



## 층경사각에 의한 횡변위를 고려한 비정형 고층건물의 횡변위 평가/보정

김윤곤 <sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>현대건설 연구개발본부

### Evaluation and Adjustment of Lateral Displacement of Complex-shaped RC Tall Buildings Considering the Displacement by Tilt Angle of Each Floor

Yungon Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>R&D Division, Hyundai Engineering and Construction, Yongin-si, Gyeonggi-do 16891, Korea

**ABSTRACT** Lateral displacement in the most complex-shaped tall buildings is caused by eccentric gravity loads which are induced by the difference in location between a center of mass and a center of stiffness. The lateral displacements obtained from analysis, using conventional procedures, are prone to overestimate the actual values because much of realignment efforts made during construction phase are ignored. In construction sequence analysis, the self-leveling of slab and the verticality of columns/walls could be considered at each construction stage. Moreover, the displacement compensation can be achieved by manual process such as re-centering - locating to global coordinates through surveying. Because the lateral displacement increases with the building height, it is necessary to set up adjustment plan through construction stage analysis in advance in order to result in displacements less than the allowable limits. Because analytical solution includes lots of assumptions, the pre-adjusting displacement should be reasonably controlled with considerations for the uncertainty due to these assumptions.

**Keywords** : construction sequence analysis, complex-shape, tall building, lateral displacement, verticality

#### 1. 서 론

건물이 고층화되면서 수직부재인 기둥과 벽체의 축변형 차이 -하중분담면적이 큰 기둥의 축소량이 벽체 축소량보다 크게 발생- 가 누적됨에 따라 외장재 균열이나 배관 이음부 등에서 건물 사용성에 문제가 제기되어 왔다. 이에 Fintel et al.<sup>1-3)</sup>은 시공단계해석을 이용해 고층빌딩의 기둥축소량에 관한 예측 및 보정에 관한 연구를 수행하였고, 이를 근간으로 많은 후속 연구들<sup>4-13)</sup>이 수행되었다. 초기에는 각 수직부재(기둥/벽체)별로 검토되어, 건물 전체 골조에 의한 재분배 효과를 고려하지 못했으나, SAP 2000이나 MIDAS Gen과 같은 상용 구조해석 프로그램에서도 시공단계해석 옵션을 제공함에 따라 시스템 전체 거동에 의한 축소량의 영향을 고려하게 되었다.

시공단계해석을 통해 얻을 수 있는 장점은 다음과 같다. 통상 구조해석은 완공건물을 대상으로 중력(고정, 활)

하중과 바람, 지진하중을 적용하고, 이들의 하중조합에 대하여 구조안정성을 확보하도록 설계한다. 하지만 구조물 자중은 완공 후 작용하는 것이 아니라, 각 시공단계에서 작용하여 건물변형을 발생시킨다. 즉 각 층 시공시점까지 발생한 변위는 타설시점에서 보정 시공이 가능하며, 이는 시공단계해석을 통해 고려할 수 있다. 이 변위를 타설이전변형/변위(up to casting deformation/displacement)라고 하며, 반면 타설이후변형/변위(subsequent to casting-)는 각 층의 타설시점에서 확인할 수 없고 사전에 검토되지 않는다면 변위 보정이 어렵다. 또한 시공단계해석은 재료의 시간의 존적 장기거동특성을 반영한다. 특히 콘크리트 구조물은 건조수축 및 크리프에 의하여 건물의 하중 변화 없이도 지속적으로 변형이 발생한다. 하지만, 공사 중에는 이를 인지하기 어려워, 완공 이후에 건물의 사용성 문제를 야기한다. 따라서 시공단계해석을 통해 사전에 평가하여 시공 중에 선조치하는 것이 필요하다.

지금까지 건축분야의 시공단계해석은 주로 초고층 건물의 벽체와 기둥사이의 (기둥)축소량 차이로 인해 발생하는 수평부재의 부가응력을 고려하는 경우가 대부분으

\*Corresponding author E-mail : yungon.kim@hdec.co.kr

Received February 16, 2015, Revised July 27, 2015,

Accepted July 31, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

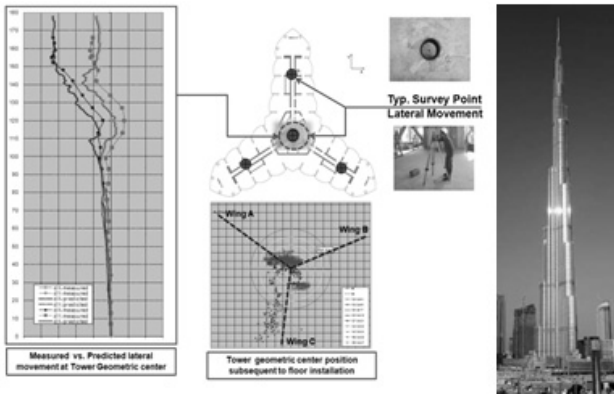


Fig. 1 Measured vs. predicted lateral movement of Burj Khalifa [CTBUH Journal Paper<sup>14)</sup>]

로, 아웃리거 부재의 조절줄눈(Adjustment Joint)을 검토하거나, 기둥길이를 조정하여, 축방향 변위를 보정하였다. 하지만, 이러한 수직부재의 축소량의 차이는 축방향 변형 뿐만 아니라, 비대칭 평면구성이나 용도별 하중 차이에 의한 (축)하중 중심과 (축)강성 중심이 불일치하여 횡변위가 발생하게 된다. 이러한 경향은 고층건물의 비정형화 추세에 따라 더욱 심화되고 있다(Fig. 1). 이로 인해 엘리베이터 수직도 및 마감재의 사용성 등의 문제가 발생하고, 정도에 따라 구조안정성에도 영향을 미치게 된다. 이러한 건물수직도 이슈를 검토하기 위해 마찬가지로 시공단계해석이 사용되고 있으나, 해석값에 대한 근본적인 역학적 분석없이 그대로 사용하고 있는 상황이다. 이에 본 연구에서는 횡변위 측면에서 시공단계해석과 일반해석의 차이에 대한 원인을 살펴보고, 횡변위를 평가/보정하는 방법을 연구하였다.

