

ADINA & WINLIFE 활용한 압력용기 용접부 피로파괴 해석

최병학*[†] · 이범규* · 심종현* · 박찬성** · 김진표** · 박남규**

*강릉원주대학교 신소재금속공학과

**국립과학수사연구원

Effect of Weld Elastic Modulus on Simulation of Stress Concentration and Fatigue Life for Boiler Vessel

Byung Hak Choe*[†], Bum Gyu Lee*, Jong Heon Shim*, Chan Sung Park**,
Jin Pyo Kim** and Nam Gyu Park**

*Dept. of Ad. Metal & Materials Sci. Eng., Gangneung-Wonju National Univ., Gangneung 26403, Korea

**Forensic Engineering Department, National Forensic Service, Wonju 26460, Korea

[†]Corresponding author : cbh@gwnu.ac.kr

(Received March 15, 2016 ; Revised March 30, 2016 ; Accepted June 27, 2016)

Abstract

The aim of this study is to consider effect of weld elastic modulus on simulations of stress concentration and fatigue life for pressure vessel. The investigations include analysis with ADINA and WINLIFE softwares for whole body model about using condition of the boiler vessel. Values of weld elastic modulus were divided by 5 steps in butt weld area of the boiler vessel body. The stress concentration of the butt weld more was increased in case of higher elastic modulus of weld area because of higher difference of material properties between matrix and weld. It was concluded that the fatigue lives were decreased along increasing stress concentration due to high elastic modulus of weld. The matrix microstructure was estimated as pearlitic structure of α -ferrite and pearlite. And the microstructures of welds along 5 steps of elastic modulus were estimated as bainitic fine pearlite and martensite as increasing elastic modulus.

Key Words : Weld elastic modulus, Whole body model, Stress concentration, Fatigue life, Microstructure

1. 서 론

보일러 압력용기는 물을 끓이고 고온·고압의 스팀을 배관으로 배출하는 역할을 한다. 가정과 민간설비 (관공서, 병원, 빌딩 등) 보일러 용기는 대략 최대 20기압의 압력으로 상온부터 약 200°C까지 반복되는 가열주기로 작동한다. 따라서 보일러 용기는 고온의 순간압력이나 열피로의 반복변형에 의해 파열될 가능성이 있다¹⁾.

보일러 파열사고는 국내외에서 빈번하게 발생되며 인명사고로 이어지는 경우가 많다. 보일러 파열사고 원인은 유증기 발생, 밸브작동결함, 전기장치문제 등 다양하지만, 상당 부분이 압력용기 파열에 기인하는 것으로

보고된다. 특히 파열은 용기 용접부에 집중적으로 발생되는데 기공, 언더컷 등 다양한 용접결함이 관련된다. 또한 용접재질 문제로 파열에 이를 수 있으며 용접 후 냉각과정 중 결정되는 미세조직 요인이 중요한 파열원인이 될 수 있음을 의미한다²⁾.

일반적으로 보일러 용기와 같은 압력용기는 전체구조 모델 (whole body model)로 모사 해석된다. 이것은 국부구조모델 (local body model)의 경우 임의로 설정된 구속조건에 따라 해석결과가 큰 차이를 보이고, 이것이 현실을 모사하기에 오차가 크기 때문이다. 따라서 국부구조모델은 전체구조모델 해석을 우선 실행한 후, 구속조건을 맞춰 해석해야 한다³⁾.

압력용기의 전체구조모델은 용기 기반 지지대로부터

용기 구조물을 접합한 용접부 구조해석을 포함한다. 용기 용접부는 실제 모재재질에 비하여 약 1.2~1.5배 강도로 설계되는데, 용접재질에 강화 원소가 첨가되어 이것이 가능하다.^{1,2)} 따라서 이론적으로는 압력용기 용접부 파열은 어려울 수 있지만, 실질적으로는 용접결합부의 잔류응력과 응력집중으로 용접부의 파열은 위험요소로 분류된다³⁻⁸⁾.

본 사고해석에서는 보일러 압력용기 용접부 파열을 가정하여, 다양한 용접재질 강성 효과를 모사해석 요인으로 하였다. 용접부에 불건전한 경화 미세조직이 유발된 것을 가정하여 이 부분에 걸리는 응력집중효과 및 피로수명 영향성을 분석하였다. 즉 기본 재질구조에 용접재질 요소인 미세조직 영향성을 해석에 더하여 압력용기 파열효과를 검증하고자 한 것이다. 용접부 해석에는 전체구조모델이 적용되었으며 응력집중효과가 이후 열피로수명에 미치는 영향까지 파악하고자 하였다. 이를 통해 보일러 압력용기 용접부 건전성 평가와 용접공정시 유발될 수 있는 용접재질의 경화 미세조직 영향성을 평가하고자 하였다.

