

## 14. 하중전달 필렛 용접구조물의 피로강도

조선공학과 이윤기  
지도교수 이상갑

일반적으로 용접구조물에서는 용접부에 모재의 항복응력에 상당하는 인장잔류응력이 발생되고 이것이 피로강도에 큰 영향을 미친다고 알려져 있다. 지금까지 용접구조물의 설계단계에서는 초기용접잔류응력이 그대로 존재하는 소형시험편으로부터 도출된 S-N 선도를 이용하여 가변진폭하중에 의한 응력진폭의 밀도분포만으로 수명기간동안의 누적손상을 구하여 피로강도를 평가하였으며, 선박 용접구조물의 경우도 이러한 개념으로 피로강도 평가를 수행해 왔다. 그러나 일반적인 육상 구조물과는 달리 선박 용접구조물에서는 화물의 적재 또는 건조 후 수행하는 수압시험등과 같은 과하중 이력을 받을 경우 초기 용접잔류응력은 상당히 감소하게 된다. 또한 항해 중 화물의 적재에 의하여 일정한 평균응력을 받음으로 인하여 피로강도에 크게 영향을 준다. 따라서 선박 용접구조물의 신뢰성 있는 피로설계를 위해서는 이들 조건을 고려한 용접부재의 S-N선도가 필요하다.

선체 구조물은 기하학적 형상과 재질뿐만 아니라 동적·정적 하중 형태가 강교나 해양구조물 등과 같은 일반 구조물과는 크게 다르다는 것은 주지의 사실이다. 선박 용접구조물에 사용되는 여러 부재중에서 선저 트랜스버스의 슬롯에서의 종 프레임과 웹 프레임의 교차부분과 선저 트랜스버스와 선저 중늑골과의 교차부분에서는 피로에 의한 균열이 자주 발생한다. 이 부재는 다른 부재와는 달리 굽힘 및 전단하중이 전달되어 누적된 피로하중에 의해 균열이 발생한다. 본 연구에서는 굽힘과 전단하중이 전달되는 하중전달 필렛 용접구조물에 대한 피로강도를 실제 선박 구조용 연강을 이용하여 조선소에서 직접 제작한 시편을 사용하여 추정하였다. 그리고 피로실험을 수행하기 전 시편의 잔류응력 분포를 추정하기 위하여 용접된 그대로의 상태와 과하중을 가한 상태에서 측정하였고, 동적 비선형 구조해석 프로그램 LS/DYNA3D를 이용하여 열탄소성 해석을 수행하여 측정 결과를 비교하였다. 하중전달 필렛 용접구조물 시편을 용접된 그대로의 상태, 과하중을 가한상태, 과하중을 가한 뒤 평균응력을 가한 상태등 5가지 하중조건에 따라 각각 15개의 시편으로 피로실험을 수행하여 S-N 선도를 구하였으며, 시편의 파단수명의 기준은 균열길이 약 20mm 정도로 정하였다. 본 연구의 주요 목적이 선체구조설계에서의 학구적인 연구논문이라기보다는 보다 실제적인 적용에 있다는 것에 가치가 있다고 할 수 있다. 본 연구를 통하여 얻은 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 용접부에는 인장잔류응력이 나타나는 것으로 알려져 있지만 본 연구의 하중전달 필렛 용접구조부의 주 판부재의 용접 토우 부위 근처에는 항복응력에 가까운 압축잔류응력이 발생하였고, 과하중을 받으면 이러한 잔류응력은 이완되거나 재분배되었다.
- 2) 설계항복응력의 약 50%의 공칭응력이 작용한 경우 주 판부재의 가장자리를 따른 용접 토우 부위에서의 응력집중계수는 핫스팟응력을 기저로 하는 시뮬레이션과 실험의 결과로부터 대략 2.1 및 1.4정도로 추정할 수 있었다. 그리고 용접 토우 안쪽 부분이 바깥쪽 보다 매우 큰 응력집중이 발생하는데 용접 토우에서의 기저 판부재에 대한 주 판부재의 응력

집중 비율은 약 5.0이 되었다.

- 3) LS/DYNA3D를 이용한 열탄소성 해석에 의한 용접 토우 부근의 잔류응력의 분포는 실험 결과와 대체로 잘 일치하고 있으며, 실제 용접구조물의 용접부위의 기하학적 형상과 용접 조건을 열탄소성 해석 모델에 적용하는 것이 해석 결과의 정도를 높일 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 실험에 의한 정도 높은 잔류응력의 측정에 어려움이 매우 크게 따랐다. 정도 높은 열탄소성 해석의 기술의 축적을 통하여 실측에 따른 어려움을 해소할 수 있을 것으로 사료된다.
- 4) 하중 전달 필렛 용접구조부의 피로실험을 통해서 토우 안쪽, 비드, 토우 바깥쪽 등 크게 3 가지 형태의 균열이 발생하는 것을 알 수 있었다. 초기 과하중은 피로강도에 크게 영향을 주지 않았고 초기 잔류응력이 존재하는 경우 공칭응력진폭이 작을 경우에는 보통 토우 바깥쪽에서 균열이 발생하였으나 초기 과하중을 50%, 85%로 가한 뒤 잔류응력이 이완된 상태에서는 공칭 응력진폭이 증가함에 따라 비드나 토우 안쪽에서 균열이 발생하였다. 이러한 현상은 대체로 주판부재 가장자리의 용접 토우 부위에 항복응력에 가까운 압축 잔류응력이 존재한다. 그러나, 초기 과하중에 의해 잔류응력이 이완된 경우에는 용접 토우 부위에서 기저 판부재에 대한 주판부재의 응력집중력이 크기 때문에 일어나는 것이다. 또한 본 연구를 통하여 관심있는 용접부에서의 피로강도에 미치는 잔류응력의 영향에 대한 인식을 새롭게 하는 계기가 될 것을 사료된다.
- 5) 잔류응력의 영향과는 달리 평균응력은 피로강도에 큰 영향을 미치고 피로강도를 크게 저하시켰다. 균열은 주로 토우 안쪽 부분에서 발생했으며, 이것은 주 판부재 가장자리에 높은 인장응력이 발생하는 것 이외에 주 판부재의 응력집중계수가 기저 판부재보다 크기 때문으로 생각된다. 선박구조물은 특히 육상구조물과 달리 화물의 적재 등으로 인하여 높은 평균응력의 영향에 놓여 있으므로 피로강도가 더욱 취약할 것이다. 따라서 피로실험 역시 더욱 가혹한 조건인 평균응력을 고려하여 실험을 수행하는 것이 바람직 할 것이다.
- 6) 기계 제품이 피로한도를 추정하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 Goodman과 Gereber의 수정식을 본 실험의 결과에 적용해보면 용접구조물에 적용하기가 어렵다는 것을 알 수 있었다. 따라서 평균응력을 피로한도에 적용하는 것이 바람직하다.
- 7) 하중조건 1~3의 경우는 균열진전속도의 경향이 서로 거의 비슷하지만 하중조건 3~5의 경우는 평균응력에 따라서 서로 크게 다르고 평균응력이 증가함에 따라 균열진전속도는 더욱 더 빨라진다는 것을 알 수 있었다. 즉, 피로강도의 수명은 최대 변동응력과 평균응력에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다.