## 2. 편심중력하중에 의한 고층건물 횡변위

### 2.1 중력하중에 의한 횡변위 발생원인

Fig. 2은 중력하중에 의해 횡변위가 발생하는 원인을 도식화하였으며, 비정형 고층건물의 횡변위 발생원인도 단순화하면 Fig. 2와 같은 원리로 접근할 수 있다. 축방향 질량중심과 강성중심의 차이에 의해 편심모멘트가 발생하며, 이로 인해 수직부재간 축방향 부등축소가 유발되고, 결과적으로 건물의 횡변위가 생긴다. 기본적으로 수직부재의 축소량 차이에 의해 유발되기 때문에 타설 전후의 시공을 고려한 변위를 평가하는 기둥축소량해석과 매우 연계성이 높다. 하지만, 횡변위는 단위부재의 축소량보다는 시스템 전체 횡강성에 의해 지배된다.

이 횡변위는 지금까지 시공단계해석을 수행하지 않더라도 통상적으로 콘크리트 타설시 바닥 수평 및 부재 수직도 확보하고 또한 계측을 통해 설계좌표로 시공하여 횡변위를 저감하고 건물수직도를 확보해 왔다. 하지

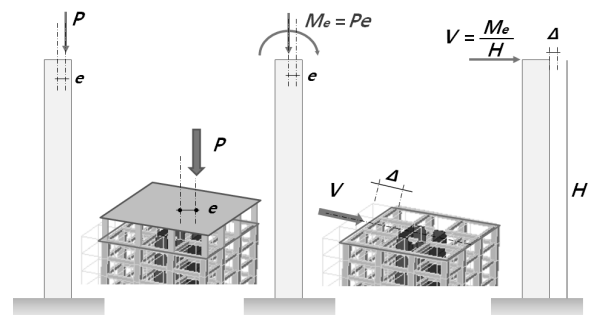


Fig. 2 Lateral displacement due to differential shortening caused by un-even gravity loads

만, 비정형 고층건물의 경우 편심중력하중에 의한 횡변위가 증가함에 따라 기존방식만으로는 건물수직도를 확보하기 어렵게 되었다. 이에 시공단계해석을 통해 실제 시공 및 보정방법을 반영한 횡변위를 공사전에 평가하여 건물수직도를 향상하거나, 합리적인 보정계획을 수립할 수 있다.

### 2.2 상용 S/W 시공단계해석을 이용한 횡변위 평가

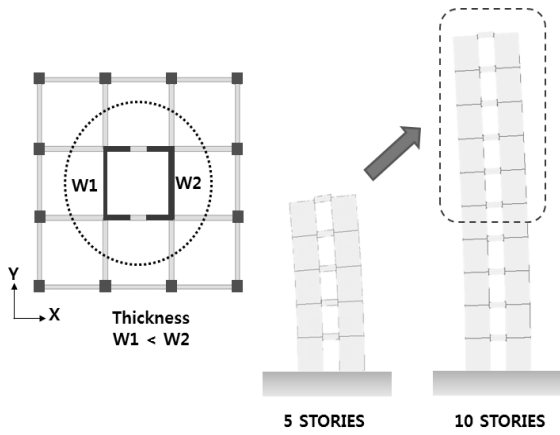
현재 국내 상용 소프트웨어(MIDAS Gen.)의 시공단계 해석에서는 매 시공단계의 신규 절점좌표를 이전 시공단계의 해석결과와 상관없이 원래의 설계좌표점으로 생성하여 해석되고 있다. 이는 매층마다 절대좌표로 자동보정하는 것으로 간주할 수 있다. 축방향 변위의 경우, 슬래브 타설에 의해 부등축소량은 자동보정되고, 부등축소량이 보정된 잔여 절대축소량은 실질적으로 부재에 부가응력을 유발하지 않으므로, 절점이 원설계좌표로 생성되더라도 실질적인 영향을 미치지 않는다. 하지만 최근 연구<sup>15)</sup>에 따르면 코어 선행하고 골조 후행하는 경우, 후행 골조의 레벨은 선행코어의 축소량과 일치시키는 것이 일반적인 시공방법임에도 해석상으로는 후행 골조 위치가 절대좌표로 설정되는 문제점이 발생한다.

횡변위의 경우도 마찬가지로 통상적인 시공프로세스에 의해 각 층의 부재수직도를 확보할 뿐 해석조건과 같이 지상층(절대좌표) 기준으로 좌표를 보정하여 매층 시공하지 않는다. 이 경우에는 시공단계해석의 결과값은 실제 시공조건을 반영하지 않으며, 또한 결과값을 보수적으로 평가하지 않는다. 이에 단계별 타설이전변위를 각 단계에서 산출하여 이를 타설이후변위와 합하고 여기서 현장의 실질적인 보정계획에 따른 보정 이후 변위를 도출하는 것이 더 명확하게 해석결과를 분석할 수 있다.

