

Tandem 용접을 이용한 풍력타워 원주용접부 잔류응력 특성에 관한 연구

김지선*, 김인주⁺

(Manuscript received: Aug, 29, 2012 / Revised: Oct, 18, 2012 / Accepted: Oct, 22, 2012)

A Study on Characteristic of Residual Stresses in a wind Tower Using the Tandem Circumferential Welding Process

Kim Ji Sun*, Kim In Ju⁺

Abstract

This research proposes FEM analysis for Tandem welding process used in wind tower and predicts optimal welding process to improve the stability of welded structures. Three dimensional elasto-plastic analyses are employed to evaluate thermo-mechanical behavior of residual stress and deformation during Tandem welding for different distance between two touches. To confirm the thermal distribution, Goldak's ellipse heat source model and the real size wind tower pipe model are utilized. Four different analyses are being performed, where in each case the distance between two electrode torches is being changed and residual stress and welding deformation are predicted. Depending on base material state, each case is divided into: Liquid (100mm), Austenite+Liquid (200mm), Austenite+Cementite (400mm), Pearlite+Cementite (800mm).

Key Words : Tandem welding (탄뎀용접), SAW(잠호용접), Residual stress(잔류응력), Electrode distance(극간거리), Wind tower(풍력타워)

1. 서론

화석 연료의 고갈과 기존 발전시설의 환경 문제가 점점 커지면서 친환경 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이중 풍력 발전은 가장 경제성 있는 신 재생에너지 기술중 하나이다. 풍력 발전기는 크게 풍력으로부터 에너지를 전달 받아 발전기에 전달하는 블레이드 로터, 동력전달 장치, 발전기 및 각종 전기장치가 설치되어 있는 나셀, 그리고 블레이드를 통하여 전달되는 하중과 나셀 조립체의 자중을 지지하는 타워로 구성되어 있다. 이 타워는 전체 풍력 발전기 제작비용의 20%를 차지할 정도로

고가의 설비이나 풍력 발전기 타워 제작 절차에 대한 연구가 많이 진행되어 있지는 않은 실정이다⁽¹⁾. 현재 유럽에서는 5MW 해상풍력 시스템 개발 및 설치가 다수 이루어지고 있으며, 해상 풍력 시스템 설계 및 제작에서 가장 중요한 요소기술 중 하나인 타워(Tower)은 독일의 Ambau 회사가 전체 세계 풍력 마켓의 80%를 차지할 정도로 관련기술 및 Knowhow를 보유하고 있다. 해상풍력용 타워 제작 시 핵심기술은 파이프 용접 자동화 기술이며, 생산 단가 및 품질 경쟁력을 확보할 수 있는 중요 요소기술로 인식되어 국내외에서 관련기술 확보에 집중하고 있다. 또한, 풍력 타워의 설계조건은 고유진동수, 강도해석, 피

* 한국생산기술연구원

+ 교신저자, 한국생산기술연구원

주소: 광주광역시 북구 월출동 971-35

✉ Corresponding Author E-mail: k9inju@kitech.re.kr

로해석, 좌굴해석, 플랜지 접합부 해석 등이 요구되고 있으나, 강도적으로 취약한 용접부에 대한 연구는 수행되지 않고 있는 실정이다⁽²⁾.

본 연구의 목적은 풍력타워의 용접부 주변의 열전달 및 열원 분포에 따른 잔류응력, 용접 변형 등에 대한 연구를 통해 풍력 타워 제작에 필요한 용접 공정절차를 최적화하기 위함이다.

2. 풍력 타워 용접공정 분석

2.1 Tandem 용접 공정

용접을 이용한 파이프 형태의 타워는 풍력터빈의 용량에 따라 3~4개의 섹션(section)로 구성되어진다. 한 개의 섹터는 약 40mm에 달하며, 각각의 섹션은 작은 파이프형태인 셸로 이루어진다. Fig. 1과 같이 각각의 셸(Shell) 8~15개가 모여 한 개의 섹션을 이루며 각 섹션은 플랜지(Flange)를 이용하여 조립되어진다.

