특 집

‖IT 시대의 콘크리트‖

IT 시대 콘크리트 구조물의 구조해석 및 설계 기법

- Structural Analysis and Design method of Concrete in the IT Era -

김종우* 문정호**

1. 서 론

구조재료로써 콘크리트의 물리적 특성은 강재와는 달리 시간 의존적이라고 할 수 있다. 즉, 타설 후 재령이 경과함에 따라 압축강도와 탄성계수가 증가함은 물론, 콘크리트 내의 수분이 대기 상태로 증발하면서 부재가 수축하는 건조수축 및 외력의 증감없이 변형률이 증가하는 크리프 특성 등을 가지고 있다. 또한, 콘크리트는 시멘트의 수화반응에 의해 시공초기에 재료의 온도가 급격히 상승하는 발열특성도 동시에 가지고 있다. 이러한 특성들은 구조물의 설계 시 무시할 수 없으며, 각 시공단계 및 완성단계의 구조물의 응력에 커다란 영향을 미치게 된다.

또한 PSC Box 교량의 경우에는 전체 경간을 한번에 시공하지 않고 분할하여 시공하게 된다. 따라서 구조물의 분할시공 중에 발생하는 부재력, 변위, 응력 등이 구조물 완공상태의 부재력, 변위, 응력보다 커질 수 있으므로, 시공단계를 고려한 해석이 필요하다. PC 강재에 의한 긴장력의 즉시 및 장기 손실뿐만 아니라, 콘크리트의 시간 의존적인 재료 특성인 강도발현특성(aging), 건조수축(shrinkage) 및 크리프(creep) 현상을 고려하여야 한다. 또한, 최근 들어 공사가 증가하고 있는 대형 콘크리트 구조물의 경우도, 분할 타설이 일반적이기 때문에 서로 다른 발열 특성 및 시간 의존적 특성을 지닌 콘크리트로 구성된 대표적인 구조물로 볼 수 있다. 이러한 분할 타설을 고려하기 위해서는 시공단계별로 달라지는 콘크리트의 물리적 특성을 고려할 수 있어야만 실제 구조물의 거동과 유사한 결과를 얻을 수 있다. 이러한 콘크리트의 시간 의존적 특성 및 발열특성, 비선형성을 해석적으로 반영하기 위해서는 다양한 수치해석 알고리즘과 많은 반복계산이 필수적으로 요구된다. 또한, 각 시공단계별로 구조시스템, 하중조건, 경계조건 등의 변화를 반영하기 위해서는 복잡한 모델링 과정도 거쳐야 한다. 그리고 설계자가 이를 오류 없이 모델링하고 시공단계별 응력의 분포를 적절하게 설계에 반영하기 위해서는 고도의 그래픽 처리 기술도 핵심요소 중 하나이다. 그러나 실제로는 해석을 위해 입력되는 변수 중에는 실제 값을 알 수 없어 부득이 가정을 사용하게 되는 경우도 많은데 이것이 해석과 실제사이의 오차의 중요한 원인이 되므로, 최근에는 첨단센서시스템을 이용한 중요변수의 계측도 빈번하게 활용되고 있는 실정이다.

21세기 IT(Information Technology) 시대의 도래와 함께 건설시장에서는 과거에는 얻을 수 없었던 정보를 취득할 수 있는 반면, 과거에는 요구되지 않았던 정보의 제공 의무도 함께 지게 되었다. 따라서 구조해석 및 설계기술도 이에 맞추어 3차원 그래픽 기술과 구조해석 및 설계 기술과 함께 콘크리트의 시간 의존적 특성 및 발열 특성, 비선형성을 반영한 프로그램이 몇몇 선진국에서 개발되었다.

국내에서도 외국의 프로그램에 의존하던 PSC 교량, 현수교, 사장교 및 수화열 해석의 시공단계해석 및 설계기술을 국산화한 콘크리트 구조물 전용 프로그램이 개발되었다.

* 정회원, (주) ICES 이사
** 정회원, 한남대학교 건축공학과 교수

본고에서는 콘크리트 구조물에 대한 최신의 해석 및 설계기술이 집약된 수화열 계측 및 해석분야와 PSC 박스교 시공단계별 해석기술에 대한 적용사례를 소개하고자 한다.

