

실용적인 비선형 비탄성해석을 이용한 강구조 설계기술

Design Technique of Steel Structures using Practical Nonlinear Inelastic Analysis

김 승 역* · 이 동 호** · 장 은 석***

Kim, Seung-Eock · Lee, Dong-Ho · Jang, Eun-Seok

ABSTRACT

This paper presents a design technique of steel structures subjected to static and dynamic loadings using practical nonlinear inelastic analysis software. The beam-column approach using the stability functions and the plastic hinge concept enables the software to suitably predict second-order effects and inelastic behavior of beam-columns. For dynamic analysis, the incremental form of the equation of motion is solved by the use of a step-by-step numerical integration procedure in which the assumption of constant acceleration over a small time step is employed. The accuracy of the analysis program is validated using the results of ABAQUS program and experimental tests. A user-friendly graphic interface of the software is developed to facilitate the modeling process and result interpretation of the problem. A design example of large span bridge is presented to detail the direct design process using the practical advanced analysis software.

Keywords nonlinear analysis, inelastic analysis, steel frame test, graphic user interface

1. 서 론

본 연구실은 2000년 6월에 과학기술부로부터 국가지정연구실(NRL; National Research Laboratory)로 선정되어 지난 2005년 6월까지 5년간 "실용적인 비선형비탄성해석을 이용한 강구조 설계 기술"을 개발하였다. 현재 실무에서 사용하고 있는 허용응력설계법(ASD) 혹은 하중저항계수설계법(LRFD)은 구조시스템은 선형 탄성해석하고 개별부재의 강도검토는 비선형비탄성해석을 통하여 개발된 강도검토식을 사용함으로써 구조시스템과 개별부재사이에 적합조건이 성립하지 않는 문제가 있다. 컴퓨터가 발전하기 전에는 종래의 설계방법을 사용할 수 밖에 없었지만 현재는 컴퓨터가 급속히 발전하여 비선형비탄성해석을 설계에 직접 활용할 수 있는 여건이 마련되었으며 이를 통하여 종래 설계의 문제점을 극복할 수 있다.

본 연구에서는 실용적으로 비탄성효과를 나타내기 위하여 각 요소의 세분화된 응력-변형률 관계를 사용하는 대신 부재력의 함수를 사용하였다. 기하학적 비선형성은 안정함수(Stability Function)를 이용하여 나타내었다. 해석을 광범위하게 사용하기 위하여 국부좌굴 및 횡비틀림좌굴을 고려하였다. 설계 시 비선형비탄성해석의 실용적인 적용을 위하여 비비례하중에 의해 발생하는 변형률 반전을 고려하였다. 실용적인 비선형비탄

* 정희원 · 세종대학교 토목환경공학과/건설기술연구소 부교수 · 공학박사 E-mail: sekim@sejong.ac.kr

** SK 건설 과장 · 공학박사 E-mail: dongho2@sju.ac.kr

*** 세종대학교토목환경공학과/건설기술연구소연구원 · 석사 E-mail: jang7331@sju.ac.kr

성해석을 이용하는 동적해석 기술을 개발하였다. 또한 GUI(Graphic User Interface)를 개발하여 설계실무자가 개발된 소프트웨어를 편리하게 사용할 수 있도록 하였다.

2. 실용적인 비선형비탄성해석

2.1 기하학적 비선형 및 재료적 비탄성을 고려한 힘-변위 관계

기하학적 비선형성은 안정함수(Stability Function)를 이용하여 나타내었다. 안정함수는 비선형거동을 나타내기 위하여 부재 당 요소를 하나 혹은 두 개를 사용하므로 실용적이고 경제적인 해석을 할 수 있다. 비탄성 효과를 나타내기 위하여 각 요소의 세분화된 응력-변형률 관계를 사용하는 대신 부재력의 함수를 사용하였다. 3차원 보-기둥 부재의 기하학적 비선형 및 재료적 비탄성을 고려하는 힘-변위의 관계는 식 (1)과 같이 정식화된다.

$$\begin{bmatrix} P \\ M_{yA} \\ M_{yB} \\ M_{zA} \\ M_{zB} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_t A}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{iiY} & C_{ijY} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{ijY} & C_{jjY} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{iiZ} & C_{ijZ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{ijZ} & C_{jjZ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_{yA} \\ \theta_{yB} \\ \theta_{zA} \\ \theta_{zB} \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } C_{iiY} &= \eta_A \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \eta_B) \right] \frac{E_t I_y}{L}, \quad C_{ijY} = \eta_A \eta_B S_2 \frac{E_t I_y}{L}, \quad C_{jjY} = \eta_B \left[S_1 - \frac{S_2^2}{S_1} (1 - \eta_A) \right] \frac{E_t I_y}{L} \\ C_{iiZ} &= \eta_A \left[S_3 - \frac{S_4^2}{S_3} (1 - \eta_B) \right] \frac{E_t I_z}{L}, \quad C_{ijZ} = \eta_A \eta_B S_4 \frac{E_t I_z}{L}, \quad C_{jjZ} = \eta_B \left[S_3 - \frac{S_4^2}{S_3} (1 - \eta_A) \right] \frac{E_t I_z}{L} \end{aligned}$$

