

초고층 건물의 Column Shortening보정에 미치는 영향요소

문일원¹, 최기봉^{2*}

The Influence Factors on the Compensation of Column Shortening in Tall Buildings

Il-Won Mun¹, Ki-Bong Choi^{2*}

Abstract: The causes of column shrinkage and the codes that have been studied up to now are discussed. The documents mentioned in the code deal with the drying shrinkage, creep, compressive strength and elastic modulus of the specimen, and the elastic deformation calculated from the structural analysis. However, the deformation due to the temperature caused by the long term monitoring is less than that caused by the factors generated by the previous studies. In the previous studies, it was found that dehydration shrinkage, creep, and elastic deformation were not considered for temperature-induced deformation, while for the specimen experiments, the temperature-related items were replaced with the humidity-related terms. The compensation value by the proposed equation showed error of 4.9 mm in the upper direction and 1.0mm in the lower direction when calculating column shortening, and it was found that its value by the proposed equation almost coincided with the measurement value in Site. Therefore, it is necessary to further study the temperature that can be omitted in calculating the existing column shortening, to consider the influence factors, and to supplement the criteria for the temperature measurement of the structure as well as the specimen tests.

Keywords: Column shortening, Compensation, Temperature, Shrinkage, Creep, Elastic deformation, Monitoring, Stability, Serviceability

1. 서론

초고층 건축물의 공사에 있어 기둥축소량을 적용한 시점은 대표적으로 1998년 준공한 Kuala Lumpur City Center를 시작으로 보면 근래의 일이다. 하지만 이미 30~40층 이상의 건물에 시험적으로 적용하여 계측을 시행하고 평가하는 사례는 많이 수행되어져 왔지만, 초고층 건물에 있어 그 적용사례는 많지 않다.

90년도 후반부터 초고층 건물의 시공과 더불어 고강도콘크리트 재료의 사용으로 그 중요성이 증가하고 있으며, 기둥축소량의 적용성에 대해 고려하여야 할 사항은 다음과 같이 많은 요소들이 존재한다.

- ① 건조수축과 크리프
- ② 탄성계수
- ③ 콘크리트 배합재료의 품질 : 모래, 시멘트, 골재의 종류, 혼화재의 종류

- ④ 시공조건
- ⑤ 계측센서의 배치방법 및 종류 : 진동현식, 전기저항식 변형률센서, 광변형 센서
- ⑥ Calibration
- ⑦ 적용코드 : 기둥축소량 기준
- ⑧ 기둥축소량의 계산 및 구조계산 시 1차원 또는 3차원의 구조해석
- ⑨ 환경적 영향 (지역 및 온도)
- ⑩ 골조 시공방식 : Core선행, Core 후행(철골 선행), 동시타설 등

각 현장들은 상기의 내용들을 재료시험 및 센서의 설치 전부터 신중하게 검토, 분석하여 현장에 적용한다.

현장에서 시공시 적용하는 보정값(Compensation)의 경우 기둥축소량 구조계산에 의한 값으로 적용하지만, 계측 및 측량에 의한 측정값의 경우 실제 보정값과 차이를 나타내는 경우가 많은 것으로 사료된다. 기둥축소량의 구조계산은 배합과 정하여진 건조수축과 크리프, 탄성계수에 따라 수행하지만, 현실적인 값은 배합 시 사용하는 재료 및 재료의 수치에 따라 그 결과가 달리 나타나며, 재료시험에 의한 값을 적용할지라도 기둥축소량의 구조계산 값과 측정에 의한 값은 달리 나타나는 경우가 많이 발생한다.

¹정회원, 가천대학교 건축학과, 박사과정

²정회원, 가천대학교 건축공학과, 교수, 교신저자

*Corresponding author: kbchoi@gachon.ac.kr

Dept. of Architectural Engineering, Gachon University, Seongnam, 13120, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