2. 수화열 계측 및 해석기술

2.1 개요

최근 들어 대형 콘크리트 구조물이나 고강도 및 고 내구성 콘크리트의 필요성이 증가함에 따라 수화열에 의한 온도균열의 발생위험이 증가하고 있는 실정이며, 실제 구조물의 설계 및 시공시 수화열에 의한 온도응력은 무시할 수 없는 영향을 미친다. 이러한 온도균열은 보통 그 폭이 크고 구조물을 관통하는 경우가 많으며, 구조물의 시공초기에 발생하여 구조물의 내력, 수밀성 및 특히 장기적인 내구성능의 저하를 초래하므로 설계, 시공 및 관리 단계에서 면밀한 검토가 이루어져야 한다. 또한 대형 콘크리트 구조물은 일괄 타설 하지 않고 분할하여 타설 하기 때문에 서로 다른 발열 특성 및 시간 의존적 특성을 지닌 콘크리트로 구성된 구조물이 된다. 이러한 분할 타설을 고려하기 위해서는 시공단계별 수화열 계측 및 해석이 수행되어야 실제 구조물의 거동을 미리 예측하여 사전에 조치를 취할 수 있다.

2.2 수화열 해석

수화열 해석은 열전달 해석(heat transfer analysis)과 열응력 해석(thermal stress analysis) 과정을 통해 이루어진다. 열전달 해석은 시멘트의 수화과정에서 발생하는 발열, 대류, 전도 등에 의한 시간에 따른 절점온도 변화를 계산하는 과정이다. 열응력 해석은 열전달 해석에서 계산된 시간별 절점 온도분포와 시간과 온도에 따른 재질의 변화, 시간에 따른 건조수축, 시간과 응력에 따른 크리프 등을 고려하여 매스 콘크리트의 각 단계별 응력을 계산한다.

2.3 수화열에 의한 응력 발생기구

콘크리트의 수화열로 인해 발생하는 응력은 크게 내부구속응력과 외부구속응력으로 나눌 수 있다. 내부구속응력이란 서로 다른 온도분포에 따른 부피 변화에 대한 상대적인 구속에 의해서 발생하는 응력이다. 즉 수화반응 초기에는 표면부와 중심부의 온도차이로 표면에 인장응력이 발생하고, 온도가 하강하는 후기에는 내부의 수축변형이 표면보다 더 크므로 내부에서 인장응력이 발생한다. 내부구속응력의 크기는 구조물의 내부와 표면의 온도차이에 비례한다. 외부구속응력은 이미 타설 된 콘크리트 혹은 지반과의 접촉이 이루어진 면에서 콘크리트 온도에 의한 체적 변화가 구속되면서 발생하는 응력이다. 외부구속의 영향은 접촉면의 넓이와 외부구속체 강성의 크기에 따라 달라지게 된다.

2.4 콘크리트 강도 변화

콘크리트 경화과정에서 발생하는 강도 변화를 고려한 시간 의존적인 부재의 재료정수를 정의하며, 일반적으로 콘크리트 표준시방서, ACI 209 위원회, CEB-FIP 및 일본 Ohzagi의 제안식이 널리 사용되고 있다.

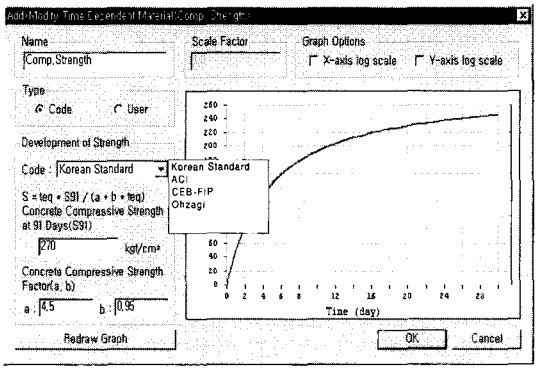


그림 1. 콘크리트 강도변화 정의

2.5 크리프, 건조수축

콘크리트에는 시간에 따른 크리프 변형과 이로 인한 추가 응력이 발생한다. 그리고 콘크리트의 초기양생이 끝나면 건조수축이 시작되고 이로 인해 변형과 응력이 발생한다. 크리프와 건조수축에 대한 정의는 콘크리트 시방서, ACI, CEB-FIP의 제안식을 통한 입력방법과 사용자가 직접 입력하는 방법이 일반적으로 사용된다.

