

용접구조물 피로해석 적용을 위한 기준응력 비교 연구

A Benchmark study on the reference stress to supply fatigue analysis of welded structures

서 정 관* 최 흥 민* 이 제 명** 백 점 기** 김 명 현** 김 현 수***
Seo, Jung-Kwan Choi, Hong-Min Lee, Jae-Myung Paik, Jeom-Kee Kim, Myung-Hyun Kim, Hyun-Su

ABSTRACT

Various type of welded joints of the ship structure have been examined numerically and experimentally under bending and tensional cyclic constant-amplitude loading. Cyclic loading on structures can produce failures not readily predicted by conventional static analysis. The aim of a benchmark study is achieved with a generalization of the reference stress concept. Also different methods and procedures exist for the computation of the welded structure hot-spot stress a welded joints. These are either based on the extrapolation of stresses at certain reference points on the plate surface (or edge) close to the weld toe-as known from experimental investigations- or on the linearization of stresses in the through-thickness direction. In the present paper, the different methods are reviewed and applied to four different details in order to compare the methods with each other and to illustrate the differences.

1. 서 론

부유식구조물이나 고정식구조물은 외부 환경의 영향을 고려해서 설계되어야한다. 이러한 환경적인 영향에 끊임없는 반복적인 하중에서의 피로하중의 정확한 계측 및 해석으로 구조물의 피로설계를 해야 한다. 특히 최근 조선소 및 용접구조물건설 현장에 이루어지는 연구개발 활동의 주된 방향으로 차지하는 피로평가에서 피로해석을 위한 기준응력은 산정은 매우 중요한 기초 자료로 사용됨은 간과 하지 않을 수 없다. 이러한 대부분의 대형구조물은 용접구조물이므로 피로설계에서의 기준응력 산정방법에서 대표적인 선급인 DNV(Det Norske Veritas)규칙 및 IIW(International Institute of Welding)규칙의 산출방법에서 차이점을 보이고 있다. 따라서 피로해석 평가와 같이 용접구조물들의 특히 극한 환경에서의 피로강도 평가 및 피로설계는 반드시 정확하고 표준화된 기준응력의 산정규칙이 필요로 하고 있다.

일반적으로 용접구조물에서 응력집중이 높게 발생하는 부분으로 용접연결부를 들 수 있다. 피로 안전성 평가를 위해서는 용접부의 구조적인 형상 및 열영향부에 대한 효과가 피로강도 평가 시 크게 작용하고, 용접 비이드 선단에 작용하는 응력을 이용하여 피로강도 평가를 해야 한다. 이 중에서 용접연결부의 구조적인 형상 기인한 Hot-Spot Stress(HSS)를 이용하여 용접비드형상의 영향으로 기인한 대표적인 응력 산정이 가능하고,

* 부산대학교 조선해양공학과 대학원
** 부산대학교 조선해양공학과 교수
*** 현대중공업

또한 이는 여러 가지의 용접부의 형상학적인 문제에 대해서 통일적인 피로강도를 평가 할 수 있다^{(1),(2),(3)}

본 연구에서는 이러한 피로강도 평가에 적용을 위한 유한요소해석용 Hot-Spot Stress(HSS)평가법 대해서 용접연결부 형상의 시험체를 이용하여 용접비드 선단에서 Hot-Spot Stress(HSS)를 범용유한요소코드 (ANSYS)를 이용하여 산출하고, 또한 유한요소모델시 용접의 비드영향의 有·無를 고려하여 해석을 수행하였다. 여기에서 유한요소의 크기 및 각각의 하중 조건에 따른 DNV, IIW에 대해서 동일한 시험편에 대해서 산출법에 대해서 비교 연구 하였다⁽⁴⁾.