풍력 타워와 같이 대형 구조물을 제작하는 대표적인 용접공정은 서브머지드아크용접(SAW: Submerged Arc Welding) 공정이다. SAW 공정은 일반 가스메탈아크용접(GMAW: Gas Metal Arc Welding)에 비해 높은 전류를 사용하며 용사를 이용하여 스펙터(Specter)를 저감하고, 산화를 방지할 수 있어 높은 용작율을 장점으로 가지는 용접기법이다. 또한, 일반 GMA 용접에 비해 용접속도가 빠르며, 이를 통해 용접 시간단축이 가능하고 생산성을 향상시킬 수 있다. 최근에는 Tnadem SAW 용접이 풍력타워 조립과 같은 후판용접에 사용되고 있다. Tandem 서브머지드아크 용접은 Fig. 2와 같이 선행토치(lead torch), 후행토치(tail torch) 로 구성되어 있으며⁽³⁾, 두 개의 용접 토치가 같은 방향으로 이동하며 용접을 수행한다. 이와 같은 방식의 용접기법은 용접 공정의 횡수를 줄이고, 열손실을 최소화하여 용접공정에서의 열효율을 높일 수 있다.

다전극 용접은 선행토치(Lead torch)가 용접을 진행하게 되면 일정 간격을 유지한 채 후행토치(Tail torch)가 선행토치가 용접한 모재위에 연속적으로 2차 용접을 수행하게 된다. 높은 전류와 전압을 사용함으로써 용작량을 증가시키고, 빠른 용접속도로 입열량을 감소시켜 생산성을 향상시키는 용접 기법이다. 그러나 다전극 용접은 짧은 시간동안 특정 구간에 많은 열원을 공급하게 되며 대형 구조물에 있어 국부적 고입열을 통해 구조물의 기계적 성질에 악영향을 미칠 수 있다. 대형 구조물은 구조물 자중에 의해 스스로 용접부를 구속하게 되며, 고입열을 통해 접합된 용착 금속이 냉각하면서 균열이 형성될 수 있다. 이러한 균열은 다양한 형태로 성장되며, 최근 용접부의 저온취성과 풍하중에 의한 풍력타워의 붕괴사고가 발생하기도 하였다. 그러나 이러한 문제점을 해결하기란 매우 어려운 실정이다. 용접공정에서 입열량은 생산성과 직접적인 연관이 있으며, 입

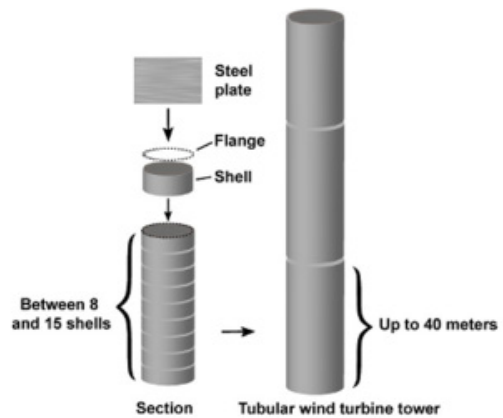


Fig. 1 Production process, the specimen



Fig. 2 Tandem SAW process

열량을 줄일 경우 용접 공정 시간의 증가로 인해 생산성이 감소하게 된다. 이러한, 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 전극간 거리를 이용하여 용접부의 기계적 특성 변화에 대해 연구하였다. 대형구조물 등 구조용 강에서 가장 요구되는 성질은 고인성이다. 고인성은 용접 미세조직 관점에서는 침상 페라이트(Aicular ferrite, AF)의 구성 비율에 달려 있으며, 침상 페라이트는 페라이트 래드가 짧은 니들(needle)형상을 하고 결정립 내에서 불규칙하게 배위되어 서로 광주리 엮는 형상(basket weave)으로 엮혀 있기 때문이다. 이와 같이 서로 엮혀 있는 성질과 미세한 결정립 크기 때문에 취성 균열 성장에 최대 저항을 갖는 것으로 알려져 있다⁽⁴⁾. 본 연구에서는 풍력타워에 사용되는 구조용 강 재료의 열에 의한 물성치 변화에 따른 기계적 성질 검토를 목표로 하고, 선행 토치의 용접이후 모재의 조직 상태를 4가지 상태로 분류하여 그에 따른 기계적 성질을 검토하였다.