여기서 S1, S2, S3 및 S4는 안정함수를 나타낸다. CRC 접선계수인 Et는 축방향력에 의하여 점진적으로 항복하는 것을 고려한다. ηA 및 ηB는 a의 함수로서 축방향력과 모멘트를 받는 부재의 점진적 소성화를 나타낸다. a는 단면에 작용하는 부재력의 크기를 나타내는 함수로서 AISC-LRFD 및 Orbison의 완전소성면을 활용하여 나타낼 수 있다.

2.2 기하학적 불완전 모형

본 연구에서는 부재의 중간에 최대 변형을 갖는 두 개의 요소로 모델링함으로써 부재의 직선도에 대한 불완전성을 고려하였다. 두 개의 요소를 사용하여 모델링할 경우의 정확도는 2차원 구조에 대하여 이미 검증된 바 있으며 이를 3차원 구조에 그대로 적용할 수 있다(Chen 및 Kim, 1997).

2.3 횡비틀림좌굴 효과를 고려하는 휨강도 감소모델

기존의 보-기둥 요소에서는 횡비틀림 거동의 영향을 무시하여 절점 당 6개의 자유도를 사용하였다. 그러나 본 연구에서는 기존의 절점 당 6개의 자유도 외에 횡비틀림 회전각을 추가하여 절점 당 7개의 자유도를 사용함으로써 횡비틀림 거동을 고려하였다.

2.4 국부좌굴 효과를 고려하는 휨강도 감소모델

국부좌굴을 실용적으로 고려하는 방법으로서 폭-두께비 등으로 구성되는 부재의 휨강도 감소모델을 실용적인 비선형비탄성해석에 적용하는 것이다. 본 연구에서는 휨강도 감소모델 중 실용적인 AASHTO-

LRFD(2004) 식을 채택하였다. 이 식을 실용적인 비선형비탄성해석 프로그램의 강도 검토식에 적용함으로써 부재의 국부좌굴효과를 고려하였다.

2.5 변형률반전효과를 고려하는 모델

수직하중이 먼저 재하되고 수평하중이 재하되는 경우에는 단면내에서 변형률 반전이 일어날 수 있다. 이러한 현상을 반영하기 위하여 이중계수 개념을 도입하였다. 이중계수는 강성감소계수 η 를 변형률 반전 효과를 고려, 수정하여 구하였다.

3. 실용적인 비선형비탄성해석을 이용한 동적해석

3.1 동적평형방정식

동적하중을 받는 구조물에 대한 다자유도계 모델의 증분형태 동적평형방정식은 식 (2)와 같이 구성된다.

$$[M]\{\Delta\ddot{x}(\Delta t)\} + [C]\{\Delta\dot{x}(\Delta t)\} + [K]\{\Delta x(\Delta t)\} = \{\Delta F(\Delta t)\} \quad (2)$$

여기서, 질량행렬([M])은 집중질량(Lumped Mass)을 절점에 작용시킴으로서 적용한다. 강성행렬([K])은 비선형, 비탄성 및 변형률 반전 효과를 모두 고려한다. $\Delta\ddot{x}(\Delta t)$, $\Delta\dot{x}(\Delta t)$, $\Delta x(\Delta t)$ 및 $\Delta F(\Delta t)$ 는 각각 시간 증분 Δt 에 대응하는 증분 가속도, 속도, 변위 및 작용하중 벡터이다. 감쇠행렬([C])의 구성 시 Rayleigh 감쇠행렬을 사용하였다.

3.2 비선형비탄성 동적해석

본 연구에서는 실용적인 비선형비탄성 동적해석을 수행하기 위하여 직접적분법을 사용하였다. 직접적분법의 종류에는 Newmark 방법, Wilson- θ 방법 및 Central Difference 방법 등이 있다. 본 연구에서는 실용적인 비선형비탄성 동적해석 시 정밀도가 가장 높은 Newmark 방법 중 $\beta=1/4$ 및 $\delta=1/2$ 을 이용하는 평균가속도법(Average Acceleration Method)을 사용하였다.

