

선체 중/횡 부재 교차부의 피로 강도 평가법에 관한 검토

대우중공업(주) 옥포조선소 한 명수*, 한 중만

1. 서론

선박의 대형화 및 경량화 추세에 동반하여 고장력강의 사용이 증가함에 따라 대형 유조선(VLCC)이나 산적 운반선(bulk carrier) 등의 선종에서 구조 손상 발생이 증가하고 있다. 이러한 손상은 선체 중 강도 및 횡 강도가 선급 규칙에 저촉되지 않은 상태에서도 주로 국부 구조의 피로 강도 부족으로 인해 발생하고 있으며 대부분이 선체의 중 부재와 횡 부재의 교차부에 집중되고 있다. 선체 중/횡 부재 교차부는 부재의 대부분이 수직으로 결합되고 작용 하중도 복잡하여 국부적인 응력 집중이 큰 구조이다.

선급 지침에 의한 선체 구조의 피로 강도 평가에는 기본적으로 유사 이음부 분류(joint class)에 따른 공칭 응력(nominal stress) 기준의 피로 평가법이 적용되고 있지만 공칭응력이 정확히 정의될 수 없고 국부 응력 집중이 심한 구조 이음부에 대한 평가는 현실적으로 어려움이 있기 때문에 최근에는 구조적 불연속(structural discontinuity)의 효과를 고려한 hot spot 응력으로 선체 구조의 피로 강도를 평가하는 지침도 제정되고 있다.

이러한 평가법에서는 구조적 불연속 효과를 일관성 있게 고려하고 그에 타당한 피로 설계 선도를 적용하는 것이 중요하지만, 각 지침에 따라 hot spot 응력 계산법 및 적용 설계선도에 차이가 있다.

본 고에서는 이들 hot spot 응력에 의한 피로 평가법을 선체 중/횡 부재 교차부에 적용하기 위한 타당성을 실험 및 구조 해석적 방법으로 검토하고자 한다.

2. 검토 내용

1) Hot spot 응력

Fig.1은 판 구조물의 용접 이음부에 대한 4가지의 hot spot 응력 정의 방법을 도식적으로 비교하여 나타내고 있다. 그림에 나타낸 것과 같이 용접 이음부 근방의 2점 (α_1 , α_2)에서의 응력 값을 이은 선을 용접 toe 부까지 직선 외삽하여 구한 응력 값을 hot spot 응력으로 정의하고 있다. 4가지 정의 방법 중 D 법은 타 방법에 비해 구조적 국부 응력 집중을 상당히 낮게 평가하고 있어 선체 중/횡 부재 교차부와 같이 이음부 근방에서의 응력 구배가 상당히 심한 구조부의 hot spot 응력 정의 방법으로서 적합하지 않은 것으로 판단된다. 한편 DNV 및 KR의 피로 설계 지침에서는 B 법에 의해 hot spot 응력을 구하도록 규정되어 있다.

Fig.2는 중/횡 부재 교차부의 구조 요소 모델을 나타내고 있다. 피로 강도 평가의 주된 부위인 중통재 면재(flange face)와 stiffener와의 fillet 용접부 근방은 solid 요소를 사용한 구조 해석과 strain gage에 의한 응력 계측을 행하여 국부 응력을 평가하였다.

Fig.3은 fillet 용접 toe 부 근방의 중통재 면재에서의 중 방향 응력 분포의 구조 해석 및 실험

결과와 Fig.1의 A, B, C 법에 의해 hot spot 응력을 구한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 실험 및 해석에 의한 toe 부 근방에서의 응력은 양호하게 일치하고 있어 해석 결과의 정도가 있음을 나타내고 있다. 한편 Fig.1의 A, B, C법을 적용하여 구해진 fillet 용접 toe 부에서의 hot spot 응력은 Table 1에 나타낸 것과 같이 $A > C > B$ 의 순서였다.

Table 1 Hot spot stresses obtained

Method	Hot spot stress, σ_h (MPa)	$K_s(=\sigma_h/\sigma_n)$	Nominal stress, σ_n (MPa)
A	224.40	1.951	115
B	212.93	1.860	
C	217.12	1.888	

2) Hot spot 응력 기준 피로 설계 선도

Fig.4는 본 구조 모델과 유사한 구조 모델에 대한 피로 시험 결과를 참고 문헌으로부터 인용하고 A~D 법에 의한 hot spot 응력으로 정리하여 UKDEn의 피로 설계 선도와 함께 나타낸 것이다. 피로 시험 결과는 면재의 전 폭에 걸쳐 균열이 전파하였을 때를 파단 수명(N_f)으로 하여 얻어진 것이며 UKDEn의 설계 선도와 같은 파괴확률을 가지도록 Mean-2 σ 선도로 나타내었다. 그림에서 UKDEn의 D-설계 선도는 DNV 및 KR의 피로 설계 지침에서 B 법에 의한 hot spot 응력으로 피로 강도 평가를 행할 때의 피로 설계 선도로 규정되어 있다. 한편 수정 T-선도는 해양 구조물에서의 용접 비드 각도(144°)와 평판 구조물에서의 용접 비드 각도(통상 45°)에 의한 응력 집중 계수의 비(0.92)를 UKDEn의 T-설계 선도의 응력 값에 고려하여 얻어진 것이다. 그림으로부터 Mean-2 σ 에 기초한 구조 모델의 피로 강도 선도는 모두 UKDEn의 D-설계 선도의 하부에 존재하고 있으며 A~C 법에 의한 피로 강도 선도는 안전성을 고려할 때 UKDEn의 D-설계 선도 보다 수정 T-설계 선도와 더욱 좋은 대응성을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 실험에 의한 피로 강도 선도와 UKDEn의 D-설계 선도를 비교하면 B 법에 의한 DNV 및 KR의 지침에 따른 피로 강도 평가가 실 구조물의 피로 강도에 비해 충분히 안전적이지 못하다는 것을 유추할 수 있다.