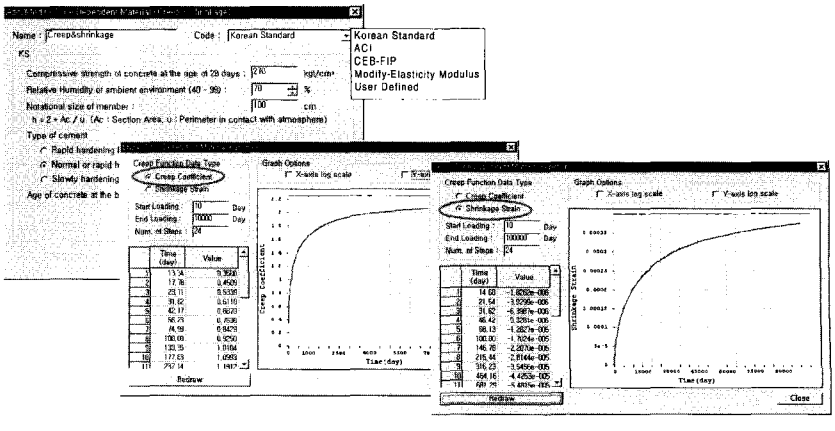


그림 2. 크리프, 건조 수축 정의

2.6 외기온도 및 대류계수

콘크리트의 타설 후 양생과정에서의 외기 온도는 일정한 온도나 사인함수, 또는 시간에 대한 온도 형태의 입력이 가능하다. 또한 대류계수는 흐름의 종류, 물체의 기하학적 형상 및 흐름의 접촉면적, 유체의 물리적 성질, 대류 접촉면의 평균온도, 위치 등에 따라 복잡하게 변하는 함수이다. 일반적으로 매스 콘크리트의 온도해석에서 사용되는 대류문제는 콘크리트 표면과 대기의 열교환 형태로 이루어지므로 대기 풍속의 함수로 다음의 경험식을 사용하기도 한다.

대류계수 $h_c(kcal/m^2 \cdot h \cdot ℃)=5.2+3.2v(m/sec)$

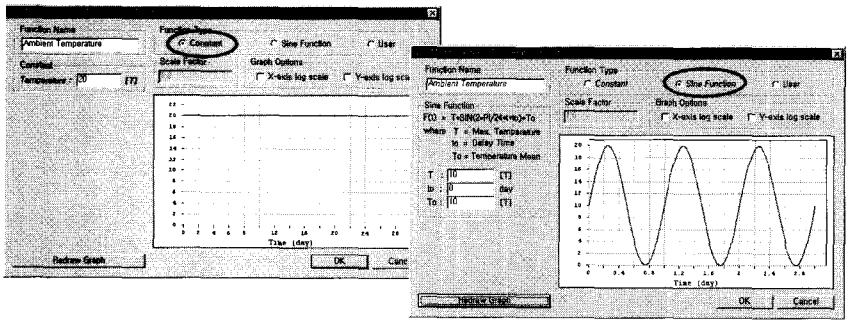


그림 3. 외기온도 정의

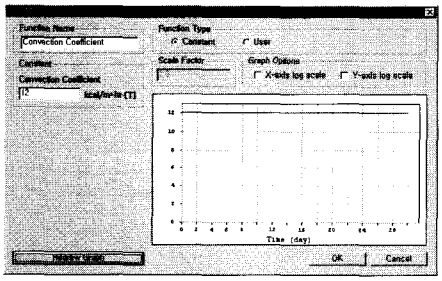


그림 4. 대류계수 정의

2.7 고정온도조건

모델링 상에서 대류조건이나 고정온도가 입력되지 않은 절점은 열의 전달이 전혀 없는 단열상태로 해석을 하게 되어 결과적으로 열전달해석의 경계조건 또는 고정온도 유지효과가 얻어진다. 일반적으로 대칭모델을 사용할 경우 대칭면에서 단열경계조건을 사용하게 된다

2.8 발열함수(Heat Source Function)

수화과정에서 발생하는 열량을 모델하기 위한 것으로 매스콘크리트의 수화발열에 의한 단위시간당 단위부피의 내부 발열량은 단열온도 상승식을 미분하고 비열과 밀도를 곱하여 얻을 수 있다.