3. FEM 이용한 용접부 열탄소성 해석

3.1 용접 열원

현재 산업현장에서 사용하는 용접공정 절차는 수많은 시행착

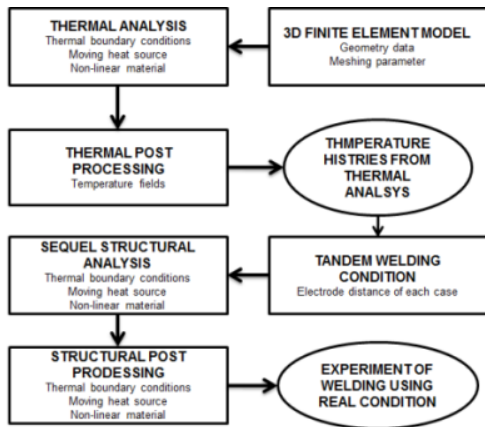


Fig. 3 Overview of thermo-mechanical simulation approach

오를 걸쳐 실험적으로 생성되어졌다. 그러나 시행착오를 통한 용접공정 정립은 시간, 비용, 재료를 소비하게 되며, 최적 공정을 찾기 위해 많은 노력 등이 필요하였다. 이러한 비생산적인 공정최적화를 개선하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 연구들이 진행되어지고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 용접 공정 수립은 최종적으로 실험과 비교를 통해 적정성 판단하지만, 시간, 비용 면에서 월등히 편리하며 환경적 요인에 제약받지 않으므로 손쉽게 접근할 수 있다⁽⁵⁾.

Tnadem SAW 시뮬레이션을 위해 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 두 단계로 분리하여 연구를 수행하였다. 열전달해석 및 구조해석을 통해 용접부의 잔류응력 분포 상태와 용접변형을 확인하였다. 열전달해석은 비선형과도 열전달 해석으로 수행되었으며, 열전달해석을 통해 얻은 열 분포 정보를 이용하여 열-탄소성해석을 수행하였다. 본 연구에서는 고닥 열원 모델(Goldak heat source model)를 사용하였다⁽⁶⁾. 아크 용접의 열원은 1960년대에 Rosenthal이 점 열원(Point heat source)을 이용하여 열전달해석을 수행한 이래 선 열원(Line heat source), 2차원, 3차원 Gaussian 열원 등이 제안되어 해석에 이용되었다⁽⁷⁾. Goldak이 제안한 이 모델은 전류(A), 전압(V)에 의한 열 분포 밀도(power density)를 수치적으로 나타낸 것이다. 열량 Q는 전류(A)와 전압(V), 그리고 아크 효율(η)로 표현될 수 있다.

$$Q = AV\eta \tag{1}$$

또한, 열원의 용적 밀도(q_v)는 다음의 함수로 계산되어질 수 있다⁽⁸⁾.

$$q_v(X, Y, Z) = \frac{Qf(X, Y, Z)}{V} = q_{max}f(X, Y, Z) \tag{2}$$

Fig. 4와 같이 고닥 모델은 열원의 용적밀도를 두 개의 타원

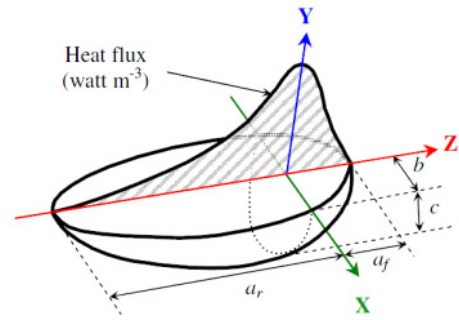


Fig. 4 Goldak model of double ellipsoid

형태로 표현하였다. 이 두 개의 타원형태의 모델은 6개의 형상 조건에 의해 표현되어 지고 있으며, X축을 기준으로 a_f 는 전면부 열원 용적밀도를 나타내며, a_r 는 후면부 열원 용적밀도를 나타낸다. b 는 X축 분포 최댓값을 나타내며, c 는 용입 깊이를 나타낸다.

