

# 비선형비탄성해석을 활용한 하로 판형교의 극한강도 평가

## Ultimate Strength Evaluation of Through Plate Girder Bridge Using Nonlinear Inelastic Analysis

전신열†                      태후타이\*                      김승역\*\*  
Shin-Youl Jeon              Tai-Huu Thai                      Seung-Eock Kim

### ABSTRACT

An ultimate strength evaluation of the through plate girder bridge using nonlinear inelastic analysis is presented. In this method, separate member capacity checks after analysis are not required, because the stability and strength of the structural system and its component members can be rigorously treated in analysis. The method captures the inelastic redistribution of internal forces throughout a structural system, and allows an economic use of material for highly indeterminate steel bridges.

### 1. 서론

현행 허용응력설계 및 하중저항계수설계에서 구조물은 선형탄성해석을 하거나 직접 비선형탄성해석을 수행하고 비선형비탄성은 설계식에서 함축적으로 고려한다. 그러나, 현행 설계방법은 다음과 같은 간과할 수 없는 문제가 있다. 탄성해석을 수행한 후 설계기준에 주어진 개별부재의 강도검토식을 사용하는 것으로는 비선형 거동을 하는 구조계의 변위조건을 고려하지 못하므로, 개별부재와 구조계에 속한 각 부재사이에 적합조건이 성립하지 않는다. 종래의 설계방법으로는 구조물의 파괴원인이 재료의 항복에 의한 것인지 부재의 좌굴에 의한 것인지를 평가할 수 없다. 이것은 설계기준에서 제공하는 강도검토식이 구조계의 파괴형상에 대한 정보를 제공하고 있지 않기 때문이다. 종래의 설계방법은 탄성해석을 수행하여 비탄성 모멘트 재분배를 고려할 수 없으므로 부정정 차수가 높은 구조물의 내하력을 과소평가하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전체 구조물의 비선형비탄성해석을 수행하여야 한다. 현재 컴퓨터 및 구조해석이론의 발달과 더불어 비선형비탄성해석을 비교적 용이하게 수행할 수 있게 됨으로써 각국의 설계기준에서도 비선형비탄성해석의 활용을 권장하고 있으며 실무에서도 그 적용이 점차 증가하고 있다. (AASHTO-LRFD, 2007; Eurocode-3, 2003)

### 2. 구조시스템의 내하력 평가방법

비선형비탄성해석을 수행하면 하중-변위의 영향을 해석 중에 적절하게 고려하여, 전체 구조계의 하중저항능력 즉 내하력을 구하는 것이 가능하다(그림 1). 이 내하력을 구조물에 가해진 극한하중과 비교함으로써 구조물의 안정성을 평가할 수 있다. 이러한 내하력 평가방법은 종래 설계법의 한계, 즉 전체구조물의 내하성능은 평가하지 못하고 부재 단위의 강도만 평가하는 한계를 극복할 수 있다. 따라서 비선형비탄성해석을 활용한 내하력 평가방법은 전체구조물 수준의 성능을 평가할 수 있어, 개별 부재의 강도를 평가하는 종래의 방법보다 한차원 진보된 평가방법이라고 할 수 있다. 이 방법은 구조시스템의 해석 후 기존의 설계에서 수행하고 있는 개별부재의 강도검토를 필요로 하지 않기 때문에 설계자의 노력과

† 세종대학교, 토목환경공학과, 석사과정  
E-mail : jsy007jsy007@naver.com  
TEL : (02)3408-3607 FAX : (02)3408-3607  
\* 세종대학교, 토목환경공학과, 전임연구원  
\*\* 정회원, 세종대학교, 토목환경공학과, 교수

시간을 현격히 단축할 수 있을 뿐만아니라 부재력의 재분배를 통해 구조재료의 물량을 효과적으로 감소 시킴으로서 경제성을 극대화한 설계방법이다. 비선형비탄성해석을 수행하기 위하여, 미국에서 개발된 ABAQUS (HKS, 2006) 및 ADINA (ADINA, 2005) 등의 상용프로그램을 사용할 수 있다. 제공된 요소 중 플레이트요소를 사용한 비선형비탄성해석은 재료비선형, 국부좌굴 및 전체좌굴을 직접 취급할 수 있는 유용한 해석방법이다.

