

용접구조물 피로강도 평가에 관한 최근 국제공동연구 동향

김 명 현 · 김 유 일

A Review on the International Effects for the Fatigue Strength Assessment of Welded Structures

Myung-Hyun Kim and Yoo-Il Kim

1. 서 론

일반적으로 용접 구조물의 피로강도는 용접부와 같은 기하학적 불연속부에 있어서의 응력집중에 의해 결정되며, 이때 응력집중은 기하학적 형상에 의한 전체적인 요인 및 용접부 비드 등의 국부적인 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

현재 용접 구조물의 피로강도 산정에 많이 사용되는 기준응력으로는 핫스팟 응력(Hot Spot Stress)과 구조응력(Structural Stress)이 있다. 핫스팟 응력 방법은 응력 집중부로부터 일정거리 떨어진 부분에서 구한 응력을 용접 토우부에 대하여 선형 외삽하여 구하는 반면, 구조응력은 유한요소 해석을 통해 구한 절점력을 바탕으로 역학적 평형조건을 만족하도록 용접 토우부에서의 응력을 산정하여 용접 구조물의 피로강도 및 수명을 산정하는 방법이다.

이러한 기준응력 관점에서 최근의 해양구조물 특히 FPSO 관련 산업체로부터 보다 더 신뢰성 있는 피로설계 기준이 강력하게 요구됨에 따라, 이들 산업체들에 의해 다양한 JIP가 시도되고 있다. 특히 최근 부유식 해양구조물인 FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading Systems)의 안전성 및 피로설계를 위한 해석 결과의 일관성을 향상시키기 위해 일련의 국제공동노력의 일환으로 DNV(노르웨이 선급) 주관으로 FPSO Fatigue capacity JIP와 Battelle 연구소 주관으로 Alternative Structural Stress JIP (Joint Industry Project)가 구성되었다. 이들 JIP들은 용접 구조물의 피로설계를 위한 해석결과에 있어서의 각 기관마다의 차이 및 예측된 결과와 실제 사건과의 차이점에 대한 보다 체계적인 이해를 향상시키고자 하는 목적으로 구성되었다.

본 특집논문에서는 이러한 관점에서 앞서 기술한 FPSO Fatigue Capacity JIP, Structural Stress

JIP 및 최근 TWI에서 제안하고 있는 Computer-based Fatigue Design JIP에 관련된 연구 활동 및 결과를 포함한 국제연구 동향에 관해 간략히 소개하고자 한다.

2. FPSO Fatigue Capacity (DNV JIP)

DNV에 의해 주도적으로 수행된 국제공동연구로 부유식 해양구조물인 FPSO (Floating Production Storage and Offloading)를 대상으로 하여 피로파괴의 요인인 반복 파랑하중에서부터 용접 구조물의 피로 특성 등 피로강도 평가 전반에 대한 광범위한 주제를 다루었다. 특히, 신뢰도 높은 핫스팟응력(HSS)을 얻기 위한 적절한 유한요소 모델 생성에 대한 기준을 정립하는 일에 많은 노력과 경비가 투입되었으며, 선급, 석유 회사, 연구소, 대학 및 조선소 등 다양한 기관의 참여와 관심 속에서 진행되었다.

Fig. 1(a)와 같은 용접 연결부는 그 형상의 특성상 피로강도 평가에 사용되는 응력을 정의하기가 상대적으로 난해하다. 조선 및 해양, 토목 분야에서는 유한요소법에 의한 응력해석 결과를 이용한 선형 외삽법을 가장 많이 사용하고 있다. 선형외삽법은 Fig. 1(b)와 같이 용접 이음부에 의해 야기되는 응력집중을 유한요소법에 의해 계산하고 용접 토우부에서 특정거리 떨어진 지점에서의 응력 값을 읽어 토우부로 외삽하여 응력 값을 도출해 내는 방법이다. 그러나 이러한 선형 외삽법은 용접부 근방에 사용되는 유한요소의 크기, 형상, 종류에 따라 민감하게 변하는 단점을 가지고 있으며, 이는 예측된 피로수명의 불확실성으로 나타나게 된다. 이러한 계산상의 오차를 배제하기 위해 유한요소법을 통하여 용접부의 핫스팟응력(HSS)을 얻는 일련의 과정을 표준화하고 그에 대한 기준을 정립하는 일이 요구되게 되었다. 먼저, 계산되는 응력의 정도를 평가할 수 있는 기준을 마련하기 위해 일련의 피로실험을 수행하였다.