2. 용접부의 Hot-Spot Stress(HSS)산정법

여러 가지의 하중의 형태에 따른 용접부의 용접비드 선단에 작용하는 응력은 공칭응력이고 이는 구조적인 형상의 변화에 따라서 선형적인 응력의 분포 및 비드의 형상변화에 따른 비선형적인 증분으로 나눌 수 있다. 용접부의 비선형응력증분에 정량적으로 산출하기는 어려움이 있으므로 구조적인 형상의 변화에 따른 선형적인 응력증분인 Hot-Spot Stress(HSS)으로 나타낼 수 있다⁽⁶⁾.

Hot-Spot Stress(HSS)는 용접토우부에서 응력성분이 비선형적으로 급격하게 증가하는 구간을 제외하고는 선형적으로 증가되는 응력성분을 토우부까지 연장한 값으로 정의할 수 있다. 그러나 실제의 용접구조물에서는 구조적인 형상의 복잡해짐으로써 Fig. 1과 같이 용접부에서 용접부 끝단에서의 두점 (0.4t, 1.0t-IIW)에서의 응력값을 용접토우부까지 외삽하여 Hot-Spot Stress(HSS)응력을 구하게 된다⁽⁷⁾.

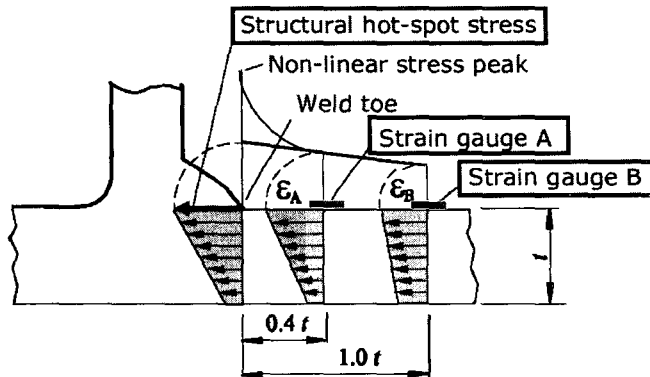


Fig.1 The estimation method of the Hot-Spot Stress by measuring strain

실험적으로는 용접비드 선단에서의 두 점의 스트레인게이지의 값으로 변형률로 계측하여 외삽법을 이용하여 용접토우부에서의 Hot-spot stress 구할 수 있다. 결론적으로 Hot-spot stress는 구조적응력집중계수와 공칭응력으로 얻을 수 있는 가상적인 응력이라 말할 수 있다.

Fig.2 예서와 같이 비드 상단의 두 계측포인트의 응력값은 유한요소 해석에 의한 수치적인 응력산정에서 요소의 종류와 크기에 따라 얻어지는 결과와 다르게 나타날 수 있다. DNV, IIW에서는 용접토우부에서의 판두께 크기로 외삽기준점에서 얻어지는 응력값으로 Hot-spot stress값과 용접비드의 영향을 고려한 경우에서의 응력값을 서로 비교하였다. 보간법에서는 선형적인 외삽법과 2차함수의 형식으로 구할 수 있고, 또한 비드선단의 4개의 계측점에서의 응력값을 이용하여 라그랑지 보간법등을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 흔히 사용되는 선형적인 외삽법을 이용하여 계산하였다.

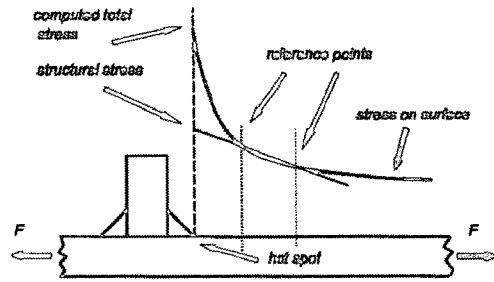


Fig.2 The estimation method of the structural Hot-Spot Stress by FEM analysis

3. Hot-Spot Stress(HSS) 재속용 해석모델

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

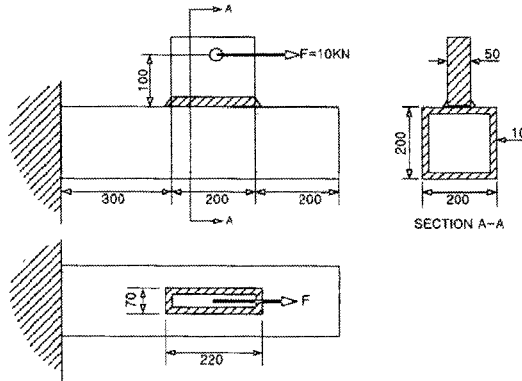


Fig.3 Specimen configuration (Type-A)