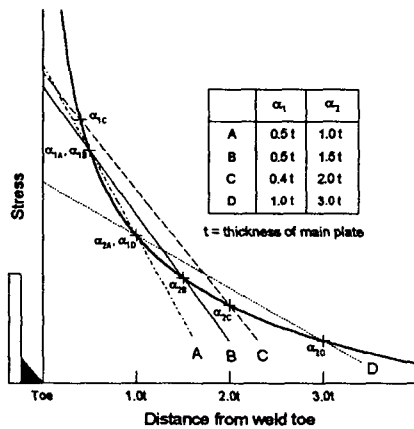


Fig.1 Proposed method for hot spot stress

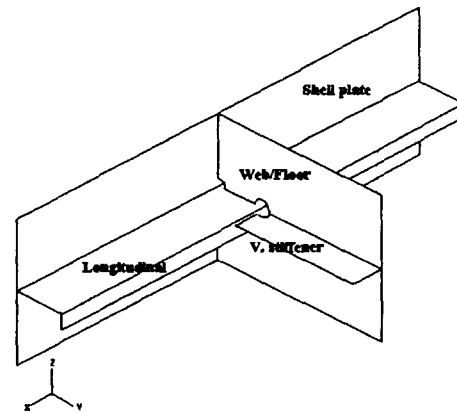


Fig.2 Configuration of structural model

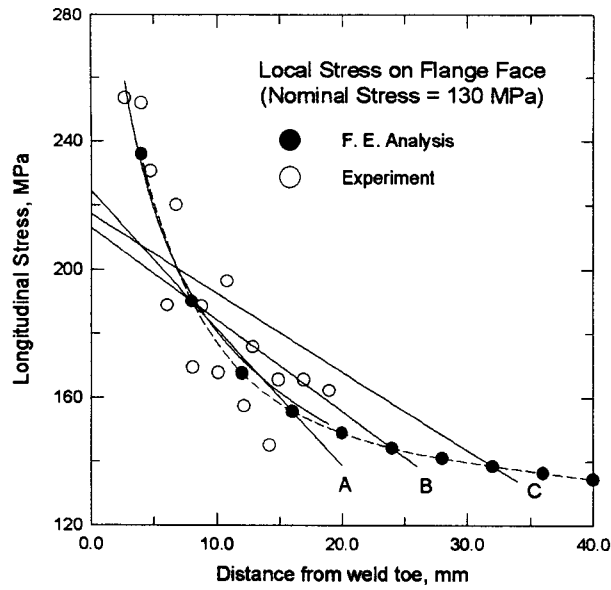


Fig.3 Local stress distribution and hot spot stresses

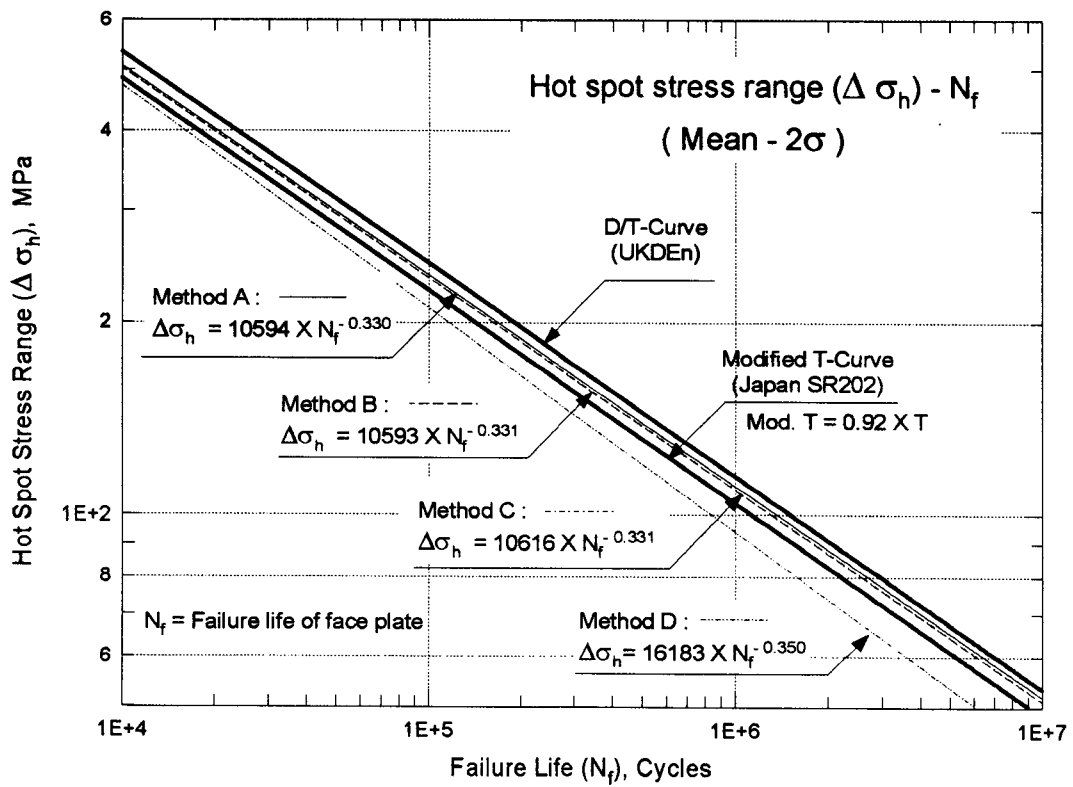


Fig.4 Fatigue curves by hot spot stress range (Method A - D)