

강교의 초기응력을 고려한 내하력 해석

Analysis on the Load Carrying Capacity of Steel Bridges Considering Initial Stress

장 경 호* 강 재 훈** 장 갑 철***
Chang, Kyong-Ho Kang, Jae-Hoon Jang, Gab-Chul

Abstract

Almost the steel bridges are manufactured and constructed by using weld process. The welding is necessary for connecting the flange, web and stiffener of steel bridges. However, residual stress and welding deformation produced by welding is a causes of decreasing the load carrying capacity of steel bridges. therefore, it is need to consider the initial stresses by welding when design the steel bridge. However, the influence of initial stress produced by welding on load carrying capacity of steel bridges is not elucidated.

In this paper, the initial stress state on the flange, web and stiffener of steel bridges are clarified by carrying out 3-dimensional non-steady heat conduction analysis and 3-dimensional thermal elastic-plastic analysis. The influence of initial stress by welding on load carrying capacity of steel bridges is clarified by carrying out 3-dimensional elastic-plastic finite element analysis using finite deformation theory.

Keywords : Steel Bridge, Load Carrying Capacity, Initial Stress

1. 서론

현재 시공되거나 시공중인 강교량의 대부분은 용접공정을 이용하여 제작 및 건설되고 있다. 강교의 가장 일반적인 형식은 판형교형식이며 이러한 판형교는 크게 I-Girder와 Box-Girder교로 구분할 수 있다. 이 두가지의 형식 교량 모두 플랜지와 웨브, 보강재 등으로 구성되어 있다. 강교의 웨브와 플랜지, 보강재 접합시 용접공정은 필연적으로 수행되며 이러한 용접에 의해 발생하는 잔류응력 및 변형은 대상 강교량의 성능을 저하시키는 주요한 요인으로 작용한다. 그러므로 강교량의 설계 및 제작시 용접등에 의해 발생하는 잔류응력과 같은 초기응력이 강교의 내하력에 미치는 영향은 반드시 고려되어야 한다.

국내의 경우 강구조물 용접 접합시 발생하는 잔류응력 및 변형에 관한 연구¹⁾⁻⁵⁾는 지속적으로 수행

되고 있으나 이러한 초기응력이 대상구조물의 성능에 미치는 영향에 관한 연구⁶⁾는 아직 미진하다. 즉, 초기응력과 강교의 내하력의 관계는 아직 명확히 규명되지 않았다.

본 연구에서는 먼저, 재료의 물리정수 및 기계적 제성질의 온도의존성을 고려한 3차원 비정상 열전도 해석 및 3차원 열탄소성 해석^{7,8)}을 통하여 적층 필렛 용접된 강교의 웨브와 플랜지, 보강재 접합부에서의 초기응력 분포를 명확히 하였다. 그리고 유한변위이론을 적용한 적층판 탄소성 유한요소해석⁹⁾을 통하여 초기응력을 고려한 강교와 고려하지 않은 강교의 내하력 해석을 수행하였다. 해석결과와 비교를 통하여 초기응력이 강교의 내하력에 미치는 영향에 대해 명확히 하였다.