열원 용적밀도는 다음과 같은 수식 (3)으로 표현될 수 있다. 전면부 열원 용적 밀도 :

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}\eta Qf_f}{\pi\sqrt{\pi}a_fbc} e^{-\left(\frac{3x^2}{b^2} - \frac{3y^2}{c^2} - \frac{3z^2}{a_f^2}\right)} \tag{3}$$

후면부 열원 용적 밀도 :

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}\eta Qf_r}{\pi\sqrt{\pi}a_rbc} e^{-\left(\frac{3x^2}{b^2} - \frac{3y^2}{c^2} - \frac{3z^2}{a_r^2}\right)} \tag{4}$$

여기서, $Q = AV\eta$ 이며, $f_f + f_r = 2$ 이다.

3.2 열원에 따른 모재 상태변화

3차원 모델을 통해 용접부의 열원공급 및 용접 진행 시뮬레이션을 통해 모재에 전달되는 열원을 분석하고 해석 결과를 통해 모재의 온도분포를 확인하였다. 모재는 구성 원소 및 온도에 따라 상태가 변화 하게 된다. 후행토치가 용접을 시작할 때의 모재의 상태를 4가지 형태로 구분하여 용접이 완료된 파이프의 기계적 성질을 비교하고자 하였다. 열전달 해석을 수행하기에 앞서 온도변화에 따른 AH32의 기계적 물성치 변화를 확인하였다. Fig. 5~6은 열전달 해석 및 열-탄소성해석에 필요한 물성치 정보를 나타내고 있다.

열전도율(Conductivity), 비열(Specific heat), 밀도(Density), 엔탈피(Enthalpy), 박판계수(Film coefficient)이며 이러한 물성치는 온도에 의해 변화한다. 또한, 열-탄소성해석에 사용되는 물성치는 영계수(Young's modulus) 푸아송비(Poisson's ratio), 열팽창계수(Thermal expansion coefficient), 항복 강

