

# 하중 비전달형 box fillet 용접부의 피로특성에 미치는 과하중의 영향

## Effect of Static Load on the Fatigue Properties of Non-load Carrying Box Fillet Weldment

박윤기\*, 김현수, 황주환, 윤중근  
현대중공업(주) 산업기술연구소, 울산시 동구 전하동 1

### 1. 서론

선박과 같은 강 구조물은 다양한 구조 형상 및 이들의 접합에 기인된 구조의 불연속이 발생하여 구조적 응력 집중부를 필연적으로 가지고 있다. 국부적으로는 각 구조부재를 용접함에 따라 발생하는 용접부의 비드 형상에 의한 추가 응력 집중이 발생된다. 이와 같은 구조 용접부에는 자중, 바람, 파도 및 진동 등의 다양한 정동적 하중이 작용되어 피로손상이 자주 발생하고 있어, 용접부의 신뢰성 향상을 위한 피로설계의 중요성이 부각되어 왔다. 특히 용접부에는 용접 과정 중 발생하는 불균일한 열분포로 인하여 용접 잔류응력이 형성되는데, 용접 잔류응력중 인장잔류응력은 용접부 피로 강도를 크게 저하시키는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 용접부의 피로설계 기준 예컨대 IIW 기준은 공히 잔류응력이 존재하는 as-welded 상태의 용접부에서 얻어진 피로선도를 따르고 있다. 그러나 선박의 경우에는 건조후 tank test가 수반되며, 시운전시 ballasting 혹은 cargo pressure등에 의한 과도한 정적 하중을 받게 되어 운항전 선체구조 용접부에는 위치에 따라 항복강도에 인접하는 과하중이 작용되게 된다. 이에 따라 용접부의 잔류응력 분포는 크게 변화하게 되므로 기존 용접부의 피로특성과는 상이하게 된다. 또한 운항중에 있어서도 적재화물 및 ballasting 상태의 기본적인 정하중이 존재하는 상태에서 반복적인 wave load 나 진동을 받게 되어 일반 강 구조물과는 상이한 하중이력을 받게 된다. 따라서 선박의 구조 용접부에 대한 피로선도는 상기된 하중이력을 고려하여 정립되어야 하겠다.

본 연구에서는 선박의 하중이력 특성에 따른 구조 용접부의 피로특성을 정립하고자, 정적 과하중에 의한 용접부 잔류 응력 변화 및 피로 특성을 평가하였다. 대상의 용접부는 선급용 연강과 AH36의 하중 비전달형 box 필렛용접부이었으며, 정적 과하중은 항복 응력의 50%, 85%를 부여하였다. 정적 과하중에 따른 용접부의 잔류응력 변화는 유한요소해석법으로 평가하였으며, 용접부의 피로특성은 응력비(R) = 0.1로 하여 상온에서 평가하였다.

### 2. 실험 및 잔류응력 해석

본 연구에 사용된 재료는 선급용 연강인 A grade (Y.S=295MPa, T.S=441MPa, EL=30%)와 고장력 강인 AH36 (Y.S=371MPa, T.S=518MPa, EL=24.1%) 으로 10mm 두께의 강재이었다. 시편은 하중 비전달형 box 필렛 용접부이었으며, 용접은 FCAW 로 250A - 25V - 30cm/min.의 일반 현업조건하에서 실시하였다. 정적 과하중은 공칭응력을 기준으로 항복 응력의 50%, 85%를 부여하였다. 피로시험은 as-welded 시편과 과하중을 부여받은 시편에 대하여 응력비 0.1의 하중제어로 상온에서 실시하였다. 피로시험시 용접부에서의 실제 응력을 평가하기 위하여 strain gage를 용접 도우로부터 길이방향으로 부착하여 응력을 측정하였으며, 피로수명은 피로균열의 폭방향 길이가 시편폭의 50-60%될 때의 수명을 기준으로 하였다. 용접부의 잔류 응력을 평가하기 위하여 1/8 symmetric 해석모델과 상용프로그램을 이용하여 용접 입열의 시편을 통한 전도, 대류와 함께 재료의 상변태를 동시에 고려한 비선형 열전달 및 열응력 해석을 실시하였다. 열전달 해석시 용접입열을 해석모델의 용접비드 전체 volume에 bulk heat flow rate,  $Q$  (w/mm<sup>3</sup>)로써 부여하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 1) 잔류응력분포