2. 강교의 용접접합부에서의 초기응력분포

2.1 해석모델 및 조건

강교의 용접 접합부의 잔류응력분포를 해석하기

* 중앙대학교 건설환경공학과, 교수

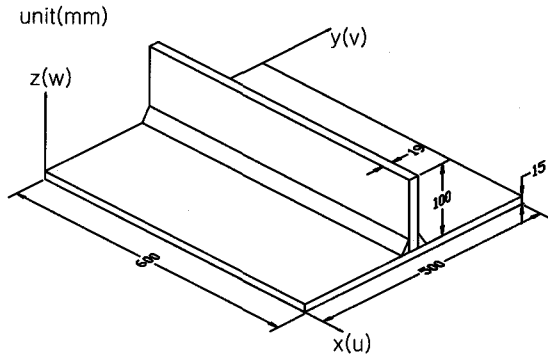
** 정회원·중앙대학교 건축학과, 교수

*** 중앙대학교 건설환경공학과, 박사과정

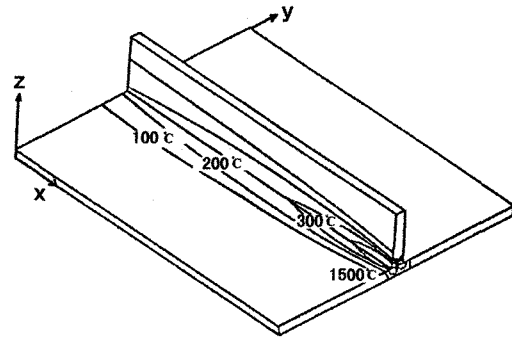
위해 저자가 개발한 3차원 비정상 열전도 해석 및 열탄소성 해석을 수행하였다. 해석모델 및 제원은 <그림 1>에 보인바와 같으며 용접은 1-Pass 필렛용접을 수행한 것으로 가정하였다.

이때 용접조건은 <표 1>과 같으며 모재는 용접

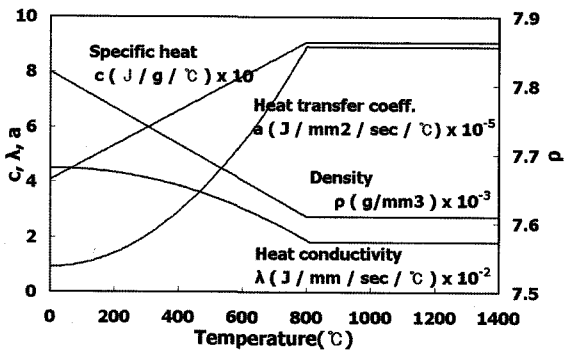
구용강재인 SM490이며 제원은 <표 2>와 같다. 을 사용하였으며 이때의 물성치는 <표 2>와 같다. 3차원 열탄소성 해석에서는 <그림 3>에 보인바와 같이 재료의 물리정수(밀도, 비열, 열전달계수, 열전도율 등) 및 기계적 제성질(선팽창계수, 포아송비,