2. 해석 및 실험방법

2.1 유한요소 모델 및 해석조건

본 사례연구에서는 ADINA 프로그램을 이용하여 보일러 압력용기 용접부 응력해석을 전체구조모델로 수행하였다. 또한 ADINA 응력해석을 토대로 WINLIFE 프로그램을 이용하여 용접부에 걸리는 열피로해석을 수행하였다.

압력용기 설계치수는 일반 치수의 도면을 활용하였는데, 용접부를 포함한 개략도는 Fig. 1과 같다. 용기의 치수는 일반 구조로 임의 설정한 것이며, 두께는 모든 부분을 5mm 하였다. 용기 용접부 응력 및 피로해석을 위하여 헤드부 버트용접과 노즐부 필렛용접을 가상하여 설정하였다. 기타 압력용기 받침대/고정단 부분에 필렛 용접부가 존재하지만 피로수명에 영향을 미치지 않으

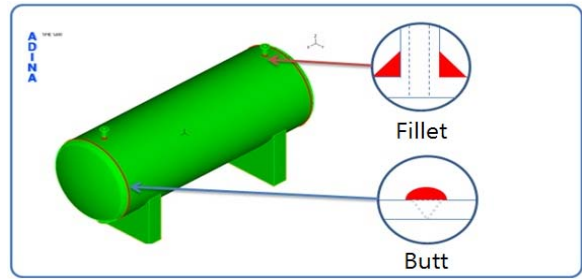


Fig. 1 Pressure vessel dimension with (a) fillet and (b) butt weld shapes.

로 본 해석에서는 제외하였다.

압력용기 해석조건은 용기 사용분위기를 고려하여 Table 1과 같이 설정하였다. 용기 내부는 물 또는 스팀으로 채워져 있는데, Table에서 최대 스팀온도인 200℃로 하고 용기 외부는 어느 정도 내부로부터 받는 영향을 고려하여 60℃로 가상 설정한 것이다. 또한 사용압력은 압력용기의 일반 사용의 최대응력 20bar (2MPa)를 고려한 것이다. 응력 해석에서 고정위치는 용기하부의 다리를 고정단 (fix position)으로 하였는데, 고정단은 충분한 설계 안전계수를 반영한 것으로 가정하여 이 부분에 대한 응력해석은 수행하지 않았다.

압력용기 용접부 재질조건은 용접 후 냉각상태를 고려하여 Table 2와 같이 설정하였다. Table에서 모재와 용접봉은 일반 재질인 SA516-70과 ER70 S-6급으로 설정하였으며, 용접 후 급냉조건을 가정하여 5단계 경화조건으로 가상 설정하였다. 이것은 용접 후 냉각조건에 따르는 재질경화를 고려한 조건으로써, 수냉의 급속한 냉각인 경우를 최대 경도의 Case 05, 서냉인 경우

Table 1 Stress simulation conditions

Conditions	Location	Value
Temperature	Inside	200℃
	Outside	60℃
Stress	Inside	20bar (2MPa)
Fix Position	Vessel Leg	

Table 2 Material properties of base and weld metals

Properties	Unit	Base Metal	Weld Metal				
			Case01	Case02	Case03	Case04	Case05
Elastic Modulus	GPa	210	231	420	630	1,050	2,100
Poison Ratio	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Density	kg/m ³	7800	7800	7800	7800	7800	7800
Coefficient Thermal Expansion	10 ⁻⁶ m/m-℃	12	12	12	12	12	12
Heat Capacity	J/g·℃	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
Thermal Conductivity	W/m·K	52	52	52	52	52	52

를 최소경도인 Case 01 단계로 설정하고 그 중간 단계를 Case 02 ~ 04 로 분류한 것이다. 이는 열영향부 (HAZ, heat affected Zone)를 포함하는 용접부 재질이 최대 경도인 full 마르텐사이트 (Case 05), 최소 경도인 펄라이트 (Case 01) 및 중간 단계인 파인 펄라이트 혹은 베이나이트 (Case 02 ~ 04)의 미세조직 특성을 반영한 것이다.