As-welded 상태에서 용접부의 잔류응력분포는 그림 1에서 보여주는 바와 같이 용접부 선단에서 최대 값을 보여 주고 있으며, AH36 강 용접부의 최대잔류응력 값이 연강보다 다소 높음을 알 수 있다. 용접부에 정적 과하중을 가하게 되면 강재에 관계없이 초기 잔류응력분포는 이완되어 전반적으로 감소하게 되며, 그 크기 및 분포는 정적 과하중의 정도에 크게 의존하게 된다. 즉, 정적 과하중의 크기가 항복 강도의 50%인 경우에는 초기 용접부 선단에 작용하던 항복강도 수준의 인장잔류응력이 거의 이완되어 0 MPa 수준으로 변화되며, 정적 과하중의 크기가 항복 강도의 85%가 되면 오히려 100MPa의 압축잔류응력이 형성된다.

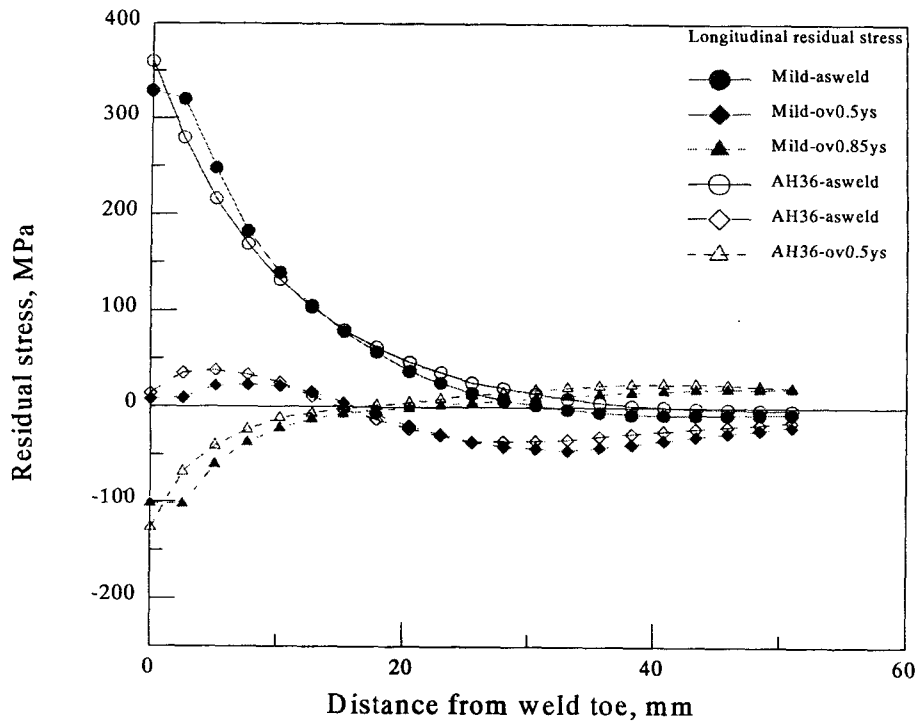
#### 2) 피로 특성

Box 필렛용접부에서 피로균열은 필렛 용접부 toe에서 발생하여 시편의 양단으로 전파하였다. 그림 2는 연강과 고장력강인 AH36 필렛 용접부의 피로수명을 공칭응력을 기준으로 하여 도시하였다. 균열이 발생된 용접부 toe에서의 응력집중은 해석과 실험결과 약 1.9정도 이었다. 연강과 AH36 용접부의 경우 as-welded 상태에서는 피로강도는 공히 약 100MPa 수준으로 유사하였다. 그러나 용접부에 정적 과하중을 부여하게 되면 용접부의 피로강도는 증가될 뿐 아니라 피로응력과 피로수명간의 기울기도 증가되고 있음을 보여 주고 있다. 