

시공단계에 따른 철근콘크리트 고층건물의 해석시스템 개발

Analytical System Development for Reinforced Tall Buildings with Construction Sequence

이태규

우송대학교 철도건설시스템학과

Tae-Gyu Lee(tglee@wsu.ac.kr)

요약

시공단계에 따른 철근콘크리트 구조물의 장기변형 해석은 설계 및 시공에 있어서 매우 중요한 요소이다. 하지만 기존의 많은 해석적 연구들은 그 적용기법의 단순화로 인하여 실제 구조설계 및 시공에 대부분 반영되지 못하고 있다. 동바리와 기둥에서는 축력 재분배가 시간에 따라 계속적으로 변화되기 때문에 콘크리트 타설, 거푸집 제거, 동바리 재설치, 동바리 제거 및 이에 따른 추가하중의 작용과 같은 전반적인 시공단계를 그대로 적용하여 해석하는 것은 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 시간에 따른 시공단계별 해석을 객체지향 알고리즘으로 개발하였다. 본 시스템에서는 입력모듈, DB 모듈, DB저장 모듈, 해석모듈 및 결과분석모듈로 구분하였으며, 각 모듈간의 연계는 visual c# 루틴으로 처리하였다. 또한 그래픽 인터페이스와 DB 테이블은 사용자 편의성을 고려하여 개발하였다.

■ 중심어 : | 장기변형 | 시공단계 | 축력 재분배 | 객체지향 |

Abstract

Long-term behavior analysis considering construction sequence should be performed in the design and the actual construction of reinforced tall buildings. Most of the analytical studies on this subject, however, has not been applied directly to the structural design and the construction caused by the simple approach. As the axial force redistribution of shores and columns is time-dependent, the actual construction sequence with the placement of concrete, form removal, reshoring, shore removal, and the additional load application is very important. Object-oriented analysis program considering construction sequence, especially time-dependent deformation in early days, is developed. This system is composed of input module, database module, database store module, analysis module, and result generation module. Linkage interface between the central database and each of the related module is implemented by the visual c# concept. Graphic user interface and the relational database table are supported for user's convenience.

■ keyword : | Long-term Behavior | Construction Sequence | Axial Force Redistribution | Object-Oriented |

1. 서론

콘크리트 구조물에 대한 일반적인 구조해석 방법은

완성된 전체 구조물에 하중이 동시에 작용한다고 가정하고 수행된다. 그러나 이러한 가정은 건물이 층별 또는 몇 개의 층 단위로 시공될 때는 실제 구조물의 거동

접수일자 : 2013년 06월 10일

수정일자 : 2013년 07월 22일

심사완료일 : 2013년 08월 05일

교신저자 : 이태규, e-mail : tglee@wsu.ac.kr

과는 상당한 차이가 발생된다. 특히 초고층 건물과 같이 시공기간이 긴 경우에 발생하는 시간의존적 비탄성 변형은 구조물에 큰 영향을 준다. 그 예로 고층건물의 상층부 휨부재에서 지나치게 크게 발생하는 모멘트나, 철골과 콘크리트벽을 동시에 사용하는 구조시스템에서의 연직하중의 분배가 콘크리트벽에서 실제보다 더 크게 나타난다. 왜냐하면 철근콘크리트 건물에서의 시공 단계 하중은 아직 시공하지 않은 상부층의 부재력에 영향을 주지 않기 때문이다[1]. 따라서 철근콘크리트 고층 구조물에서 시공단계를 고려한 해석을 수행하는 것은 매우 중요한 요소이다.

콘크리트 구조물에서 사용기간 동안 탄성변형 뿐만 아니라 크리프 및 건조수축과 같은 시간의존적 비탄성 변형이 발생한다. 특히 초기재령에서 발생하는 이러한 비탄성적 장기 변형이 원인이 되어 발생한 균열은 구조물의 사용성에 문제를 초래할 수 있다. 그리고 여러 요인의 복합결과에 의하여 지배되는 비선형 변형의 특성 때문에 구조물의 장기거동을 정확하게 예측하고 이를 설계 및 시공에 반영하는 것이 필요하지만 실제로는 탄성해석만을 수행하는 경우가 대부분이다. 그러나 콘크리트는 타설 후 시공기간에 걸쳐서 강성을 발현함과 동시에 시간의존적 변형을 수반하므로 크리프, 건조수축과 같은 장기변형을 고려해야한다.