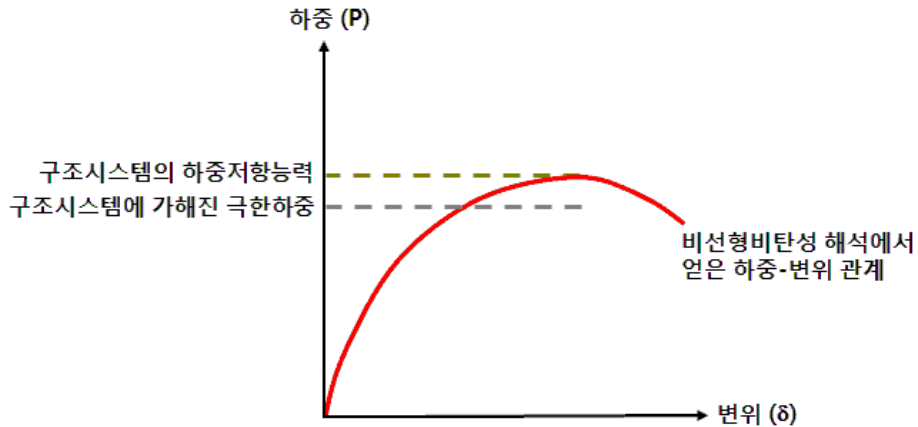


그림 1. 구조시스템의 하중-변위 관계

현재 강구조의 설계방법으로 채택하고 있는 허용응력 설계 형식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{R_n}{F.S.} \geq \sum_{i=1}^m Q_{ni}$$

여기서,  $R_n$  : 개별부재의 강도  
 $F.S.$  : 개별부재의 안전율  
 $Q_{ni}$  : 사용하중에 의한 개별부재의 응력

비선형비탄성해석 방법을 활용한 전체구조 시스템의 내하력을 평가하기 위한 설계형식은 다음과 같이 전환할 수 있다.

$$\frac{R_n}{\sum_{i=1}^m Q_{ni}} > F.S.$$

여기서,  $R_n$  : 전체 구조 시스템의 하중저항 능력  
 $Q_{ni}$  : 구조시스템에 작용하는 사용하중  
 $F.S.$  : 전체 구조 시스템의 안전율

상기 식에서 보는 바와 같이 종래의 허용응력 설계 방법은 개별 부재 관점에서 응력을 검토한 것이 라면 비선형비탄성해석에 의한 내하력 평가방법은 전체 구조시스템의 관점에서 내하력을 평가하는 것이다.

### 3. 적용하중 및 하중조합

#### 3.1 적용 하중

해석에 적용한 하중은 구조물에서 가장 큰 비중을 차지하는 주하중인 고정하중과 활하중, 부하중인 차량횡하중, 시·제동 하중, 풍하중 그리고 주하중에 상당하는 특수하중인 설하중, 지점이동의 영향을

적용하였다.

### 3.1.1 고정하중

강 거더의 자중은 대상구조물을 실제형상으로 모델링하였기 때문에 프로그램에서 자동적으로 고려하였다. 슬래브, 궤도하중(가이드레일, 침목, 전차선, 신호선 등), 케이블 및 트러프, 프린스(Plinth)구조물, 주행지대 구조물에 대한 하중은 31.147 KN/m 로 2열의 세로보 위에 나누어 재하하였다. 대피통로 하중(보강판 및 난간 등)은 1.428 KN/m로써 등분포 하중으로 재하하였다.

### 3.1.2 활하중

활하중은 열차하중 및 충격하중으로 분류할 수 있다. 만차시 열차하중은 26 KN/m를 적용하고 충격하중은 열차하중에 강 거더의 충격계수 0.15를 적용한다. 따라서 열차하중과 충격하중으로 인한 활하중은 29.90 KN/m 로 2열의 세로보에 나누어 재하하였다.

### 3.1.3 차량이상시 하중

차량이상시 하중은 스키드 낙하하중 및 스키드 활주하중으로 구분 된다. 스키드 낙하하중은 다시 정상낙하하중과 최대낙하하중으로 구분된다. 차량의 1대차가 부상력을 상실하여 레일상에 낙하할 때 정상낙하하중은 레일 한쪽에 대해 2개의 스키드가 작용하는 하중을 30KN으로 하고, 최대낙하하중은 레일 한쪽에 대해 1개의 스키드가 작용하는 하중을 35KN으로 한다. 스키드 활주하중은 차량 주행시 전체 대차에서 부상제어에 이상이 발생하여 차량이 전체 스키드에 의해 활주하는 경우에 레일기준면에 작용하는 하중으로서 연직방향, 교축직각방향, 교축방향으로 분류된다.