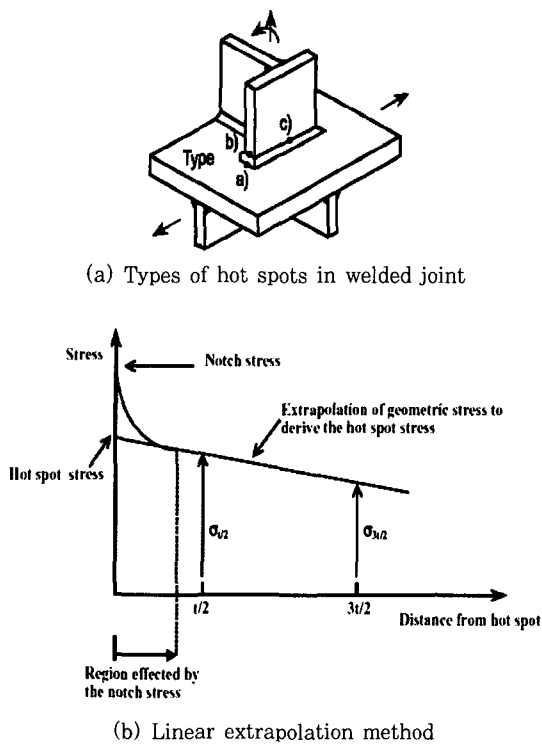


Fig. 1 Concept of hot spot stress

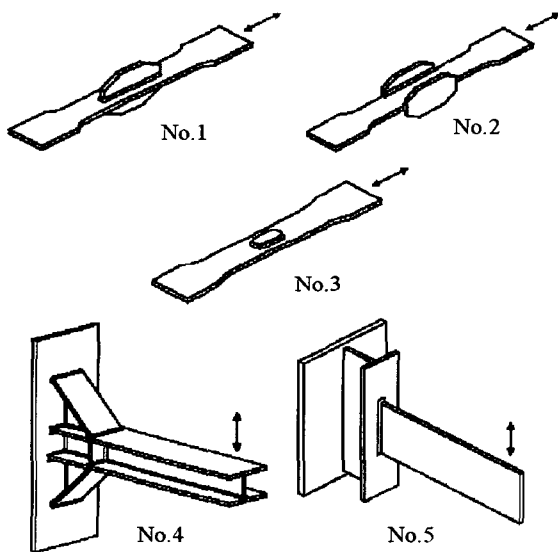


Fig. 2 Test Specimen

Fig. 2는 피로시험에 사용된 5가지 타입의 시험편을 나타낸다. FPSO나 선박과 같은 구조물에 자주 사용되는 5 가지 타입의 전형적인 용접 이음부를 선정하였으며 이에 대하여 일련의 피로시험을 실시하여 얻어진 피로선도를 바탕으로 계산된 핫스팟 응력의 정도를 평가하였다. 실제로 피로 시험은 다양한 형태의 하중조건에 대하여 수행되었으나 최종적인 분석에 사용된 하중은 높은 응력비가 작용하는 경우였는데, 이는 피로실험 데

이터의 편차를 야기하는 인자 중의 하나인 잔류응력의 영향을 배제하기 위함이었다. Fig. 3은 선정된 5가지 시험편에 대한 피로실험 결과를 핫스팟 응력을 기준으로 작성한 S-N선도이다.

시험편 No.4와 No.5는 나머지 시험편과 비교하여 상대적으로 추세를 벗어나는 경향을 나타내었으며, 이에 대한 다양한 검토가 행해졌다. 그 결과 No.4의 경우 판 두께 방향으로 생성된 과도한 굽힘응력 성분으로 인해, No.5의 경우는 용접 이음부에 생성된 압축잔류 응력 때문인 것으로 밝혀졌으며, 이를 재검토한 결과 Fig. 4와 같은 결과를 얻게 되었다. 굽힘응력이 작용하는 경우 등가의 핫스팟 응력을 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\Delta\sigma_{eqv} = \Delta\sigma_{axial} + 0.592\Delta\sigma_{bending} \quad (1)$$

피로시험의 결과를 먼저 공칭응력 기반으로 표현한 다음 피로설계 선도를 만족하기 위한 응력집중계수 (K_{g_target})를 각 시험편 별로 계산하고, 이 값을 유한요소 해석의 정도를 평가하는 기준값으로 사용하였다. 여

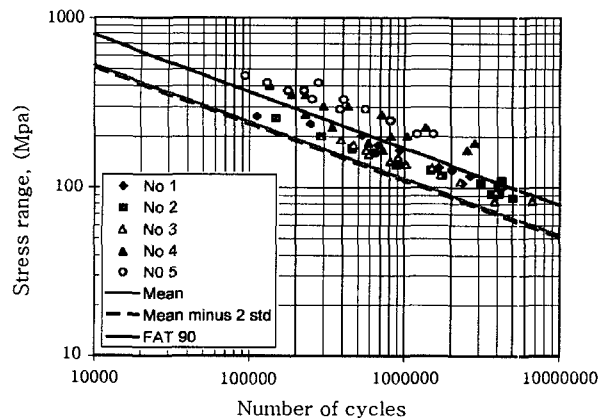


Fig. 3 Fatigue test results

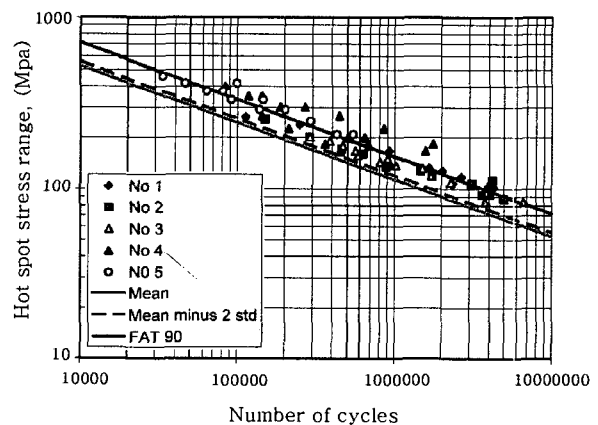


Fig. 4 Fatigue test results after modification

기서 사용되는 설계선도는 핫스팟 응력을 적용하는 경우에 이용되는 설계선도로서 IIW-FAT90을 설정하였다.

