

Slot 구조용접부의 피로강도에 미치는 과하중의 영향 (Effect of Overload on Fatigue Strength of a slot structural weldment)

윤중근, 김현수, 황주환
현대 중공업(주) 산업기술연구소

1. 서론

근래 보고되는 선박에서의 손상은 대개 피로균열 발생에 기인된 손상으로서, 이는 선박이 운항중 파도, 엔진 진동과 같은 다양한 외력을 반복적으로 받음에 따라 구조적 불연속부나 용접부와 같은 응력집중부에서 발생하는 것이다. 특히 피로손상의 50% 이상이 발생하는 슬롯 구조부에 대한 피로수명의 충분한 확보는 매우 중요하다. 이를 위하여 슬롯 구조부에 대한 피로특성에 미치는 인자들을 평가하여야 한다. 특히 슬롯구조부의 피로특성에 미치는 과하중 즉, 탱크 테스트나 발라스팅 시 발생하는 과하중의 영향은 공학적으로 중요하다. 이에 따라 공저 자들은 슬롯 구조부의 피로특성에 미치는 과하중의 영향을 평가하여 전년도에 이를 보고하였다. 슬롯구조부의 피로강도는 과하중을 부여받게 되면 증가되는데, 이에 대한 원인을 과하중 이력에 의한 용접 잔류응력의 재분포와 가공 경화라는 측면에서 고려할 수 있다. 그러나 용접부 피로강도와 잔류응력 간의 관계는 아직 논란의 대상이 되고 있으며, 가공경화 효과도 용접부에서는 열영향부 자체의 경화현상 때문에 명쾌하게 분리 설명하기도 어려운 점이 있다.

따라서 본 연구에서는 과하중에 의한 용접부의 피로강도 향상에 대한 원인을 이해하고자 후열처리를 실시한 후 슬롯 구조부에 대한 피로 특성을 평가하였으며 실험 변수는 과하중 유무이었다.

2. 실험 방법

시편은 전년도와 동일하게 두께 10mm 연강을 이용하여 제작한 원형 slot 구조부를 이용하였으며, 후열처리는 일반 열처리로를 이용하여 615°C에서 2시간 유지한 후 냉각하였다. 후열처리후 용접부에 대한 잔류응력과 경도분포를 평가하여, 이를 과하중 이력 (3mm 변위) 을 부여한 후의 결과와 비교하였다. 잔류응력은 원형 슬롯과 늑골이 교차되는 즉, 피로균열 발생부위에 대하여 ASTM E837-89에 따라 hole-drilling method으로 측정하였다. 과하중 이력에 의한 가공경화 특성은 Vickers' 경도분포로서 평가하였다. 피로 시험은 슬롯부가 면외하중을 받는 조건하에서 50ton dynamic 시험기의 변위제어로 응력비 R=0.1로 실시하였으며, 균열의 측정은 육안, dye penetration 및 crack monitoring system을 이용하여 측정하였다. 피로수명은 표면 균열 길이 5mm 가 되는 경우의 소요된 cycle 수로 정의하였다. 피로시험시 부여된 응력은 슬롯 용접toe부에 부착된 3축 strain gage에서 얻어진 값을 환산하여 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

슬롯의 용접토우부에서 5mm 떨어진 위치 즉, 피로 균열 발생부 주위에서의 잔류응력은 초기 as-welded 상태의 경우 약 34kg/mm^2 , 후열처리후는 약 8kg/mm^2 이며, 후열처리후 과하중 이력 (변위 3mm)을 받게 되면 약 5kg/mm^2 로 되어 변수에 따른 잔류응력의 재분포를 확인할 수 있다. 참고적으로 as-welded 상태에서 동일한 과하중 이력을 받은 경우의 잔류응력은 약 30kg/mm^2 이었다. 따라서 과하중 이력에 의한 잔류응력의 경감효과는 약 3-4 kg/mm^2 정도임을 알 수 있다. 후열처리후 과하중 이력 (3mm 변위)에 의하여 슬롯 용접 토우부는 경화되어 Hv 138 에서 161로 약 17% 증가하였다.

슬롯 용접부에서의 피로 균열은 외부 조건에 무관하게 모두 원형 슬롯과 늑골간의 용접토우부 (web 측면)에서 발생하여 web 쪽으로 전파하였다. 그러나 외부 조건인 후열처리 및 과하중 이력에 따라 상이한 피로 수명 및 강도를 가지고 있다. 그림 1에 후열처리된 슬롯용접부의 피로 특성에 미치는 과하중 이력의 영향을 보여 주고 있다. 용접부의 피로특성은 전반적으로 향상되었으며, 피로강도 ($\Delta \sigma_f$) 는 약 20 에서 26kg/mm^2 으로 증가되었다. 이는 전술한 바와 같이 잔류응력의 경감과 가공경화의 증첩효과에 기인된다고 할 수 있다.