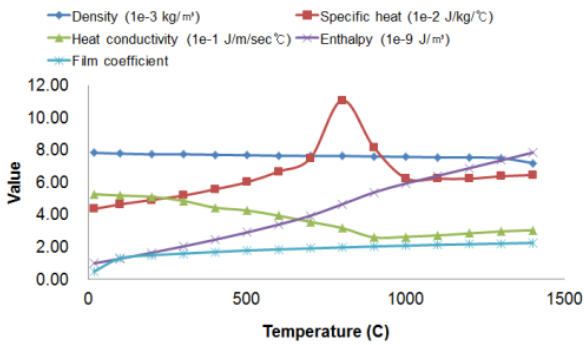


Fig. 5 Thermo-physical properties of AH32

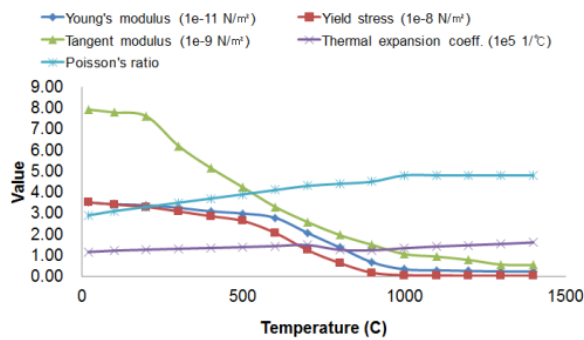


Fig. 6 Thermo-mechanical properties of AH32

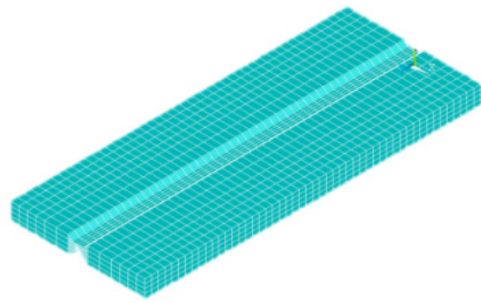


Fig. 7 Plate model of AH32

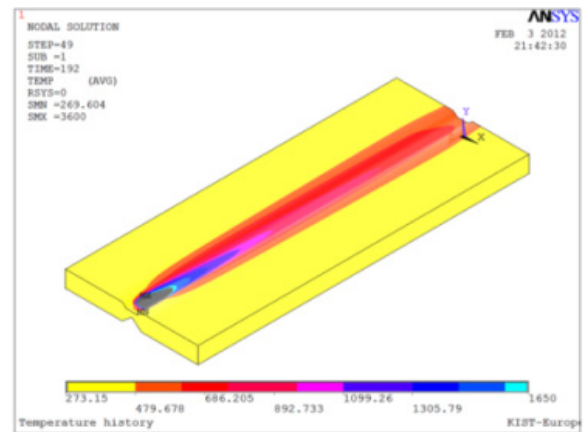


Fig. 8 Thermal distribution of AH32

도(Yield strength)등이 있다. 이와 같은 기계적 물성치 또한 온도에 의해 변화 하며 Fig. 6과 같은 특성을 나타낸다. 열 전달 해석에 사용되는 비열의 경우 약 800°C부터 급격하게 증가하여 1,000°C이후부터 안정 상태를 갖는다. 밀도와 박판계수의 경우 다른 물성치의 특성에 비해 변화의 정도가 적었다. 약 1,400°C 이상부터는 모든 물성치가 안정된 상태를 나타내며, 열-탄소성 해석에 사용되는 물성치는 1000°C 이내에서 많은 변화를 보인다. 본 연구에서는 이와 같은 물성치를 사용하여 온도에 따른 물성치 변화를 통해 보다 정확한 해석 결과를 얻고자 하였다. 선행토치의 용접이후 모재의 상태를 4가지로 구분하기 위해 평판 모델을 이용하여 열전달해석을 1차적으로 수행하였다.

Fig. 7에 나타난 모델은 열 전달해석을 위해 주로 사용되는 Solid 70 엘리먼트가 사용되었으며, 대류에 의한 열손실을 고려하기 위해 Sulf 153 엘리먼트가 적용되었다⁽⁹⁾. 대기온도는 20°C로 대기중으로 손실되는 열원을 고려하여 열원의 분포를 확인하였다. 본 평판 해석은 과도 열전달 해석을 통해 이루어졌으며, 열원 공급은 Goldak 모델을 이용하여 열 하중을 주었다. Fig. 8은 해석결과를 가시화 하여 나타난 것이다.

Fig. 9의 해석 결과를 통해 4가지 해석 조건을 선정하였다. Case 1은 선행토치와 후행토치의 거리가 100mm이며 선행토치의 용접이후 모재가 용융된 상태에서 후행토치가 용접을 시작한다. 해석을 수행하기위해 환산된 시간 20sec이다. case 2의 경우 선행토치와 후행토치의 거리가 200mm이며 선행토치

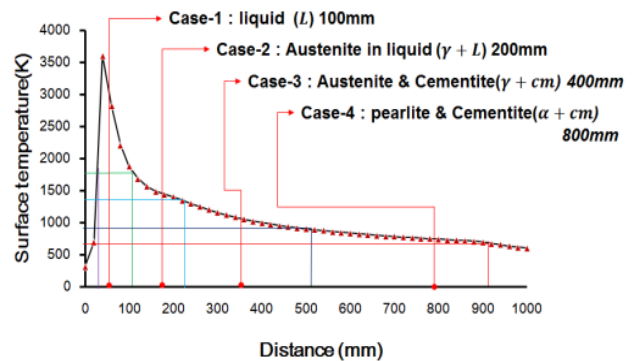


Fig. 9 The division of electrode distance according to base metal state after lead torch welding

Table 1 Welding analysis cases of tandem welding process

Analysis condition	Material state	Distance from lead torch	Time from lead torch
Case 1	Liquid	100mm	20sec
Case 2	Austenite + Liquid	200mm	40sec
Case 3	Austenite + Cementite	400mm	80sec
Case 4	Pearlite + Cementite	800mm	120sec

의 용접이후 모재의 상태가 응고되기 시작하는 시점인 액상형 오스테나이트 상태에서 후행토치의 용접이 시작되며 해석을 수행하기 위해 환산된 시간은 40sec이다. case 3, 4 또한 각각 400mm, 800mm의 전극간 거리를 선정하였으며, 환산된 시간은 각각 80sec, 120sec로 선정하였다.