Table 1에는 각 시험편의 응력집중계수의 목표값을 나타내었다. 시험편에 대한 유한요소해석을 통하여 얻어진 응력집중계수가 Table 1에서 제시된 목표값을 만족하는지 여부를 평가한 뒤 그에 따라 유한요소모델의 적정성 여부를 판단하고 그에 따른 기준을 제시하였다. 유한요소해석은 round-robin 형태로 진행되었으며 다양한 기관에서 여러 가지 다른 종류의 상용 유한요소프로그램을 이용하여 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 요소의 종류와 크기에는 제한을 두지 않았는데 이는 요소의 종류와 크기가 결과에 미치는 영향을 파악하고 그를 통하여 적절한 기준을 마련하기 위함이었다. Table 2는 round-robin을 통하여 얻어진 해석 결과 중 4절점 shell요소를 사용한 경우의 결과를 보여주고 있다. 이 때 Table에 사용된 각 기호들의 의미는 다음과 같다.

- Good: +10% ~ -5% of K_{g_target}
- Acceptable: +20% ~ -10% K_{g_target}
- Conservative: More than +20% K_{g_target}
- Non-Conservative: Less than -10% K_{g_target}

Table 1 Target stress concentration factors

Specimen	K_{g_target}
No.1	1.32
No.2	1.96
No.3	1.33
No.4	1.64
No.5	1.69

Table 2 Round-robin analysis results (4-shell)

S-N curve: FAT90	Specimen	Company	Mesh Size			
			0.5t x 0.5t	t x t	2t x 2t	4t x 4t
	ISSC	NTNU		Good	Good	NC
	ISSC	LR		Good		
	ISSC	ABS		Acceptable-		
	ISSC	BV(2)		Good		
	HII 1	HII		Acceptable+		
	HII 1	DNV	C	C	Acceptable+	
	HII 2	LR		Good		
	HII 2	HII		Good		
	HII 2	BV(2)		Good		
	HII 2	DNV	Good	Good	NC	
	HII 3	HII		Good		
	HII 3	DNV (1)	Good	Good	Good	
	HII 3	DNV (2)	Good	Good	Good	
	HII 4	LR		C		
	HII 4	HII		C		
	HII 4	ABS		C		
	HII 4	BV (2)		C		
	HII 4	DNV	C	C	C	Good
	HII 5	LR		C		
	HII 5	HII		C		
	HII 5	BV (2)		C		
	HII 5	DNV	C	C	Good	
	GL DP	LR		Good		
	GL DP	BV (2)		Good		
	DNV SND	DNV	C	C	C	MANAGING

유한요소해석을 통해 얻어진 응력집중계수를 목표값과 비교하여 그 정확도를 총 4단계로 분류하였으며 이를 바탕으로 유한요소 모델의 적정성에 대한 기준을 제시하였다. 상기의 실험과 해석을 통하여 얻어진 유한요소모델링에 대한 가이드라인을 정리하면 다음과 같다.

- 4절점 혹은 8절점 shell요소를 사용하는 경우 적절한 요소의 크기는 판 두께(t)를 기준으로 0.5t×0.5t에서 2t×2t까지이다.
- 20절점 sloid 요소를 사용하는 경우 판 두께 방향으로 하나의 요소로 분할하는 것으로 충분하다.
- 8절점 solid 요소를 사용하는 경우 20절점의 경우와 같은 결과를 얻기 위해 두께 방향으로 최소 4개의 요소분할이 필요하다.
- Solid 요소의 경우 요소의 종횡비가 1:4를 초과하지 않도록 한다.
- 요소의 크기가 t×t보다 큰 경우에 2차 다항식으로 용접부 근방의 응력분포를 계산한 다음, 그로부터 해당위치(0.5t, 1.5t)에서의 응력값을 읽는다.
- 이상의 가이드는 선급에서 제시하는 선형 외삽법(0.5t/1.5t)에만 적용이 가능하다. IIW의 선형 외삽법(0.4t/1.0t)을 사용하는 경우에는 일반적으로 매우 조밀한 요소분할이 권장되고 있으며, 요소의 크기가 상대적으로 큰 경우에는 IIW의 방법이 선급의 방법에 비해 비교적 큰 편차를 보인다.
- 선형외삽에 사용되는 응력은 요소내부의 gaussian integration point로부터 읽어 적절히 요소의 표면이나 가장자리로 외삽하여 사용한다.

3. Structural Stress JIP (Battelle JIP)

용접구조물의 피로강도를 평가하기 위한 구조응력 방법(Structural Stress Method)은 Battelle 연구소에 의해 2000년도에 처음 제안되었다. 이 방법은 용접 토우부에서의 응력을 산정하는데 있어 유한요소 결과를 바탕으로 역학적 평형조건을 이용하여 응력집중부에서의 응력을 추정하는 방법으로서, 유한요소해석에 사용된 요소 크기에 민감하지 않도록 일관성 있게 용접 토우부에서의 응력을 추정할 수 있으며 다양한 용접부 형상에 대한 피로선도의 단일화가 가능한 것으로 알려져 있다.