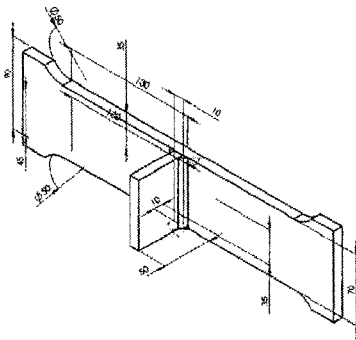


Fig.4(a) Specimen configuration (Type-B)

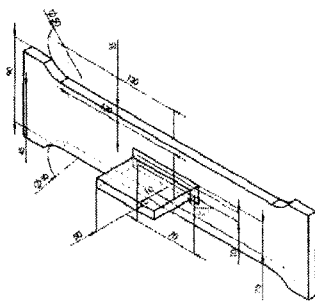


Fig.4(b) Specimen configuration (Type-C)

Fig. 3은 박스형 거더에 가셋이 붙은 형태이다. Fig. 4(a)은 가셋이 종방향으로 붙어있는 형태로 Leg-length의 길이는 각각 5mm로 하였다. Fig. 4의 시험편에 각각 인장력을 작용한 경우와 굽힘력을 작용한 두가지 형태의 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.

Fig. 5(a), Fig. 5(b)는 판에 가셋이 붙은 시험편의 치수를 나타내었다. 응력집중이 예상되는 용접토우부에서 용접비스선단 및 하단에서의 15mm와 5mm간격으로 스트레인게이를 부착하여 변형률값을 계측하였다..

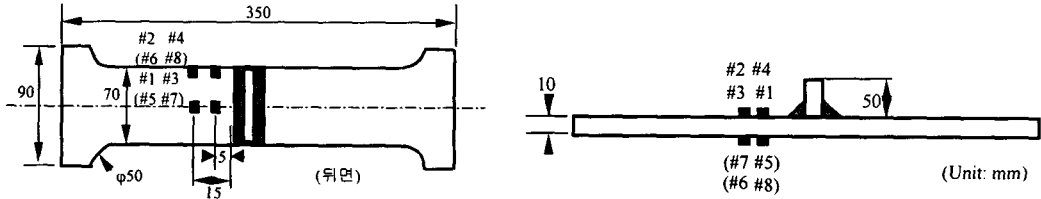


Fig. 5(a) Strain gauge locations in 5mm and 15mm distance (Type-B)

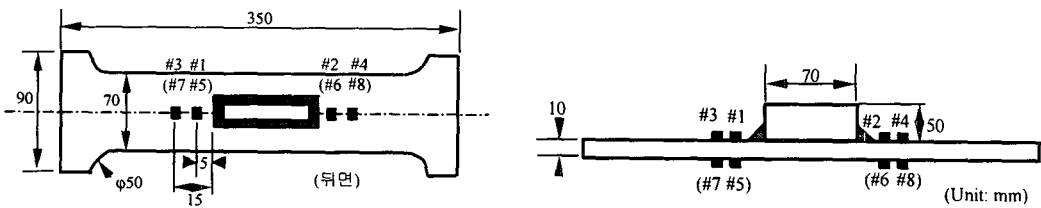


Fig. 5(b) Strain gauge locations in 5mm and 15mm distance (Type-C)

이때 하중은 인장력은 3000kgf과 굽힘력이 700kgf 하중조건으로 실험하여 계측하였다.