2.2 미세조직 분석

Table 2에 해당하는 재질 경화단계를 확인하기 위하여 미세조직을 관찰하였다. 미세조직은 최소 경화단계인 Case 01 및 최대 경화 이하인 Case 02~03 단계에 해당되는 것이다. 이것은 탄성계수가 1000Gpa를 초과하는 미세조직 유도가 어렵기 때문이다. 모재 (A516- 70) 및 용접부 (ER70 S-6) 미세조직은 나이탈 (5% 질산 + 메타놀) 에칭액을 사용하여 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 해석결과

3.1 최대응력값 해석

압력용기 응력해석을 위한 사용분위기와 고정단 조건은 Fig. 2와 같다. 그림에서 용기 사용조건은 내부 온도 최대 200℃와 내부압력 최대 20bar로 설정되었으며 고정은 용기 하부 Leg 지점에 지정된 것을 알 수 있다.

압력용기 3D 모델링과 메쉬 생성은 Fig. 3 과 같다.

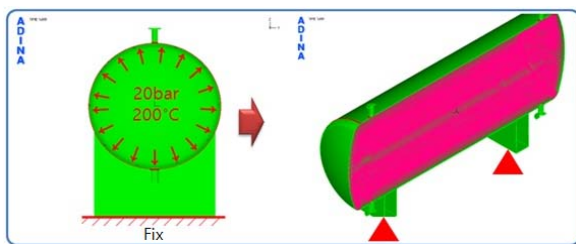


Fig. 2 Fixed and using conditions of pressure vessel

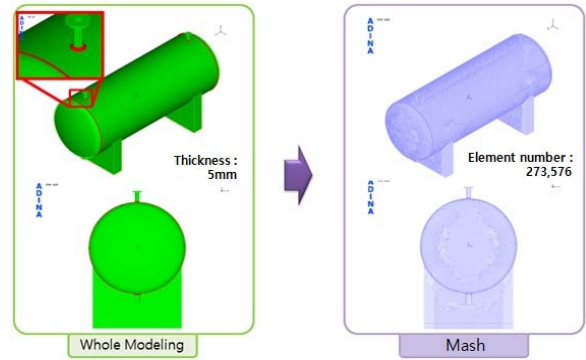


Fig. 3 3D modeling and meshing for vessel whole modeling

응력해석은 전체구조모델 (whole body model)로 실행하고자 용기 전체구조에 대한 3D모델링과 메쉬 생성 작업을 수행하였다. 이때 생성된 메쉬는 273,576개이다.

압력용기 용접부 재질조건인 Table 2와 같은 5단계 경화조건에 대한 ADINA 응력해석 결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 최대응력집중부는 용기의 좌측 상부와 우측 원주방향을 따라서 발생하는 것이 확인되는데, 모든 응력집중부는 용접부에 해당된다. 여기에서 최대응력값은 주응력과 전단응력을 총괄적으로 포함하는 Von-Mises 응력값에 해당된다.

특히 용접재질 경화를 가정한 5단계의 경화조건에서 경화를 대표하는 탄성계수가 클수록 최대응력값이 커지는 것을 알 수 있다. 이것을 Table 3에 정리하였다. Table 에서 탄성계수가 일반 용접재질인 1단계와 일반용접재질의 약2배에 해당되는 2단계까지 최대응력이 각각 651MPa 및 690MPa로 압력용기 허용응력 범위에 속하지만, 이보다 큰 3,4,5 단계의 경우 최대응력이 허용응력을 초과하는 것을 알 수 있다.

이와 같이 용접재질 경화가 클수록 최대응력값이 증가하는 것은, 용접재질과 모재재질의 탄성계수차이가 클수록 응력집중이 증가되는 현상과 일치한다³⁻⁸⁾. 특히 용접부 현상이 버트나 필렛의 경우 Fig. 1과 같이 모재 접촉면에서 노치구조로 형성되었기 때문에 이러한 응력 집중은 심화되는 것으로 볼 수 있다.

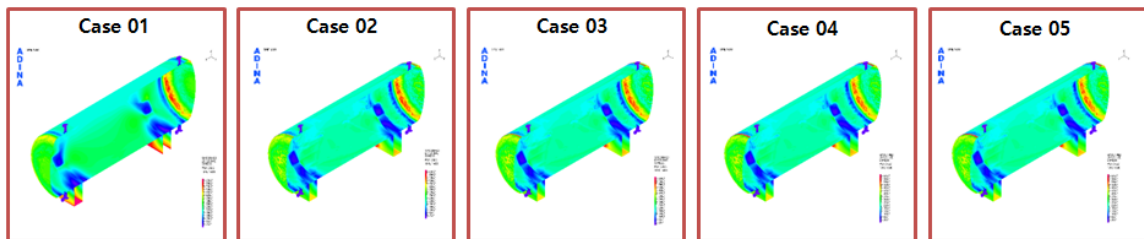


Fig. 4 Stress simulation results along hardened properties of weld metal

Table 3 Maximum stresses of weld metal conditions

Case	Material condition	Maximum stress (Von-mises stress)
#01	Elastic modulus : 231Gpa	650.9MPa
#02	Elastic modulus : 420Gpa	689.9MPa
#03	Elastic modulus : 630Gpa	1.011MPa
#04	Elastic modulus : 1050Gpa	1,557MPa
#05	Elastic modulus : 2100Gpa	2,927MPa