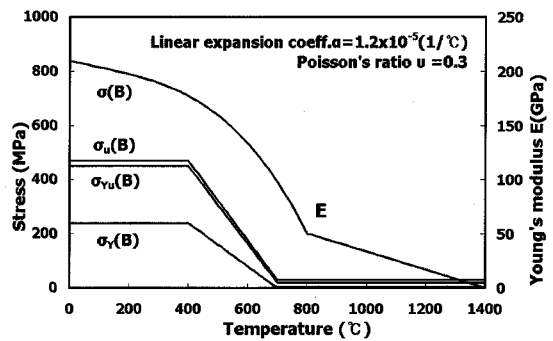
<그림 1> 해석모델 및 제원



<그림 2> 온도분포

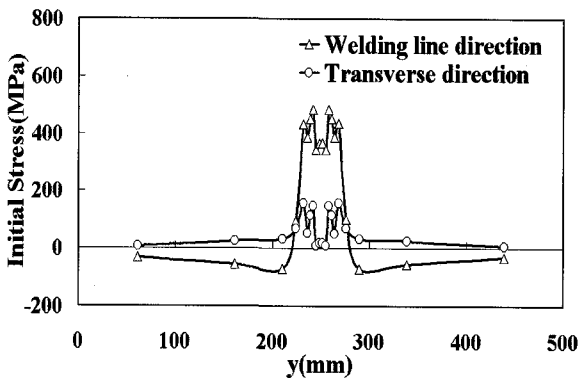


(a) 물리정수

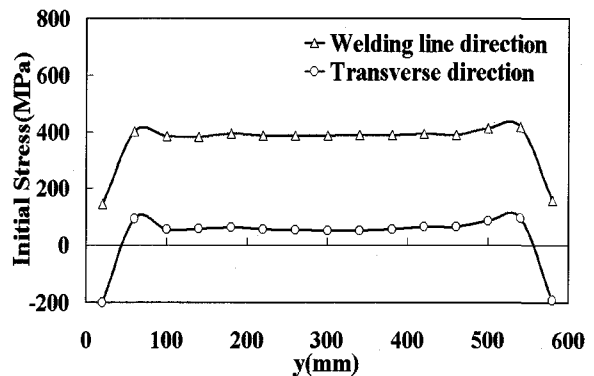


(b) 기계적 제성질

<그림 3> 재료정수



(a) 용접선 직각방향



(b) 용접선 방향

<그림 4> 초기응력분포

<표 1> 용접조건

전압	전류	속도	열효율
30V	240A	6 mm/sec	0.85

<표 2> SM490 제원

모재	항복강도	인장강도
SM490	344MPa	513MPa

인장강도, 탄성계수 등)의 온도의존성을 고려하였다.

2.2 잔류응력분포

<그림 2>는 3차원 비정상 열전도해석의 결과로 용접이 완료됐을 때 강교의 용접접합부에서의 온도 분포를 보이고 있다. 용접완료시 최고 1500°C 까지 온도가 상승됨을 알 수 있다.

<그림 4> (a), (b)는 3차원 열탄소성 해석결과로 용접선방향과 용접선 직각방향의 잔류응력분포를 보이고 있다.

3. 강교의 내하력 해석

3.1 해석이론

본 연구에서는 강교의 내하력 해석을 위해 유한 변위이론을 적용한 등매개변수 적층판 쉘요소 프로그램을 이용하였다. 해석시 전단변형을 고려하여 Mindlin의 평판이론에 입각한 Refined Plate Theory¹⁰⁾를 이용하였다. 이때, 변위장은 식(1)과 같이 정의된다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{i=0}^4 N_i \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} + \sum_{i=0}^4 N_i \xi \frac{t_i}{2} [V_{1i} - V_{2i}] \begin{Bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, N_i 는 라그랑지안 형상함수이며 $V_{1i, 2i}$ 는 기준축의 단위방향 벡터이며 α_i, β_i 는 기준축의 회전각 성분이다.

소성하중 작용시 쉘구조물의 대변형 및 좌굴거동을 구현하기 위해 유한변위이론^{11),12)}을 적용하였다. 유한변위이론 정식화시 변형률-변위관계에 기하학적 비선형을 고려한 그린 변형률텐서(Green strain tensor)를 식(2)와 같이 적용하였다.

$$E_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j})$$

$$\{d\epsilon\} = [B] \cdot \{du\} \quad (3)$$

식(3)은 그린변형률 텐서 E_{ij} 를 증분형 변위-변형률 행렬 $[B]$ 로 표현한 행렬식이다.

응력-변형률관계에 있어 재료학적 비선형과 강제회전을 고려한 키르쵸프응력의 야만속도형 구성식(Jaumann's derivative of Kirchoff stress)을 식(4)와 같이 적용하였다.

$$\sigma'_{ij} = \sigma^*_{ij} - w_{ik}\sigma_{kj} + w_{jk}\sigma_{ki} \quad (4)$$

$$w_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} - v_{j,i}) \quad (5)$$

여기서, w_{ij} 는 식(5)로 정의되는 회전텐서이며 σ'_{ij} 는 야만의 속도형으로 표시되는 응력성분이다. σ^*_{ij} 는 시간 t에서 계산되어진 키르쵸프 응력성분이다. 식(4)를 증분형 응력-변형률 행렬식으로 나타내면 식(6)과 같다.

$$\{d\sigma'\} = [D^{ep*}] \cdot \{d\epsilon\} \quad (6)$$

여기서, $[D^{ep*}]$ 는 탄소성재료행렬로 탄성재료행렬 $[D^e]$, 소성재료행렬 $[D^p]$ 및 스핀텐서항을 고려한 재료행렬 $[D^*]$ 로 이루어지며 식(7)과 같이 정의된다.