3.1 IIW (International Institute of Welding) 규칙

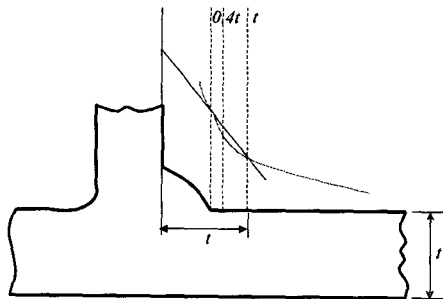


Fig.6 The estimation method of the structural Hot-Spot Stress by FEM analysis (IIW)

IIW의 는 다음과 같은 식(1)과 같이 유한요소해석에서의 Fig. 6와 같이 0.4t 와 1.0t 의 두지점에서의 하중방향에 대한 주응력 성분으로 이용하여 선형외삽법의 방법으로 구할 수 있다.

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

3.2 DnV (Det Norske Veritas) 규칙

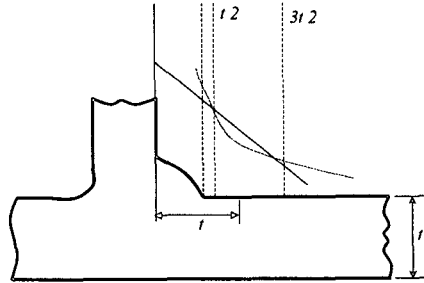


Fig.7 The estimation method of the structural Hot-Spot Stress by FEM analysis(DNV)

DnV의 HSS의 산출법은 용접토우에서의 노치영향을 제거하기 위하여 식(2)를 이용하여 Fig. 7과 같이 용접토우에서 용접토우에서 0.5t 와 1.5t 떨어진 위치에서의 응력을 사용하여 선형외삽법으로 계산한다.

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

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 10N의 힘이 가넷의 중앙부에 작용했을때의 용접비드선단에서의 인장면(Loc_A)과 압축면(Loc_B)에 분포한 응력으로 HSS를 구한 결과 이고, Table2-3 는 FEA 해석에서 구한 각각의 DnV, IIW의 HSS 값을 보여주고 있다. Table 4는 시편의 스트레인게이지의 계측값을 이용한 HSS의 계산 결과를 보이고 있다.

Table 1 Stress distribution of type-A

Type	Method	Element		Size	Weld effect	Extrapolation method	HSS(MPa)		Offset
		Shell	Solid				Loc_A	Loc_B	
TA-1	DnV		8node	t	○	○	47.36	30.88	35mm
TA-2	DnV		8node	t	○	○	49.73	37.81	0mm
TA-3	DnV		8node	0.5t	○	○	49.85	48.31	35mm
TA-4	DnV		8node	0.5t	○	○	52.72	40.45	0mm
TA-5	DnV		20node	t	○	○	47.63	39.37	35mm
TA-6	DnV		20node	t	○	○	50.47	38.95	0mm
TA-7	IIW		8node	t	○	○	62.61	52.89	35mm
TA-8	IIW		8node	t	○	○	60.98	48.17	0mm
TA-9	IIW		8node	0.5t	○	○	50.42	40.90	35mm
TA-10	IIW		8node	0.5t	○	○	52.63	40.24	0mm
TA-11	IIW		20node	t	○	○	66.24	56.67	35mm
TA-12	IIW		20node	t	○	○	64.47	51.39	0mm
TA-13	DnV	8node		t		○	133.50	116.78	0mm
TA-14	DnV	8node		0.5t		○	107.14	94.22	0mm
TA-15	Dnv	4node		t		○	152.81	138.31	0mm

TA-16	DnV	4node		0.5t		○	129.84	111.29	0mm
TA-16	IIW	4node		t		○	154.64	135.53	0mm
TA-17	IIW	4node		0.5t		○	154.56	133.15	0mm
TA-18	IIW	8node		t		○	135.64	118.70	0mm
TA-19	IIW	8node		0.5t		○	126.96	110.72	0mm