3.3 타워 셀 모델을 이용한 열전달 해석

타워 셀 모델을 이용하여 파이프 원주방향 다전극 용접해석은 실제 선형토치 및 후행토치 모두 용접을 수행한다. 전극간 거리가 서로 다른 4가지의 용접 조건을 해석에 적용하기 위하여 거리를 환산하여 타임 스텝(Time step)을 이용하여 용접 열원을 인가하였다. Fig. 11에 나타난 모델은 실제 3MW급 풍력 타워의 셀을 이용하였으며, 파이프는 길이 방향으로 7,000mm, 반경 3,500mm, 두께 50mm 크기이다. 메시(mesh) 형상은 열원을 균일하게 입력하고, 노드(node)의 위치를 정형화 하기 위해 브릭(brick)형태로 설계하였다. 또한, 모델의 메시(mesh)는 총 257,800 개로 형성되었으며, 모델의 메시 중형비는 20이하로 설계하였다. Fig. 11에 나타난 것과 같이 메시의 개수를 결정하기위해 모델의 메시 크기를 계속하여 변화 시켜가며 특정 노드점에서의 온도가 일정해 지는 메시를 최적개수로 선정하여 해석을 수행하였다. 해석 결과는 메시 크기와 형상에 매우 밀접한 관계가 있으므로 정확한 결과를 위해 선행된 것이다.

Fig. 12~13은 극간거리가 100mm와 200mm 경우의 열전달 해석 결과를 나타낸다. 그래프는 용접선을 중심으로 0mm, 5mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm 위치의 노드의 온도 변화를 나타낸 것이다. 100mm의 경우, 후행토치의 최고 온도가 2500°K임을 확인하였다. 200mm의 경우, 후행토치의 최

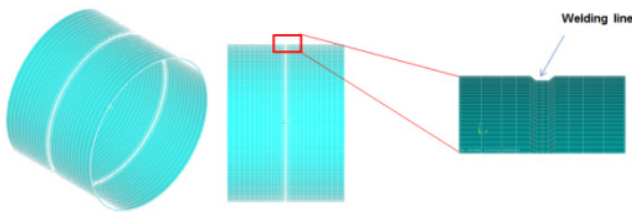


Fig. 10 Circumferential pipe model real size wind tower

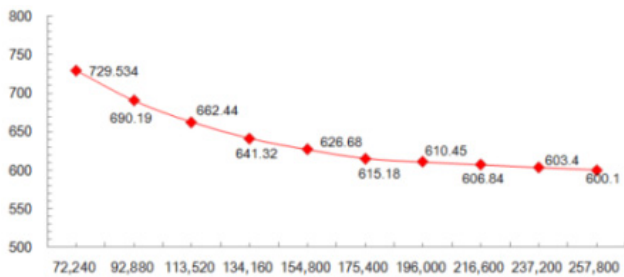


Fig. 11 Mesh sensitivity analysis based on maximum temperature attained

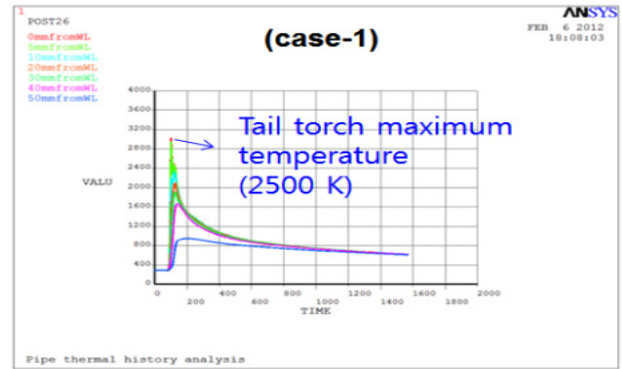


Fig. 12 Temperature history of case-1(100mm)

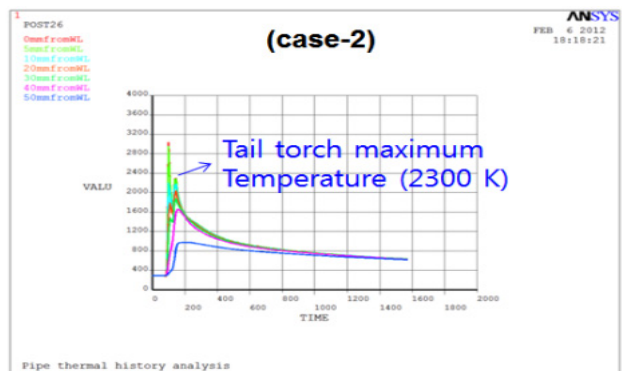


Fig. 13 Temperature history of case-2(200mm)