이에 따라 시간의존적 비탄성 변형을 고려한 해석 프로그램이 다수의 연구자들[1-5]에 의하여 개발된 바 있다. 이러한 기존의 연구방식은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째, 전체 건물의 해석이 아닌 기둥 하나만을 독립적으로 평가하여 결과를 도출하는 방식[1-3]으로 해석적 루틴은 비교적 간단하지만 결과에 대한 신뢰도는 크게 떨어져 개략적인 경향만을 참조할 뿐 실제로 적용되지 않는다는 단점이 있다. 둘째, 전체 건물에 대한 시공단계 해석을 수행하지만 그 과정에 있어서 거푸집(form)과 동바리(shore)를 변형이 발생하지 않는 무한강성을 가진 동일한 하나의 조건으로 설정하여 동시 설치와 동시 제거로만 고려하고 있다[4][5]. 이렇게 하면 동바리 재설치(reshoring)에 따른 영향을 고려하지 못하는 물론이고, 초기재령에서부터 장기적으로 발생하는 축력과 변형이 실제보다 과다하게 크게 나타나게 되는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 시공단계에서의 장기변형 특성과 거푸집 및 동바리 효과를 각기 고려한 해석프로그램을 개발하고자 한다. 임의의 층 타설시 거푸집 제거 이후에도 동바리에 작용하는 축력은 시간에 따라서 점차적으로 감소하는 반면에 콘크리트 기둥의 축력은 점차적으로 증가하기 때문에 거푸집과 동바리의 실제강성을 적용한다. 또한 구조해석에 필요한 자료들과 해석 결과를 효율적으로 관리하기 위한 DB를 설계하고, 사용자가 편리하게 구조해석을 실행할 수 있는 통합 구조 해석 시스템을 개발하고자 한다. 개발된 시스템은 사용자에게 편리하도록 GUI 환경을 제공하기 위하여 통합 프로그래밍 개발도구를 사용하였다.

II. 시공단계를 고려한 해석시스템

1. 시스템 구성

개발된 시스템은 철근콘크리트 고층건물에서 시간의존 거동을 고려한 시공단계 해석프로그램이므로 구조물에 대한 탄성 및 시간의존적 비탄성해석을 수행하여야 한다. 시스템의 구조는 [그림 1]과 같이 입력모듈, DB 모듈, DB 저장모듈, 해석모듈, 그리고 결과분석모듈로 구성되어 있다. 본 논문의 해석시스템의 개발툴은 Microsoft Visual Studio C# 통합개발도구를 사용하여 구현하였으며, 데이터베이스는 Microsoft Access 2000의 DBMS(data base management system)을 사용하였다.

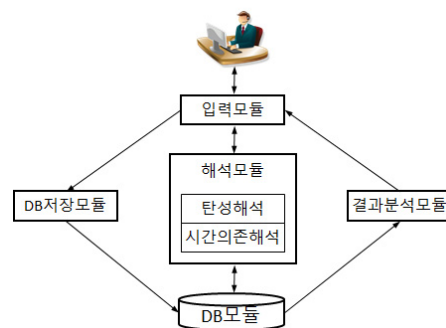


그림 1. 시스템 구성도

2. 입력모듈

입력모듈은 해당 전공분야의 일반적 지식을 가진 사용자가 접근이 용이하도록 하기 위해 가장 단순하면서도 보편화된 GUI 환경을 사용하였다. 사용자는 메뉴 도 구바, 위저드 형식, 계층적 목록을 이용하여 데이터를 입력할 수 있으며 수정, 검색을 수행할 수 있다. 또한 숙련된 사용자는 입력데이터파일에 직접 접근하여 데이터를 형성할 수도 있다.

3. DB저장모듈 및 DB모듈

DB저장모듈 및 DB모듈은 사용자가 데이터 입력을 완료하였을 때 데이터의 효율적인 저장과 관리를 위하여 데이터베이스로 변환하는 기능을 수행한다[6].

DB저장모듈은 실제로 자료를 저장하고 있는 SQL table과 table에 저장된 자료들을 관리하는 데이터베이스 관리시스템(DBMS)으로 구성되어 있다. DB모듈은 해석모듈에서 사용할 데이터파일을 생성하고 해석에 따른 결과물을 데이터베이스에 저장하여 해석결과를 사용자가 접근할 수 있도록 일정한 양식을 갖춘 파일로 생성하는 역할을 수행한다. 이 과정을 통하여 타 프로그램과의 호환성을 가능하게 하며 전체적인 시스템 통합을 구현하게 된다.