## 3. 시공단계해석과 횡변위

### 3.1 축변위 vs. 횡변위

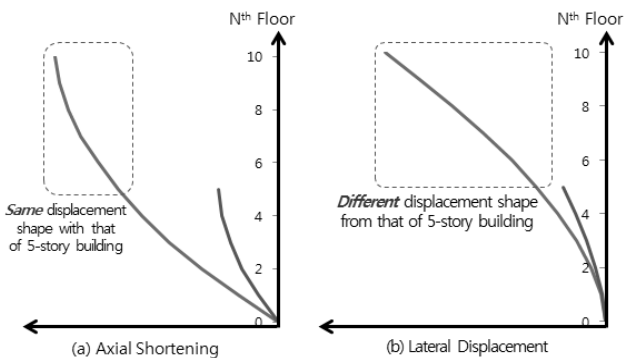
축변위(기둥축소량해석)의 시공단계해석 알고리즘을 횡



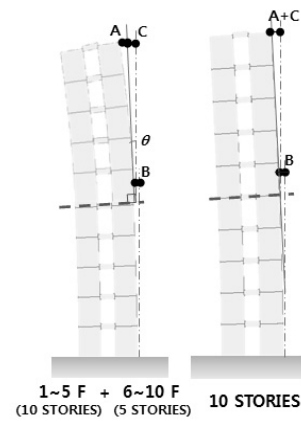
**Fig. 3** Simplified analysis models (5F, 10F) for evaluating lateral displacement

변위에 그대로 적용 가능한 지 여부를 검토하기 위해 Fig. 3과 같이 중력하중 및 기하조건이 전층 동일한 대칭 정형건물을 기준으로 한쪽 코아벽 두께를 감소( $W1 < W2$ )시켜 의도적으로 강성중심을  $W2$ 쪽으로 이동하여  $W1$ 방향으로 횡변위가 발생하는 10층 규모 단순 해석모델을 생성하였다. 시공단계해석 측면에서 축방향 변위와 횡변위의 상관관계를 도출하기 위해 임의로 5층 건물과 10층 건물을 대상으로 압축축 축변위와 각 층의 횡변위를 Fig. 4와 같이 비교하였다. Y축 강성 비대칭 건물로 X축방향 횡변위만 발생하며, Y방향 및 비틀림 변형은 발생하지 않는다.

Fig. 4(a)와 같이 5층 건물의 압축축 축변위와 10층 건물의 상부 5개층 압축축 축변위량은 정확히 일치한다. 즉, 10층 건물의 하부 5개층 축변위와 상부 5개층 축변위 사이에는 5층상부 축변위 초기값에 의해 서로 연계되어 있다는 것을 의미한다. 반면 축방향 변위와 동일한 접근 방법으로 Fig. 4(b)와 같이 5층 건물의 최상층 횡변위를 10층 건물의 상부 5개층 횡변위값을 비교하였으나, 그 차이가 크게 나타났다. 즉, 10층 건물 최상층변위는 하부 5개층의 횡변위량(B)과 5층 건물 상부층의 횡변위(A)를 합한 값만으로는 표현되지 않는 것이 기둥축소량과의 가장 큰 차이이다(Fig. 5, Fig. 6). 그 이유는 5층 건물 변위를 10



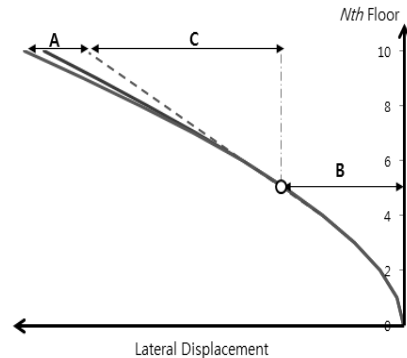
**Fig. 4** Axial shortening vs. lateral displacement for simplified model



**Fig. 5** Effect on lateral displacement of tilt angle on 5<sup>th</sup> floor of 10 stories building

층 건물의 6-10층의 발생변위로 대체할 경우, 10층 건물의 5층 상부에서 존재할 바닥경사각과 이와 수직하는 수직부재의 경사각을 고려하여 이로 인한 추가 횡변위(C)를 추가로 반영해야 하기 때문이다.

하지만 실질적으로 이 경사각을 각각의 층에서 하나로 정의하는 것이 용이하지 않다. 각 층 바닥이 강체거동하여 층을 구성하는 모든 절점의 축변위가 서로 연계되는 것이 아니므로, 바닥 경사각은 임의의 두 점을 연결할 때마다 각각 다르다. 마찬가지로 각 수직부재의 경사각도 모두 다르게 정의되기 때문에 Fig. 5에서 개념적으로 표현된 층경사각을 하나의 값으로 정의하기 어렵다. 그럼에도 비틀림이 발생하지 않은 경우 한 층의 횡변위는 다이아프램 조건하에 하나의 값을 가지기 때문에, 이를 층고로 나누는 층간변위각을 상기 예제에서의 층 경사각으로 적용하는 것이 합리적인 접근방법이라 할 수 있다. 이를 10층 건물 최상층 변위를 구하는 데 있어 5층의 경사경사각( $\theta$ )과 6-10층의 높이를 곱하여 얻은 각변위(C)를 더하면 Fig. 6과 같이 일반해석과 거의 동일한 결과를 얻는다. 따라서 횡변위의 경우 축방향 변위와는 달리 단계별 해석을 조합하기 위해서는 횡변위뿐만 아니라, 경사각에 의한 횡변위를 추가로 고려해야 한다. 이 값은 Fig. 6과 같이 각변위량(C)이 해당구간의 횡변위량의 합(A+B)



