 34 pp.
4. 문재흠, '콘크리트 강도대별 크리프 예측모델 평가', 구조물진단학회지, Vol. 14, No. 4, 2010, 7, pp. 154 ~ 159.
5. Tazawa and Miyazawa, "Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials", Magazine of Concrete Research, Vol. 49, No. 178, 1997, pp. 15 ~ 22.
6. 롯데월드타워 프로젝트 신축현장 수직/부등축소량계측 분석 용역 계측보고서.



김규용 교수는 충남대학교 건축공학과에서 박사학위를 취득한 후 일본 독립행정법인 건축연구소의 연구원을 거쳐 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소에서 근무한 경력이 있으며, 현재 충남대학교의 건축공학과 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 콘크리트 구조물의 내충격/방폭, 내화, 크리프, 자기수축, 친환경소재이며, 우리학회 특수환경위원회 위원장을 맡고 있다.

gyuyongkim@cnu.ac.kr



구경모 연구원은 충남대학교 건축공학과에서 Hydration Heat and Deformation Behaviors of High Strength Concrete Considering Hot Weather Condition로 박사학위를 취득한 후 현재 동대학 사회기반시설연구소에서 박사후 연구원으로 근무하고 있다. 주 관심 연구분야는 고성능 콘크리트의 수화열 특성과 DEF, 자기수축 및 크리프 등의 변형 특성이다.

kkm1203@cnu.ac.kr



문형재 과장은 충남대학교 건축공학과 박사과정에 재학 중이며, 2006년부터 롯데건설 기술연구원 및 잠실 제2롯데월드 현장 콘크리트 기술팀에서 근무하고 있다. 초고층용 고성능 콘크리트 배합설계/품질관리 및 각종 기술지원을 담당하고 있으며, 수축제어 특성 연구 과제를 진행하고 있다.

doorbrother@lottenc.com