용접재질의 경화란 용접금속이 용접후 냉각되는 과정에서 결정되는 기계적 물성으로 볼 수 있다. 용접부는 냉각과정 중에 급냉조건인 경우 최상으로 경화된 마르텐사이트 조직을 유발시키는데 이것은 본 연구에서 제시한 Table 2의 경화단계중 3단계 이상으로 예측된다. 용접부 냉각과정 중에 서냉조건인 경우 기본 모재 및 용접재질인 펄라이트조직인데 이것은 Table 2의 경화단계 중 1단계로 볼 수 있다. 그리고 용접부 냉각과정의 급냉과 서냉의 중간정도인 빠른 냉각조건에서는 경화단계 2단계의 파인펄라이트 (또는 베이나이트) 조직 구성으로 예상 할 수 있다.

Table 3의 최대응력값 해석결과에 의하면 경화 3단계 이상인 용접재질의 마르텐사이트 조직상태에서는, 용접부와 모재 탄성계수차이가 너무 커서 응력집중에 의한 최대응력값이 모재 강도를 초과하여 파열에 이르는 것을 알 수 있다. 이에 비해 경화 2단계의 용접재질 파인 펄라이트나 경화 1단계의 펄라이트 조직 상태에서 최대응력값은 모재 강도 이하로 계산되어 적합한 용접방안으로 추천된다.

그러나 이결과를 보면 경화 5단계의 모든 경우 최대응력값이 SA516 재질 항복-인장강도에 접근하여 압력용기 사용에 문제가 될 수 있다. 따라서 용접후 후열처리를 통해 용접부 모재 및 용접금속 경화도를 낮출 필요가 있다고 판단할 수 있다.

3.2 피로수명해석

앞장의 압력용기 최대응력 해석결과를 활용하여 WINLIFE 프로그램으로 용기의 피로수명을 해석하였다⁴⁾. 먼저 ADINA 열-구조의 응력해석 최대응력값이 얻어진 용접부 지점의 모든 절점을 지정하여 이에 대한 해석이 수행되었다. 그리고 각 절점에서는 최대 응력과 최대 온도 변화에 대한 주응력과 전단응력의 6축 응력값이 대입되고, 여기에 반복응력이 적용되어 모사 피로시험이 수행된 것이다. Fig. 5는 최대응력값 지점의 한 절점에서 구해지는 압력과 온도에 대한 6축 응력 계산결과를 보여 주는 것이다.

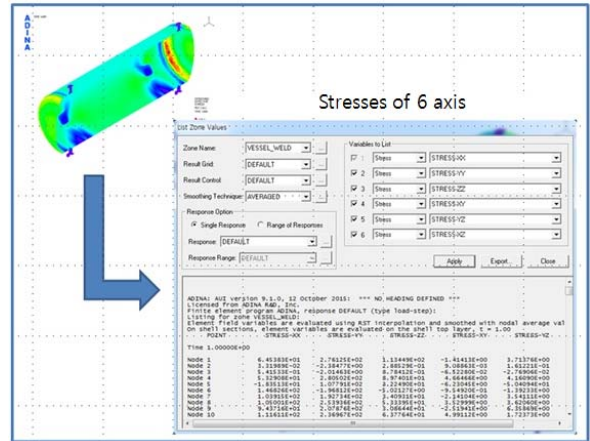


Fig. 5 Stresses of sixaxis in a node presented by maximum stress value

ADINA 열-구조해석으로부터 유도된 최대응력값은 그 지점의 주응력과 전단응력을 포괄적으로 포함하는 Von-Mises 응력에 해당된다. 이 응력값은 각 절점의 응력을 대표할 수 없으며, 실제 절점의 모든 주응력과 전단응력보다 크게 구해진다. 따라서 압력용기에 부가되는 반복하중의 피로응력을 모사하기 위해서는 절점의 6축 응력인 σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{zx} 값들이 대입되며, 본 해석에서는 Fig. 5와 같이 용기 용접부 최대응력 지점의 절점에 대한 6축 응력값들이 대입되어 WINLIFE 프로그램 피로수명 모사가 실행된 것이다.

