

Box Girder의 용접변형과 잔류응력분포 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Welding Distortion and Residual Stress Distribution in the Box Girder

김하근*, 장경복*, 강성수**

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계기술연구소

1. 서론

교량과 같은 구조물은 최근에 폭주하는 교통량의 증가로 인해 대.소형화물의 빈번한 운송에 따라 점차 대형화되고 있으며 그에 따른 강구조물 제작에 필요한 용접물량이 급증하고 있는 실정이다. 강구조 부재중에서, 특히 용접된 박스형 구조물은 기존의 구조물 형태에 비해 보다 큰 강도와 강성으로 인해 하중에 대한 변형을 감소시킬 수 있으며 좌굴강도나 비틀림 강도에 우수한 장점을 가지고 있다. 그러나, 이러한 구조적 불연속부를 연결할 경우 수행되는 용접으로 인해 발생하는 잔류응력에 의해 응력집중부에서의 균열 발생, 변형 및 좌굴등이 용접설계, 안전성 측면에서 많은 문제점을 내포하고 있는 것이 사실이다. 이러한 잔류응력은 구조물의 변형과 강도에 커다란 영향을 미치게 되며 특히 용접중심부의 인장잔류응력은 구조물의 저항력을 감소시키면서 구조물의 거동에 심각한 영향을 미치게 된다. 즉, 강구조물의 각종 구조부재들 중에서 박스형 구조물(Box-Type Structure)의 제작시 용접작업으로부터 초래되는 접합부의 국부적인 용융과 냉각에 따른 불균일한 온도분포의 생성으로 용접변형 및 잔류응력이 발생하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 Box Girder에 대해 시행되고 있는 용접프로세스에 따라 온도분포 특성의 파악, 용접변형 검토 및 잔류응력의 분포를 유한요소해석 코드를 이용하여 예측함으로써 구조물의 거동에 미치게 될 영향을 파악하고자 한다.

2. 해석 모델 및 방법

본 연구의 해석모델은 Fig. 1과 같이 일반적으로 박스(Box), 다이아프램(Diaphragm), 보강재(Stiffener) 등으로 구성되는 Box Girder 및 최외곽부 형상의 치수와 필렛용접부의 크기를 제시하였으며, Fig. 2에서 데이터 획득의 위치와 용접순서 및 용접후에 발생하는 변형 양상을 도식화 하였다. Fig. 3에서 용접선방향의 길이가 길기 때문에 용접시에 발생하는 용접잔류응력 및 변형을 예측하기 위하여 각 단면은 같은 온도변화를 갖는다는 가정 하에 용접선상에 단위길이를 지니는 수직한 단면을 취하여 2차원 해석을 수행하였다. 요소분할(mesh generation)은 국부적인 입열에 의해 온도구배가 심한 용접부 주변에는 보다 미세하게 분할하였으며 용융부와 열영향부에서 멀어질수록 해석시간을 단축하기 위해 요소의 크기를 증가시켰다. 해석영역에 대한 요소망은 일반적으로 2차원 해석시 사용되는 4개의 절점을 가진 사각형요소(4-node quadrilateral element)를 이용하여 구성하였다. 그리고, 변형 해석의 정확성을 높이기 위해 용융부의 요소들은 분석초기에 제거(deactivated)되었다가 해당되는 용접패스가 놓여짐에 따라 다시 활성화시켰으며 활성화된 용융부의 요소에 열량을 입열시켰다. 실용접시 시행되는 가접은 용융부의 상.하부플랜지와 복부판이 교차되는 절점을 x방향으로 구속경계조건을 부여하였다. Table 1은 용접조건을 나타낸 것이다.

Table.1 Welding conditions

Layer No.	Conditions	Type	Current(A)	Voltage(V)	Speed(cm/min)
1		Auto	213	24.6	17

3. 해석 결과

각 시간별 온도분포 특성은 두께 20mm인 경우 상표면에서 3.3mm인 지점에서 결과를 획득하였다. Fig. 4(a), (b), (c)는 하부 플랜지의 우측하단 용접부 주위의 온도분포를 시간에 따라 도시한 것이다.