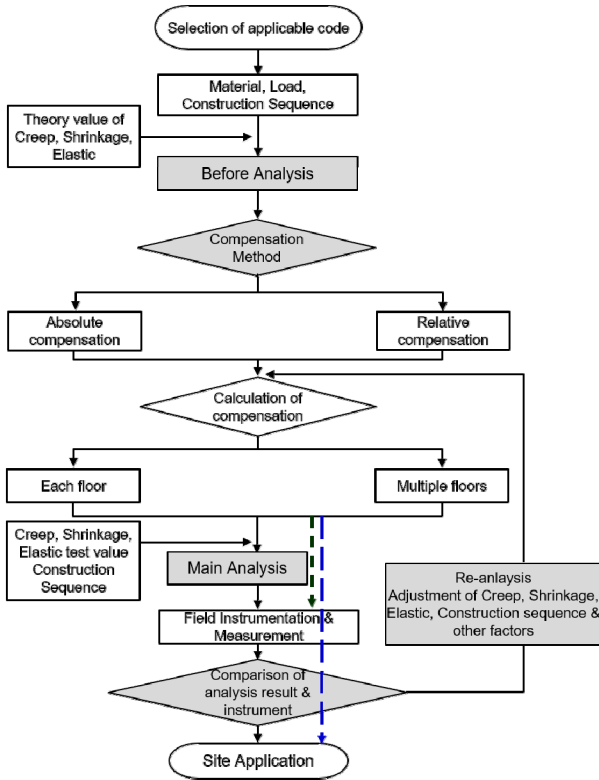


Fig. 1 Applying process of column shortening

현장 및 설계시 진행되고 있는 기동축소량 보정에 대한 프로세스는 Fig. 1과 같다. 하지만 현장의 여건에 따라 Fig. 1의 프로세스는 다른 형식으로 조정하여 수행할 수 있으며, 실험 테스트 값의 실험시기를 앞당길 경우 프로세스는 단축할 수 있고, 예시로 적용한 프로세스는 테스트가 현장 개설 후 적용되었을 경우에 해당하는 사항으로 사전에 콘크리트 배합 등의 과정을 수행하여 그 값을 가지고 있을 경우 충분히 Flow의 조정이 가능하다. 보정방법의 적용형식은 절대적인 것은 아니므로, 현장의 조건에 따라 다른 혼합방식을 적용하여도 된다. 하지만, 그 방법의 적용시 왜 보정을 하는지, 그 보정방법의 의미에 대해 충분한 파악이 필요하며, 주요부재나 내부의 마감재요소에 대해 어떤 결과가 발생할 지에 대해 충분한 검토가 수행된 후 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 보정의 필요성은 구조적 재료요소에 의해 발생하는 기본적인 변형량도 있지만, 시공의 공정에 의해서도 발생한다.

2. 본 론

2.1 기동축소량의 요소

2.1.1 시공 및 환경적 요소

기동축소량(Column Shortening)이란 하중, 재료(탄성체의

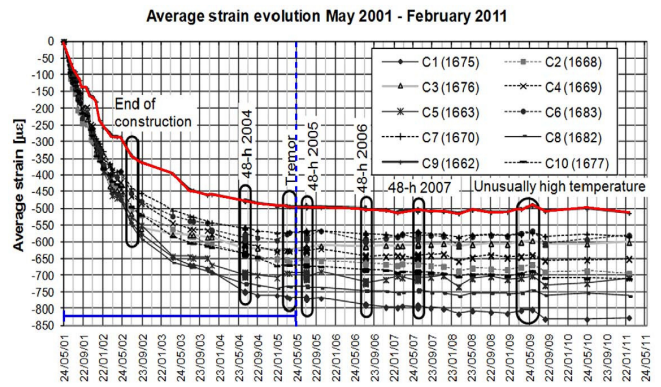


Fig. 2 Stabilization period of column shortening(Glisic, 2013)

거동, 건조수축과 크리프의 원인) 및 공정요인에 의해 시공 후에 수직 및 수평방향의 변형이 발생하는 현상을 말한다.

건물이 고층화되면서 기동축소량에 의한 변형량 및 그에 상응하는 응력이 증가하면서 구조적 문제와 관련하여 관심도가 높아지게 되었으며, 현재까지 주로 수직적 요인에 대해서만 연구를 수행하고, 1차원적 기동축소량에 대한 구조계산을 수행하여 공사에 반영하여 왔으며, 실험실의 재료시험 결과만으로 설계와 시공에 적용한 것이 현실이다.

Fig. 2와 같이 10년간의 모니터링결과(B. Glisic, 2013)에 의하면 각 위치별로 수축량의 차이도 있지만, 온도의 영향을 받는 부재와의 차이는 확연히 나타나지만, 기동축소량 산정에 있어 온도에 대한 요소를 배제한 상태(Thermal Strain $\Delta\epsilon_T=0$)에서 계산하여 반영하고 있는 상황이다.

북극지역의 초고층 건물과 적도지역의 초고층 건물을 설계하고 시공시 그에 따른 기동축소량 값은 동일하게 계산이 된다. 즉, 극도의 차이를 나타내는 온도결과에 의해서 발생하는 수직변형량은 구조체에서 발생하는 응력에서 안정성(Stability)과 사용성(Serviceability) 문제가 서로 다른 위치에 있는 건물에서 발생할 수밖에 없다.

최근 초고층 건물이 증가하면서 철근콘크리트의 재료를 가진 구조물이 증가하는 추세이며, 기동축소량의 구조계산 결과를 반영하는 추세가 점점 증가하고 있다. 이와 같은 추세에 대해 어떠한 수치들을 적용할 경우 기동축소량 현상을 보다 정확하게 제어할 수 있는지 다음과 같이 나열할 수 있다.

- ① 시공 시 적용할 콘크리트 배합에 대한 재료시험
- ② 재료시험에 따른 시공 전 Elastic 및 Inelastic deformation 값 산정
- ③ 기계적 장치 및 콘크리트 실험에 의한 계측값으로 시공 중에 지속적으로 보정량의 수정 및 반영
- ④ 시공 공정에 따라 수직부재의 변형량이 다르게 나타남.
- ⑤ 공사방법
 - Up to 및 Subsequent to 방식

- 코아와 주변 기둥요소의 일체 시공방식
 - 코아의 선 시공방식
 - 기둥의 선 시공방식
 - 철골 선 설치방식(가설구조)에 따라 변형량 산정이 다르게 나타난다.
- ⑥ 공사 지역에 따라 온도의 증감에 따른 기둥축소량의 추가 변형량.
- ⑦ 공사시의 구조체 주변의 온도와 공사 후 건물실내의 온도변화에 따라 발생하는 기둥축소량의 변화.
- ⑧ 3차원적 FE해석모델에 의한 부등축소량으로 발생하는 응력의 변화(초고층으로 인한 Warping 및 St. Venant요소에 의한 변형성분, FE Model의 수직, 수평성분의 정확 한 평가에 따라 발생하는 변형에 따른 응력의 변화).