**Fig. 6** Lateral displacement considering tilt angle of 5<sup>th</sup> floor in 10 story building

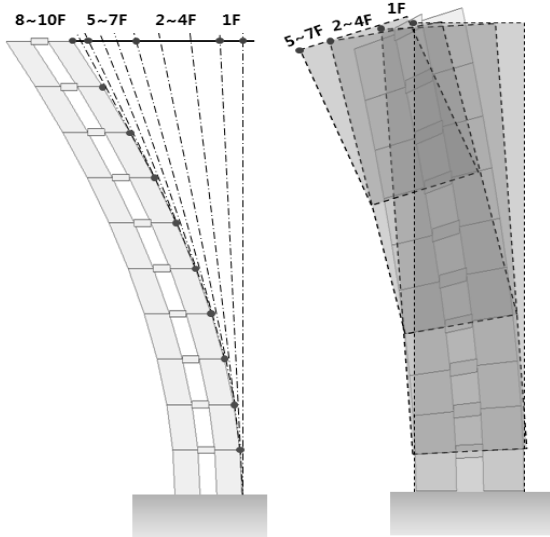


Fig. 7 Effect on lateral displacement at top due to inclined angle of each floor

과 비교해도 상당 비율에 해당한다.

Fig. 7은 각 층 경사각에 의한 횡변위 영향을 나타낸 것이다. 임의층 경사각은 그 이전층들의 경사각을 누적한 값으로, 저층부 경사각은 그 값이 작더라도 이후 상부층의 경사각에 모두 반영된다. 따라서 저층부의 경사각이 동일하더라도 건물높이에 비례하여 이로 인한 횡변위가 증가하기 때문에 고층건물일수록 이러한 각변위 요인을 관리하는 것이 중요하다. 따라서 시공단계에서 이 경사각이 누적되지 않도록 공사관리하고, 장기거동에 의한 저층부 경사각을 최소화하는 것이 횡변위를 제어하는 데 중요하다.

### 3.2 시공단계해석 횡변위

Fig. 8은 3.1절에서 도출된 내용을 일반화하여 시공단계해석의 결과값인 타설이후변위(sub to)로부터 타설이전변위(up to)를 산출하는 방법을 도식화한 것이다. N층의 타설이전변위( $\Delta_{N,up}$ )와 그 층의 변형각( $\theta_{N,up}$ )이 주어진 경우, N+1층의 관계를 도출할 수 있다면, 초기변위값에 의해 모든 층의 값을 찾을 수 있다.

N층 횡변위( $\Delta_1 = \Delta_{N,up}$ , N층 타설전 변위)와 N층의 타설전 변형각( $\theta_{N,up}$ )과 해당층의 높이( $H_N$ )곱만큼의 각변위( $\Delta_2 = \theta_{N,up} H_N$ )로부터 (N+1)층 횡변위의 초기값, 즉 N층의 하중을 고려하지 않은 값( $\Delta_1 + \Delta_2$ )을 얻는다. 또한 N층의 타설에 의해 타설하중에 의한 N층 경사각 증가분( $\theta_{N,add}$ )에 의한 (N+1)층의 추가횡변위 ( $\Delta_3 = \theta_{N,add} H$ )와 N층 타설로 인한 1층에서 N-1층까지 횡변위 증가분의 누적값( $\Delta_4 = \Delta_{N,add}$ )이 증가하며, 이 증분은 N층을 타설하는 시공단계의 값 타설이후변형( $\Delta_3 + \Delta_4$ )에 해당한다. 시공단계해석으로부터 얻는 횡변위는  $\Delta_3, \Delta_4$ 이 서로 구분되지 않지만, (N-1)층의 변위 증분값으로부터  $\Delta_4$ 를 구하고 이

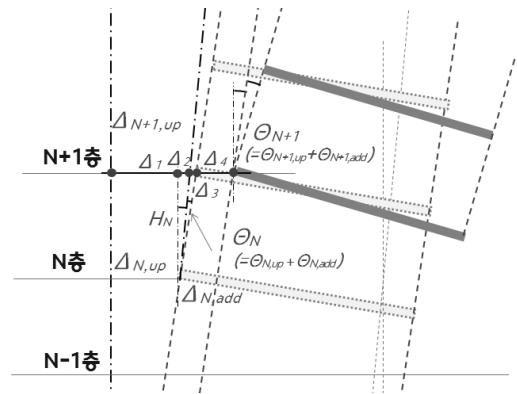


Fig. 8 Evaluation of lateral displacement on (N+1)-th floor from that on N-th floor

로부터  $\Delta_3$ 를 얻어, 이 값을 N층 높이로 나누면  $\theta_{N,add}$ 를 얻을 수 있다. 이러한 상관관계에 의해 (N+1)층의 타설이전변위( $\Delta_{N+1,up}$ ) 및 경사변형각( $\theta_{N+1,up}$ )은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta_{N+1,up} &= \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \\ &= \Delta_{N,up} + \theta_{N,up} H_N + \theta_{N,add} H_N + \Delta_{N,add} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\theta_{N+1,up} = \theta_{N,up} + \theta_{N,add} \quad (2)$$

건물높이( $H_N$ )는 건물형상으로 주어지며, 시공단계별 해석에 의해  $\Delta_3(\theta_{N,add} H_N)$ ,  $\Delta_4(\Delta_{N,add})$ ,  $\theta_{N,add}$ 는 결정된다. 따라서 이 관계식에 의해 모든 값이 결정되기 위해서는 초기값이 주어지야만 순차적으로 모든 시공단계의 연산이 가능하다. 각각의 초기값( $\Delta_{1,up}$ ,  $\theta_{1,up}$ ) = (0,0) 조건으로 모든 단계의 타설이전 횡변위 및 변형각의 값을 얻고, 타설이후 변형값은 시공단계해석을 통해 모든 단계의 값을 누적하여 계산되므로, 타설이전변위와 타설이후변위와 합하면 시공단계해석의 총 횡변위량을 얻는다.