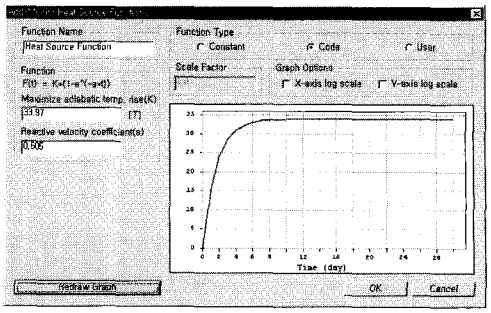
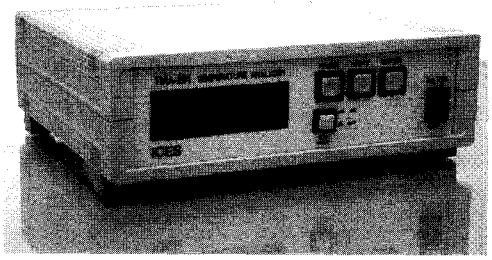


그림 5. 발열함수 정의

2.9 수화열 계측

수화발열량은 최근 들어 사용되기 시작한 다양한 종류의 시멘트와 각종 혼화재의 영향으로 콘크리트의 온도분포의 예측이 점점 어려워지고 있어 실측에 의존하는 경우도 빈번하다. 실제현장에서도 계측의 필요성을 인식해왔으나 그 비용이 고가이어서 쉽게 수행되지 못한 것도 사실이다. 그러나 최근 저가 NTC 센서시스템을 이용한 수화열 계측시스템이 국내기술로 개발되어 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 기반이 구축되고 있다.



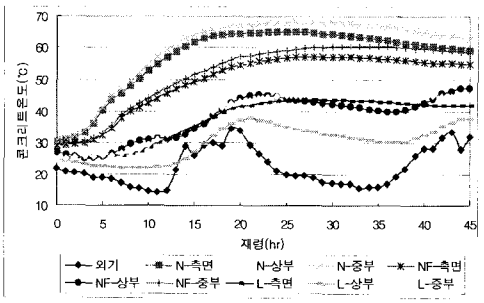


그림 6. 온도측정장비 및 저열시멘트를 사용한 부재의 온도측정 예

2.10 시공단계 정의

수화열 시공단계는 각 타설 단계에 해당하는 해석시간간격, 요소, 경계조건을 지정하여 정의한다.

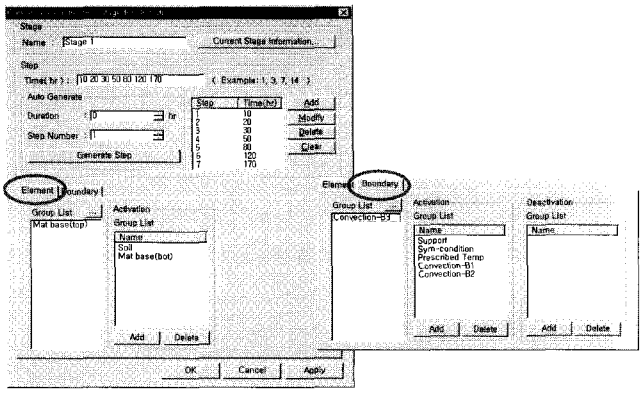


그림 6. 시공단계 정의

2.11 시공단계별 수화열 해석 예제(PSC Box 주두부 시공단계 해석)

요소수 : 2926개(Solid Element)