Table 2 Stress distribution of type-B

Type	Method	Element		Size	Weld effect	Extrapolation method	HSS(MPa)	Offset
		Shell	Solid					
TB-1	DnV		20node	t	○	○	42.4	35mm
TB-2	DnV		20node	t	○	○	44.2	0mm
TB-3	DnV		8node	0.5t	○	○	44.2	35mm
TB-4	DnV		8node	0.5t	○	○	45.8	0mm
TB-5	DnV		20node	0.5t	○	○	45.8	35mm
TB-6	DnV		20node	0.5t	○	○	44.0	0mm
TB-7	IIW		20node	t	○	○	43.1	35mm
TB-8	IIW		20node	t	○	○	43.2	0mm
TB-9	IIW		20node	0.5t	○	○	41.6	35mm
TB-10	IIW		20node	0.5t	○	○	41.6	0mm
TB-11	IIW		8node	0.5t	○	○	43.9	35mm
TB-12	IIW		8node	0.5t	○	○	44.8	0mm
TB-13	DnV	4node		t		○	47.8	35mm
TB-14	DnV	4node		t		○	41.9	0mm
TB-15	DnV	4node		0.5t		○	47.0	35mm
TB-16	DnV	4node		0.5t		○	41.8	0mm
TB-17	DnV	8node		t		○	46.8	35mm
TB-18	DnV	8node		t		○	41.8	0mm
TB-19	DnV	8node		0.5t		○	43.7	35mm
TB-20	DnV	8node		0.5t		○	41.8	0mm

Table 3 Stress distribution of type-C

Type	Method	Element		Size	Weld effect	Extrapolation method	HSS(MPa)	Offset
		Shell	Solid					
TC-1	DnV		20node	t	○	○	45.9	35mm
TC-2	DnV		20node	t	○	○	56.0	0mm
TC-3	DnV		8node	0.5t	○	○	46.2	35mm
TC-4	DnV		8node	0.5t	○	○	56.3	0mm
TC-5	DnV		20node	0.5t	○	○	46.4	35mm
TC-6	DnV		20node	0.5t	○	○	54.6	0mm
TC-7	IIW		20node	t	○	○	45.8	35mm
TC-8	IIW		20node	t	○	○	55.4	0mm
TC-9	IIW		20node	0.5t	○	○	46.3	35mm
TC-10	IIW		20node	0.5t	○	○	55.2	0mm
TC-11	IIW		8node	0.5t	○	○	46.7	35mm
TC-12	IIW		8node	0.5t	○	○	57.4	0mm
TC-13	DnV	4node		t		○	52.3	0mm

TC-14	DnV	4node		0.5t				○	52.9	0mm
TC-15	DnV	8node		t				○	57.5	0mm
TC-16	DnV	8node		0.5t				○	50.6	0mm
TC-17	IIW	4node		t				○	60.6	0mm
TC-18	IIW	4node		0.5t				○	63.1	0mm
TC-19	IIW	8node		t				○	56.7	0mm
TC-20	IIW	8node		0.5t				○	54.2	0mm