이를 보다 명확하게 비교하기 위하여 전년도 수행된 피로시험 결과와 함께 고찰하여 보았다. 슬롯 용접부의 피로 특성은 잔류응력과 과하중 이력에 따른 가공경화를 동시에 고려하여야 한다. 표1에서 보여주듯이 as-welded 상태에서 과하중 이력을 겪게 되면 as-welded 상태와 비교시 경도는 유사하므로 잔류응력의 감소(약 3kg/mm^2) 만큼 피로강도가 향상되었다고 단순하게 고려할 수 있다. 후열처리의 경우, 과하중이력에 따라 잔류응력이 3 정도 감소되어 피로강도의 증가도 3kg/mm^2 정도이어야 하나 가공경화에 따른 경도 증가로 3kg/mm^2 만큼 더욱 증가하여 총 6kg/mm^2 정도 증가되었다. 이와 같은 논리는 단순하게 결과를 산술적으로 평가한 것이다. 종합적으로 볼 때 즉, as-welded 상태와 후열처리만 된 경우를 비교하면, 비록 연화되었지만 잔류응력의 감소만큼 피로강도의 증가는 보이지 않는다. 따라서 과하중 이력의 효과는 as-welded 상태에서는 잔류응력의 감소이며, 후열처리된 경우에는 잔류응력의 감소와 가공경화의 효과가 동일하게 작용됨을 알 수 있다.

표 1 조건별 잔류응력과 경도

	잔류응력 (kg/mm^2)	토우부 경도 (Hv10)	피로 강도, $\Delta \sigma_f$ (kg/mm^2)
As-welded	33	176	19.5
As-welded + 과하중 이력	30	170	22.5
후열처리후	7	138	20
후열처리 + 과하중 이력	4	161	26

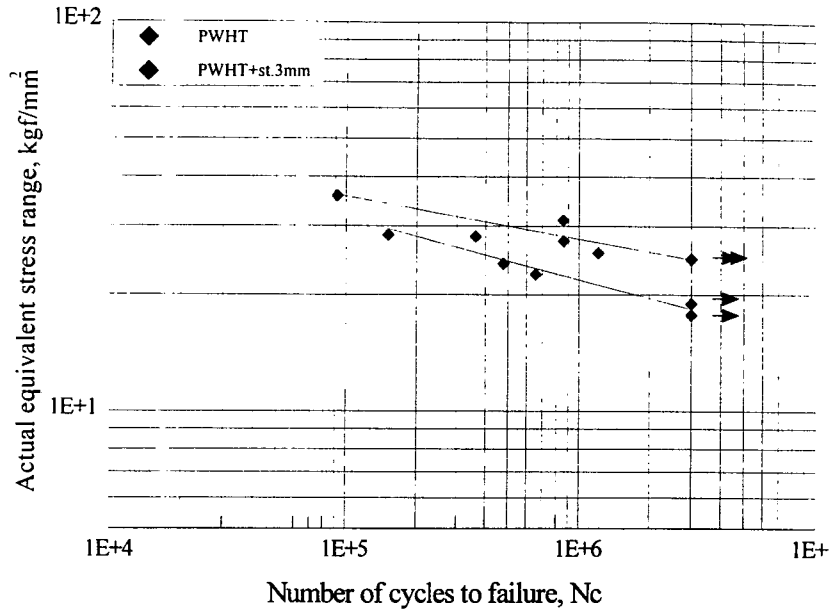


그림 1 후열처리된 슬롯 용접부의 피로특성에 미치는 과하중 이력의 영향

4. 결론

슬롯과 늑골간의 용접부의 피로강도는 과하중을 부여 받게 되면 증가된다. 이는 과하중 이력은 슬롯구조 용접부에서의 초기 잔류응력의 재분포를 통한 잔류응력의 감소와 피로균열의 발생부에서의 가공 경화를 동시에 유발시키기 때문이다. 이와 같은 과하중 이력의 효과는 as-welded 상태에서는 잔류응력의 감소가 주요 요인이며, 후열처리된 경우에는 잔류응력의 감소와 가공경화의 효과가 동일하게 작용된다.