

기하학적 천이를 지닌 Girder 의 피로특성 (Fatigue properties of the girder having transitional geometry)

김현수, 윤중근, 황주환
현대중공업(주), 산업기술연구소

1. 서 론

선박에 작용하는 하중은 선박의 자중 및 화물과 같은 정적 하중과 파도, 진동 등의 동적 하중으로 구분할 수 있다. 실제 선박에서는 이러한 정, 동적 하중이 중첩 작용하여 longitudinals 과 transverse web 간 용접부 등과 같은 구조적 불연속부에서 피로 균열을 발생되고 있다. 특히, bulk carrier의 경우 hatch coaming 에서 3.6% 이상, oil tanker의 경우 vertical girder 의 flange 에서 8.9% 이상 발생되고 있다 (선종별의 1973~1979 년까지의 DNV 검사 결과 보고서). 이와 같은 손상은 주로 flange 부의 두께 차이에 기인된 mis-alignment 로 발생되는 bending moment 및 구조적 불연속으로 인한 응력 집중 등에 기인한다.

본 연구에서는 선박 및 bridge 등에 있어 응력이 천이되는 부위에 많이 적용되는 girder (혹은 scalloped & tapered beam) 부의 피로 수명을 향상시키고자, girder 부에 대한 응력해석을 실시하여 응력 집중부위 및 응력집중 정도를 평가하고 이를 완화할수 있는 형상학적 변경을 모색하였다. 즉, girder 부에서의 응력분포에 미치는 flange 의 폭과 두께 방향으로의 taper ratio 와 scallop 부의 반경의 영향을 유한 요소법으로 평가하였다. 이 결과를 검증하고자 실제 크기의 1/2 인 축소 시편을 제작하여 정적과 동적 (피로) 시험을 수행하였다.

2. 응력 해석 및 결과

Girder 에 대한 응력분포를 유한요소법으로 평가하고자, 그림1과 같은 부위를 대상으로 3차원 8절 점, 6자유도 solid 요소를 사용하여 symmetric 으로 요소 분할 하였다. Model 은 실 부재의 1/2 scale 로 하였으며 요소분할시 scallop end fillet 용접부는 고려하지 않았으나 splice 의 butt 용접부 비드 형상은 flank angle =157.7°, weld bead width $h_p=3\text{mm}$, weld bead height $h=1/9\text{mm}$, weld toe radius =1mm 로 고려하였다. 해석 시 하중($P=7000\text{ kgf}$, 자중 포함)을 point loading으로 가하였으며, 단순 지지 3 point bending의 경계 조건으로 해석을 실시하였다. FEM 해석은 그림 1과 같은 현재 채택되고 있는 형상(이하 C type 이라 칭함 : thin flange thickness 6mm, thick flange thickness 12mm, web thickness 6mm, scallop radius 25 mm) 에 대한 정적 해석을 실시하여 응력 성분별 최대 작용 위치를 평가하고, 이를 기준으로 하여 flange의 폭과 두께의 차이 및 scallop 반경에 따른 탄성 영역에서의 응력 분포 변화 양상을 평가하였다.

현재 채택되고 있는 girder 에 대한 해석 결과, 굽힘응력의 경우 두꺼운 flange 표면의 edge 에서 최대 값이 작용하고 있었다. 이는 두꺼운 flange 부의 tapered 형상으로 인하여 응력집중이 되기 때문이다. 그러나 이 결과를 등가응력 측면에서 평가하게 되면 flange 부 에서의 응력값은 크게 저하되어 scallop 내부에서 최대 응력값이 관찰되게 된다 (그림 2 참조).

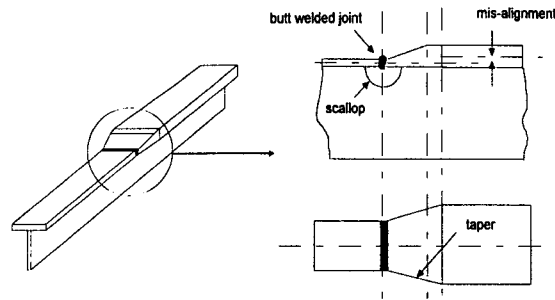


그림 1. 응력 천이 영역에 적용되는 전형적인 Girder 형상

이는 flange 상에 shear 응력의 크기가 매우 커서 flange 부의 등가응력값을 크게 감소시키는 반면 scallop 내부에서는 shear 응력의 값이 적어 굽힘응력과 등가응력간의 차이가 적기 때문이다. 본 연구에서는 응력분포를 평가함에 있어 등가응력을 기준으로 하고자 하는데, 이는 toe radius 가 존재하면 응력 상태가 복잡하여 지며, 실제 피로 시험에 있어 균열은 scallop 내부에서 발생되었기 때문이다. 한편 scallop center 부에는 응력이 상대적으로 작은 값을 가지고 있는데, 이는 scallop 으로 인한 단면 계수의 감소로 local deflection의 영향으로 변위가 증가하지만 butt weld 에 의한 강성 증가에 기인한다.