WINLIFE 해석에서 각 절점에 대한 6축 응력값들은 적합한 피로 반복응력폭을 결정하는 변수가 된다. 즉 이들 응력값들에 대한 WINLIFE 피로모델식으로부터 SN곡선 (Stress-Number of cycles)에 대입될 응력폭이 지정되고 피로수명을 구하는 방식이다⁴⁾.

재질의 SN곡선은 WINLIFE 라이브러리를 이용하여 구한다. 여기에는 기본 강종과 Modified Data가 수록되어 있어 활용이 용이하다. 본 해석에서는 모재 강종인 A516 (DIN 1.6523)의 SN곡선을 이용하였다. 용접재질인 ER70급은 모재 SA516에 비하여 약 1.2~1.5배 강성이 크므로 피로 파열 가능성에서 배제된다. Fig. 6은 모재강종인 SA516의 SN곡선을 보여 주는 것이다.

압력용기 피로수명은 용접부 지점의 각 절점 6축 응력값으로부터 도출되는 응력폭과 라이브러리의 A516 SN곡선으로부터 구해진다. 즉 산출된 응력폭에 대한 예상 피로수명은 SN곡선에서 구해질 수 있는데, 이것은 Fig. 6의 y축 상에 6축 응력 계산값으로 도출된 응력폭이 적용되면 x축 상의 피로수명이 정해지는 방식이다.

Table 4는 이와 같은 방식으로 구해진 경화 1단계 및 경화 2단계에 대한 피로수명을 나타낸다. Table에서

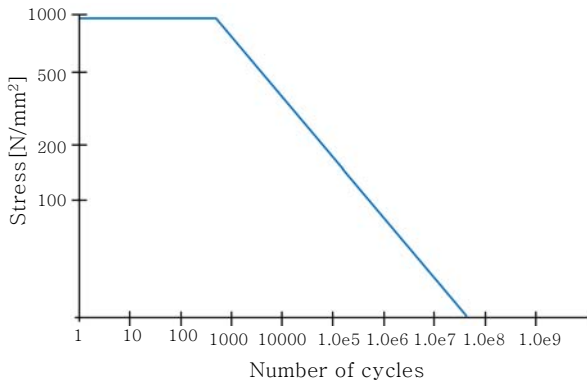


Fig. 6 SN curve of A516 base metal [S-N Curve, DIN 1-6523]

Table 4 Fatigue life simulation of Case01, Case02 and Case05

Case & Microstructure	Elastic Modulus	Fatigue Life
Case 01 [Pearlitic]	231GPa	57,046 cycles
Case 02 [Bainitic]	420GPa	19,024 cycles
Case 05 [Martensitic]	2,100GPa	Under 1 cycle

압력용기 용접부가 별다른 경화가 없는 용접재질 탄성계수 231GPa 정도인 경우 (Case 01) 피로수명은 57,046회이고, 용접부 미세조직이 상부 베이나이트 (또는 마르텐사이트급) 경화단계인 평균탄성계수 420GPa 정도인 경우 (Case 02) 피로수명이 19,024회인 것을 알 수 있다. 이 결과는 용접부 미세조직이 베이나이트로 경화된 경우 응력집중 효과가 크고 이에 따라 반복하중 적용에 의한 피로수명이 감소하는 것을 보여 준다⁹⁻¹³⁾. 물론 용접재질이 마르텐사이트급으로 최대 경화된 경우 (Case 05) 피로수명 감소폭은 훨씬 크게 되는데, 실제 피로수명 모사에서는 1회 미만으로 계산되어 해석에 큰 의미가 없었다.

4. 고 찰

보일러 압력용기를 몸체 원주방향 버트용접과 노즐부 필렛용접을 가상하고, 사용조건을 200℃/20bar로 설정하여 최대응력 및 피로수명을 모사 예측한 결과 버트용접부 최대응력 집중과 이 지점의 피로수명이 구해졌다. 여기에 변수로 준 것은 용접부 경화단계이다. 본 해석의 Table 2에서 용접부 경화를 5단계로 하여 탄성계수를 231→420→630→1050→2100 GPa로 설정한 것은, 용접부 경화요소를 실제 용접부 재질강성 변화정

도보다 과도하게 예상하여 응력집중을 모사한 것이다. 그런데 강재질만으로 경화 3단계 이상의 높은 탄성계수를 유추할 수는 없다. 즉 강재질의 최고 경화단계인 마르텐사이트 조직도 경화 2단계 이하에 머문다. 그런데 본 해석에서 경화 3단계 이상에 대한 응력집중효과를 모사한 것은 강재질 자체의 경화효과와 더불어 용접부 잔류응력까지 고려한 것으로 볼 수 있다. 즉 용접부 특별 지점에 형성되는 잔류응력은 탄성계수 630GPa 이상의 최고 강성을 동반하고 이에 따른 응력집중이 배가되는 것으로 예측하는 것이다.