$$[D^{ep*}] = [D^e] - ([D^p] + [D^*]) \quad (7)$$

적층판 탄소성 유한요소해석의 전체강성방정식을 가상일의 원리를 이용하였으며 유한변위이론에 기초한 요소강성행렬 $[K]$ 를 식(8)와 같이 정식화된다.

$$[K] = \int_V ([B]^T [D^{ep}] [B] + [G]^T [M] [G]) dV \quad (8)$$

여기서, $[B]$ 는 식(3)에 의해 정식화된 변형률-변위 행렬이며 $[D^{ep*}]$ 는 식(7)에 의해 정식화된 응력-변형률 행렬이다. $[M]$ 은 초기응력 행렬(Initial stress matrix)로 식(9)와 같이 정의된다.

$$[M] = \begin{Bmatrix} [\sigma_0] & 0 & 0 \\ 0 & [\sigma_0] & 0 \\ 0 & 0 & [\sigma_0] \end{Bmatrix}, [\sigma_0] = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{yz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (9)$$

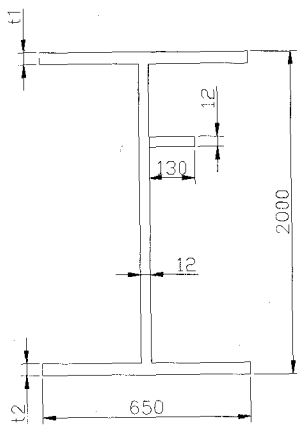
3.2 해석모델 및 조건

본 연구에서는 초기응력을 고려한 강교의 내하력 해석을 위해 <그림 5, 6>에 보인바와 같은 I-Girder와 Box-Girder를 해석모델로 하였다.

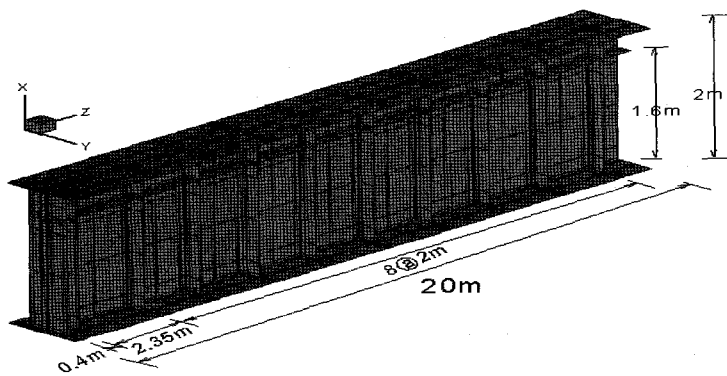
I-Girder모델은 지간 20m의 단경간 강교량으로 단면 및 치수는 <그림 5>(a)에 보인바와 같다. 해석모델은 형상 및 제원은 <그림 5>(b)에 보인바와 같이 웨브의 높이는 2000mm, 두께는 12mm이며 상

하부 플랜지의 폭은 650mm이다. 수평보강재는 상부플랜지 하단으로부터 400mm의 위치에 1단 부착되어 있으며, 그 폭은 130mm, 두께는 12mm이며, 지점부 수직 보강재와 잭업(Jack up)용 보강재의 폭은 180mm, 두께는 30mm, 중간 수직 보강재의 폭은 150mm, 두께는 14mm이다. 강재는 웨브와 플랜지, 보강재 모두 SM490을 적용하였다.

Box-Girder모델의 단면 및 형상은 <그림 6>(a), (b)에 보인바와 같다. 해석모델의 플랜지의 폭은 상하부 모두 2.94m이며 상부 플랜지의 두께는 16mm, 하부 플랜지의 두께는 14mm이다. 웨브의 높이는 2.5m, 두께는 20mm이며 상하부 플랜지에 부착된 종방향 보강재는 폭 180mm, 두께 16mm로 하부 플랜지에 2개 상부 플랜지에 3개가 부착되어