시공단계	1st Stage	2nd Stage	3rd Stage
시공기간	150 hr	240hr	1000 hr

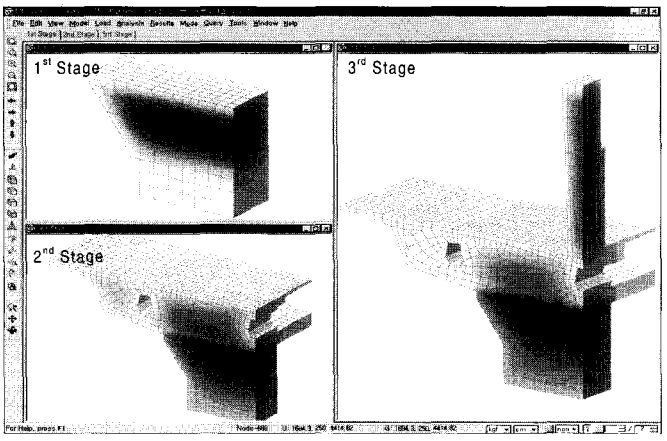


그림 7. 시공단계별 온도분포

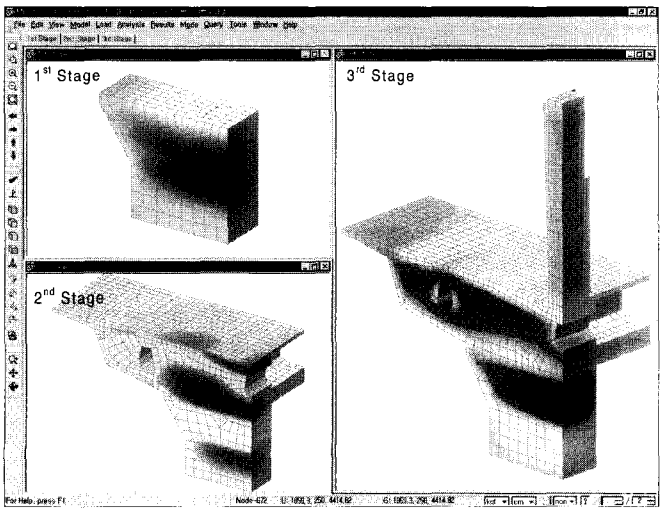


그림 8. 시공단계별 응력분포

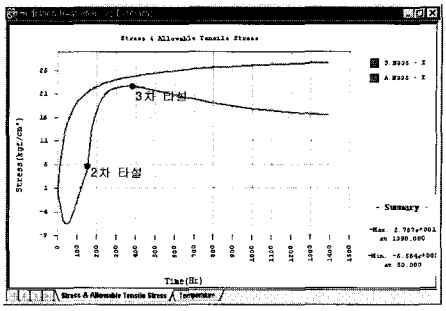


그림 9. 허용응력과 발생응력 변화 그래프

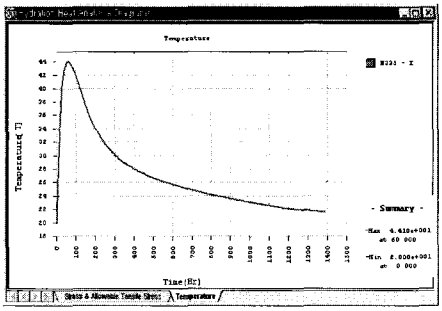


그림 10. 온도 변화 그래프

수화열 해석결과는 응력, 온도, 변위, 허용인장응력, 균열지수에 대해서 contour, 테이블, 동영상, 그래프로 확인할 수 있다. 〈그림 7, 8〉은 시공단계별 온도와 응력 contour이다.

〈그림 9〉는 주두부 내부 부분(1차 타설 콘크리트)의 허용응력과 발생응력을 출력한 그래프이다. 일괄 타설 한 해석결과와는 달리 2차 타설 콘크리트의 온도상승에 의해서 인장력이 증가하고 있음이 확인된다.

3. PSC Bos교의 시공단계별 해석

3.1 개요

PSC Box 교량의 대표적인 시공방법에는 ILM(Incremental Launching Method), FCM(Free Cantilever Method), MSS(Movable Scaffolding System), FSM(Full Staging Method)이 있으며, 각각의 공법에 따라 시공단계의 흐름, 단면의 형상, PC 강재의 배치 방법 등이 달라지게 된다. ILM의 경우 세그먼트 압출 시 경계조건의 변화가 중요한 요소가 되며, FCM의 경우에는 각 세그먼트 시공 시의 하중조건의 변화, 키 세그먼트의 시공순서 등이 시공단계 해석의 중요한 요소가 된다. PSC Box교는 각 시공단계별로 구조 시스템, 하중조건, 경계조건이 변화하게 되며, 이러한 변화를 구조물의 시공단계 모델에 반영하기 위해서는 복잡한 모델링 과정을 거쳐야 한다.