유한요소해석에 있어서 고려된 경계조건은 실제 용접작업에서 상.하부 플랜지의 가장자리를 따라서 클램핑이 이루어 지기 때문에 해석모델의 좌우의 상.하부 끝단의 절점을 구속하였다. Fig. 5는 좌.우측 및 상.하부의 변형이 가장 심한 중앙부의 절점에서의 시간에 따른 변위량을 도시한 것이다. 1 - 8패스의 용접후 x 방향으로의 좌.우측 복부판의 최고 변위량이 각각 1.238mm, -1.224mm 정도이며 y 방향으로의 상.하부 플랜지의 최고 변위량이 -3.098mm, 2.554mm로 나타났다. 결과적으로 x 방향의 전체 최고 변위량은 2.46mm이고 y 방향의 전체 변위량은 5.64mm로써 Fig. 2(b)에서 제시한 실제 용접후의 상대 변형량인 x 방향의 3, 2mm와는 많은 차이를 제시하지 않으나 y 방향의 상대변형량은 1mm로 다소 차이를 보인다. 이는 해석상의 구속조건의 문제로 판단된다. Fig. 5에서 제시한 결과는 용접 변형의 시간에 대한 이력을 나타냄으로써 적절한 용접순서나 입열량을 파악할 수 있으리라 판단된다.

Fig. 6은 용접부 주위의 복부판에서 Box Girder의 안쪽과 바깥쪽 표면으로부터 3.3mm 떨어진 위치에서 길이방향의 잔류응력을 획득했다. 제시한 Box Girder는 복부판과 플랜지의 길이에 비해 용착부의 크기가 작은 반면에 복부판 사이의 모재부분이 상당히 넓어져서 모재 중앙부는 용착부에서의 냉각시 수축의 영향을 크게 받지 않게 된다. 따라서, 복부판 사이의 모재부분에서의 압축응력의 미소한 증가를 초래한다. 또한, 두께방향으로 박스 내,외의 표면부에서의 응력 차이가 좌.우측 상단부의 경우 30.48MPa정도이며 하단부의 55.52MPa과 비교해서는 다소 작은 값을 나타낸다. 그리고 하부플랜지의 두께방향의 최고응력 차이는 상부플랜지와 비교해 대략 146MPa 정도가 크게 나타났다. 이는 두께방향의 응력불균형이 하단부에서 발생함을 제시한다. 용착금속과 열영향부에서 최대 인장잔류응력은 하단부가 상단부보다 7 ~ 35% 정도까지의 큰 차이를 제시하였다. 이는 하부 플랜지의 용접중심부에서의 인장잔류응력은 균열전파력을 증가시키고 취성파괴에 대한 구조물의 저항력을 감소시켜 용접구조물의 안전성에 영향을 미치리라 판단된다.

4. 결론

Box Girder에 대한 현조건을 유한요소해석을 통하여 열사이클에 의한 온도분포 획득, 용접 변형의 시간에 대한 이력 검토 및 잔류응력 분포를 파악한 결과, 용접변형의 경우 해석적인 결과와 더불어 실용점의 변형량도 허용범위내에서 발생하므로 크게 문제시 되지 않으며 잔류응력의 측면에서는 중앙부 모재의 압축응력의 영향은 미소하며 하단부가 상단부보다 용착부와 열영향부의 인장잔류응력의 집중도와 응력의 불균일 측면에서 다소 불리한 것으로 판단된다.