Structural Stress JIP는 Battelle 연구소의 주도로 구조응력 추정방법의 검증 및 개선과 다양한 산업분야에서의 피로설계를 위한 적용관점에서의 기술개발을 목표로 2002년에 시작되었다. 1단계 Structural Stress JIP는 2002년부터 2004년에 걸쳐 수행되었으며,

2004년 11월부터 현재까지 2단계 JIP 연구가 수행되고 있다.

1단계 JIP기간 동안에는 주로 용접구조물의 피로설계를 위한 구조응력 방법의 효과적인 적용에 관한 연구가 진행되었다. 다양한 용접연결부, 하중모드 및 용접구조물 판 두께 등을 고려할 수 있는 구조응력 산정방법에 관한 연구가 이루어졌으며, 항공, 자동차, 조선, 에너지, 원자력 산업 분야에서 사용되고 있는 다양한 용접부에 대한 구조응력 기법의 적용에 관한 일련의 연구를 수행하였다. 한편 상용유한요소 해석 프로그램을 이용한 해석결과를 바탕으로 자동적으로 구조응력을 계산할 수 있는 post-processor가 개발되었으며, 1950년 이후로 각종 논문에 발표된 5000여개 이상의 피로시험 결과를 정리하여 등가구조응력을 바탕으로 하는 단일 피로선도를 도출하였다. 1단계 구조응력 JIP에는 참여한 기관은 American Bureau of Shipping, Caterpillar, ChevronTexaco, ConocoPhillips, DANA, ExxonMobil, Hyundai Heavy Industry, International Truck and Engine, Korea Power Engineering Company, Shell, Technip-Coflexip 등 11개 기관이다.

구조응력 JIP 1단계에서 도출된 주요 연구결과는 아래와 같다.

- 항공, 자동차, 조선·해양, 에너지, 원자력 산업 분야의 다양한 용접구조물로의 적용을 위한 구조응력 계산절차 확립
- Shell 및 Plate 요소를 이용한 유한요소결과를 바탕으로 자동적으로 구조응력을 계산할 수 있는 post processor 개발
- 피로균열이 발생할 수 있는 용접선에 대한 정의 및 용접 루트부 균열해석을 위한 계산지침 확립
- 다양한 용접연결부, 하중모드 및 판 두께 등의 영향을 고려할 수 있는 구조응력 산정 기법 확립
- 1950년 이후로 각종 논문에 발표된 5000여개 이상의 피로시험 결과를 바탕으로 등가구조응력을 이용한 단일 피로선도 도출
- Edge gusset을 가지는 시험편에 대한 피로시험 수행 및 구조응력 계산결과와의 비교를 통한 구조응력기법 검증
- 피로시험결과와의 비교·검증을 통한 등가구조응력을 바탕으로 한 단일 통합피로선도 검증 작업 수행
- IIW 및 ASME 등 국제기관으로부터의 향후 코드 및 표준화 지침서 등으로의 적용을 위한 구조응력 기법에 대한 인식 확보

구조응력 (Structural stress, σ_s)은 용접 토우부 근처에서 발생하는 응력 구배를 막응력(Membrane

stress, σ_m)과 굽힘응력(Bending stress, σ_b)으로 나누어 이들의 합으로 정의된다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 구조응력을 구하기 위한 방법에는 크게 Shell 요소를 이용하는 방법과 Solid 요소를 이용하는 두 가지 방법이 있다.

먼저 Shell 요소 모델의 경우, Fig. 5에서 보인 바와 같이 유한요소해석을 통해 절점 변위에서 얻을 수 있는 절점력(nodal force)을 이용하여 식 (2)와 (3)과 같은 역학적 평형 조건을 만족하는 용접선에 대한 선분포력(line force)을 식 (4)의 형태로 구할 수 있다. 절점력뿐만 아니라 절점모멘트(nodal moment)에 의한 선분포모멘트(line moment)도 같은 방식으로 도출이 가능하다.

$$\sum F_{y_i} + \int_0^l f_y(x)dx = 0 \tag{2}$$

$$\sum F_{y_i x_i} + \int_0^l f_y(x)xdx = 0 \tag{3}$$

$$f_{y1} = \frac{2}{l}(2F_{y1} - F_{y2}), f_{y2} = \frac{2}{l}(2F_{y2} - F_{y1}) \tag{4}$$

식 (2)-(4)에서 구한 단일 요소에 대한 구조응력 계산방법을 여러 개의 요소로 구성된 모델로 확대하면 Fig. 6과 같이 선분포력(line force)의 방향을 따라 정의할 수 있으며 이는 식 (5)와 같이 표현 될 수 있다.

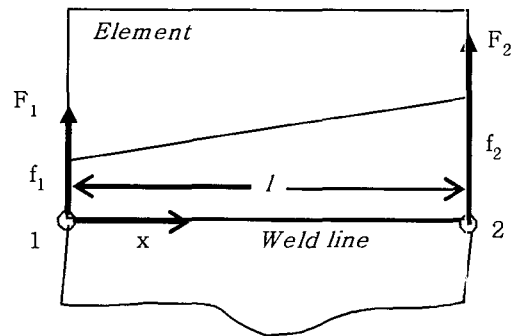


Fig. 5 Local line force from nodal force

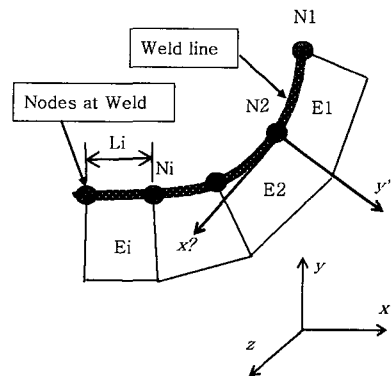


Fig. 6 Generalized procedure of line force

선분포모멘트(line moment)도 동일한 방법으로 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 \\ \frac{l_1}{6} & \frac{(l_1+l_2)}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{(l_2+l_3)}{3} & \frac{l_3}{6} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \quad (5)$$

이렇게 구해진 선분포력 및 선분포모멘트를 이용하여 식 (6)과 같이 막응력과 굽힘응력의 합으로 표현되는 구조응력을 구할 수 있다.