①~⑧의 사항들을 미반영시 구조체에 부등축소량(differential shortening)에 따라 초과응력이 발생하거나 기울기로 인한 사용성 문제와 같은 안정성 및 사용성 문제를 초래하게 된다.

2.1.2 재료적 요소

기둥축소량에 영향을 미치는 요소들은 상당히 많이 존재하지만, 그중에서 재료적 요소들을 크게 분류하면 선형적 요인과 비선형적 요인으로 분류되어 왔다.

- 1) 선형적 요인(Elastic Element)
 - (1) 탄성변형(Elastic deformation)
- 2) 비선형적 요인(Inelastic deformation)

2.1.2.1 건조수축(Shrinkage)

건조수축은 분류상 콘크리트에서 발생하는 수축종류의 일 부분으로서 Drying Shrinkage를 총칭처럼 사용해온 용어이다. 건조수축은 수분의 손실 또는 이동으로 발생하는 현상을 말하며, 이에 해당하는 종류는

- 건조수축(Drying Shrinkage)
- 소성수축(Plastic Shrinkage)
- 자기수축(Autogenous Shrinkage)
- 탄화수축(Carbonation Shrinkage)

추가적으로 열팽창수축(Thermal dilation shrinkage)으로 분류된다.

2.1.2.2 크리프(Creep)

크리프는 응력이 작용하는 부재에서 시간경과에 따른 변형도의 증가 즉, 그 길이가 수축하는 것으로 나타나며, 크리프의 예측은 부재의 크기 및 철근 등을 고려하기 위해 무근 콘크리트 실린더의 계측된 크리프를 수정한 것을 사용하여 반영한다. 설계단계에서는 크리프와 같은 현상들은 고려되지 않지

만, 설계마지막 단계에서는 시공을 위한 부재의 보정수치를 반드시 표현하여야 한다.

실험에서 발생하는 크리프는 기본 크리프(Basic Creep)와 건조 크리프(Drying Creep)로 분류된다.

① 기본 크리프(Basic Creep)

주변으로부터 수분의 이동이 차단된 상태의 변형으로 이 시기 이후부터 발생하는 것을 말하며, 초기 하중재하시점과 하중재하 증가 속도에 비례하여 발생한다.

② 건조 크리프(Drying Creep)

주변 환경으로 수분이 계속 배출되는 상황에서의 변형을 의미하며, 하중재하의 초기단계에서 발생한다.

2.1.3 기둥축소량의 보정방법

기둥축소량의 보정방법에는 절대보정과 상대보정이 있으며, 보정방법이 필요한 이유는 수직부재의 수직적 레벨을 설계 평면레벨에 맞추기 위해 기준(Master)이 되는 부재와 종속(Slave)이 되는 부재간의 부등축소량을 제어하기 위해 필요한 보정방법이다. 보정방법은 Fig. 3과 같이 수직부재에 지지되는 수평부재들의 사용성(Serviceability) 및 처짐으로 발생하는 응력은 안정성(Stability)을 충족시키고, 수평부재와 수직 부재에 발생하는 응력을 만족시키기 위해 수직부재의 길이를 조정하는 방법이다. 콘크리트 구조체의 건물에서 콘크리트로 보정하는 방법은 2.1.3.1과 2.1.3.2의 방법이 있으며, 구조부재의 종류가 다르거나 이질재료가 적용된 구조물에서는 부등축소량을 보정하기 위해 2.1.3.3과 2.1.3.4와 같은 방법으로 보정을 한다.

2.1.3.1 절대보정

절대보정은 Fig. 3과 같이 건물의 시공시 기준이 되는 부재를 설계레벨에 맞게 보정하는 방법이다. 건물에서 코아벽체와 기둥에서 선시공을 하는 부재에 적용하는 방법으로 설계레벨과 보정치를 구조체 기준으로 적용하는 방법을 의미한다. 즉, 강성이 큰 부재를 절대보정 기준으로 고려하는 것이 효율적이다.

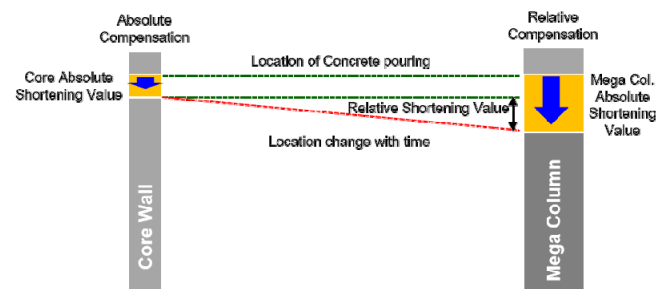


Fig. 3 Compensation Method of column shortening

2.1.3.2 상대보정

선시공 부재에 중속되는 부재의 부등축소량에 적용하는 방법이며, 일반적으로 코아벽체와 기둥 중 선시공되는 코아벽체의 설계레벨에 맞춰 후속으로 시공되는 기둥부재에 설계레벨과 보정레벨을 Fig. 3과 같이 상대적으로 조정하여 맞추는 보정방법이다.