이와 같은 데이터베이스 시스템을 구축하므로써 모든 자료를 효과적으로 처리할 수 있으며, 모든 입력데이터 및 위험관리변수들에 대한 직접적인 수정, 보완작업이 용이할 뿐 아니라 모든 기능들이 유기적으로 연결되게 된다. 시스템을 위한 전체 데이터베이스의 스키마 구조(schema structure)는 [그림 2]와 같으며, ER(entity-relationship) 데이터모델을 지원하도록 설계하였다.

4. 해석모듈

해석모듈은 시스템의 가장 핵심적인 부분으로 DB에 저장된 데이터를 이용하여 해석을 수행하고 그 결과를 해당 table에 저장한다. 장기변형 해석법으로는 가장 정확한 방법으로 알려진 step-by-step 방법을 사용한다. 따라서 DB에 저장된 파일로부터 해석에 필요한 시공단계별 정보 즉, 현재 시공단계에서의 해석할 골조의 형태(절점과 부재)와 하중조건 등을 찾는다. 그리고 해석

은 [그림 3]과 같이 크게 탄성해석과 시간의존적 비탄성해석으로 나누어 수행한다. 해석의 편리를 위해 탄성해석에서는 시간에 따라서 콘크리트의 강성이 바뀌는 영향을 고려하기 위해서 발생하는 콘크리트의 변형 또는 응력을 작용하는 총 하중(또는 응력)에 대해서 구한다. 반면에 시간의존적 비탄성해석에서는 각각의 시간 단계에서 발생하는 증분량(increment)을 계산하여 전체적으로 합산한다. 한편, 비탄성해석에서는 임의의 시간에서 발생하는 콘크리트의 변형과 곡률(또는 비탄성하중)을 곧바로 결정할 수 없기 때문에 식(1)과 같이 수렴할 때까지 반복계산을 수행한다. 계산된 탄성해석결과와 비탄성해석결과를 합해 다시 부재력을 계산하고 해석을 완료한다.

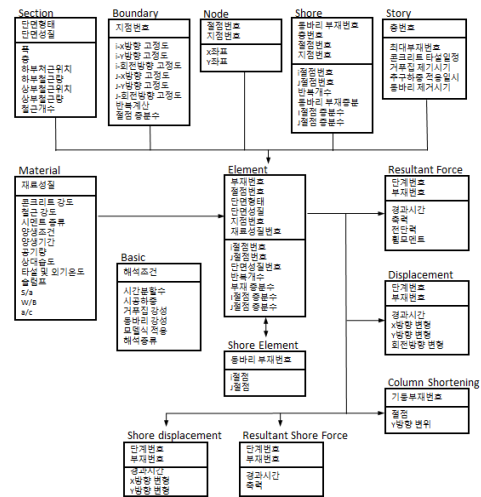


그림 2. DB 스키마 구조

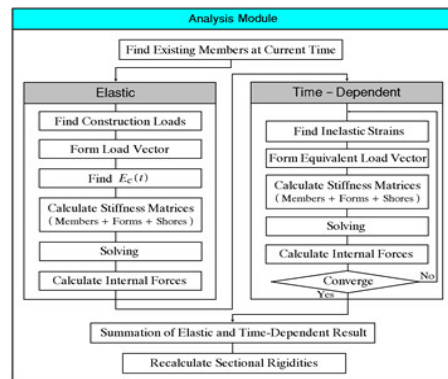


그림 3. 해석모듈의 상세

$$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\Delta_{j,i}^{(n)} - \Delta_{j,i-1})^2}{\sum_{j=1}^N (\Delta_{j,i}^{(p)} - \Delta_{j,i-1})^2}} \leq tol \quad (1)$$

여기서, i : 층분단계, j : 절점번호, N : 총절점수
 (n) = 현 단계의 값
 (p) = 이전 단계에서의 값
 $tol = 0.01(\text{tolerance})$

탄성해석과 시간의존적 비탄성해석에서 수행되는 프로그램은 그동안 국내외 여러 건설현장에서 적용되어 그 신뢰성이 입증된 Conses 프로그램[7][8]을 적용하였으며, 여기서 고려되는 주요 사항들은 다음과 같다.