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y}{t} + \frac{6m_x}{t^2} \quad (6)$$

앞서 기술된 구조응력 기법을 적용하여 Fig. 7에 보인 바와 같은 선체구조에 대하여 두 가지 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 다양한 요소크기에 대하여 구한 핫스팟 응력계산 결과와 구조응력 계산 결과를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 이 때 핫스팟 응력 계산결과는 유한요소 프로그램 및 요소크기에 따라 민감한 변화를 보이는 반면, 구조응력 계산결과는 상대적으로 일관성 있는 결과를 보이는 것으로 나타났다.

Solid 요소를 이용하여 구조응력을 계산하는 방법은 Shell 요소와 같이 역학적 평형조건을 이용한다는 점에서는 동일하나 등가 절점력을 이용하는 shell 요소와는 달리 solid 요소의 경우 응력성분을 이용하여 이들의 평형 관계를 유도 한다는데 있어 차이가 있다. 즉, 용접 토우부 위치인 A-A단면에서의 구조응력은 일정거리(δ)만큼 떨어진 B-B단면에서의 수평응력(σ_x)과 전단응력(τ_{xy})을 각각 구하여, 식 (7)과 (8)을 통해 두 단면

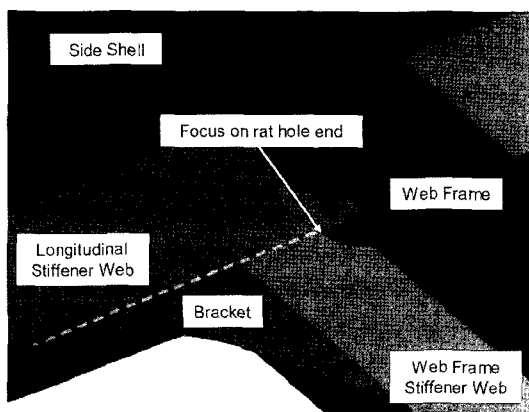


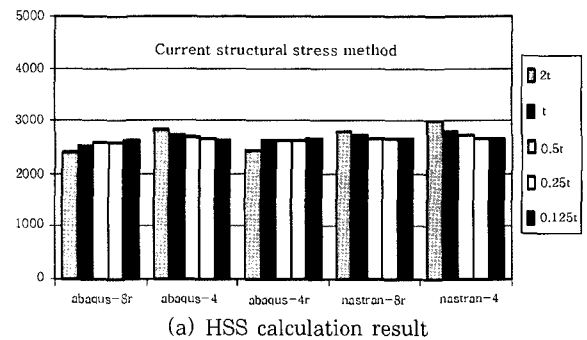
Fig. 7 Ship detail example with rat hole

사이의 구조역학적 평형조건을 바탕으로 A-A단면에서 막응력과 굽힘응력을 계산한다.

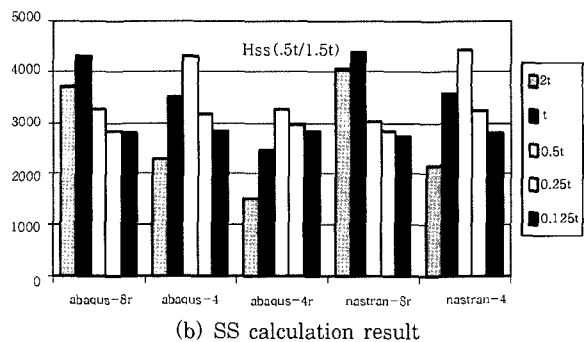
$$\sigma_m^{A-A} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_x^{B-B}(y) dy \quad (7)$$

$$\sigma_m^{A-A} \cdot \frac{t^2}{2} + \sigma_b^{A-A} \cdot \frac{t^2}{6} = \int_0^t \sigma_x^{B-B}(y) y dy + \delta \int_0^t \tau_{xy}^{B-B}(y) dy \quad (8)$$

여기서 식 (7)은 x 방향으로 힘의 평형을 의미하며 식 (8)은 모멘트의 평형을 의미한다. Fig. 10에는 Fig. 9와 유사한 용접부에 대하여 solid 요소를 적용하여 유한요소해석 결과를 바탕으로 구한 구조응력을 통



(a) HSS calculation result



(b) SS calculation result

Fig. 8 Comparison of hot spot stress(HSS) and structural stress(SS)

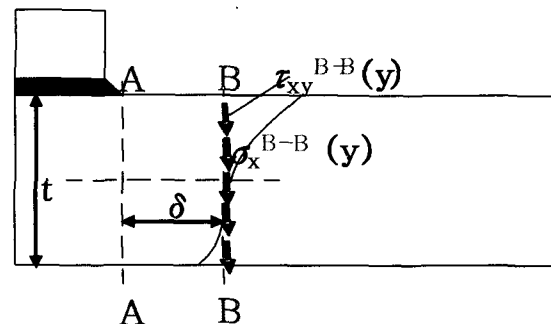


Fig. 9 Structural stress calculation procedure for through thickness fatigue crack

한 용접토우부에서의 응력집중계수를 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 계산에 사용된 유한요소 크기나 용접토우부에서의 응력을 구하기 위한 일정거리(δ)를 바꾸어도 일관성 있게 구조응력이 계산되는 것으로 나타났다.