압력용기 용접부 경화 1단계부터 경화2단계에 이르는 탄성계수 231GPa~420GPa의 해당 미세조직은 Fig. 7과 같다. 그림은 버트용접부와 필렛 용접부를 보여주는 것인데, 모재인 SA516 미세조직은 입도가 40~50μm 크기인 ASTM No.6 정도의 일반적인 펄라이트 (페라이트+펄라이트)이며, 용접 ER70 재질은 조대한 입도로 구성된 주조·응고조직인 것으로 확인된다.

그런데 용접부 응력집중 부위는 모재와 용접부 경계인 열영향부 (HAZ, heat affected zone)에 형성되며 이 부분에 대한 미세조직은 대략 Fig. 8과 같다. 그림은 HAZ부에서 용접 후 냉각속도에 따라 형성 가능한 미세조직을 보여 주는 것이다. 용접부 경화 1단계로 모사되는 미세조직은 Fig. 8(a)와 같이 파인펄라이트로 대표되는 것인데, 이것은 수 μm 이하의 짧은 Fe₃C (시멘타이트) 석출조직이다.

용접재질 측면에서 베이나이트를 포함하는 파인펄라

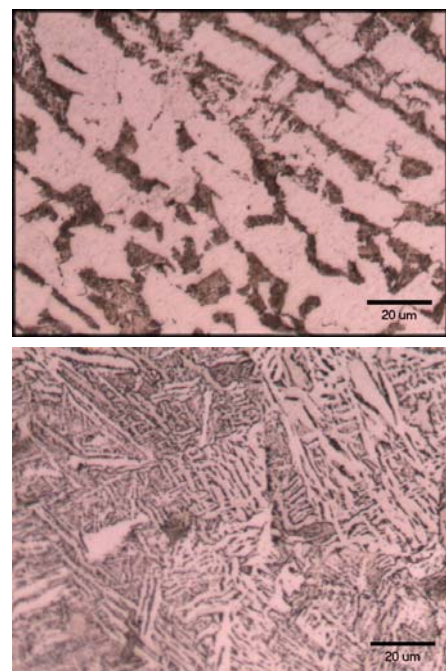


Fig. 7 Microstructures of base metal (A516) and weld metal (ER 70 S-6)

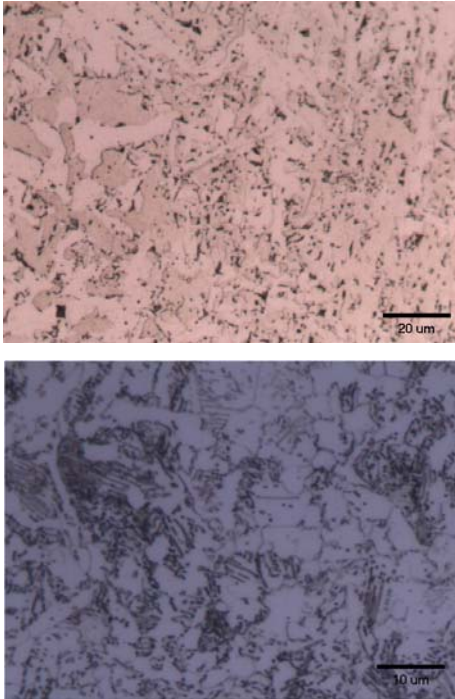


Fig. 8 Microstructures of HAZ in weld : (a) fine pearlite and (b) bainite

이트는 본 해석의 경화 1단계와 경화2단계 사이에 존재한다고 볼 수 있다. 이것은 Fig. 8(b)와 같이 $1\mu\text{m}$ 이하 Fe_3C 석출의 경우 베이나이트로 볼 수 있으며 이것도 파인펄라이트 영역에 속한다고 볼 수 있다. 이 조직은 SA516 모재조직인 일반 펄라이트 조직보다 1~2배 정도 경화된 것으로서, 용접부 응력집중 요인이 된다. 이에 비해 용접 후 급냉조건에서 생성되는 마르텐사이트는 경화2단계 이상에 존재한다고 보여 진다. 또한 이 조직은 A516 모재조직인 펄라이트에 비해 2배 이상 경화된 조직으로써, 용접부에 심각한 응력집중을 유발한다. 또한 금속재질 측면 외에 용접시 구조물에 구속된 잔류응력은 경화단계 3단 이상의 모재강성보다 몇 배 큰 강성으로부터 유발될 수 있으며, 이로 인해 최대응력이 재질 강도를 훨씬 초과할 수 있는 것이다¹⁴⁻¹⁶⁾.