### 3.1.4 차량횡하중

차량 횡하중은 열차하중의 20%가 작용하는 것으로 5.200 KN/m를 재하하였다. 차량 횡하중은 교축에 직각이고 수평으로 작용하는 하중이기 때문에 이때 발생하는 모멘트는 정역학적 등가에 의해 세로보 중심에서 레일기준면의 거리(1.575m)를 고려하여 8.19 KNm/m를 교축방향을 따라 2열의 세로보에 나누어 재하하였다.

### 3.1.5 풍하중

풍하중은 열차가 없는 경우는 풍상측 구조물의 연직 투영면적에 대하여 3.0 KN/m<sup>2</sup>이 적용되며, 풍하측 구조물의 연직투영면적에 대하여 2.0 KN/m<sup>2</sup>가 적용된다. 열차가 있는 경우는 열차의 연직 투영면적에 대하여 1.5 KN/m<sup>2</sup>이 적용되며 열차의 연직투사면은 3.625m로 5.438 KN/m 의 하중이 교축에 직각이고 수평으로 작용된다. 또한 풍상측 구조물의 연직투영면적에 대하여 1.5kN/m<sup>2</sup>, 풍하측 구조물의 연직 투영면적에 대하여 1.0kN/m<sup>2</sup>을 재하하였다.

### 3.1.6 시,제동 하중

본 관형교는 단선이기 때문에 시동하중과 제동하중의 중복효과는 일어나지 않는다. 따라서 시동하중(열차하중의 10%)에 비해 제동하중(열차하중의 15%)이 지배적이다. 따라서 3.9 KN/m 하중이 차량중심 위치에서 교축방향으로 작용한다. 이때 발생된 모멘트는 정역학적 등가에 의해 세로보 중심에서 열차중심간의 거리(2.875m)를 고려하여 11.12 KNm/m 가 되며 2열의 세로보에 나누어 교축 직각 방향으로 재하하였다.

### 3.1.7 설하중

일반적인 경우 설하중은 1.0 KN/m<sup>2</sup>을 적용한다. 따라서 거더의 폭(3.4m)을 고려하여 3.4 KN/m를 2열의 세로보에 나누어 등분포로 재하하였다.

## 3.2 하중 조합

도시형 자기 부상철도 토목구조물 설계기준(2008)에서는 강교에서의 하중 조합인 경우 15가지의 하중조합을 제시하고 있다. 하지만 이번 평가에서는 하중효과가 큰 11가지의 하중조합을 선정하였다.

## 4. 모델링 및 해석

관형교의 비선형비탄성해석은 상용 유한요소 패키지인 ABAQUS를 사용하였다. 주거더, 가로보, 세로

보, 브레이싱 및 보강재를 포함하는 모든 구조 부재는 ABAQUS의 쉘 요소 S4R을 사용하여 모델링 하였다. 여기서 S4R은 4개의 절점과 절점당 6자유도를 가지는 사각형 쉘 요소이다. 콘크리트 슬래브는 세로보에 적용된 사하중으로 고려하였다. 정확한 결과 값을 얻기 위하여 I형 단면의 복부는 높이방향으로 최소 2개 이상의 요소로 모델링하였다. 본 해석에서는 주 거더, 가로 보, 세로보를 높이 방향으로 각각 19, 4, 2개의 요소로 모델링 하였다(그림 2). 구조물을 실제 형상과 동일하게 모델링하기 위해 일변이 100mm 보다 작은 요소를 사용하였고 총 요소 수는 37,834개이다(그림 3). 주부재, 가로보, 세로보, 보강재 등의 강종은 SM490으로서 항복응력 320 MPa를 적용하였고, 하부 브레이싱의 강종은 SS400으로서 항복응력 240MPa를 적용하였다.