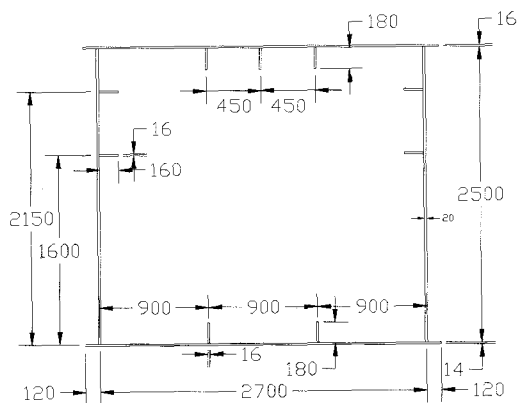


(a) I-Girder 단면 및 치수

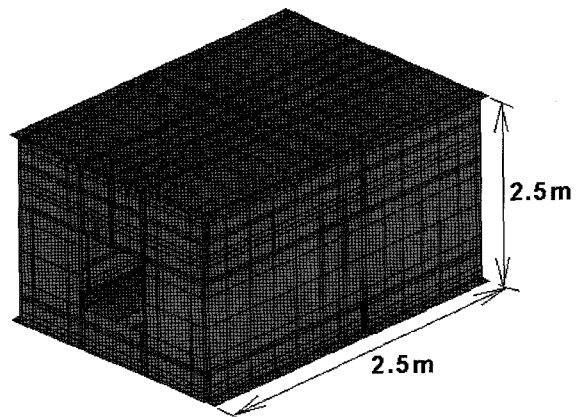


(b) I-Girder 형상 및 치수

<그림 5> I-Girder 해석모델

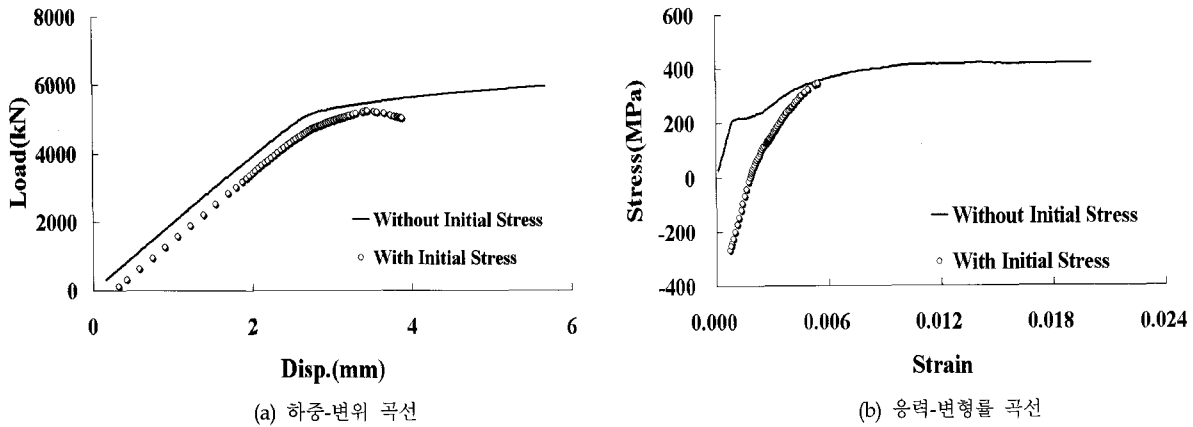


(a) Box-Girder 단면 및 치수

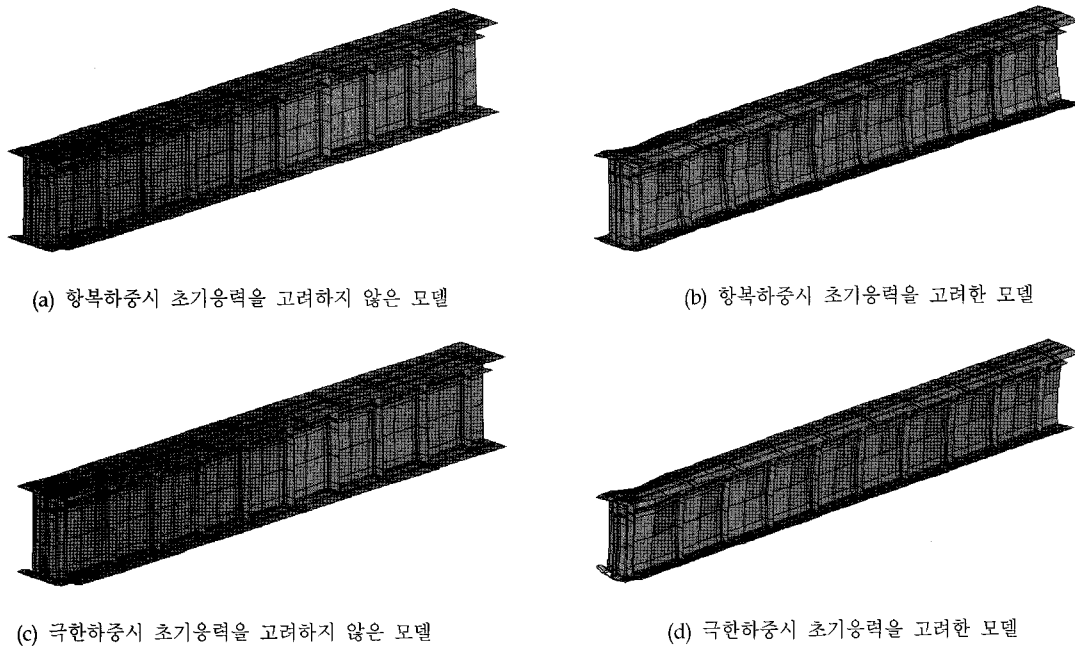


(b) Box-Girder 형상 및 치수

<그림 6> Box-Girder 해석모델