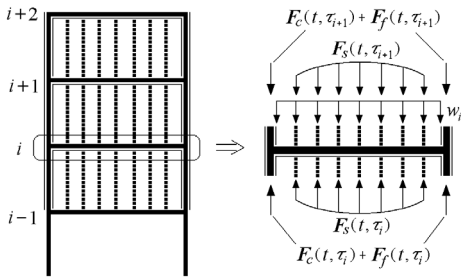


그림 4. i 층에서 작용하는 수직하중

시공단계를 고려하기 위해서는 각 층에서 계산된 하중 값을 전체적으로 누적해야 하기 때문에 중첩의 원리(principle of superposition)를 적용한다. 실제로 시공 중에는 구조물 자체의 자중과 동바리의 고정하중만이 존재하기 때문에 작용하중은 탄성범위 내에 있게 된다. 본 논문에서는 1차원 선요소(line element)를 사용하는 2차원 골조해석을 수행하였으며, [그림 4]와 같이 i 층에서 상향 및 하향으로 작용하는 모든 수직하중은 평형조건을 만족하여야 하므로 식(2)와 같이 정리된다. 여기서 슬래브에 작용하는 하중은 슬래브 전체에 등분포하중이 작용한다고 설정하였다.

$$\begin{aligned} F_c(t, \tau_i) + F_f(t, \tau_i) + F_s(t, \tau_i) \\ = F_c(t, \tau_{i+1}) + F_f(t, \tau_{i+1}) + F_s(t, \tau_{i+1}) + w_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, F_c, F_f, F_s : 기둥, 거푸집 및 동바리의 축력
 τ_i : i 층이 타설된 시간
 w_i : i 층 슬래브에 작용하는 고정하중

거푸집과 동바리는 기존에 무한강성을 가진 하나의 조건으로 설정하여 동시에 설치하고 동시에 제거하는 것으로 고려하였던 것과 달리 [그림 5]와 같이 거푸집과 동바리를 실제강성을 가진 별도의 요소로 각각 설정하여 설치와 제거를 따로이 입력할 수 있도록 구현하였다. 그림에서 동바리를 해체하고 바로 재설치하는 이유는 거푸집을 제거하기 위한 시공과정 상에서 반드시 필요한 일정이며, 재설치된 동바리는 상부 슬래브가 안정적인 강성을 확보하였을 때 완전 제거된다.

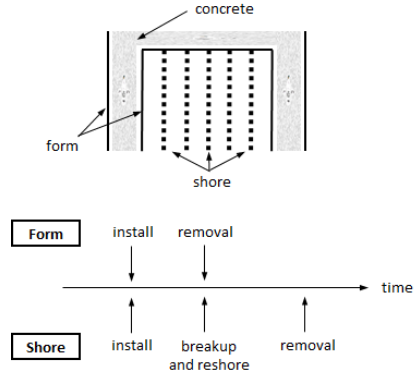


그림 5. 거푸집과 동바리의 설치 및 제거

또한 시간의존적 비탄성해석에서 콘크리트의 균열 또는 단면 상하부 철근배근의 상이로 인하여 중립축의 변형률과 곡률이 계속적으로 변화되는 것을 고려하였으며[9], 이에 따라 단부에서의 축력과 휨모멘트가 계속적으로 바뀌며 재분배되는 것을 변화된 강성행렬을 적용하여 재계산하였다. 그리고 응력이완 현상을 고려하여 계산된 변형이나 하중이 과도하게 크게 평가되지 않도록 고려하였다[10].

해석모듈은 구조물 조건, 적용설계기준 선정, 해석조건 등 주어진 모든 입력조건을 바탕으로 하여 해석을 수행하며, 주어진 조건을 만족하여 해가 도출될 때까지 Newton-Raphson 방법[11]에 의하여 지속적으로 반복

계산을 수행하게 된다. [그림 6]은 해석모듈이 수행되는 프로그램 실행 화면이다.