이 관계식을 적용하여 단계별해석과 일반해석의 결과값이 거의 일치함을 검증(Fig. 8)하였고, 이를 통해 한 층의 평균 횡변위를 층고로 나눈 층변형각을 시공단계해석에서의 변형각으로 정의하여도 무방함을 확인하였다. 이로부터 실질적으로 시공중에 일어나는 매 층 슬래브바닥 평활도 유지 및 기둥 및 벽체 수직도확보를 통해 타설이전에 발생하는 변형각에 의해 발생하는 변위( $\Delta_2, \Delta_3$ )는 모두 배제할 수 있으며, 이 효과를 시공단계해석을 통해서 반영할 수 있다.

### 3.3 횡변위 관점에서 시공단계해석과 일반해석 비교

일반해석의 경우 완공건물 기준으로 모든 하중조건을 일시에 반영하기 때문에, 저층부 중력하중에 의해 경사가 발생하고 이를 시공시점에서 보정한다 하더라도, 이러한 현장여건을 해석에 반영하기 어렵다. 하지만 시공

단계해석을 수행하여 각 층마다 기 발생한 변형각을 자동보정하는 것으로 가정할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 9 와 같다. 단, 단계별 하중 및 경계조건을 차이만을 검토 하기 위하여 크리프나 건조수축과 같은 재료 장기거동 특성의 영향은 포함하지 않았다. Fig. 9와 같이 일반해석의 횡변위( $\Delta_{conventional}$ )는 변형각의 자동보정을 고려한 시공단계해석 결과의 횡변위( $\Delta_{total}$ )보다 상층부로 갈수록 급격히 증가한다. 더불어 시공단계에서 타설이전 횡변위( $\Delta_{sub}$ )를 각 시공단계에서 모두 보정한다면 타설이후 변위( $\Delta_{up}$ )만 고려 가능하다. 이처럼 시공중 횡변위 보정방법에 따라 실제 건물 횡변위는 매우 상이하며, 이는 시공단계 해석을 통해서만 분석이 가능하다. 한편 시공절차와의 부합성을 보면, 각 시공단계에서 바닥평활도 및 부재수직도를 확보하는 것이 통상적이므로, 시공중에 작용하는 중력하중에 한해서는 일반해석보다는 시공단계해석이 더 실제에 근사하고, 이는 일반해석의 횡변위값이 과대평가 되고 있음을 뜻한다. 정형건물인 경우에 중력하중에 의한 횡변위는 미소하고, 대부분 횡변위는 풍하중이나 지진 하중에 의해 발생하므로, 상기 기술한 일반해석의 오류는 크게 영향을 미치지 않는다. 하지만 건물이 비정형화됨에 따라 중력하중 - 특히 골조 시공중 작용하는 중력하중 - 이 클수록 일반해석과 시공단계해석의 결과값의 차이가 커진다. 여기서 주의할 점은 골조타설이후 작용하는 중력하중 - 마감하중, 활하중- 에 의한 영향은 일반해석과 시공단계해석에서 동일하다는 점이다. 상기에제는 골조 자중만 고려한 것으로 두 해석결과값의 차이가 극대화된 측면이 있지만, 건물이 고층화될수록 저층부의 경사각에 의한 고층부의 영향이 커지기 때문에 시공단계해석에 의해 횡변위를 평가하는 것이 더 적절한 방법이다.

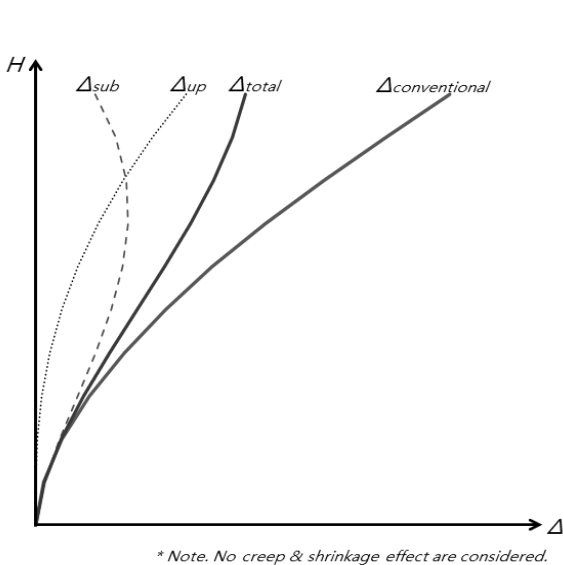


Fig. 9 Comparison of lateral displacement of conventional analysis and construction sequence analysis

## 4. 횡변위 평가 및 보정

### 4.1 횡변위 평가 / 보정 프로세스

바닥평활도와 부재 수직도 확보에 의해 타설시점의 경사각은 모두 보정되기는 하지만, 그 시점에서 발생한 횡변위(Fig. 8,  $\Delta_j$ )는 보정되지 않고, 시공단계가 증가함에 따라 누적된다. 따라서 건물 높이가 증가함에 따라 기 타설층의 타설이후 변위의 영향으로 상층부로 갈수록 횡변위 발생량이 급격히 증가하고, 허용수준을 초과하게 된다. 따라서 절대좌표점을 측량하여 설계좌표로 보정하여 시공할 필요가 있으며, 이를 통상 원점보정(re-centering)이라 칭한다. 이 과정은 매층마다 계측을 통해 설계좌표로 시공되는 것을 뜻하며, 이를 통해 타설이전변위는 모두 보정되고, 타설이후변위만 실제로 남게 된다. 따라서 시공단계해석을 통해 Fig. 9와 같은 검토결과가 주어진다 면, 타설이전변위가 크지 않은 구간 - 주로 저층부 - 에서는 계측에 의한 보정이 불필요하고, 타설이전변위가 크게 나타나는 구간 - 주로 고층부 - 에서는 계측보정이 필요하다고 판단할 수 있다. 또한 일단 특정층에서 계측보정을 할 때 해당층의 부재수직도를 크게 벗어나지 않는 수준으로 유지해야 하므로, 보정시점이나 보정주기를 합리적으로 결정하는 것이 중요하게 된다.