한편 Battelle에서는 구조응력의 유효성을 검증하기 위하여 방대한 양의 피로시험 데이터를 수집·분석하였고, 그 결과물을 바탕으로 피로시험 데이터베이스를 구축하였다. 데이터베이스에 포함된 데이터의 개수는 현재 840개 정도이며, Fig. 11은 각각 공칭응력 및 등가 구조응력을 바탕으로 모든 피로시험 결과 데이터를 한번에 출력한 결과를 보여주고 있다. 공칭응력을 이용하여 도시한 피로시험 데이터는 상대적으로 데이터의 산포된 정도가 크게 나타남을 알 수 있으며, 이를 두께효과, 하중모드효과를 고려한 등가 구조응력을 이용하여 표현하는 경우 데이터가 하나의 단일선도를 향해 모여드는 것을 확인할 수 있다. 참고로 공칭응력 및 등가 구조응력을 이용하여 얻어진 데이터의 표준편차는 각각 0.352, 0.241로 나타났다.

등가 구조응력에 사용되는 두께보정은 일반적으로 IIW 나 BS에서 제시하는 방법과는 약간 차이를 보이고 있다. 식 (9)과 식 (10)은 각각 Battelle과 BS에서 사용하고 있는 두께보정 계수를 각각 나타낸다.

$$TC = \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^{\frac{2-m}{2m}} \tag{9}$$

여기서 $m=3.6$, $t_{ref}=1\text{mm}$ 이다.

$$TC = \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^{-0.25} \tag{10}$$

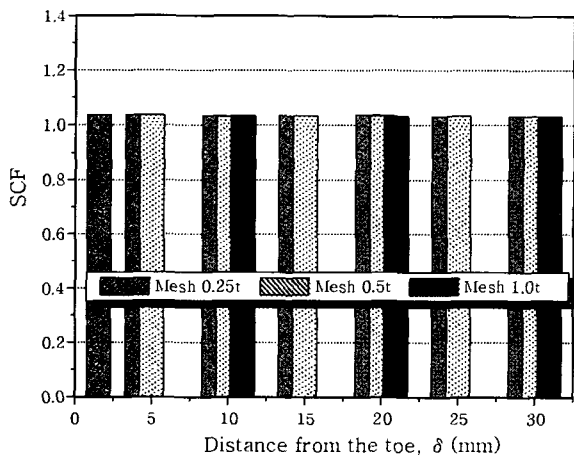
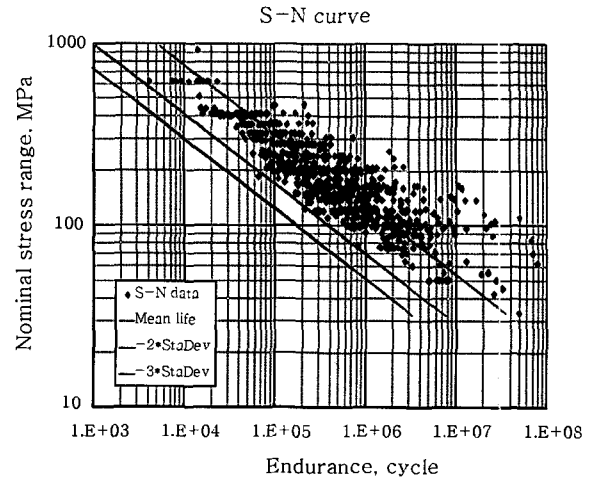
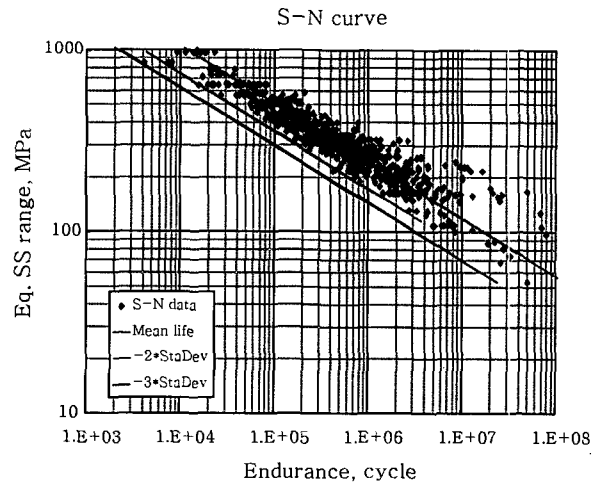