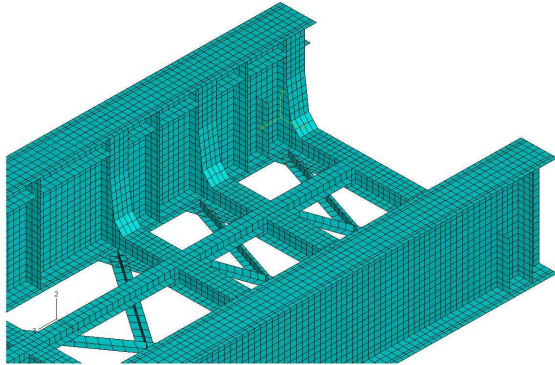


그림 2. 유한 요소 mesh 상세

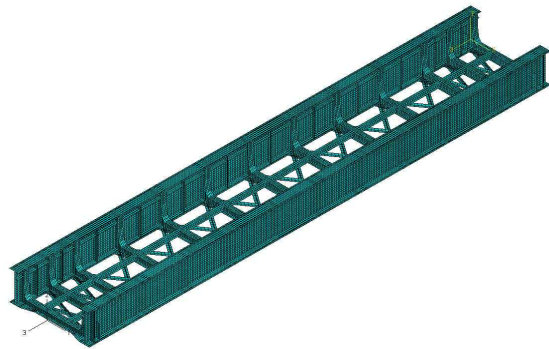


그림 3. 전체 유한 요소 mesh

수평 브레이싱의 절점과 주 거더 및 가로 보의 하부 플랜지의 절점은 겹쳐지는 부분에서 일치하지 않기 때문에 구조물의 실제 거동을 시뮬레이션 하기위해 TIE 구속 옵션을 사용하였다. 힌지와 롤러 지지 조건을 시뮬레이션하기 위해 거더 양단의 수직보강재 하부에 경계조건을 할당하였다. 경계조건을 아래 그림 4에 나타내었다.

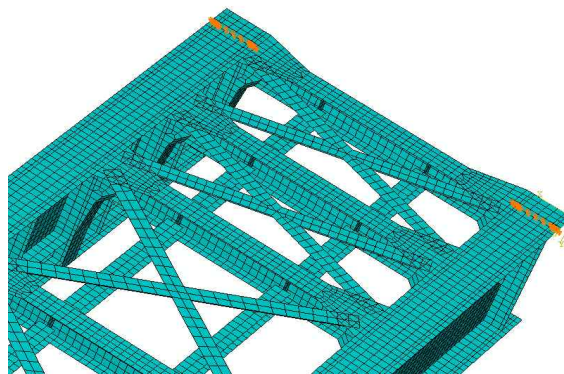


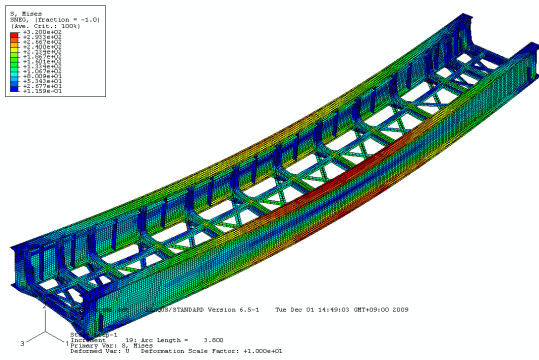
그림 4. 하부 경계조건

관형교의 극한하중저항능력은 강재의 항복과 국부좌굴 및 횡비틀림좌굴 등을 고려하는 비선형비탄성 해석을 통해 구하였다. ABAQUS(2005)에서는 비선형비탄성해석에 있어서 두가지 옵션(\*STATIC and \*STATIC, RIKS)이 있다. \*STATIC 옵션은 비선형 평형방정식을 풀기위해 Newton-Raphson 방법을 채택하기 때문에 극한하중점까지 추적할 수 있다. 반면에, \*STATIC, RIKS 옵션은 비선형 평형방정식을 풀기위해 arc-length 방법을 채택하기 때문에 극한 하중점 및 그 이후 하강곡선을 획득할 수 있다. 따라서 여기서는 구조물의 극한강도를 얻기 위해 \*STATIC, RIKS 옵션을 선택하였다. 이 해석에서 적용된 하중계수의 증가가 10<sup>-5</sup>의 최소하중계수 보다 작게 되면 해석은 정지하도록 하였다.

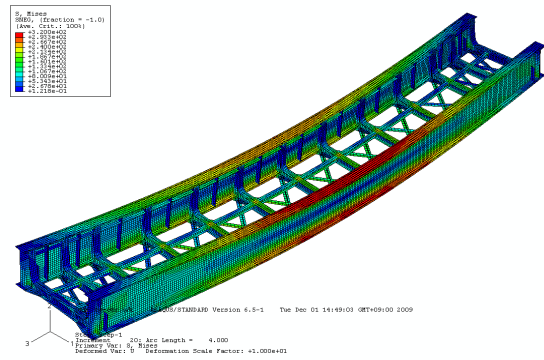
## 5. 구조시스템의 붕괴 메커니즘

구조시스템의 비선형비탄성해석 결과, 대체적으로 구조물에 가장 큰 응력이 발생하는 지간 중앙부의 주 거더에서 가장먼저 항복이 발생하였다. 대피통로 하중에 의해 우측 거더가 좌측 거더보다 먼저 항복에 도달하였고 상부 플랜지 하부 플랜지 순으로 항복이 진행되어 최종항복과괴에 도달하였다. 극한하중 계수가 가장 큰 load case 8에서의 각 단계별 붕괴 메커니즘은 다음 그림 5와 같다.