즉, 정적 과하중의 크기가 증가되면 이에 따라 용접부의 피로강도가 증가되고 있다. 이는 정적 과하중이 증가함에 따라 그림 1에서 보여 주듯이 피로균열 발생부인 용접 토우부의 초기 인장 잔류응력이 제거될 뿐 아니라 압축 잔류응력이 발생됨에 따른 피로균열 발생수명의 증가 및 용접 toe 에서의 가공경화에 기인된다고 하겠다. 정적 과하중에 의한 피로 강도 증가는 연강의 경우 부여된 하중의 크기에 따라 직선적으로 비례하나, 고장력강의 용접부에서는 정적하중이 항복강도의 0.85 배인 경우 현저하게 피로강도가 증가되었다. 이는 고장력 강이 연강에 비하여 가공경화율이 크기 때문이라고 할 수 있다.

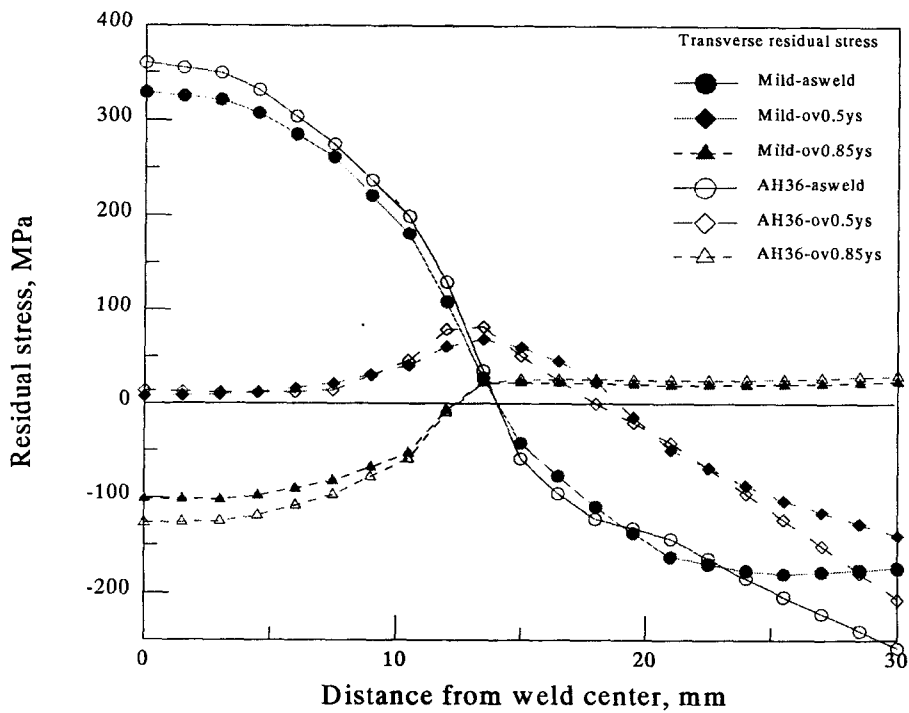
### 4. 결론

선박의 하중이력 특성에 따른 구조 용접부의 피로특성을 정립하고자, 정적 과하중에 의한 연강과 AH36의 하중 비전달형 box 필렛용접부 잔류 응력 변화 및 피로 특성을 평가하였다.

- 1) 용접부의 잔류응력은 정적 과하중에 의하여 크게 변화되는데, 정적 과하중의 크기가 항복 강도의 85%가 되면 오히려 100MPa의 압축잔류응력이 형성된다.
- 2) 용접부에 정적 과하중을 부여하게 되면 용접부의 피로강도는 증가될 뿐 아니라 피로응력과 피로 수명간의 기울기도 증가되었다. 정적하중이 항복강도의 0.85 배인 경우 현저하게 용접부의 피로강도가 증가되었다.