상기된 girder 에 대한 응력해석 결과를 토대로, flange의 폭과 두께의 차이 즉 taper ratio 및 scallop 반경에 따른 girder 부의 응력 분포 변화 양상을 평가하였다. Taper ratio 는 2, 3, 4 로, scallop 반경은 5 - 35 mm 로 각기 변화시켰다. 해석 결과, scallop radius(r) 를 작게 하고, taper ratio(S)를 크게 함에 따라 scallop 부위와 tapered flange top surface 의 구조적 응력 집중이 완화됨을 알 수 있었다. 이를 토대로 $S = 4, r = 5$ mm 인 형상 girder (이하 N1 type) 과 N1 type 에 있어 flange edge 부의 응력을 감소시키고자 flange 부에 추가로 곡율을 부여한 girder ($S=4, r=5, R=100$, 이하 N2 type) 를 적정 형상으로 선정하였다. 양 girder 에 대한 응력 해석 결과는 그림 2에 나타나 있다. 그림 2에서 보여주듯이 scallop 내부에 작용되는 최대 응력을 약 15% 감소시키고 있으며, N2의 경우 flange edge 에서의 응력값을 크게 완화되었음을 알 수 있다.

피로시험은 응력비 $R=0.1$ 최대하중 7 ton 으로 3점 굽힘 형태로 부여 하였다. 피로 균열의 개시 및 전파는 dye penetration 방법으로 일정 cycle 마다 계측하였으며, 피로 파단 수명은 발생한 균열이 through thickness 균열이 되었을 경우의 수명으로 정의하였다. 그림 3 에 각 girder 형상에 대한 피로시험 결과를 도시한 것으로, 응력 집중을 형상적으로 완화시킨 N1 과 N2 type girder 의 피로균열 개시 및 파단 수명이 크게 향상되었음을 보여 주고 있다. 현재 사용중인 girder 의 최대 피로 수명이 약 180000 cycle 인 반면, N1 과 N2 type girder 의 최소 피로수명이 각 약 360000과 410000 cycle 로 최소 2배 이상이었다. 피로 균열 개시의 경우 각 시편 중 1개의 시편을 대상으로 측정한 결과이다.

3. 결 론

응력이 천이되는 여역에 존재하는 girder 부에서 최대 등가응력의 위치는 scallop 내부이었으며, 이 응력값은 scallop radius 와 taper ratio 에 의존한다. 따라서 scallop 반경과 taper ratio 의 적정화를 통하여 girder 부의 피로수명을 2배이상 향상시킬 수 있었다.

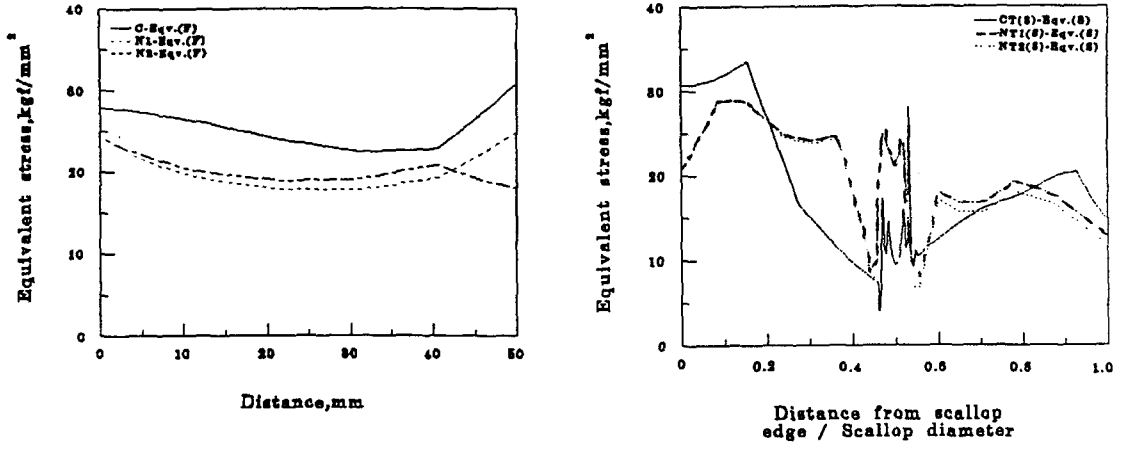


그림 2 Girder 의 등가응력 분포에 미치는 scallop radius 과 taper ratio 의 영향

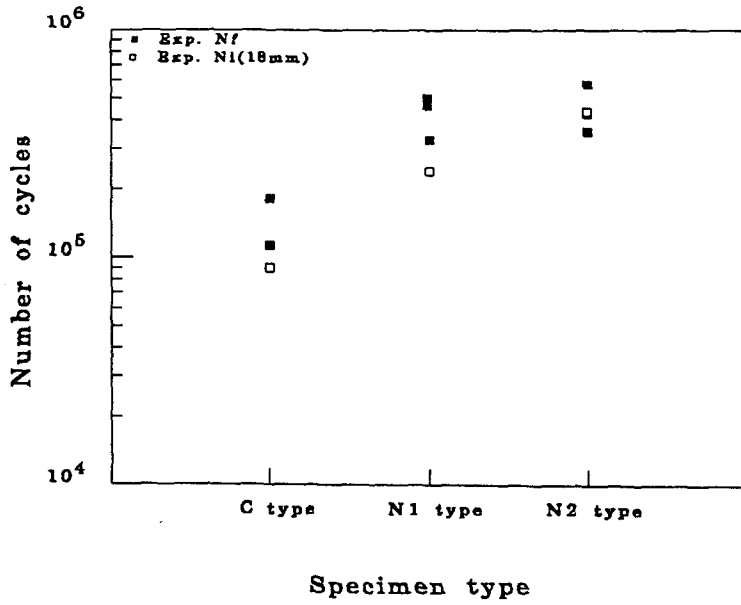


그림 3 Girder 의 피로수명에 미치는 scallop radius 과 taper ratio 의 영향