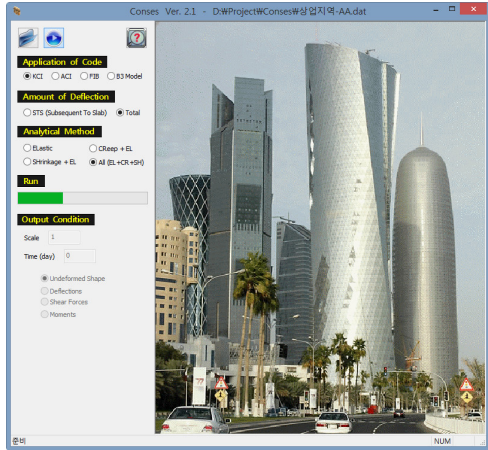


그림 6. 프로그램 실행 화면

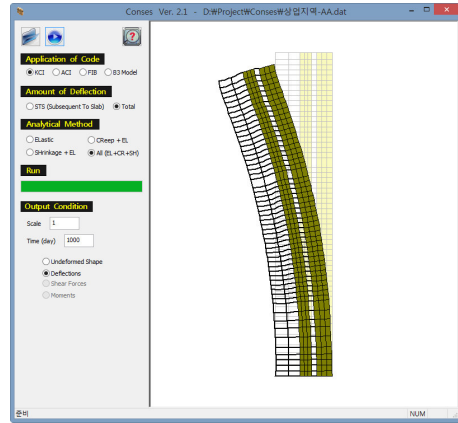


그림 8. 결과도출 화면구성 사례

5. 결과도출

해석모듈에서 수행된 해석결과들은 DB모듈을 통하여 저장되며 저장된 결과들을 사용자가 접근할 수 있도록 일정한 양식을 갖춘 파일로 생성하는 역할을 수행한다. 이를 통하여 사용자는 [그림 7]과 같이 한컴오피스나 Microsoft Office 등의 각종 에디트 프로그램을 통하여 연계된 추가 작업을 할 수 있으며, [그림 8]과 같이 화면에서 직접 결과들을 볼 수도 있도록 구현하였다.

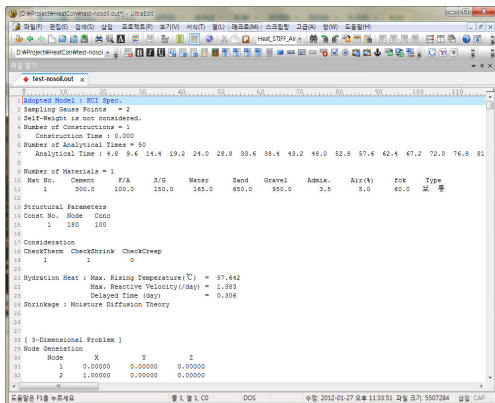


그림 7. 에디트 프로그램 구동 사례

III. 적용사례

1. 적용 구조물 시공 개요

본 논문에서 개발된 해석시스템의 사용성 및 정확성을 평가하기 위하여 실제 구조물인 서울의 50층 K건물에 대한 시공사례[12]와 비교 분석해 보기로 한다. 적용된 구조물의 시공단계는 [그림 9]와 같으며, 계획은 진동현식 게이지를 주철근에 부착하고 이를 층별로 구분하여 데이터로거에 연결하여 정해진 시간간격으로 자동으로 측정하는 시스템인 [그림 10]과 같은 방식으로 적용하였다.

구조물 기둥 및 벽체의 시공단계별 해석을 위하여 각 부재별 부담면적과 부재크기를 고려하였으며, 시공단계에 따른 거푸집 설치와 제거, 동바리 재설치와 제거를 고려하였다. 이때 모든 골조 부재에 대하여 실제 시공된 일자를 입력 데이터로 사용하였다.

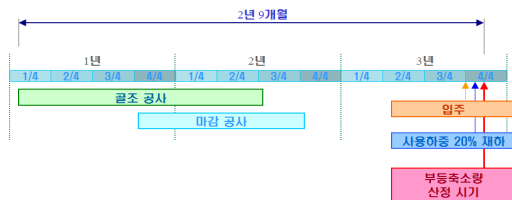


그림 9. 적용된 시공단계

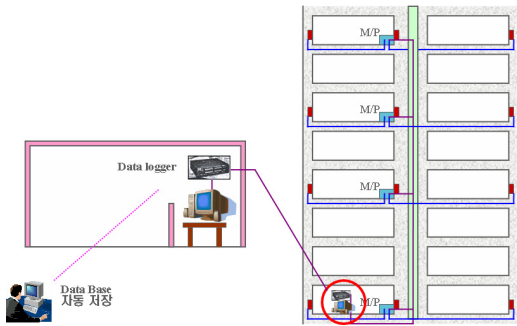


그림 10. 자동화 계측 시스템

또한 부등축소량의 산출 시점은 [그림 9]에 나타나 있는 바와 같이 최초로 골조공사가 시작된 이후 구조물이 완공되고 입주가 부분적으로 시행되어 사용하중의 20%가 재하되는 시기인 2년 9개월로 설정하였다.