2.1.3.3 Shim Plate보정

2-IFC(International Finance Cenetr)와 ICC(International Commerce Centre)에서 적용했던 보정방법이며, 기둥축소량이 Shim Plate두께 만큼 발생할 때마다 Outrigger단부 하단 또는 상단에 여러장 설치되어 있는 Shim Plate를 한 장씩 제거하여 반대편에 삽입함으로써 부등축소량에 해당하는 수치만큼 보정하는 시스템으로 Fig. 4(b)와 같이 Jack Support를 혼용하여 사용한다.

2.1.3.4 Oil Jack 보정

국내의 초고층 건물인 NEATT에 설치된 기둥축소량으로 인한 부등축소량 보정시스템으로 Shim Plate 보정방법의 적용시 시공의 어려움과 공정의 편리성을 위하여 Viscous Damper와 동일한 원리를 이용하여 공사단계별로 부등축소량 발생치 만큼 Oil이 상부로 이동하여 자동적으로 기둥축소량을 보정하는 시스템으로 Fig. 4(c)와 같이 사용된다.

2.2 온도가 기둥축소량에 미치는 영향

2.2.1 온도에 의한 거동

온도에 의한 구조물의 변화를 언급한 부분은 연구결과(Fintel, 1987)에서 찾아볼 수 있으며, 그 내용은 다음과 같다.

“계절온도변화 및 일교차 모두 외부기둥들이 외기 온도로 부터 보호되지 않는 경우 그 길이의 변화를 발생시킵니다. 외부 기둥들은 온도가 내부기둥의 온도보다 더 높을 때 늘어나

게 됩니다. 이러한 주변에 노출된 기둥들은 내부 기둥보다 온도가 더 낮을 때, 열에 의한 축소 값은 수직하중에 의한 축소 값에 추가됩니다.”

이와 같이 언급된 부분은 온도에 의한 길이변화를 기둥축소량 값에 추가적으로 고려하는 것으로 언급하고 있다. 여기서 언급된 내용은 “열에 의한 축소 값은 수직하중에 의한 축소 값에 추가”라는 언급으로 겨울철에 대한 온도에 대한 내용만 고려하고 있다. 하지만, 건축구조물은 열대지방에서 극지방까지 공사가 이루어지고 있음을 고려할 때, 그 온도변화에 의한 축소량 값은 기둥축소량에 고려하여야 하지만, 연중 온도 변화로 발생하는 그 길이변화를 기둥축소량에 고려하여야 한다. 이는 시공중 “기둥축소량에 의한 값 + 온도변화에 의한 값”으로 나타나는 값이 시공의 정확도를 결정하는데 매우 중요한 요소가 된다. 그러면 그 값을 어떻게 고려하여야 하는지는 현재까지 정확하게 언급된 바가 없다. 이와 같은 내용은 보정시 “Up-to”, “Subsequent to”에 대한 내용으로 실제로 Up-to에 대한 사항이 매우 중요한 요소가 된다. 대부분의 공사는 “Up-to”에서 모든 철근과 접합부가 설치되어 시공되기 때문에 그 레벨이 일치하지 않을 경우 모든 접합 장치들을 새로이 시공하여야 하는 경우가 발생한다. “기둥치수를 관통할 일교차의 온도 영향이 시간적으로 기둥의 길이변화를 유발할 만큼 되지 않는 것”으로 언급하고 있다. 이 사항도 실제 시공시 고려하여야 하는 사항이지만 초기 계획시 센서의 배치를 고려하고, 그 영향이 미치는 시간(Δt)을 산정하여 보정에 반영하여야 하는 사항중의 하나이다. 중요한 것은 기둥축소량 구조계산시 시공시의 온도를 예측하기 어렵고, 시공당일 온도를 고려한 구조해석에 의해 보정량을 산정하는 것은 더더욱 어렵다.

2.2.2 각 지역별 온도

각 지역별로 건물의 보정량에 영향을 미치는 온도는 서로

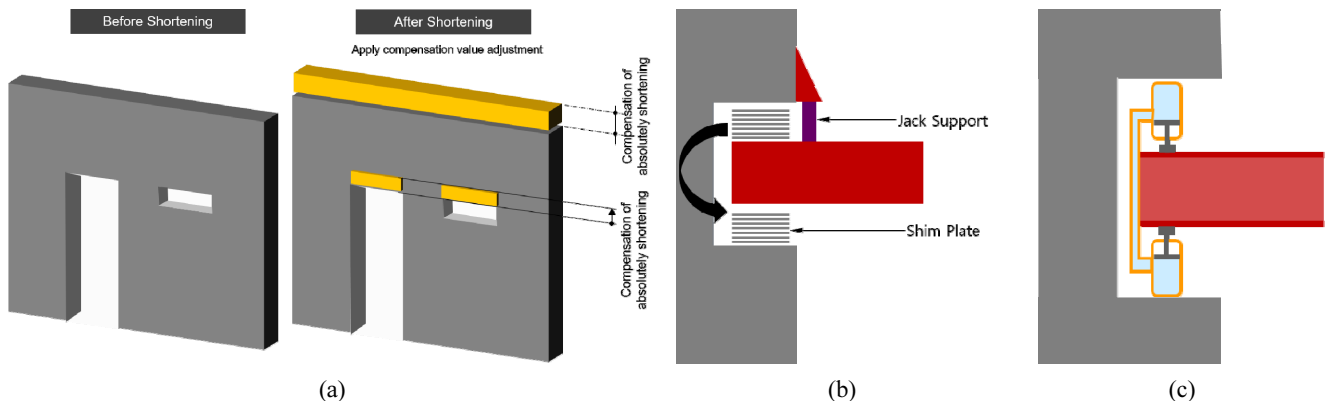


Fig. 4 (a) Compensation Method of core wall shortening; (b) Shim Plate Compensation; (c) Oil Jack Compensation