이 장에서는 국산해석 프로그램을 이용하여 콘크리트의 시간의존적 재료특성과 PC 강재의 손실을 고려한 PSC Box교의 시공단계해석모델을 간단히 구성하는 방법과 시공단계 해석의 결과를 기술하고자 한다.

3.2 시간 의존적 재료특성의 고려

콘크리트는 시간에 따라 탄성계수가 증가하는 강도발현 특성을 가지고 있어 콘크리트의 탄성변형은 시간에 따라 감소하게 되며, 이러한 탄성변형을 True Elastic Strain이라 한다. 콘크리트에 응력이 발생하면 작용하는 응력의 크기에 비례하는 크리프 변형이 발생하게 되며, 구조물의 경계조건에 따라 크리프에 의한 추가의 응력이 발생하게 된다. 그리고 콘크리트의 초기양생이 끝나면 건조수축이 시작되고 이로 인하여 변형과 응력이 발생한다. 크리프 변형률은 하중재하 또는 응력 작용 시의 콘크리트의 재령과 하중 또는 응력의 지속시간에 따라 결정되며, 건조수축 변형률은 건조수축이 시작될 때의 콘크리트 재령과 건조수축의 지속시간에 따라 결정된다.

여기서에는 정의된 시공단계의 지속시간과 콘크리트의 초기재령 및 탄성해석에 의한 응력의 크기를 이용하여 콘크리트의 시간의존적 재료특성에 의한 부재력, 응력 및 변위의 시간에 따른 변화를 계산하도록 하고 있다.

3.3 User Interface Tool을 이용한 PSC Box교의 시공단계 모델링

ILM, FCM, MSS및 FSM 공법으로 시공되는 정형적인 PSC Box 교량의 해석모델 및 시공단계는 기본적인 정보로 반드시 필요하다. 종래의 PSC Box교의 해석은 그에 대한 해석기술이 없어서가 아니라 사용이 어려운 것이 문제였다는 것을 생각하면, User Interface tool은 설계자를 위해 반드시 필요한 기능이라고 할 수 있다. 이 장에서는 PSC Box교의 시공단계 모델링에 대해서 기술하고자 한다.

3.3.1 교량 제원의 입력

교량의 기본정보로는 교량의 재료, 지간 구성, 요소의 분할, 시공단계의 소요시간, 시공되는 콘크리트의 초기 재령, 교량의 곡선반경 등을 입력된다.

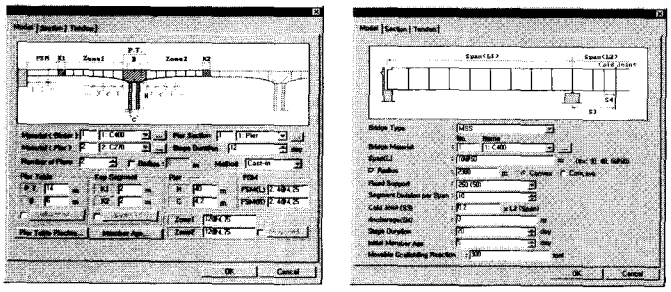


그림 11. 교량의 기본정보 입력 창

3.3.2 단면특성의 입력

공법에 따라 정해지는 정형적인 PSC Box거더의 단면치수를 입력하는데, 지점부와 지간 중앙부의 단면만을 입력함으로써 변단면부의 단면치수를 자동으로 계산하는 기능도 가지고 있다.

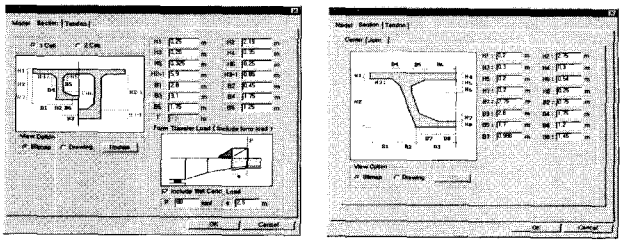


그림 12. 단면특성 입력 창

3.3.3 PC 강재의 배치 입력

Tendon탭에서는 기 입력된 교량제원과 세그먼트의 분할 그리고 단면정보에 맞는 PC 강재의 배치를 입력하고, PC 강재와 콘크리트의 환산합성강성이 반영되는 그라우팅 시기를 정의한다.