2. 계측결과 비교

계측은 지하3층, 6층, 17층에 대하여 대표부재를 선정하여 실시하였으며, 마감공사가 진행되어야 하는 현장

여건상 최초 골조공사가 시작된 시점으로부터 507일까지만 수행되었다.

계측결과와 해석결과와의 비교는 [그림 11]에 나타나 있는 바와 같다. 지하층의 경우에는 초기 계측 시작 후 약 80일 정도까지는 구조물이 지반 위에 안착되는 과정에서 지연현상이 발생되어 변형률이 거의 나타나지 않다가 지반에 안착된 이후 급격한 변형률의 증가가 나타나고 있다. 이후 지상층에서는 벽체와 기둥의 모든 계측부위에서 계측결과와 해석결과가 유사하게 나타나고 있음을 볼 수 있어 해석결과와의 신뢰성을 입증하여 주고 있다.

3. 부등축소량 산정

구조물의 시공중 시공단계에 따른 해석과 구조물 완공후 입주에 따른 사용하중 재하를 모두 고려하여 구조물의 부등축소량을 산정하였다. 부등축소량은 슬래브 타설후 축소량으로 정리하였으며, 벽체-내측기둥 연결부와 내측기둥-외측기둥 연결부의 두 가지 종류로 구

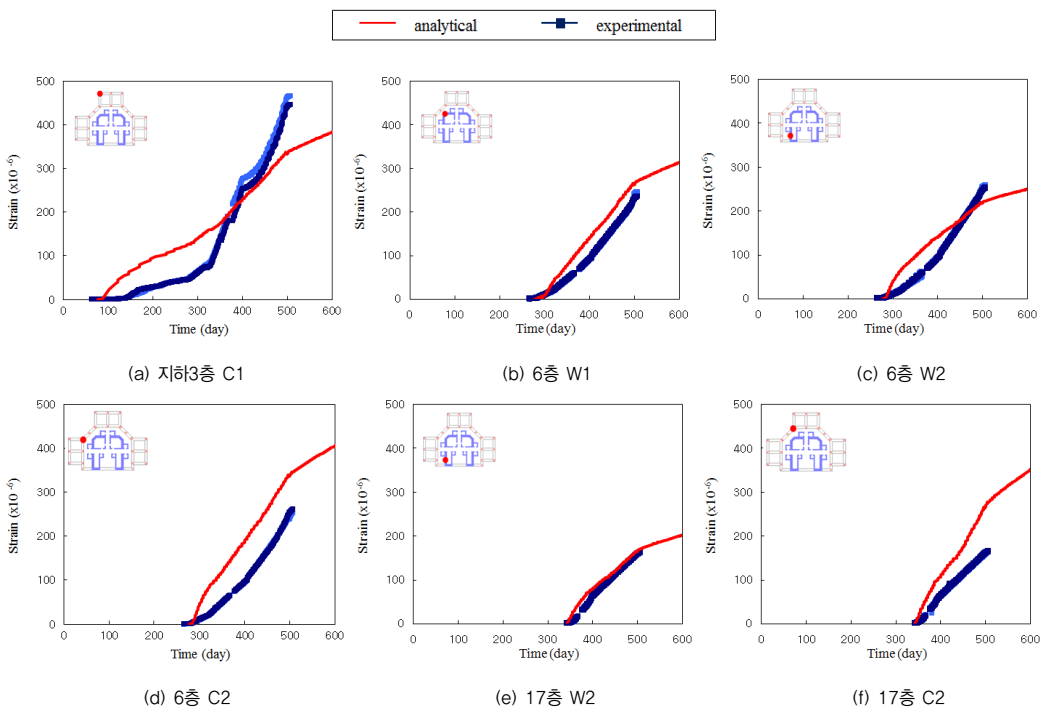


그림 11. 계측결과와의 비교

분하여 정리하면 [그림 12]와 같이 나타난다.

벽체-내측기둥 연결부에서는 35층에서 11.83 mm로 가장 크게 평가되었으며, 내측기둥-외측기둥 연결부에서는 50층에서 8.06 mm로 가장 크게 평가되었다.