〈그림 7〉 I-Girder 해석결과



〈그림 8〉 I-Girder 변형형상

〈표 3〉 I-Girder 해석결과의 비교

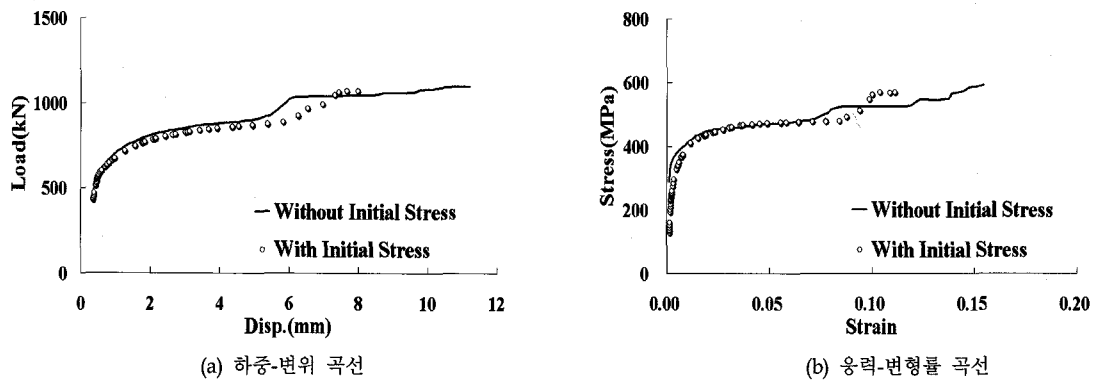
	초기응력을 고려하지 않는 경우	초기응력을 고려한 경우	비고
항복응력	209 MPa	130 MPa	약 38% 감소
극한응력	421 MPa	345 MPa	약 20% 감소

있다. 수평보강재는 폭 160mm, 두께 16mm로 하부 플랜지로부터 1.6m, 2.15m의 위치에 2단 부착되어 있다. 또한, 다이아프램은 폭 900mm, 높이 900mm이고 두께는 10mm이다.