Fig. 10 SCF at the weld toe with respect to various distances(δ) and mesh sizes



(a) S-N curve based on nominal stress



(b) S-N curve based on equivalent structural stress

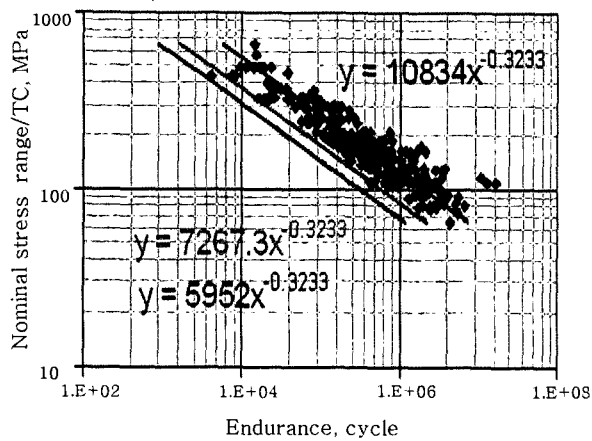
Fig. 11 Fatigue test results of various weld joints

여기서 $t_{ref}=16\text{mm}$ 이다.

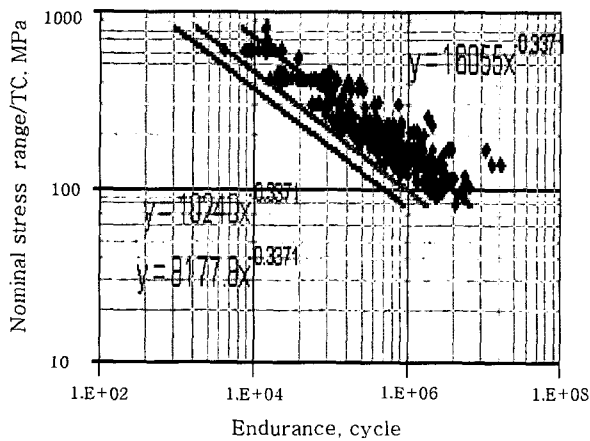
Fig. 12는 서로 다른 두께보정 계수를 이용하여 공칭 응력으로 표현된 피로시험 데이터를 분석한 결과이다. 두께 보정을 한 후에 피로시험 데이터의 흩어짐 정도를 살펴보면 각각 0.268과 0.290으로 Battelle에서 제안한 두께 보정계수가 BS의 방법에 비해 좀더 나은 결과를 주는 것을 확인하였다.

2단계 구조응력 JIP는 2004년 11월에 시작되어 2년을 기간으로 현재 진행 중에 있다. 이 기간 동안에는 앞서 1단계에서 도출된 결과를 바탕으로 다축응력 및 위상을 고려할 수 있는 구조응력 기법 개발 및 3차원 solid 요소를 바탕으로 구조응력을 계산할 수 있는 post-processor 개발에 관련된 연구를 수행 중이다.

현재 2단계 구조응력 JIP에는 Arvin Meritor, BP, Bureau Veritas, Caterpillar, ChevronTexaco, ConocoPhillips, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, Korean Power Engineering Company,



(a) Thickness correction by Battelle (sd=0.268)



(b) Thickness correction by BS (sd=0.290)

Fig. 12 Thickness correction

International Truck and Engine, Rockwell Power Systems, Technip-Coflexip, Tenaris-Siderca 등 13 개 정도의 기관이 참여하고 있다. 2단계 구조응력 JIP 에서 수행하고자 하는 주요 연구목표는 다음과 같다.

- 다축하중 및 위상을 고려한 구조응력기법의 적용 기술 개발
- 3차원 솔리드 요소를 사용한 구조응력 계산을 위한 post-process 개발
- FPSO 등을 포함한 대형 용접구조물에 대한 구조응력 기법 적용성 검증
- 사용자 편의 중심의 피로선도 데이터베이스 확보
- 핫스팟 응력 및 구조응력을 모두 적용하기 위한 일관성 있는 피로해석 가이드라인 제시
- 각종 코드 및 표준화 지침서 및 선급 승인 확보

한편 현재 수행되고 있는 2단계 구조응력 JIP의 주

요 연구내용으로는 대우조선해양(DSME)의 주도로 핫스팟 응력 기법을 바탕으로 한 피로해석 적용이 어려운 선박구조에 있어서의 구조응력 적용 가능성에 대한 연구(Large scale ship detail tests)가 수행되고 있다. 또한, Bureau Veritas(BV)의 주도로 선체구조의 피로해석을 위한 구조응력기법 적용을 위한 선급 관점에서의 피로해석 지침서를 개발하고 있다. 특히 Shell 혹은 3D solid 요소를 이용한 선체 구조 모델을 바탕으로 피로시험결과와의 검증, 핫스팟 응력 기법과 구조응력 기법을 적용한 선체 피로해석 결과의 비교·검증 및 다양한 용접 이음부에 대하여 일관성 있는 피로해석 절차 확보 등을 목표로 연구를 수행 중이며, 특히 선박 및 해양구조물 관련 산업에 있어서 가장 중요시되는 구조 모델링 기법, 다축응력 효과, 기준 피로선도 및 각종 보정 효과등을 포함한 피로해석 지침서를 개발 중이다.