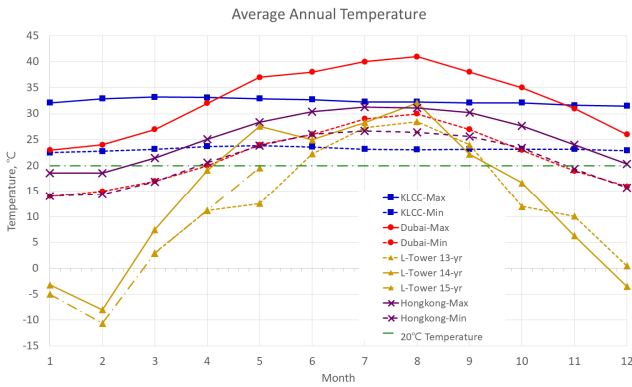


Fig. 5 Annual temperature comparison of region

다른 양상을 보여준다. 말레이시아와 같은 경우는 연중 온도가 일정하게 유지되며 건물의 시공시 보정량의 적용에 큰 어려움이 없으나, 시공 후 발생하는 기동축소량을 고려하여야 하며, 중동과 홍콩의 경우는 겨울과 여름의 온도 차이가 16°C, 10°C 정도의 차이를 나타내어 보정량의 결과값에 큰 차이를 유발하지 않는 온도분포이다. 하지만 Fig. 5에서 보는 것과 같이 한국의 경우는 기상청의 온도발표시점 오전 10:00를 기준으로 표기 한 것을 인용하였으며, 실제 새벽과 오후 1~2시경 기준으로 고려할 때 그 값의 차이는 약 53°C 정도의 차이를 나타낸다.

Fig. 5에서 보는바와 같이 온도 20°C를 기준으로 하였을 때 대부분 초고층이 위치하고 있는 지역의 경우는 상온(온도 20°C)을 상회하는 지역이며, 한국과 같은 경우는 상온대비 상, 하로 움직이는 현상을 볼 수 있다. 이와 같은 경우 시공 시 슬래브, 보, 벽체의 레벨설정 시 오차가 발생한다.

각 기준에서 다루고 있는 축소량 항목에서 Fig. 2에 나타난 것처럼 온도가 동일한 것으로 간주하여 기동축소량 모니터링에서 온도를 고려하지 않고 공사를 수행하거나, 온도의 영향이 어느 정도인지, 또한 어떻게 고려하여야 하는지에 대한 이론 및 경험, 실측의 부족으로 시공이나 구조계산에 어려움이 있으며, 이론적으로 어떻게 적용하여야 할 것인지에 대한 지침이 없는 상황이다.

2.2.3 건물별 보정량 비교

일반적으로 기동축소량에 의한 보정은 절대보정과 상대보정을 사용하며, 그 보정량은 구조체에 발생하는 응력 및 변위를 고려하여 코아와 외주부 기동간의 상대보정을 수행한다. 또한 건물 내부의 파티션, 외부의 커튼월, 수직배관등의 파손을 방지할 수 있는 허용 변위량을 충족하면서 보정량을 결정하여야 하며, 해석에 있어 정확성을 가지는 것 또한 매우 중요한 인자가 된다.

Fig. 6에서 KLCC(Kuala Lumpur City Center)같은 경우 보

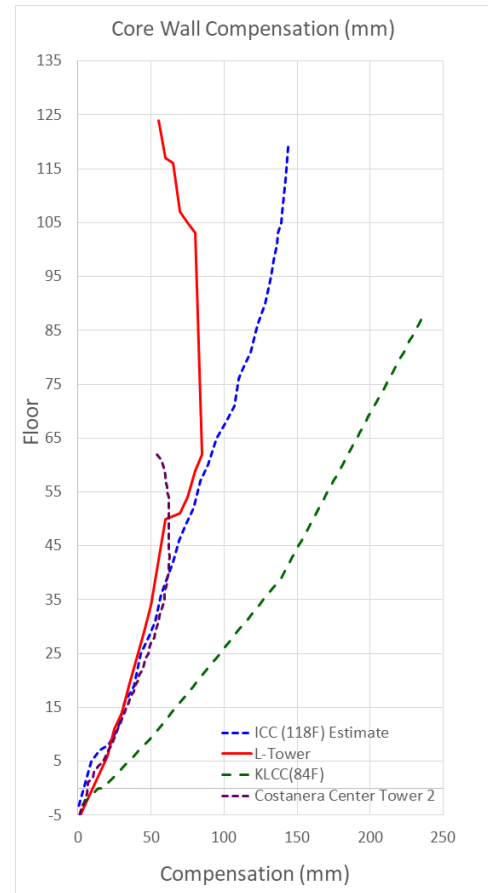


Fig. 6 Relative of each compensation value(Samsung, 1998), (Kim, 2014), (Rene, 2012)

정량을 2년에 대한 보정량을 산정한 것을 표현하였으며, 2 mm의 단위로 보정에 반영하였다. 20년 보정치인 7.5 mm 단위의 보정량이 산출되어 매우 높은 수치로 산정되었고, 실제 보정 시에는 2.0 mm 단위로 보정하여 시공에 반영한 것으로 되어 있다. L-Tower 및 ICC(International Commerce Centre)의 보정량은 몇 개 층별로 대략 5 mm를 보정한 것으로 보고되고 있다. 상부로 갈수록 보정치가 적고 변형량이 적어 역 보정되는 상황을 고려하여 그 양상이 전혀 다르게 나타나는 것을 보여준다.