Table 4 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

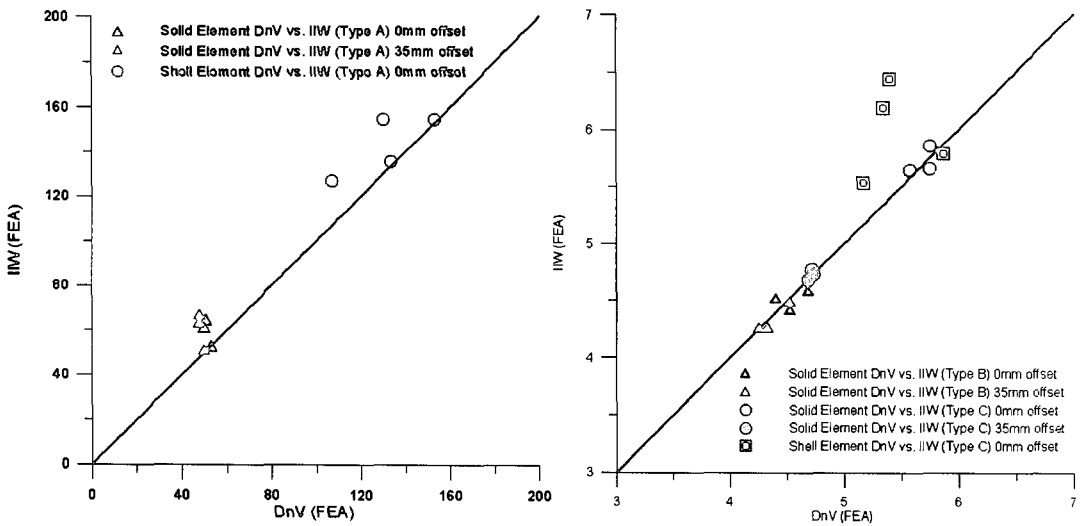


Fig.8 The Comparison of DnV vs. IIW method of FEM analysis

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. 결론

현재 크게 두가지로 나뉘어지는 IIW, DNV의 평가법을 이용한 Hot-Spot Stress(HSS)의 용접부의 기하

학적인 형상영향에 대해서, 요소의 크기, 요소의 종류, 계측위치 그리고 실험결과를 이용하여 비교하였다.

여기서 크게 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) Weld 형상을 고려한 경우가 Weld 형상을 고려하지 않은 모델에 비해서 작은 Hot-Spot Stress(HSS)값을 나타내는 것을 알 수 있었다.
- 2) Hot-Spot Stress(HSS)는 Solid 요소가 Shell 요소보다 작은값을 내는 것을 알 수 가 있었고, 요소의 종류에서 절점의 개수가 많은 것에 비해 적은 것이 Hot-Spot Stress(HSS)값이 작게 나오는 것을 알 수 있다.
- 3) Hot-Spot Stress(HSS)는 요소는 크기(0.5t~1.0t)에 대해서는 크게 작용하지 않는 것을 알 수 있고, 또한 DNV와 IIW의 서로 다른 산출법에 대한 해석결과는 크게 차이는 보이지 않으나 1)경우에서만 편차를 보이고 있다.
- 4) 용접토우부를 고려한 경우에는 HSS가 실험에서의 값과 비슷하게 결과를 보이고 있으나, 토우를 고려하지 않은 유한요소해석을 이용한 평가법에서는 실험에서의 값과 편차를 보이는 것을 알 수 있었다.

Hot-Spot Stress(HSS)의 응력산정법에서는 각각의 적용방법에서의 차이는 보이지 않으며, 또한 요소의 크기에서는 크게 차이점을 나타나지 않았고 이는 용접의 각장과 Weld만 고려해준다면 Solid와 Shell요소를 사용해서 피로강도 평가시의 기준응력 산정에 도움이 될 것이라고 사료 된다. 이에 더해 각각의 요소의 크기 및 요소의 종류에 대해서 정밀한 응력산정법에 대한 고찰이 또한 필요하고 범용유한요소코드의 응력레벨 또한 비교해야 할 문제이다.

후 기

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

참고 문헌

1. Iikka Poutiainen, Pasi Tanskanen, Gary Marquis, "Finite element methods for structural hot spit stress determination—a comparison of procedures", International Journal of Fatigue, 2004, vol 26, pp 1147-1157.
2. P.Carter, "Analysis of cyclic creep and rupture. Part1: bounding theorems and cyclic reference stresses", International Journal Pressure Vessels and Piping, 2004(In press).
3. Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. Document XIII-1539-96/XV-845-96. Paris: International Institute of Welding, 1996.
4. Maddox SJ. Fatigue strength of welded structures. Cambridge: Abington Publishing; 1991.
5. RadajD, Sonsino CM. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Cambridge: Abington Publishing; 1998.
6. Dong P, Hong JK, Cao Z. A mesh-insensitivity structural stress procedure for fatigue evaluation of welded structures. IIW doc. XIII-1902-01/XV-1089-01. International Institute of Welding; 2001.
7. 한정우, 한승우, 신병천, "Hot-Spot 응력을 이용한 용접 대차프레임 부부구조의 피로강도평가", 대한기계학회 1998년도 춘계학술대회 논문집 A, 1998, pp.202-207.