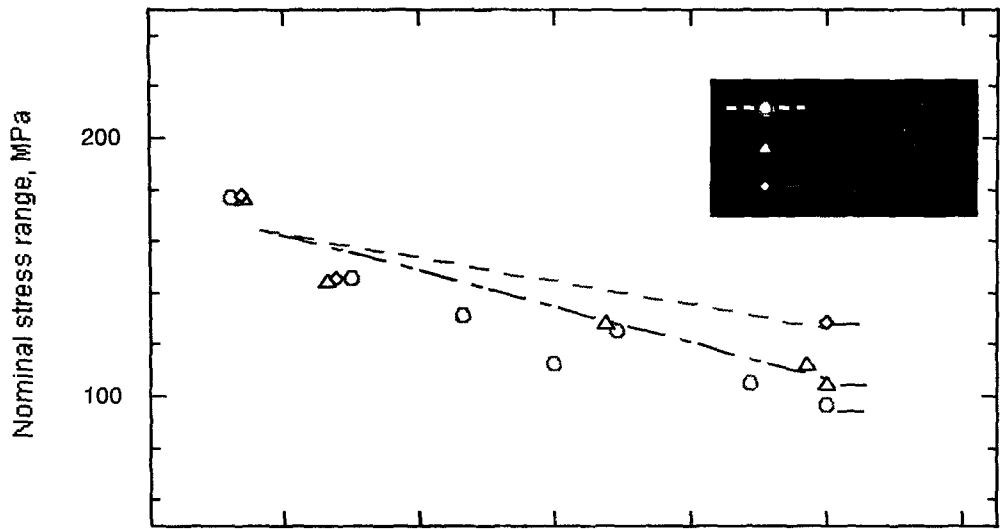


(a)

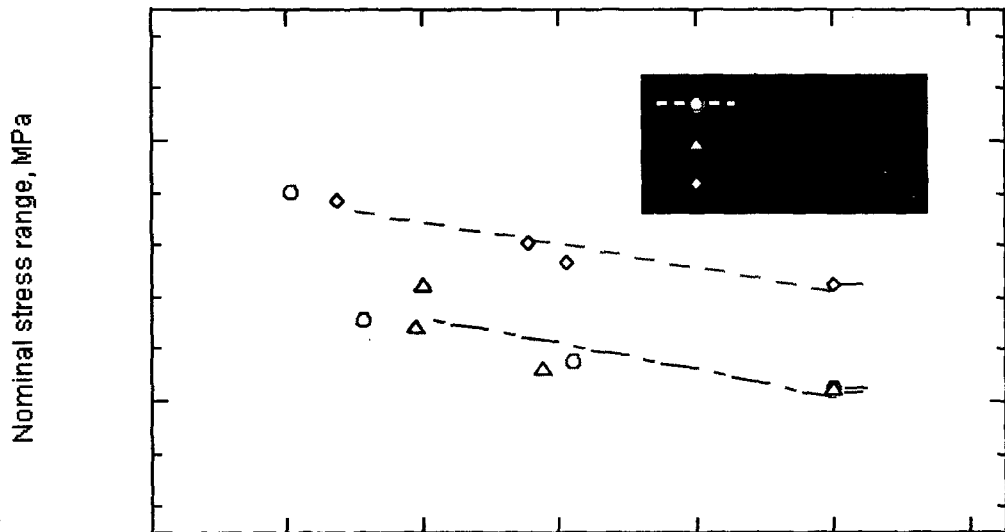


(b)

그림 1. 정적 하중에 따른 용접부 잔류응력 변화 : (a) 종방향 (b) 횡방향



(a)



(b)

그림 2. 정적 하중에 따른 box 필렛 용접부의 피로특성 : (a) 연강 (b) AH36 강