온도에 대한 보정은 기동축소량에 대한 계산이나 구조해석에서 반영하여 그 수치를 결정하는 것은 시간 및 시공상 공기 문제로 매우 어려운 일이다. 따라서 온도에 대한 보정은 산정된 기동축소량 수치에 시공 당일 온도를 고려하여 그 치수를 결정하는 것이 합리적인 것으로 파악된다. 또한 구조기준에서 대기온도에 대한 기동축소량의 반영여부를 제시하지 못하고 있으며, 어떻게 적용하여야 할 것인지에 대해서도 현재로서는 어려운 현실이다.

2.3 온도로 인한 기동축소량 비교

2.3.1 온도로 인한 기동축소량 비교시 보정수식

이론적 개념과 모니터링결과에 따르면 이론치에 의한 구조 계산에서 산정된 기동축소량 값만으로 정확한 기동축소량의 변위 값을 파악하기에는 현재까지 크리프, 건조수축 및 탄성 변형 외에 기타의 변수가 있는 것을 정확하게 파악하지 못하였음을 알 수 있으며, 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 계절 별 온도 즉, 연중온도를 고려하여 기동축소량에 반영하는 것이 합리적인 것으로 분석하였다. 싱가포르의 건물에서 10년 동안 모니터링한 결과에서 일반적인 경우와 온도의 영향을 받는 경우에 대해 파악된 Fig. 2에서 이론적인 수치와 측정수치에 차이가 많이 발생하고 있으며, 이를 위한 분석이 더 필요하다는 것 또한 알 수 있다.

구조체의 변형은 Hooks의 법칙과 같이 응력과 변형이 비례하고 탄성계수와 변형이 반비례관계인 것을 알 수 있듯이, 구조체의 강성이 존재하는 한 갑작스러운 변형이 발생할 수 없으므로, 시공중에 발생하는 변형은 완만하고 서서히 증가하는 변형이다. 여러 건물의 변형 그래프에서 완만한 곡선이 아닌 값을 나타내는 것은 수직하중 외에 다른 추가 요인이 있음을 보여주는 것이다. 그 사례로 온도변화량과 온도변화에 따른 수직변형이 관련이 있음을 Fig. 5와 Fig. 6에서 수직보정량과 온도그래프를 비교시 그 연관성을 확인할 수 있으며, 현재까지 여러 건물의 시공시 발생하는 계측과 계산결과의 불일치가 왜 존재하였는지를 알 수 있다.

KBC 2016, ACI 209R, CEB-FIP(KBC 2016, ACI 209R 1997, Euro Code 2, CEB-FIP 1990)등의 기준에서 온도에 대한 고려는 건조수축과 크리프에 대해 실험실의 계측치에 대해 고려하도록 되어 있으며, 현장의 계측에 대해서도 고려할 수 있지만, 상대습도 값은 연간 평균습도를 사용하므로 적용하기에도 다소 문제점이 있으며, 매 시간 시공현장의 온도를 고려하여 보정치를 결정하는 것은 거의 불가능에 가까운 일이다.

따라서 코드에서 적용하고는 있는 수식은 먼저 건조수축에 대해 다음과 같이 정의되고 있으며, 적용코드 CEB-FIP 1990과 KBC에 의하면 식 (1)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{sh}(t, t_s') &= \epsilon_{sho} \cdot \beta_s(t - t_s') \\ &= \epsilon_s(f_{cu}) \cdot \beta_{RH} \cdot \beta_s(t - t_s') \\ &= \epsilon_s(f_{cu}) \cdot (-1.55 \cdot [1 - (RH/100)^3]) \cdot \\ &\quad \sqrt{\frac{(t - t_s')}{0.035 \cdot h^2 + (t - t_s')}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{sh}(t, t_s') &= \epsilon_{sho} \cdot \beta_s(t - t_s') \\ &= \epsilon_s(f_{cu}) \cdot \beta_{RH,T} \cdot \beta_s(t - t_s') \\ &= \epsilon_s(f_{cu}) \cdot \left[1 + \left(\frac{8}{103 - RH} \right) \cdot \left(\frac{T - 20}{40} \right) \right] \cdot \beta_{RH} \\ &\quad \cdot \sqrt{\frac{(t - t_s')}{0.035 \cdot h^2 \cdot \exp[-0.06 \cdot (T - 20)] + (t - t_s')}} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)와 같이 온도변화에 대해 대체할 경우, 식 (2)에서 건조수축에 대하여 온도가 변화할 때 습도에 대한 수식항에 온도 값을 대입하여 조정하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 온도에 대해 직접적인 값을 입력하는 항이 없고, 대신 습도 값을 조정함으로써 건조수축 값을 조정하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 구조물에서의 계절적변화에 따른 온도의 영향을 고려할 수 있는 요소가 필요한 상황이다.