4. 3차원 강뼈대 구조물 실험

4.1 3차원 강뼈대 구조물의 극한강도 실험

지금까지 강뼈대 구조물의 실험은 대부분 2차원 구조물에 국한되어 왔다. 이 2차원 구조물로는 실제 구조물의 거동을 정확히 알 수 없으므로, 본 연구에서는 비례하중 및 비비례하중 재하 시 실물크기의 3차원 강뼈대 구조물의 극한강도 실험을 수행하였다. 실제 사용되는 강뼈대 구조물의 경우는 조밀단면이 아닌 경우도 많으므로 국부좌굴효과를 고려한 강뼈대 구조물의 실험이 필요하다. 따라서 국부좌굴효과를 고려한 3차원 강뼈대 구조물의 극한강도 실험을 수행하였다. 극한강도 실험 전경을 그림 1에 나타내었다.

4.2 3차원 강뼈대 구조물의 진동대 실험

본 연구에서는 개발된 강구조의 실용적인 비선형비탄성 동적해석 기법의 타당성 검증 및 지진하중 재하 시 강구조물의 비탄성 거동에 관한 연구를 위한 실험 자료를 제공하기 위하여 실제 지진에 대한 3차원 강뼈대 구조물의 진동대 실험을 수행하였다. 진동대 실험 전경을 그림 2에 나타내었다.

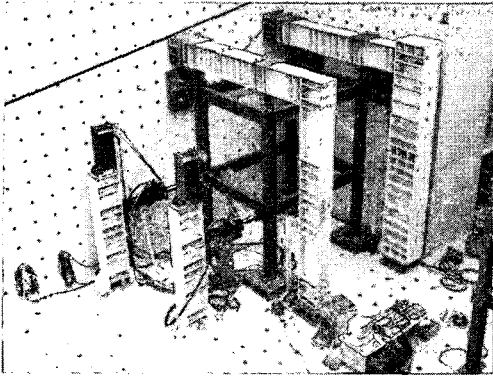


그림 1. 극한강도 실험 전경

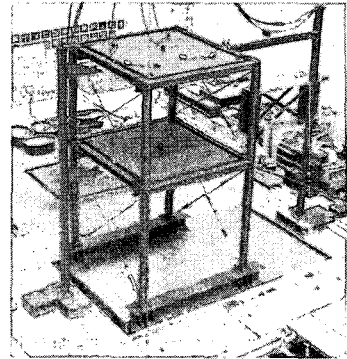


그림 2. 진동대 실험 전경

5. 검 증

제안한 실용적인 비선형비탄성해석 기법의 정밀도를 검증하기 위하여 제안한 해석결과와 상용 FEM 프로그램인 ABAQUS의 해석결과 및 실험결과를 서로 비교하였다. 그림 3-5에 결과 비교를 나타내었다.

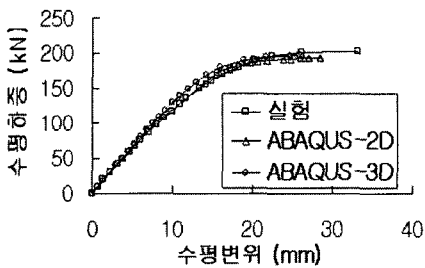


그림 3. 수평 하중-변위곡선 (극한강도 실험)

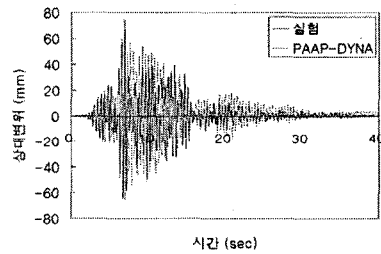


그림 4. Loma Prieta 지진 재하 시 2층의 상대변위 응답 이력곡선 (진동대 실험)

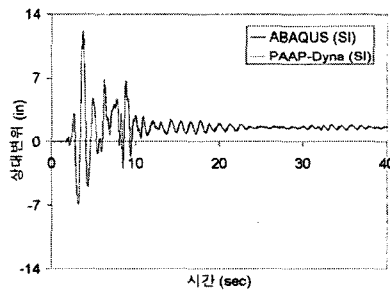


그림 5. San Fernando 지진 재하 시 4층 강뼈대 구조물 상 절점 A의 상대변위 비교

6. GUI(Graphic User Interface) 개발

본 연구에서는 사용이 간단하고, 입력데이터의 작성 및 출력데이터의 분석이 용이한 전후처리 시스템을 개발하였다. 그림 6과 7에 각각 GUI의 첫 화면과 구성을 나타내었다.