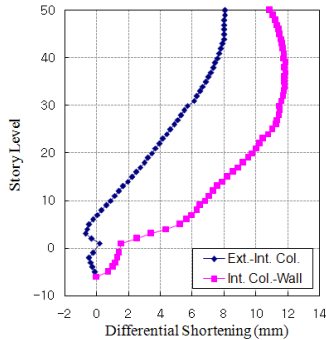


그림 12. 부등축소량 비교

IV. 결론

본 논문에서는 철근콘크리트 고층건물에서 거푸집, 동바리의 설치, 제거 및 재설치 과정을 포함하는 시공 단계를 고려한 해석시스템을 개발하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 일반적인 시공단계별 진행상황 및 결과물을 DB화하여 시스템을 효율적으로 관리할 수 있다.
- 2) 사용자 편의를 위한 GUI 환경의 지원으로 사용자가 필요 데이터 및 조건의 입력과 수정작업을 쉽게 할 수 있도록 구현하여 실무에의 적용성이 매우 편리하도록 하였다.
- 3) 개발된 해석시스템은 일반적인 고층건물의 시공 단계는 물론 각 층별로 거푸집의 설치와 제거, 동바리의 재설치와 제거까지 고려하여 실제 구조물의 시공단계를 거의 그대로 모사하여 적용할 수 있다.
- 4) 시간 경과에 따른 기둥과 거푸집 및 동바리의 축력의 변화를 고려하여 축력을 재분배시킴으로서 실제 기둥의 축력과 거의 동일한 수준으로 예측하

고 있음을 실제 적용사례 분석에 의하여 입증하였다.

- 5) 아직까지는 시스템이 개발되어 DB 축적 초기단계에 있기 때문에 DB자료의 활용성은 매우 떨어지지만, 향후 많은 건설공사에 적용되어 어느 정도 DB가 축적되고 나면 더욱 더 체계적이고 신뢰성 높은 시스템이 완성될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] M. F. Ghosh and H. Iyengar, *Column Shortening in Tall Structures-Prediction and Compensation*, Engineering Bulletin No. EB108D, Portland Cement Association, 1987.
- [2] 김한수, 정세훈, 신승학, “시간간격과 시공단계 간략화를 이용한 RC골조의 기둥축소 해석”, 대한건축학회 논문집, 제26권, 제6호, pp.3-10, 2010.
- [3] 김선영, 김진근, 김원중, “철근콘크리트 고층건물 기둥의 부등축소량 해석 및 보정을 위한 시스템 개발”, 한국콘크리트학회 논문집, 제14권, 제3호, pp.291-298, 2002.
- [4] 오향옥, 박학길, “시공단계와 기하 비선형성을 고려한 초고층 구조물 해석”, 대한건축학회 논문집, 제24권, 제7호, pp.3-10, 2008.
- [5] 김진국, 홍수미,곽효경, “시간의존적 거동을 고려한 철근콘크리트 골조의 효율적 지지시스템 결정”, 한국전산구조공학회 논문집, 제17권, 제3호, pp.225-239, 2004.
- [6] 민병원, 오용선, “H.264기반 HD급 VOD 콘텐츠관리시스템 설계 및 구현”, 한국콘텐츠학회논문지, 제9권, 제9호, pp.18-30, 2009.
- [7] 이태규, “고층건물 부등축소량 해석 프로그램”, 한국저작권위원회, 2004.
- [8] 이태규, “초고층 건물의 부등축소량 산정시스템 및 방법”, 특허등록번호 10-0842226, 특허청, 2008.
- [9] 이태규, “균열단면을 고려한 철근콘크리트 구조물의 시간단계 해석”, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제I-6호, pp.811-818, 1998.

- [10] S. W. Park and Y. R. Kim, "Interconversion between Relaxation Modulus and Creep Compliance for Viscoelastic Solids," Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.11, No.1, pp.76-82, 1999.
- [11] I. M. Smith and D. V. Griffiths, *Programming the Finite Element Method*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1998.
- [12] 리더스큐엠, *스타시티 상업지역 건물의 부등축 소량 계측 및 해석*, 금호건설, 2007.

저 자 소 개

이 태 규(Tae-Gyu Lee)

정회원



- 1989년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 우송대학교 철도건설시스템학과 교수

<관심분야> : 건설시스템, 알고리즘, OOP, 멀티미디어