크리프는 CEB-FIP 1990과 KBC에서 식 (3)과 같이 정의하고 있다.

$$\begin{aligned} \phi(t, t') &= \phi_0 \cdot \beta_c(t - t') \\ &= \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cu}) \cdot \beta(t') \cdot \left[\frac{(t - t')}{\beta_H + (t - t')} \right]^{0.3} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 크리프 수식을 온도 변화에 대해 식 (4)와 같이 습도와 추가적으로 온도의 선폽창에 대해 고려하고 있음을 알 수 있다. 식 (4)에서 알 수 있듯이, 크리프 수식의 3개항에 대해 온도를 고려하고 있으며, 특히 습도에 대해 고려하는 항과 선폽창은 일반적인 온도에 의한 선폽창계수가 아닌 공시체에 대해서 고려하고 있으며, 습도와 선폽창개념을 조합하여 고려하고 있다. 또한 온도는 상온인 20°C에 대해 고려하고 있음을 알 수 있다.

현재까지의 수식에서 온도변화는 양생중 실험실의 조건을 고려하였으나, 공사중에 이와 같은 온도변화를 고려할 상황이 될 수 없음은 시간적으로 불가능함을 누구나 인지할 수 있다. 따라서 현장에서 발생하는 온도변화는 공시체에서 습도를 고려하고 Creep계산에서 연중습도의 변화를 고려하므로 시공당시의 상황을 고려하여 축소량을 산정하는 것은 어려움이 있으며, 또한 현장에서의 온도변화는 시간마다 변화하는 수치이므로 그 적용성에 어려움이 있다.

$$\begin{aligned}
\phi(t,t') &= \phi_0 \cdot \beta_c(t-t') + 0.004 \cdot (T-20)^2 \\
&= \phi_{RH,T} \cdot \beta(f_{cu}) \cdot \beta(t') \cdot \left[\frac{(t-t')}{\beta_{H,T} + (t-t')} \right]^{0.3} \\
&\quad + 0.004 \cdot (T-20)^2 \\
&= (\phi_T + (\phi_{RH} - 1.0) \cdot \phi_T^{1.2}) \cdot \beta(f_{cu}) \cdot \beta(t') \cdot \\
&\quad \exp\left[\frac{1,55}{273+T} - 5.12 \right] \cdot \left[\frac{(t-t')}{\beta_H + (t-t')} \right]^{0.3} \\
&\quad + 0.004 \cdot (T-20)^2
\end{aligned} \tag{4}$$

여기서, $\phi_T = \exp[0.015 \cdot (T - 20)]$

따라서 현장에서의 온도변화는 산정된 기동축소량에 추가적인 온도변화를 고려한 별도의 수식이 필요하다. 그 수식은 다음에서 산정한 수식과 같이 온도를 고려하여 추가적으로 시간에 따른 변화 및 계절적 요인에 의한 요소를 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

시공시 또는 준공 후 온도에 대한 변형량을 건물의 높이에 따라 정리하면 수식은 식 (5)와 같다. 이 수식으로 Case Study 대상인 L-Tower의 건물에 대해 온도의 축소량을 산정시 상부방향 -4.9 mm, 하부방향 1.0 mm의 차이를 나타내어 상부방향의 치수에서 다소 오차를 나타낸 것으로 나타났지만, 주방향은 하부방향의 경우는 측정결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 식 (5)의 경우 수직온도보정계수를 적용하여 계산하였으며, 여기서 함수는 여러 계수의 조합으로 반영된다.

$$\Delta Y_T = H - S_v - \beta_{vT} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} H_i \cdot (T - 20 - (n_i - 1)) \cdot \alpha + h_1 \tag{5}$$

- H = 시공시 수직 좌표값
- T = 대기중의 온도, °C
- n = 100 m 단위별 개수
- H_i = i 군별 건물높이, m
- h_1 = 최상층 시공 높이(시공 해당층의 높이)
- α = 선폽창 계수
- β_{vT} = 수직온도보정 계수
- (Vertical Temperature Compensation Factor)
- S_v = 크리프와 건조수축, 탄성변형에 의한 값

수식 (5)의 계산결과에 대해 기동축소량을 조합시 수식(6)과 같이 전개할 수 있다.

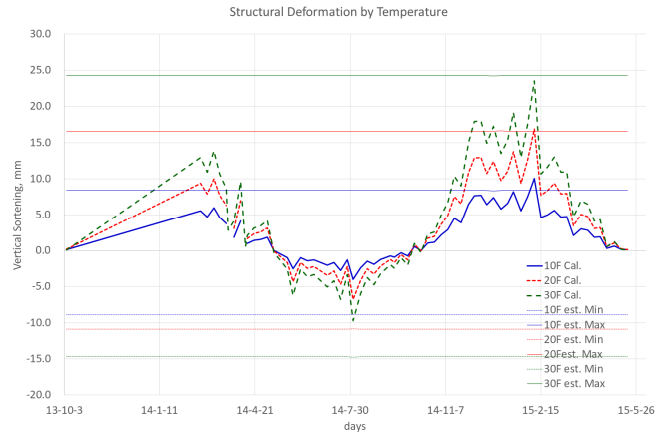


Fig. 7 Vertical shortening value by temperature of eq. (5)

$$\Delta H_T = E + CR + SH + \Delta Y_T \tag{6}$$

여기서, E = Elastic deformation Value

CR = Creep Value

SH = Shrinkage Value

$CR + SH$ = Inelastic deformation Value

ΔY_T = Temperature deformation Value

을 나타낸다.