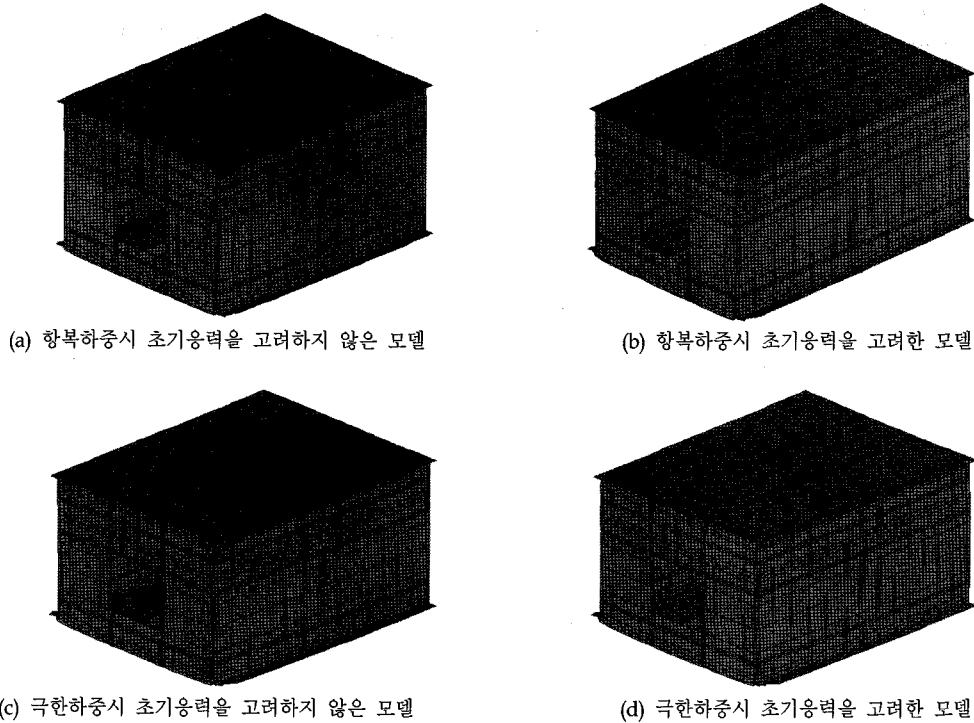
해석모델들의 경계조건은 양단에 힌지와 롤러의 단순지지조건을 적용하였으며 하중은 상부플랜지

에 등분포하중을 재하하였다.

유한요소 해석시 2장의 해석결과인 잔류응력을 초기응력상태에 고려하여 내하력 해석을 수행하였다. 또한, 초기응력이 강교에 미치는 영향을 파악하기 위해 초기응력을 고려한 해석모델과 초기응력을 고려하지 않은 모델로 분류하여 내하력 해석을 수



〈그림 9〉 Box-Girder 해석결과



〈그림 10〉 Box-Girder 변형형상

〈표 4〉 Box-Girder 해석결과의 비교

	초기응력을 고려하지 않는 경우	초기응력을 고려한 경우	비고
항복응력	310 MPa	140 MPa	약 55% 감소
극한응력	593 MPa	568 MPa	약 4% 감소

행하여 그 결과를 비교하였다.

3.3 I-Girder모델 해석결과

〈그림 7〉(a), (b)는 I-Girder모델의 초기응력을 고

려한 경우와 고려하지 않은 경우 해석결과인 하중-변위곡선과 응력-변형률곡선을 이용하여 그 차이를 비교하고 있다. <표 3>에 보인바와 같이 초기응력을 고려하지 않은 경우의 항복응력과 극한응력은 각각 209MPa, 421MPa이고 초기응력을 고려한 경

우는 130MPa, 345MPa이다. 즉, 용접에 의한 초기 응력의 영향으로 I-Girder모델의 경우 항복응력은 38%정도 감소하였으며 극한응력은 20%정도 감소함을 알 수 있다. 그림8은 항복 및 극한하중시 I-Girder 모델들의 변형형상을 보이고 있다.

