

피로해석 적용을 위한 기준응력 벤치마킹

A Benchmark study on the reference stress for fatigue assessment of welded structures

최홍민^{†*}, 이제명^{*}, 백점기^{*}, 김명현^{*}, 김현수^{**}

*부산대학교 조선해양공학과

** 현대중공업(주), 산업기술연구소

1. 서 론

용접을 통해 제작이 이루어지는 강 구조물의 설계 시 가장 중요시 되는 점은, 반복적인 하중 하에서의 해당구조물 거동예측을 바탕으로 하는 설계를 해야 한다는 것이다. 특히 대부분의 대형 강 구조물의 파손사례 분석에 의하면 이들 구조물의 파손원인은 용접부에서의 피로균열발생이라는 점도 피로설계의 중요성을 대변하고 있다.

용접이음부의 피로설계에 자주 활용되는 것으로서, 기준응력 산정을 통한 용접이음부의 피로 성능평가 기준확보를 들 수 있다. 즉, 임의의 형상을 갖는 용접이음부의 피로성능은 기하학적 형상이나 용접특성에 따라 많은 차이가 있을 수 있으나 탄성해석을 통해서 얻어지는 응력장을 이용하여 적절한 외삽규칙을 적용하여 용접이음부에서의 응력집중효과를 표현하고 이를 이용하여 각종 피로강도평가를 수행하고자 하는 방법이다.

비교적 간단한 탄성유한요소해석의 수행을 통하여 기본적인 피로성능평가가 가능하기 때문에 손쉬운 접근법으로 많이 활용되고 있으나, 전술한 바와 같이 적용하는 외삽방법이 결과의 편차를 야기하는 근본원인으로 지적되고 있으며 유한요소해석에서 나타나는 각종 불규칙성 등도 평가 결과의 신뢰성확보에 제한요소로 거론되고 있다.

따라서 본 연구에서는, 용접부 기준응력 산정에 있어서 주로 활용되는 대표적 기법, 즉 IIW 및 선급규칙을 대상으로 벤치마킹 테스트를 수행하여 적용 외삽규칙 및 유한요소해석기법에 따른 차이점을 비교하여 피로평가용 기준응력 산정법 적용상의 제 문제점을 분석하고자 한다.

2. 용접부 기준응력 산정법

본 연구에서는 용접부 피로강도 평가를 위한 유한요소해석을 통한 기준응력 산정법 중에서 Hot-Spot Stress(HSS)산정법을 대상으로, 용접 시험체를 이용하여 용접비드 선단에서의 HSS를 범용유한요소코드(ANSYS)를 이용한 탄성해석을 통해 계산하고 해석용 이산화과정에서 용접 비드의 고려 여부 및 채용 유한요소의 특징에 따른 영향에 대한 분석을 수행하였다.

본 연구에서 비교대상으로 선정된 HSS란, 용접토우부에서 응력성분이 비선형적으로 급격하게 증가하는 구간을 제외하고 선형적으로 증가되는 응력성분을 토우부까지 외삽규칙을 통해 연장한 값으로 정의할 수 있다. 즉, 실제의 용접구조물에서 용접토우부에서의 응력이 무한 증가되는 이유로, Fig. 1과 같이 용접토우부에서의 두 위치에서의 응력값을 용접토우부까지 외삽하여 HSS응력을 구하게 된다.

보통 외삽규칙을 적용하기 위해서 선정되는 위치는 용접토우부로부터 일정간격 떨어진 위치이며 각 기관별 규칙에 따라 조금씩 달라지고 있다. 본 연구에서는 IIW와 노르웨이선급(DnV)에서 제시하는 외삽규칙을 비교대상으로 삼았다.

해석을 통한 HSS 산정결과의 신뢰성 평가를 위하여 해석에 이용한 용접이음부를 실제 제작하여 실험적으로 변형률로 계측하여 응력을 계산한 후, 동일한 외삽규칙을 이용하여 용접토우부에서의 HSS를 계측하였다.