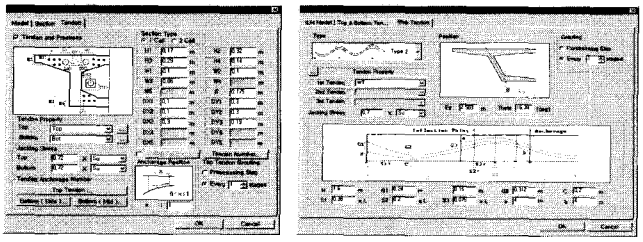


그림 13. PC 강재 배치 입력창

3.3.4 압출단계의 정의

완공시의 경계조건 그룹을 지정하고 압출단계의 기준점, 압출시작지점 및 압출방향을 정의하여 ILM 교량의 압출단계를 모델링 한다. 여기서 ILM 공법은 PSC Box교 뿐만 아니라 Steel Box Girder교의 시공에도 이용되는 공법임을 감안하여 ILM공법에 대한 Model 및 Stage 단계로 분리되어 있다.

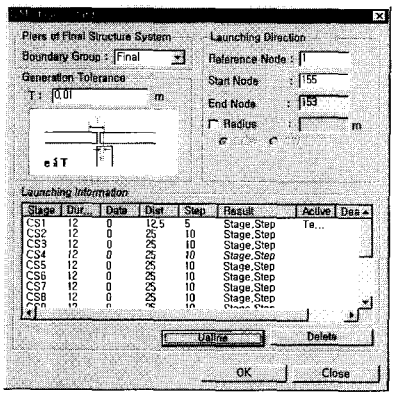


그림 14. ILM Bridge Stage 창

3.3.5 기타정보의 입력 및 시공단계의 수정

공법별 PSC Box교에서의 기타정보는 정형적인 교량에 대한 구조모델 및 시공단계를 구성해 주는 기능이다. 비정형적인 교량 또는 Wizard에서 고려하기 곤란한 시공단계상의 차이에 대해서는 Compose Construction Stage 대화상자와 여러 가지 일반 기능을 이용하여 사용자가 직접 정보를 입력 또는 수정하여 사용할 수 있다.

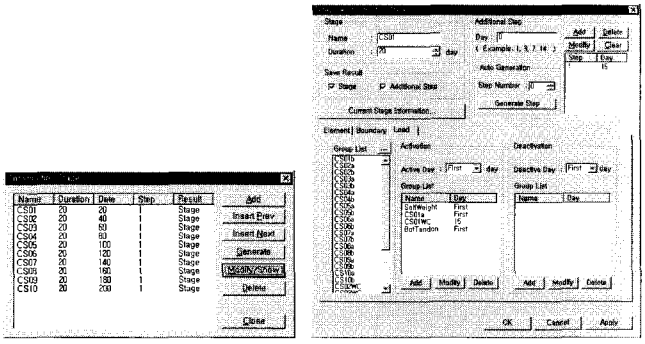


그림 15. 일반기능을 이용한 시공단계의 수정

3.4 시공단계해석 결과의 확인

3.4.1 시공단계 해석결과

각 시공단계별 해석결과 및 전체 시공단계에 대한 최대/최소값, 그리고 시공단계에 따른 해석결과의 변화를 확인할 수 있다. 〈그림 16〉은 특정 시공단계에서의 주 거더의 응력, 시공단계의 진행에 따른 최대변위의 변화, 그리고 모든 시공단계와 완성계에서 주 거더의 최대 휨 모멘트를 보여준다.