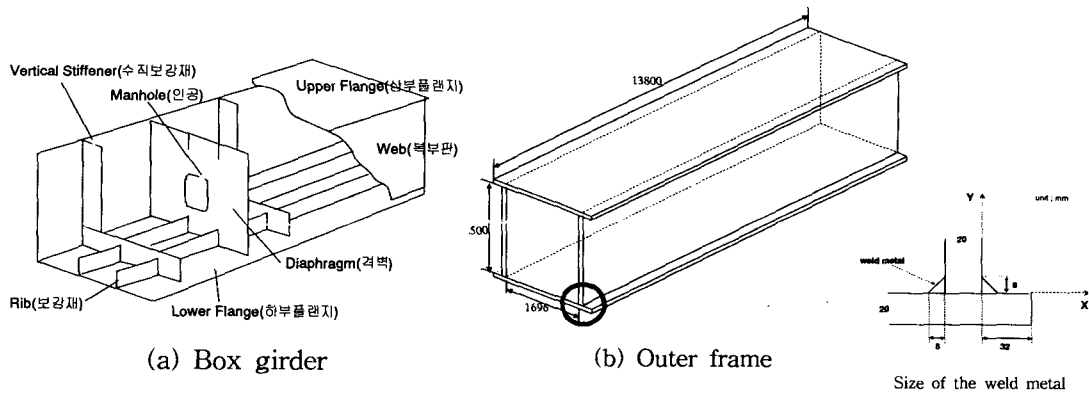


Fig. 1 Shape and dimensions of the box girder

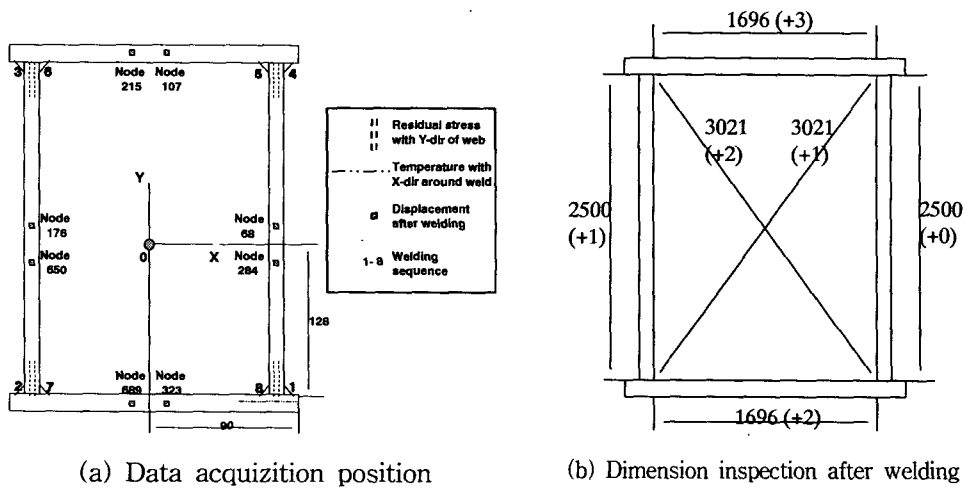


Fig. 2 Data acquisition position and dimension change of the outer frame at the box girder