압력용기 용접부의 경화3단계 이상은 물론이고 경화 1,2단계에서도 열-구조 응력해석의 최대응력값은 600Mpa 이상으로써 재질사용 허용한도에 거의 이른다. 따라서 본 해석결과에 따른다면 압력용기 용접부는 모든 경화 단계에서 후열처리가 가해져야 함이 추천된다. 즉 용접부에 대해 일정 온도로 가열 유지를 통해 용접재질을 연화시키는 노력이 필요하다. A516-ER 70 S-6 재질의 경우 약 600°C 에서 후열처리하는 것이 적당한데, 이 온도에서는 Fe_3C (시멘타이트) 석출과 성장이 이루어져 재질을 연화시키는 역할을 담당한다. 이것은 “베이나이트→파인펄라이트” 및 “마르텐사이트→템퍼드 마르텐사

이트” 변화되는 과정을 일컫는다. 이에 재질의 강성은 저하되는 효과를 갖는다.

압력용기의 용접후 후열처리는 이러한 재질측면의 강성저하 외에도 용접에 의한 구속 응력인 잔류응력을 저하시키는 역할을 한다¹⁷⁻²²⁾. 본 해석결과에 따르면 모재와 용접재질의 강성차이인 경화단계 별로 응력집중효과가 큰 것으로 모사되는데, 특히 경화3단계 이상에서는 재질측면과 더불어 용접부 잔류응력이 개입된 것이고 이때 최대응력값이 극단적으로 커지는 것을 알 수 있다.

ADINA 프로그램으로 해석되는 용접부 최대응력은 WINLIFE 프로그램에 연계되어 피로수명으로 해석되는데, 최대응력값이 클수록 피로수명은 저하되는 결과를 보인다. 이것은 최대응력값이 클 때 절점부 주응력/전단응력의 응력축값이 커지며 이로부터 유도되는 응력 폭의 SN곡선상 피로수명이 감소되는 것은 일반적인 결과이다. 따라서 압력용기 사용의 피로수명을 향상시키기 위해서는 최대응력이 유도되는 용접부에 대해 후열처리를 통한 강성 감소가 필요하다.

지금까지 본 해석의 결과는 압력용기 버트와 필렛 용접부에 대한 일반 형상을 고찰한 것이다. 그러나 용접부는 대체로 결함 형상을 포함한다. 특히 용접부 토우 지점의 언더컷은 용접부 응력집중을 배가시키는 요인이 되는데, 본 해석을 비롯한 일반의 전체구조모델 (whole body model)로서는 모사가 어렵다. 이러한 용접결함이 배제된 상황에 피로해석은 피로수명이 실제보다 높게 모사될 가능성이 크다 따라서 용접부 해석에는 언더컷과 같은 응력집중 유발의 용접결함 요소에 대해서는 국부구조모델 (Local body model)로 해석방안이 고려될 필요가 있다고 보여 진다.

5. 결 론

1) ADINA를 이용한 압력용기 전체구조모델 해석으로부터 용기 원주방향 버트 용접부에서 최대응력값이 구해졌다.

2) 용접재질의 탄성계수를 경화5단계로 분류하여 응력해석한 결과, 경화1단계인 1배 용접강성과 경화2단계인 2배 용접강성의 경우 A516 재질사용 허용강도를 만족하는 것으로 구해진다. 이것은 용접부 미세조직이 파인펄라이트와 베이나이트 또는 마르텐사이트 경계에 이르는 것으로 판단된다.

3) 용접재질 탄성계수의 경화3단계 이상인 경우, 재질적인 강성증가 요소 외에도 용접후 잔류응력에 의한 강성증가가 추정된다. 이로 인해 최대응력값이 일반 강종재질 허용강도를 크게 초과하는 것으로 보여 진다.

4) WINLIFE를 이용한 압력용기 피로수명 해석은

ADINA 해석결과의 용접부 최대응력값 지점의 10개 절점으로부터 수행되었다. 각 절점의 주응력/전단응력 6축 응력이 피로 반복응력 산출에 이용된다.

5) WINLIFE 라이브러리 SN곡선으로부터 유도된 압력용기 피로수명은 용접부 경화1단계와 경화 2단계로부터 구해졌는데, 각각 53,000회 및 19,000회이다.