Fig. 10은 횡보정량에 따른 횡변위를 각 시공단계별로 나타낸 것이다. 통상적인 시공 방법, 각 층에서 부재수직도를 확보할 때의 횡변위( $\Delta_{before\ adj.} = \Delta_{total}$ )이며, 여기에 각 층에서 선보정량( $\Delta_{adjust\ story}$ ) 계획을 반영하고, 이에 따른 각 층의 누적보정량( $\Delta_{adjust}$ )을 결정하게 된다. 이 누적보정량( $\Delta_{adjust}$ )과 시공단계해석의 결과값( $\Delta_{total}$ )을 더하면 각 단계에서 보정량을 반영한 횡변위( $\Delta_{after\ adj.}$ ) 산출이 가능하다. Fig. 10은 매층 원점보정(re-centering)의 경우에 대해 나

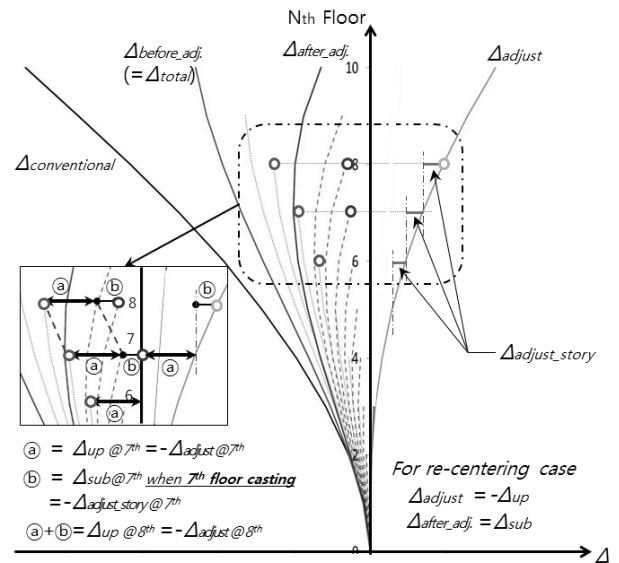


Fig. 10 Lateral displacement considering adjustment scheme (re-centering case)

타낸 것으로, 이 예의 누적보정량은 타설이전변위량(up to)과 방향은 반대이고, 크기는 같다. 또한 Fig. 10의 부분 확대그림을 보면 7층 타설시점에서 7층과 8층의 횡변위 사이의 연계성을 보여준다. 7층 타설전의 7층 위치의 횡변위는 1-6층에서 모두 원점보정하였다면 0이었을 것이고, 아무런 보정을 하지 않았다면 ㉠ 변위가 발생하였을 것이다. 7층 타설과 동시에 ㉡ 변위가 발생한다고 할 때 8층 시점에서 원점보정을 위해 필요한 횡변위 보정량은 ㉠가 되고 누적보정량은 ㉠+㉡가 된다. 이와 같은 보정방법이 사전해석을 수행하지 않고도 현장에서 매층 계측보정에 의해 건물의 수직도를 확보할 수 있는 방법이다. 하지만 시공단계해석을 통해 단계별 횡변위를 사전에 평가한다면, 수직도의 허용범위를 초과하지 않는 범위에서 횡변위 발생량이 적은 구간과 큰 구역을 구분하여 합리적인 보정계획 수립이 가능하며, 또한 원점보정 이상의 선보정을 통해 타설이후 변위에 대한 선보정도 가능하다.

## 4.2 횡변위 보정계획

Fig. 11은 매층 계측에 의해 원점보정하는 것이 아니라 그 빈도수를 저감한 보정계획의 경우를 각각 나타낸 것이다. 실제 횡변위를 검토하는 경우는 보통 200 m를 넘는 비정형 고층건물에 해당하지만 본 예제에서는 개념적 설명을 위해서 10층 건물을 대상으로 기술하고 있다. (a) 4-6-8-10의 경우는 4층에서 최초 원점보정하여 이후 2개 층마다 보정하고, (b) 4-7-10은 3개층 단위로 보정하였다. (a)와 (b)의 경우를 비교하면 (a)의 경우 매층 원점보정한 것과 거의 유사한 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 즉 보정빈도가 감소함에 따라 한 층 보정 변위값이 증가하여 해당층의 수직도에 영향을 미칠 수 있다. ACI 117에서는 한 층 부재의 수직도는 수직부재의 0.3%를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 이 제한조건에 의해 보정빈도를 산정할 수 있는 기준이 된다.

(c) 6-8-10의 경우는 (a)에서 4층 보정을 제외하여 총 보정층의 수를 (b)와 일치하였다. 이는 저층부의 횡변위

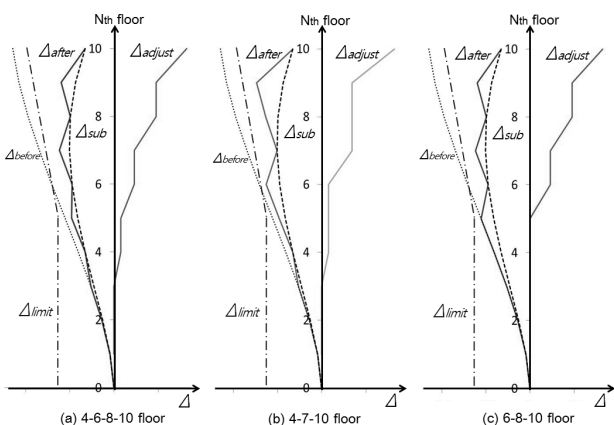


Fig. 11 Comparison of lateral displacements according to different plans on selecting floors for adjustment

발생량이 고층부에 비해 작기 때문에 동일한 빈도수로 보정하더라도 고층부에서 집중적으로 보정하는 것이 더 효과적이라는 것을 보여준다.