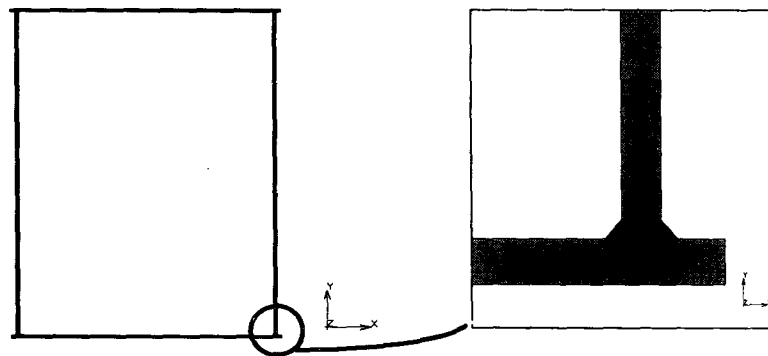


Fig. 3 2-D mesh shape of outer frame and fillet weld at the box girder

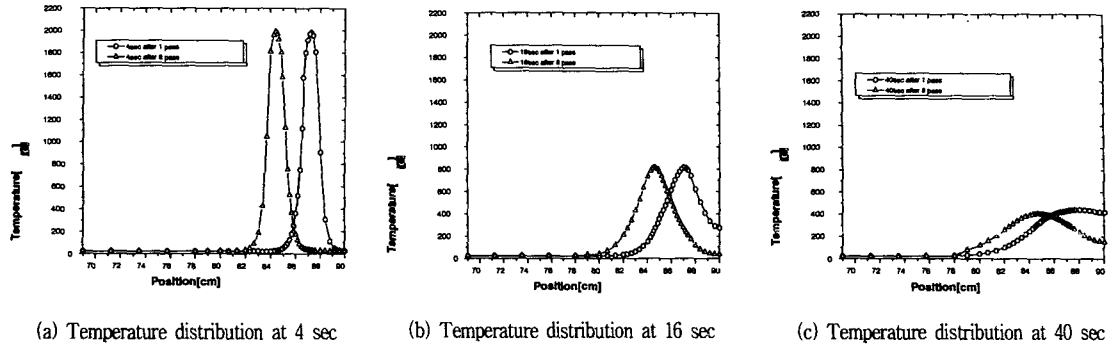


Fig. 4 Comparison of thermal cycles around the weld

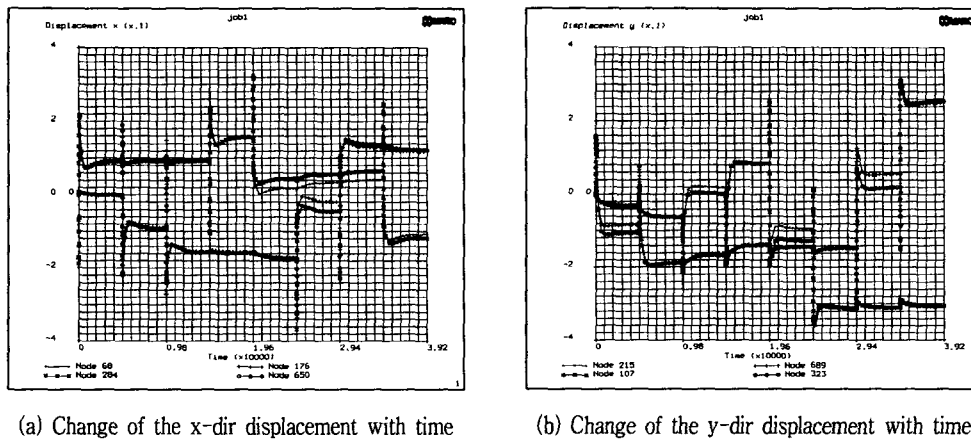


Fig. 5 Comparison of the dimension change at the box frame after welding

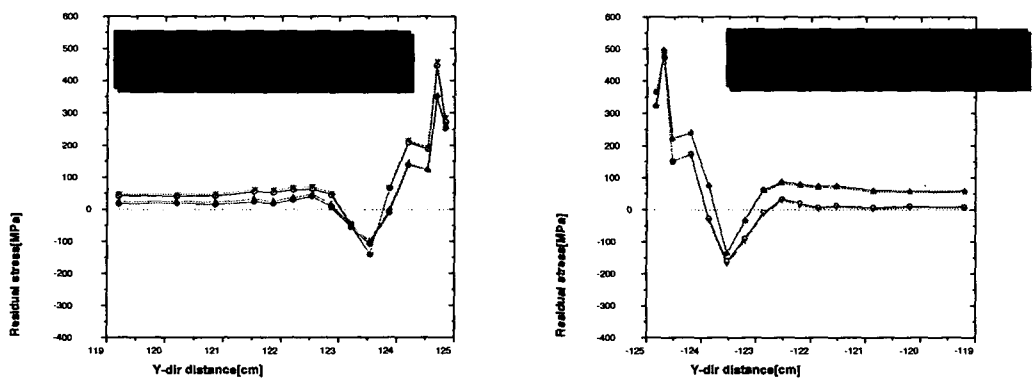


Fig. 6 Comparison of welding residual stresses around the weld of web