6) 최대응력값이 큰 경화2단계의 경우 절점 6축 응력의 피로반복응력이 클 것이며 이로부터 피로수명이 저하되는 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was supported by NFS (National Forensic Service), and Korea Institute of Materials Science, and the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (20132010500010). And the present work is a result of the project "Development of the design technologies for a 10MW class wave and off-shore wind hybrid power generation system" granted by the Ministry of Oceans and Fisheries (20130032). This Study was also supported by Gangneung-Wonju National University.

References

1. R.O. Ritchie, S. Suresh and C.M. Moss, Near-Threshold Fatigue Crack Growth in 2 1/4 Cr-1Mo Pressure Vessel Steel in Air and Hydrogen, *J. Engineering Materials and Technology*, 102, 293 (1980)
2. P. Dong and F. W. Brust, Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: A Millennium Review and Beyond, *J. Pressure Vessel Technology*, 1, 122 (2000), 329
3. D. Radaj, C. M. Sonsino and W. Fricke, Fatigue assessment of welded joints by local approaches. *Woodhead Publishing*, (2006) (2nd edition)
4. W.H. Kearns, *Welding Handbook, American Welding Society, 7th Edition*, 5 (1984), 276
5. H.S. Chang, M.G. Na and K.S. Kim, Evaluation of Residual Stress on Pipe Welded Joints Using Laser Interferometry, *J. Korean Society for Nondestructive Testing*, 34 (2014), 18
6. K. Masubuchi, Analysis of welded structures residual stress, distortion, and their consequences, *Pergamon press, Oxford*, 1 (1980)
7. P. Michaleris and A. DeBicari, Prediction of Welding Distortion, *Welding Journal*, 76, 172 (1997)
8. H.W. Lee and S.W. Kang, The Relationship between Residual stresses and Transverse Weld Cracks in Thick Steel Plate, *Welding Journal*, 225 (2003).
9. C.D. Beachern, A new model for hydrogen-assisted cracking(hydrogen "embrittlement"), *Metallurgical Trans.*, 3 (1972), 437
10. N. Bailey and M.D. Wright, Weldability of High Strength Steels, *Welding and Metal Fabrication* (1993), 389
11. H. Granjon, Met. Constr Br, *Welding Journal*, 11(1969), 509
12. M. Fermer and H. Svensson, *Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures*, 24, (2001)
13. H. Kang, A. Khosrovaneh, M. Amaya, J Bonnen, H-C. Shih, S. Mane and T. Link, Application of fatigue life prediction methods for GMAW joints in vehicle structures and frames, *SAE Technical paper 2011-01-0192*
14. J.G. Moon, J.Kor. Effects of Peak Temperature of Weld Thermal Cycle on the Microstructure and Mechanical Properties in the IRHAZ of Nuclear RPV Steel Weld, *Ist. Met & Mater.*, 37 (1999), 1000
15. J.H. Kim and E.P. Yoon, Notch Toughness and Microstructural Alterations in the Unit Heat - Affected Zone of SA 508 CL.3 Reactor Pressure Vessel Steel, *J. Kor. Ist. Met & Mater.*, 36 (1998), 1329
16. E. Weber, J. Hackh and G. Willmerding, NAFEMS Seminar on "Simulation-based Fatigue and Lifetime Predictions", *November, 2010 Germany*
17. D. Radaj, C. M. Sonsino and W. Fricke. Fatigue assessment of welded joints by local approaches, *Woodhead Publishing 2nd edition*, 1 (2006)
18. M. Fermer, M. Andreasson and B. Frodin, Fatigue Life Prediction of MAG-Welded Thin-Sheet Structures, *SAE Technical Paper 982311*, 1 (1998)
19. A. Rupp, K. Storzel and V. Grubisic, Computer aided dimensioning of spot-welded automotive structures, *SAE Technical Paper 950711*, (1995)
20. B.S. Kim, Effect of Loading Variables and Temperature on Fatigue Crack Propagation in SA508 CL.3 Nuclear Pressure Vessel Steel, *J. Korean Nuclear Soc.*, 27 (1995), 825
21. Y.S. Yang and J.W. Kim, Analysis of Weldment by Using Finite Element Method(3) - Residual Stress and Distortion in Weldment, *Journal of KWJS*, 29(4) (2011), 363 (in Korean)
22. H.S. Bang, C.S. Park, C.S. Ro, C.I. Oh and H.S. Bang, Influence of Welding Residual Stress on the Externally Loaded Welded Structure, *Journal of KWJS*, 25(6) (2007), 571 (in Korean)