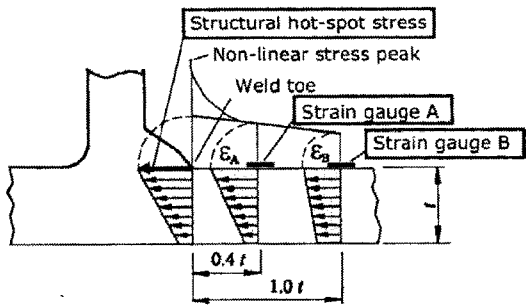


Fig.1 The estimation method of the Hot-Spot Stress by measuring strain

3. Hot-Spot Stress 계측용 해석모델

다양한 형상을 갖는 용접부의 HSS를 도출하기 위하여 다음과 같은 세 가지의 형상의 용접구조물을 사용하였다. 사용된 재료는 일반적인 선급용 강재인 $E = 205.8 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$ 의 재료물성치를 가지고 있다.

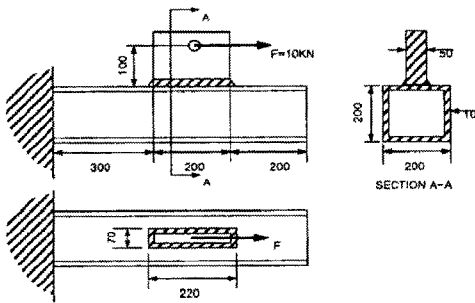


Fig.2 Specimen configuration (Type-A)

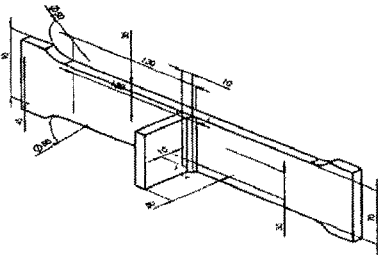


Fig.3(a) Specimen configuration (Type-B)

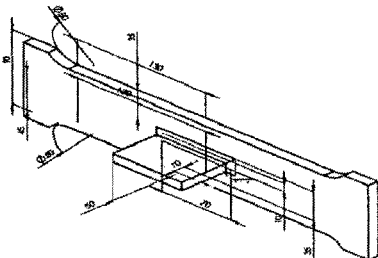


Fig.3(b) Specimen configuration (Type-C)

Fig. 2은 박스형 거더에 거셋판이 붙은 형태이

다. Fig. 3(a)은 거셋판이 종방향과 Fig. 3(b)는 횡방향으로 붙어있는 형태로 Leg-length의 길이는 각각 5mm이다. Fig. 3의 시험편에 각각 인장하중을 가한 경우와 굽힘하중을 가한 두 가지 하중 상태에서의 HSS값을 구하였다. 각각의 시험체에 대해서 ANSYS를 이용하여 유한요소해석을 수행하였고, 유한요소해석을 위한 모델링에서는 요소의 크기는 판두께의 비를 이용한 $t \times t$, $0.5t \times 0.5t$ 요소의 크기를 변경하면서 해석하였고, 요소는 8, 20절점요소의 Solid요소 및 4, 8절점 Shell요소를 사용하였다. 또한 형상의 대칭성을 고려하여 1/2의 모델링하여 해석을 수행하였다. 응력집중이 예상되는 용접토우부에서 용접비드선단 및 하단에서의 15mm와 5mm간격으로 스트레인게이를 부착하여 변형률값을 계측하였다.

3000kgf의 인장하중과 700kgf의 굽힘하중을 하중조건으로 사용하였다.

3.1 IIW 규칙

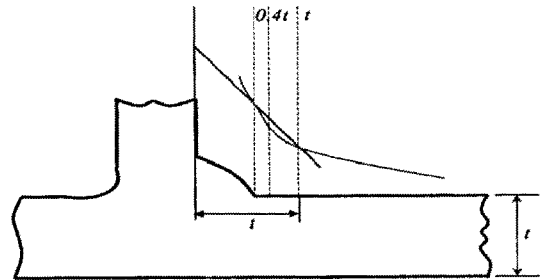


Fig.4 The estimation method of the structural Hot-Spot Stress by FEM analysis (IIW)

IIW의 HSS의 산출법은 다음과 같은 식(1)과 같이 유한요소해석에서의 Fig. 5와 같이 0.4t 와 1.0t 의 두 지점에서의 하중방향에 대한 주응력 성분으로 이용하여 선형외삽법의 방법으로 구할 수 있다.

$$\sigma_{HS} = A(0.4t) - B(1.0t) \quad (1)$$

3.2 Det Norske Veritas(DnV) 규칙

DnV의 HSS의 산출법은 용접토우에서의 노치영향을 제거하기 위하여 식(2)를 이용하여 Fig. 5과 같이 용접토우에서 0.5t 와 1.5t 떨어진 위치에서의 응력 사용하여 선형외삽법으로 계산한다.