통상적인 경우에 상층부로 갈수록 횡변위량이 급격하게 증가하므로, 계측보정(원점보정) 주기가 상부로 갈수록 빈번해야 한다. 하지만 건물의 비정형화가 커지거나 층고가 큰 경우에는 상대적으로 횡변위가 크게 발생하는 부분이 생기므로, 실제 프로젝트에서는 사전에 시공단계 해석을 통해 횡변위 평가하고 이로부터 합리적인 보정계획을 수립하여야 한다.

## 4.3 횡변위 선보정

건물의 발생변위는 각 시공시점에서 바닥평활도 및 부재수직도 확보 등의 시공관리나 계측관리를 통해 설계좌표로 시공할 수 있지만, 모두 타설이전 변형/변위만을 대상으로 보정하는 것이다. 따라서 크리프나 건조수축 등과 같이 콘크리트의 시간 경과에 따른 장기거동에 의해 추가로 발생하는 변위나, 특히 골조완료이후 작용하는 마감하중 및 활하중에 의해 발생하는 변위는 계측보정만으로는 타설시점에서 보정할 수 없다. 이러한 타설이후변형에 의해 장기적으로는 엘리베이터의 수직도 확보 - 통상  $H/1000 \sim H/2000$  수준 - 나 각 외장재가 허용할 수 있는 허용한계를 만족하지 못하는 경우, 타설시점에서 원점보정 이상의 횡변위를 선보정하여 타설이후변위에 대응이 필요하다. 이 때의 선보정은 장기관점에서 건물수직도를 확보하기 때문에, 시공중에는 장기횡변위 방향과 반대로 건물을 기울이도록 시공하는 것을 의미한다. 따라서 이 선보정량을 결정하기 위해서는 사전에 시공단계해석을 수행하여 필요한 선보정량을 결정해야 한다.

Fig. 12는 원점보정(case A)과 선보정(case B)을 비교하였다. 선보정값은 각 시공단계 및 최종단계에서 모두 허용변위 이내로 수직도를 유지하도록 하였다. 원점보정(계측)하는 경우 4.2절과 같이 고층부로 갈수록 한 층에서 보정해야 하는 양이 급격해지는 반면, 선보정을 하는 경우

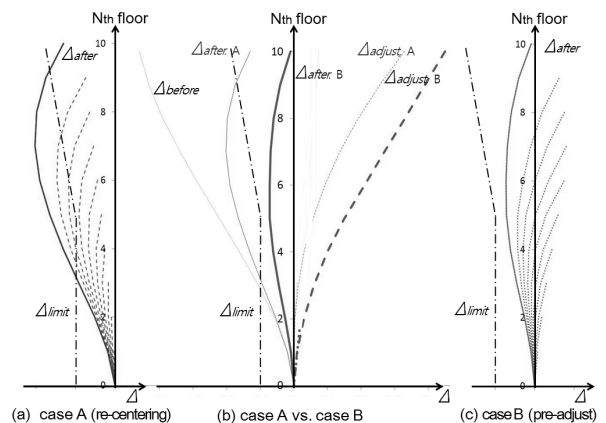


Fig. 12 Comparison between re-centering (case A) and pre-adjustment (case B) scheme

저층부에서도 일정량의 보정을 통해 상부 요구보정량을 지속적으로 감소시켜, 수직도확보가 더 용이하다.

또한 선보정계획은 골조타설 이전에 결정되기 때문에 실제 건물의 재료물성, 시공 순서에 의한 하중재하 등의 변수조건이 해석과 실제 여건상 차이가 발생하며, 각 부재별로 해석조건과 실제조건을 반영하기 어렵기 때문에 해석값을 완전히 신뢰하기 어렵다. 따라서 선보정계획을 장기적으로 건물이 완벽하게 수직도를 확보할 수 있도록 계획할 수도 있지만, 실제 거동특성이 해석과 상이할 경우 선보정에 의해 건물수직도에 저해가 될 수도 있다. 따라서 한계 허용범위를 넘지 않는 목표수준을 결정하고 그 범위내로 횡변위를 보정하는 것이 합리적이다. 또한 골조공사시 변위 선보정에 의해 역으로 발생하는 기울기도 마찬가지로 허용범위 이내로 관리하는 것이 바람직하다.

## 5. 요약 및 결론

불균등 중력하중에 의해 횡변위가 발생하는 고층건물에 대하여 시공단계해석을 통해 횡변위를 평가 및 보정하는 과정을 역학적으로 분석하였다. 본 연구로부터 도출된 결론은 아래와 같다.