4. Computer-based Fatigue Design(TWI JIP)

TWI(The Welding Institute) JIP는 비교적 최근에 들어서 연구에 대한 기술적 윤곽이 잡힌 경우이며, 현재 연구에 참여할 파트너를 구하고 있는 단계로 각국의 선급으로부터 상당한 관심을 끌고 있다. TWI가 제안한 방법은 Battelle의 방법과 마찬가지로 판 두께 방향으로의 응력선형화가 그 기본 개념이다. 그러나 Battelle의 방법이 피로수명을 계산하기 위해 파괴역학적 접근법을 상당히 적용하고 있는 반면, TWI의 방법은 피로실험 데이터베이스를 기반으로 한 경험적 접근법에 더 유사하다고 할 수 있다. Fig. 13은 용접부에 작용하는 응력성분을 선형화 과정을 통하여 막응력 성분과 굽힘응력 성분으로 나눈 예를 보여준다. 식 (11)은 유한요소해석을 통해 얻어진 응력으로부터 막응력과 굽힘응력을 구하는 방법을 각각 나타낸다.

$$\sigma_m = \frac{\int \sigma(z) dz}{t}, \quad \sigma_b = \frac{6 \left| \int z \sigma(z) dz \right|}{t^2} \quad (11)$$

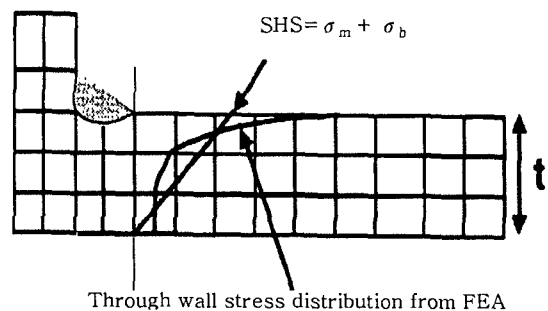


Fig. 13 Through thickness linearization

두께 방향으로 응력을 선형화하는 방법은 대부분의 상용 유한요소 프로그램들의 후처리기에 그 기능이 내장되어 있기 때문에 별도의 계산과정이 필요하지 않은 큰 장점이 있다. 그러나 이렇게 계산된 응력은 여전히 표면에서의 응력값으로 판두께의 영향, 하중 모드의 영향 등을 고려할 수 없다. 따라서 계산된 표면에서의 선형화된 응력값을 바탕으로 판 두께, 하중모드, 그 외에도 토우각과 용접비드의 크기와 같은 효과를 고려할 수 있는 경험적 계수들을 식 (12)와 같이 도입하게 된다.

$$SHS^* = SHS \times f(t) \times f(\theta) \times f(L) \times f(m, b) \quad (12)$$

그러나 두께방향의 응력 선형화가 해의 요소 의존성을 얼마만큼 극복할 수 있는지는 아직 미지수이며, 또한 shell요소를 사용하는 경우에는 Battelle이 제안하고 있는 용접 토우부의 절점력을 사용하는 방법으로 귀착된다는 단점이 있다. TWI JIP는 아직 시작단계에 있으므로 방법론에 대한 차세한 검토는 현 단계에서 이루어지기는 힘들 것으로 여겨지며 연구의 진행 추이들에의 주시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

5. 결 언

본 특집논문에서는 용접 구조물의 안전성 및 피로설계를 위한 해석 결과의 일관성을 향상시키는 한편, 각 기관마다의 해석방법의 차이 및 예측된 결과와 실제 사건의 차이점에 대한 보다 체계적인 이해를 향상시키고자 하는 목적으로 국제 공동노력의 일환으로 구성된 JIP(Joint Industry Project)를 바탕으로 DNV(노르웨이 선급) 주관의 FPSO Fatigue capacity JIP와 Battelle 연구소 주관의 Alternative Structural

Stress JIP 및 TWI(The Welding Insitute)에 의해 최근에 제안된 Computer-based Fatigue Design JIP에 대하여 그 연구 활동과 내용을 간략히 살펴보았다. 이를 바탕으로 피로강도 평가를 위한 용접부 기준 응력 선정을 위한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대하며, 향후 용접 구조물의 피로강도 해석기법에 대하여 보다 체계적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 특집 논문은 대한용접학회 산하 용접강도연구위원회의 공동 연구 활동의 일환으로 준비되었으며 참여해주신 기관과 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Proceedings of OMAE Specialty Symposium on Integrity of Floating Production, Storage and Offloading systems, Houston, TX, U.S.A., 2004
2. Mesh-Insensitive Structural Stress Method for Fatigue Evaluation of Welded Structures, Battelle Structural Stress JIP Final Report, 2004
3. Proceedings of the 15th International Ship and Offshore Structures Congress, San Diego, U.S.A., 2003
4. S.J.Maddox, Key Developments in the Fatigue Design of Welded Constructions, 2003 IIW Portivin Lecture, 2003
5. DNV RP-C203 : Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures, DNV
6. Summary of the FPSO Fatigue Capacity JIP, Report No.2000-3466, DNV
7. FPSO Fatigue Capacity Phase II - Summary Report, Report No.2003-0579, DNV
8. Proposal - Computer based Fatigue Analysis, TWI, 2005



- 김명현(金明顯)
- 1968년생
- 부산대학교 조선해양공학과
- 구조해석, 피로파괴
- e-mail : kimm@pusan.ac.kr



- 김유일(金裕鎰)
- 1972년생
- 대우조선해양 구조R&D팀
- 구조해석, 피로파괴
- e-mail : yikim@dsme.co.kr