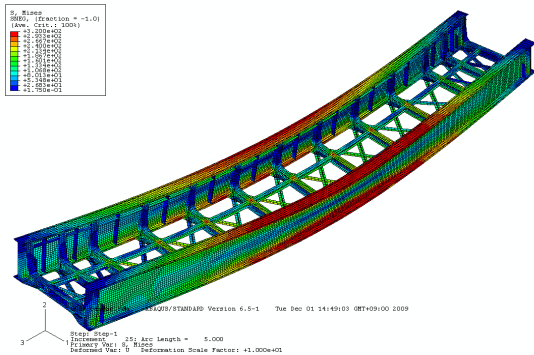
- 1) 1 단계 - 하중계수 3.795 : 우측 주 거더의 상부 플랜지에서 초기 항복이 발생
- 2) 2 단계 - 하중계수 3.986 : 우측 주 거더의 하부 플랜지에서 항복이 발생
- 3) 3 단계 - 하중계수 4.532 : 좌측 주 거더의 상부 플랜지에서 항복이 발생
- 4) 4 단계 - 하중계수 4.669 : 우측 주 거더의 중앙부가 완전 항복되어 구조물이 붕괴



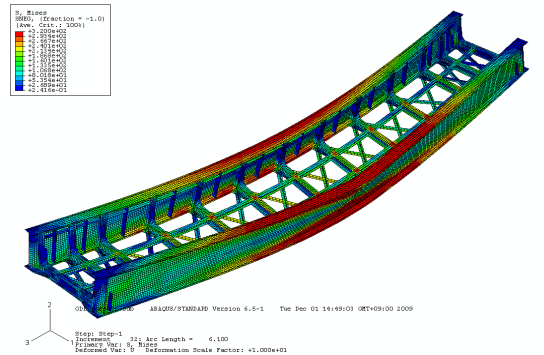
(a) 1단계



(b) 2단계



(c) 3단계



(d) 4단계

그림 5. load case 8에 대한 각 단계별 붕괴 메커니즘

## 6. 구조시스템의 내하력 평가

비선형비탄성해석을 수행하여 구조시스템의 내하력을 평가하였다. 하중계수 즉 작용된 사용하중에 대한 구조시스템의 하중저항 능력이 가장 큰 load case 8에 대한 하중-변위 그래프를 그림 6에 나타내었다.

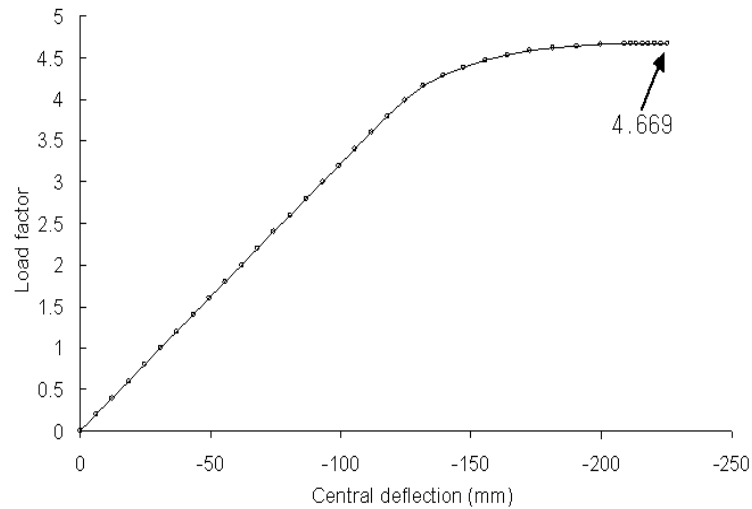


그림 6. load case 8에 대한 하중-변위 그래프

## 7. 결론

도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준(2008)의 허용응력 설계법에서 개별부재의 항복에 대한 안전율은 1.296 ~ 1.75이다. 해석결과 각각의 하중조합에 대한 구조시스템 레벨의 안전율은 3.760 ~ 4.669 이다. 따라서 이는 설계기준에서 제시하는 소요 안전율 대비 2.573 ~ 3.776배 더 큰 안전율로써 본 판형교의 구조시스템은 충분히 안전한 것으로 평가된다. 아울러 단면감소를 통한 경제성 향상을 도모할 필요가 있는 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. AASHTO (2007), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. Eurocode 3 (2003) Design of Steel Structures.
3. ABAQUS (2007). ABAQUS/Standard version 6.5 user' s manual.
4. 도시형 자기부상열차 실용화 사업단 (2008) 도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준.