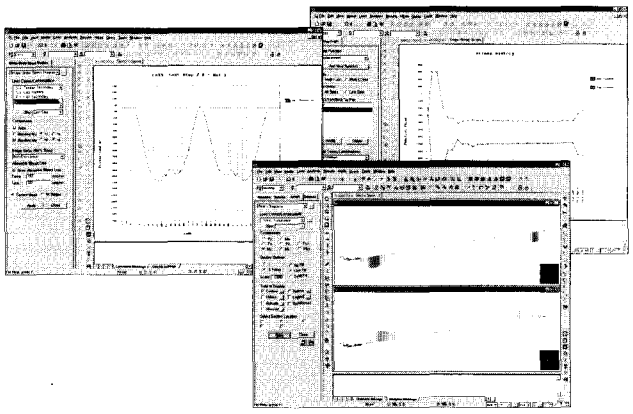


그림 16. 시공단계 해석결과

3.4.2 PSC 전용 해설 결과

〈그림 17〉은 시공단계에 따른 PC 강재의 긴장력의 손실량, PC 강재의 좌표 및 신장량 및 처짐량 제어를 위한 FCM 교량의 치솟음(camber)을 그래프로 보여준다.

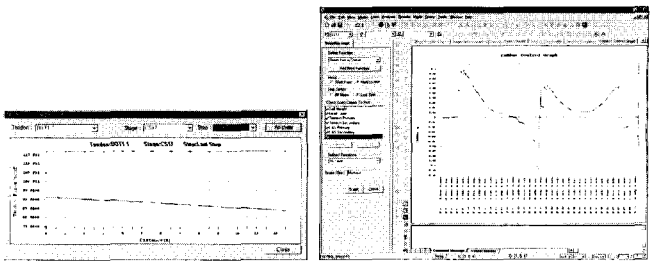


그림 17. 손실량 그래프와 치솟음(camber)

4. 결언 및 전망

현재 건설업의 정보 흐름은 '설계→견적→시공'이라는 일방적인 흐름으로써, 중요한 설계 정보 데이터의 상호 교환성이 낮다. 그것은 설계, 견적, 시공이라는 생산 과정에서도 마찬가지이다. 따라서 정부차원에서 건설 CALS(Continuous Acquisition & Life-cycle Support)가 2005년 완성을 목표로 추진되고 있다. 건설 CALS는 건설사업의 설계, 입찰, 시공, 유지관리 등 전 과정에서 발생되는 정보를 발주청, 설계·시공업체 등 관련주체가 정보통신망을 활용하여 교환·공유하도록 하는 시스템으로써, 전 건설업계가 새로운 정보화 패러다임에 동승할 수 있는 계기를 제공해줄 것으로 기대하고 있다. 설계, 시공의 IT화의 일례로 일본의 경우, IT를 제도나 계산의 단순한 도구가 아닌 다른 활용 수단으로 모색하는 가운데, 설계의 각 단계와 생산 과정 전체의 데이터를 통합·공유한 시스템인 건축 생산 정보 통합 시스템을 구축하였다. 설계부문과 시공 부문의 연결을 강화해 생산 과정의 합리적인 일원화를 도모함으로써, 설계·시공의 진정한 IT화를 기대할 수 있기 때문이다.

건설분야 업무를 종합적으로 관리하는 통합시스템 구축을 위해서는 입찰, 견적 등의 일반업무와 설계, 시공, 유지관리 등의 엔지니어링 업무를 면밀히 분석하여 디지털화 된 자료로 저장하고 관리하는 기술이 필요하다. 여기서 일반업무를 DB화하는 것은 이미 많은 분야에서 일반화되어 있으나, 엔지니어링 업무를 관리하기 위해서는 구조해석 및 설계를 수행할 수 있는 원천기술이 반드시 확보되어야 한다. 이 기술은 소수의 선진국만이 보유하고 있는 핵심기술로써, 순수 국내기술로 구조해석 및 설계프로그램을 개발 보유하고 있다는 것은 이점에서 큰 의의가 있다고 할 수 있다. 이러한 원천기술에 IT 기술을 접목함으로써, 향후 해석 및 설계, 견적, 시공데이터를 통합하는 디지털 자료 구축, 현장과 연계한 구조물의 건전성 평가 및 보수·보강 방안 수립 및 이들을 연계, 통합한 체계적 관리시스템 구축 등의 IT 기술을 기반으로 한 다양한 응용기술분야의 개발이 가능할 것으로 보인다.