- 1) 일반해석은 완공건물에 모든 하중을 재하하므로, 각 층 골조시공단계의 바닥평활도 및 부재수직도 확보 조건을 반영할 수 없다. 따라서 일반해석 결과는 높이가 증가함에 따라 층경사각이 누적 반영되기 때문에 골조자중에 의한 횡변위를 과대평가된다.
- 2) 시공단계해석은 통해 각 단계에서 이미 발생한 변형/변위과 이후 변형을 구분하기 때문에 바닥평활도 및 부재수직도를 반영하여 횡변위를 평가한다. 또한 계층에 의한 원점보정(re-centering)을 반영하여 횡변위를 분석할 수 있다.
- 3) 기둥축소량 해석에서 다루는 축방향변위와는 달리 각 층 경사 변형각에 의한 횡변위는 높이에 비례하여 고층부에 영향을 미치기 때문에, 변위값의 연산만으로는 횡변위를 평가하기 힘들다. 단, 일반적인 시공과정- 바닥평활도, 부재수직도확보-중에 타설이 전변형각은 자동보정된다.
- 4) 하지만 타설이전변위의 경우 각 단계마다 계층보정을 통해 설계좌표점으로 시공해야 하므로 자동으로 보정되는 값은 아니므로 이를 고려하여 횡변위를 평가해야만 한다.
- 5) 횡변위는 높이에 비례하여 증가하는 각변위와 각 층에서 누적되므로, 저층부는 부재수직도 확보만으로도 충분하지만, 고층부로 갈수록 급격히 증가한다. 따라서 고층부에서 주로 계층보정이 필요하고, 사전평가에 의해 계층주기(층)를 합리적으로 결정할 수 있다.
- 6) 횡변위 값이 원점보정(계층보정)에 의해서 허용수준

이내로 확보되지 않는 경우 선보정계획을 사전에 수립하여야 한다. 해석값의 불확실성을 고려하여 선보정계획을 수립하고, 실제 변위 모니터링을 통해 지속적인 재해석 및 보정계획 수정이 필요하다.

## References

1. Fintel, M. and Khan, F., "Effects of column creep and shrinkage in tall structures-Prediction of inelastic column shortening", *ACI Journal Proceedings*, Vol.66, No.12, 1969, pp.957-967.
2. Fintel, M. and Khan, F. R., "Effects of column creep and shrinkage in tall structures-analysis for differential shortening of columns and field observation of structures", *ACI Special Publication*, 1971, pp.27.
3. Fintel, M., Ghosh, S., and Iyengar, H., "Column shortening in tall structures: prediction and compensation", *Portland Cement Association*, 1986.
4. Gao, Z. and Bradford, M., "Time-dependent shortening of slender RC columns", *Journal of engineering mechanics*, Vol.119, No.10, 1993, pp.2036-2051.
5. Pan, L., Liu, P., and Bakoss, S., "Long-term shortening of concrete columns in tall buildings", *Journal of Structural Engineering*, Vol.119, No.7, 1993, pp.2258-2262.
6. Song, H. et al., "Influence of Column Shortening in Tall Concrete Buildings", *Korean Architectural Institute*, Vol.13, No.12, 1997, pp.289-297.
7. Kim, W. et al., "Measured and Predicted Column Shortening of a Tall Reinforced Concrete Building", *Korean concrete institute*, Vol.11, No.3, 1999, pp.161-170.
8. Kim, H., Cho, S., and Kim, D., "Analysis and Field Measurement of Column Shortening of RC cores and SRC Columns in Tall Building", *Korean Architectural Institute*, Vol.19, No.11, 2003, pp.49-56.
9. Park, H., "Optimal compensation of differential column shortening in high-rise buildings", *The structural design of tall and special buildings*, Vol.12, No.1, 2003, pp.49-66.
10. Kim, H. and Cho, S., "Column shortening of concrete cores and composite columns in a tall building", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol.14, No.2, 2005, pp.175-190.
11. Yi, T. and Tong, X., "Differential column shortening effects in typical medium to high-rise buildings", *In Proceedings of Sessions of the 2007 Structures Congress*, Long Beach, California, 2007, pp.16-19.
12. Kim, H., "Column Shortening Analysis of Tall Building Considering the Restraints of Rebars and Horizontal Members", *Korean Architectural Institute*, Vol.24, No.6, 2008, pp.35-42.
13. Ha, T. and Lee, S., "Advanced Construction Stage Analysis of High-rise Building considering Creep and Shrinkage of Concrete", *the 2013 World Congress on Advances in Structural*

*Engineering and Mechanics* (ASEM13), 2013, pp.2139-2147.

14. Abdelrazaq, A., "Validating the Structural Behavior and Response of Burj Khalifa: Synopsis of Full Scale Structural Health Monitoring Programs", *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol.1, No.1, 2012, pp.37-51.

15. Eom, T. and Kim, J., "An Application of Construction Sequence Analysis for Checking Stability in High-Rise Building under Construction", *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.22, No.3, 2009, pp.211-222.

**요 약** 비정형 고층건물의 경우 편심중력하중에 의해 횡변위가 발생한다. 일반해석은 완공시점에 건물 조건을 기준으로 모든 하중을 고려하기 때문에, 시공중 부재 수직도 확보를 통해 각 단계별 보정량을 반영할 수 없어 골조자중에 의한 횡변위를 과대 평가한다. 시공단계해석은 통상적인 시공과정에서 각 층마다 바닥평활도 및 기둥/벽체 수직도를 확보하는 것을 고려하여 타설이전에 발생하는 변형각을 보정하기 때문에 일반해석의 한계를 보완할 수 있다. 또한 계측을 통해 타설시점의 좌표를 설계좌표점으로 시공할 경우 각 시공단계에서 추가적인 횡변위보정(원점보정)이 가능하다. 횡변위는 고층부로 갈수록 급격히 증가하므로, 이러한 사전해석을 통해 합리적인 보정계획 수립이 가능하며, 이러한 보정에도 횡변위 관리기준을 초과하는 경우는 선보정 계획을 수립하여야 한다. 이때 사전해석의 불확실성 측면을 고려하여 선보정량을 결정하고, 실제 건물거동의 모니터링을 통해 선보정계획을 지속적으로 수정하여 건물수직도를 확보할 필요가 있다.

**핵심용어** : 시공단계해석, 비정형, 고층건물, 횡변위, 수직도