$$\sigma_{HS} = A(0.5t) - B(1.5t) \quad (2)$$

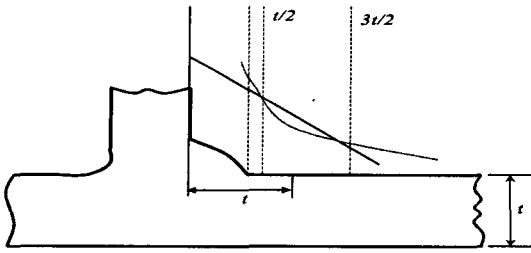


Fig.5 The estimation method of the structural Hot-Spot Stress by FEA(DnV)

4. 유한요소해석 및 계측결과

유한요소해석에서의 응력 계측점은 절점 Shell 요소의 경우에는 절점에서의 응력값과 요소의 적분점에서의 응력을 적용하였고, 또한 요소의 크기를 조절하여 HSS값을 비교해보았다. Table 1은 시편의 스트레인게이지의 계측값을 이용한 HSS의 계산 결과를 보이고 있다.

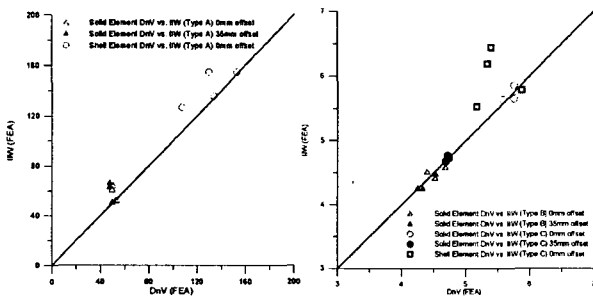


Fig.8 The Comparison of estimated results between DnV and IIW method

Table 1 Stress measurement of each specimen, Experiments vs. FEA (type B, C)

	Load type	Measured stress by strain gages(MPa)								HSS		
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	Exp.	FEA Shell Solid	
Type -B	Tension	58.38	59.7	58.2	55.2	31.5	33.7	32.1	29.3	59.47	41.8	44.2
Type -B	Bending	683.9	463.3	481.3	440.6	569.2	525.1	398.8	419.2	474.6	533.8	492.0
Type -C	Tension	57.2	62.8	52.3	50.2	36.7	38.3	44.8	42.0	64.3	57.5	56.0
Type -C	Bending	374.7	409.2	314.1	306.2	239.0	205.3	282.0	277.4	432.8	539.0	558.6

유한요소해석에서의 Fig. 8에서 보이는 것과 같이 Solid Element에서는 DNV와 IIW의 식은 비교적 크게 차이가 나지 않지만(5), Shell 요소를 사용했을 경우에는 IIW와 DNV의 HSS값의

편차를 보이고 있다. 이는 Solid 요소를 사용했을 때는 용접의 비드 및 각장의 크기를 고려했기 때문에 두개의 서로 다른 응력계측위치 및 요소의 크기변화의 영향이 HSS값에 비교적 적은 편차를 나타내는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는, 용접부 기준응력 산정법 중에서 IIW 및 DNV규칙에 의한 HSS 산정 및 실험 결과를 이용한 비교 분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접비드형상을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해서 작은 HSS값을 주는 것을 알 수 있었다.
- 2) HSS 산정에 있어, 적용규칙에 따른 차이는 크게 나타나지 않으며, 또한 유한요소해석시의 사용요소 크기에 따른 차이도 우려할 만한 수준은 아니다.
- 3) 용접비드의 고려, 즉 용접각장 및 용접부형상에 대한 적절한 고려가 수행된다면, Solid 혹은 Shell요소 어느 쪽을 사용해도 기준응력 산정 결과는 유사하다고 판단된다. 이는 요소선택 보다는 용접비드의 고려가 결과의 신뢰성에 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 대한용접학회 강도분과위원회의 Round -Robin Study의 일부로 수행된 내용이며, 시험편제공을 해주신 현대중공업 및 대한용접학회 강도분과위원들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Iikka Poutiainen, Pasi Tanskanen, Gary Marquis, "Finite element methods for structural hot spot stress determination - a comparison of procedures", International Journal of Fatigue, 2004, vol 26, pp 1147-1157.
2. Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. Document XIII-1539-96 / XV-845-96. Paris: International Institute of Welding, 1996.