3. 결론

기동축소량을 발생시키는 원인과 현재까지 연구되어온 각 기준에 대하여 고찰하였다. 기준에서 언급하고 있는 내용들은 공시체의 건조수축, 크리프, 압축강도 및 탄성계수 그리고 구조해석에서 산출되는 탄성변형을 다루고 있으나, 장기간의 모니터링에 의해 나타나는 온도에 의한 변형은 기존의 연구에 의해 발생하는 요소들에 의한 것보다 축소량이 적거나 또는 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 여러 문헌이나 논문에서 기동축소량 고려시 L-Tower의 경우를 제외하고, 온도에 대한 영향을 고려하지 않은 것으로 언급되고 있다.

기존의 연구에서는 온도에 의한 변형에 대해서는 고려하지 않고 건조수축, 크리프 및 탄성변형에 대하여 다루고 있는 것을 확인할 수 있고, 공시체의 실험에 대해서는 온도에 대한 항목은 습도에 대한 항목으로 대체하여 다루고 있음을 알 수 있다. 현장에서 실제 발생하는 문제점의 보안을 위해 제안 식 (5)에 의한 보정수치는 축소량 산정시 상부방향 4.9 mm와 하부방향 1.0 mm의 오차를 나타내어 측정에 의한 수치와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

따라서 기존의 기동축소량 산정에 있어서 누락될 수 있는

온도에 대하여 추가적으로 더 연구하여 그 영향계수(수직온도 보정계수 $\beta_{v,T}$)를 고려하고, 공시체의 시험시외에 구조체의 온도보정에 관한 기준 보완이 필요한 것으로 파악되었다.

감사의 글

본 논문의 연구수행을 위하여 가천대학교 교내연구비의 지원에 대한 결과이며, 이에 감사를 표하는 바입니다.

References

ACI Committee 209R-92 (1997), Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, American Concrete Institute.

CEB-FIP Model Code 1990 (1993), Comite Euro-International du Beton (CEB) and Federation Internationale de la Precontrainte (FIP), 460.

Eurocode 2: Design of concrete structures (BS EN 1992 -1-1:2004), British Standards Institution, 2008, 230.

Glisic, B., Inaudi, D., Lau, J. M., and Fong, C. C. (2013), Ten-year

monitoring of high-rise building columns using long-gauge fiber optic sensors, Smart Materials and Structures.

Kim, G. Y., Koo, K. M., Moon, H. J. (2014), Shrinkage Properties Evaluation of High Strength Concrete for Control of Column Shortening, Korea Concrete Institute, 26(5), 29-35.

Korean building code-structural (KBC 2016), Architectural Institute of Korea.

Mark Fintel, S. K. Ghosh, and Hal, L. (1987), Column Shortening in Tall Structures-Prediction and Compensation, Portland Cement Association.

Rene, C. L., Maruane, C. K., Simon, T. S., and Francisco, V. C. (2012), "Costanera Center-Shortenings due to elastic deformation, creep and shrinkage of concrete in a 300-m tall building", The International Concrete Journal.

Samsung Construction (1998), MColumn Shortening of KLCC Tower 2

Zdenek, P. B. and Sandeep, B. (2001), Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures : Model B3, ACI Concrete International, ACI 23, Jan. 2001, 38-39.

Received : 11/21/2017

Revised : 12/22/2017

Accepted : 12/29/2017

요 지 : 기동축소량을 발생시키는 원인과 현재까지 연구되어온 코드에 대하여 고찰하였다. 코드에서 언급하고 있는 내용들은 공시체의 건조수축, 크리프, 압축강도 및 탄성계수 그리고 구조해석에서 산출되는 탄성변형을 다루고 있으나, 장기간의 모니터링에 의해 나타나는 온도에 의한 변형은 기존의 연구에 의해 발생하는 요소들에 의한 것보다 축소량이 적게 발생하는 것을 알 수 있었다. 하지만 기존의 연구에서는 온도에 의한 변형에 대해서는 고려하지 않고 건조수축, 크리프 및 탄성변형에 대하여 다루고 있는 것을 확인 할 수 있고, 공시체의 실험에 대해서는 온도에 대한 항목은 습도에 대한 항목으로 대체하여 다루고 있음을 알 수 있다. 이에 대해 제안식에 의한 보정수치는 축소량 산정시 상부방향 4.9 mm와 하부방향 1.0 mm의 오차를 나타내어 측정에 의한 수치와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서, 기존의 기동축소량 산정에 있어서 누락될 수 있는 온도에 대하여 추가적으로 더 연구하여 그 영향계수(수직온도보정계수, $\beta_{v,T}$) 고려하고, 공시체의 시험뿐만 아니라 구조체의 온도보정에 관한 기준 보완이 필요한 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 기동축소량, 보정, 온도, 건조수축, 크리프, 탄성변형, 모니터링, 안정성, 사용성