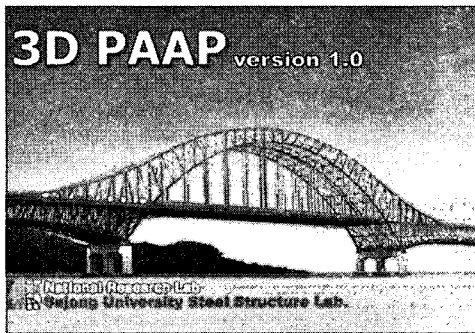


그림 6. GUI의 첫 화면

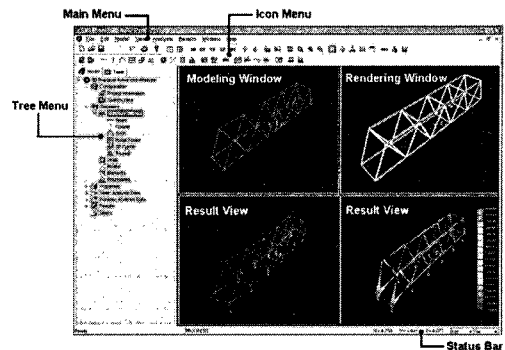


그림 7. GUI의 구성

7. 설계기술 개발

제안한 해석기법을 설계에 적용할 경우 개별부재의 강도검토에 소요되는 설계시간을 단축할 수 있을 뿐만 아니라, 비탄성 모멘트 재분배 효과에 의하여 부재단면의 크기를 절감할 수 있다는 것을 입증하기 위하여 3차원 강아치교에 대하여 설계를 수행하였다. 3차원 강아치교의 제원을 그림 8에 나타내었다. 종래설계방법 즉 AASHTO-LRFD 설계방법과 제안한 설계방법의 설계결과를 표 1에 비교하였다.

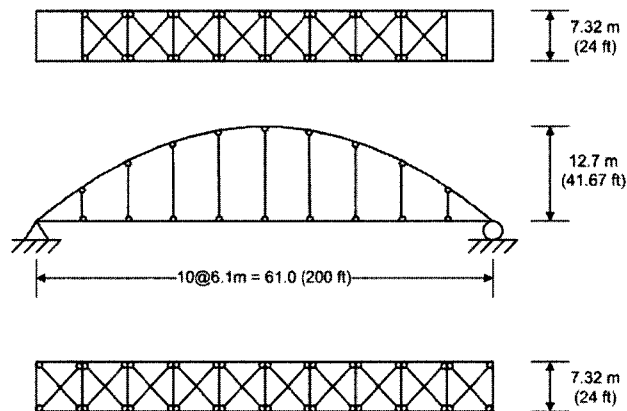


그림 8. 3차원 강아치교의 제원

표 1. AASHTO-LRFD 및 제안한 설계방법에 의한 설계결과 비교

부재종류	부재길이 m(ft)	AASHTO-LRFD 설계방법		제안한 설계방법		중량차이 (%)
		단면크기	중량 kg(lb)	단면크기	중량 kg(lb)	
아치리브	135(442)	24×24×1/2	31,628(69,726)	24×24×1/2	31,628(69,726)	0.00
타이	122(400)	W21×111	20,140(44,400)	W21×101	18,344(40,400)	9.00
평형재	168(550)	W6×12	2,994(6,600)	W8×10	2,495(5,500)	16.70
브레이싱	493(1619)	W10×26	19,097(42,100)	W10×22	16,159(35,623)	15.40
총중량	-	-	73,858(162,826)	-	68,607(151,249)	7.65

8. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부재 1개당 요소 1-2개를 사용하면서 비선형비탄성효과를 고려할 수 있는 3차원 강구조물에 대한 실용적인 비선형비탄성 해석 프로그램을 국내 최초로 개발하였으며 실용적인 비선형비탄성동적해석의 경우는 세계최초로 개발하였다.
2. 개발된 기술을 통하여 실제 구조시스템이 비선형비탄성 거동을 함에도 불구하고 선형탄성거동하는 것으로 가정하여 해석한 후 비선형비탄성 거동은 개별 부재의 강도 검토식에서 함축적으로 고려하고 있는 종래 설계방법의 문제점을 극복하였다.
3. 본 설계 기술을 설계 실무에 적용할 경우 해석 후 개별부재의 강도 검토가 필요없어 설계시간을 단축할 수 있을 뿐 만 아니라 모멘트의 비탄성 재분배에 의한 강재물량을 절감할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(M1-0204-00-0143) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- AASHTO (2004), AASHTO-LRFD Bridge Design Specification, American Association of State Highway and Transportation Officials of Steel Construction.
- Chen and Kim (1997), LRFD Steel Design Using Advanced Analysis, CRC Press.