3.4 Box-Girder모델 해석결과

<그림 9>(a), (b)는 Box-Girder모델의 초기응력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 해석결과인 하중-변위곡선과 응력-변형률곡선을 이용하여 그 차이를 비교하고 있다. 표4에 보인바와 같이 초기응력을 고려하지 않은 경우의 항복응력과 극한응력은 각각 310MPa, 593MPa이고 초기응력을 고려한 경우는 140MPa, 568MPa이다. 즉, 초기응력이 고려된 Box-Girder 해석모델의 경우 초기응력을 고려하지 않은 모델에 비해 항복응력은 약 55% 감소하였으며 극한응력은 약 4% 감소함을 알 수 있다. 이는 I-Girder모델의 경우와 동일하게 초기응력이 Box-Girder 내하력 감소의 주된 요인임을 알 수 있다. 그림10은 항복 및 극한하중시 Box-Girder 모델들의 변형형상을 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 3차원 비정상 열전도 해석과 3차원 열탄소성해석을 이용하여 강교의 용접접합부에서 발생하는 잔류응력 분포를 파악하였다. 해석을 통하여 파악된 잔류응력을 초기응력상태로 적용하여 유한변위이론을 적용한 적층판 탄소성 유하요소 프로그램을 이용하여 강교인 I-Girder와 Box-Girder의 내하력 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. I-Girder의 경우 용접에 의한 초기응력의 영향으로 항복응력은 38%정도 감소하였으며 극한응력은 20%정도 감소하였다.
2. Box-Girder의 경우 초기응력이 고려된 경우 초기응력을 고려하지 않은 모델에 비해 항복응력은 약 55% 감소하였으며 극한응력은 약 4% 감소하였다.

3. 상기 결과를 통하여 강교의 경우 용접에 의한 초기응력이 내하력 감소의 주된 요인임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 장경호, 金裕哲, 堀川浩甫, "すみ肉溶接で生じる面外形留力に及ぼす溶接諸件の影響", 일본강구조학회 논문집, 제6권 제21호, 1999. 3, pp.77-82
2. 장경호, 이상형, 전준태, "공용중 보수용접에 의한 용접부의 응력 및 변형의 거동(I)", 한국강구조학회 논문집, 제 12권 3호, 2000. 6, pp.269-279
3. 장경호, 양성철, 강재훈, "강관 적층용접부 잔류응력의 생성기구", 한국강구조학회 논문집, 제 13권 4호, 2001, pp.327-335
4. 장경호, 이진형, 이상형, 이은택 동종강재 및 이종강재 용접접합부의 잔류응력특징 한국강구조학회 논문집 제 15권 3호, pp.241-250 2003.06
5. 장경호, 장갑철, 경장현, 이은택, "T형 강관 용접 이음부의 잔류응력 생성기구에 관한연구", 대한용접학회 논문집, 제21권 제6호, 2003. 10, pp.646-651
6. 장경호, 조수철, 김은석, "이종강재를 적용한 I형-거더의 좌굴특성에 대한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2000.10, pp.181- 184
7. 장경호, 金裕哲, 堀川浩甫, "Characteristics of Out-of-plane Deformation and Residual Stress Generated by Fillet Welding", TRANSACTION OF JWRI(Joining and Welding Research Institute), Vol.27 No.1, 1998. 6, pp.69-74
8. 장경호, 金裕哲, 堀川浩甫, "Production Mechanism of Out-of-Plane Deformation in Fillet Welding", TRANSACTION OF JWRI, Vol.27 No.2, 1998. 12, pp.107-113
9. 장경호, 장갑철, 이찬호, 이은택, "원형강교각에서 수직보강재가 내하력에 미치는 영향", 한국

- 강구조학회 논문집, 제16권 5호, 2004.10, pp.653-660
10. J. R. Vinson, The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials, Lancaster-Basel, USA, 1999
 11. Toi Y., Yuge K., Kawai T., "Basic Studies on the Crash-worthiness of Structural Elements : Part 1. Crush analysis by the finite elements method", 日本造船工學會論文集, Vol. 5. 第159号, 1986, pp.248-257
 12. S. Ahmad, B. M. Irons, o. C. Zienkiewicz, "Analysis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Finite Elements", Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 2, 1970, pp 419-451