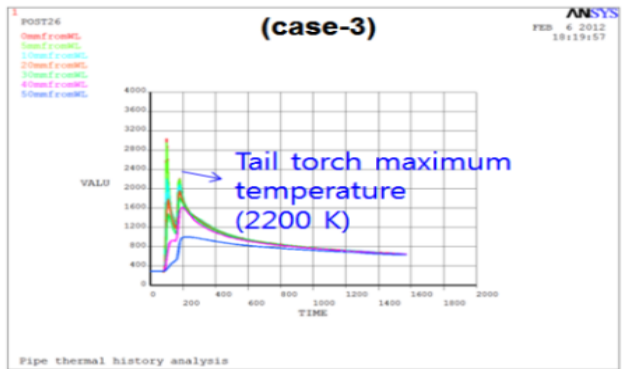


Fig. 14 Temperature history of case-3(400mm)

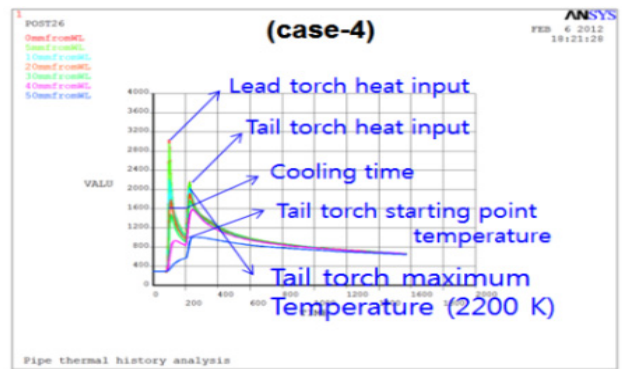


Fig. 15 Temperature history of case-4(800mm)

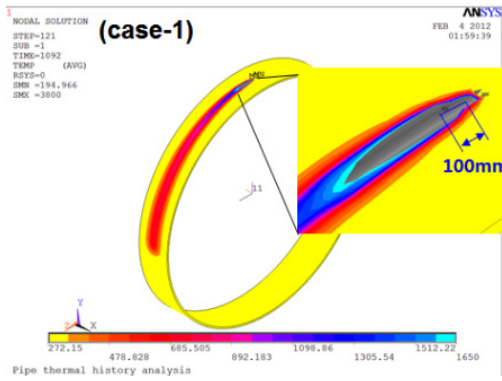


Fig. 16 Temperature profile of case-1(100mm)

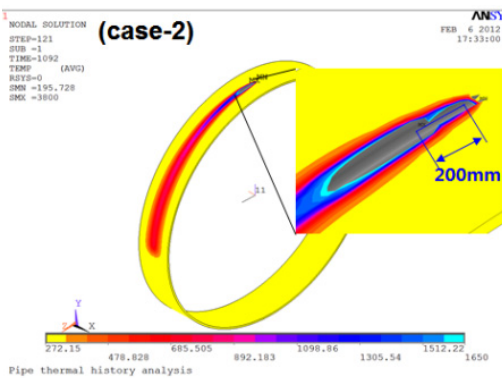


Fig. 17 Temperature profile of case-2(200mm)

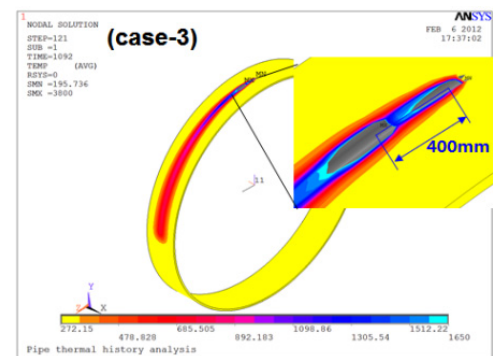


Fig. 18 Temperature profile of case-3(300mm)

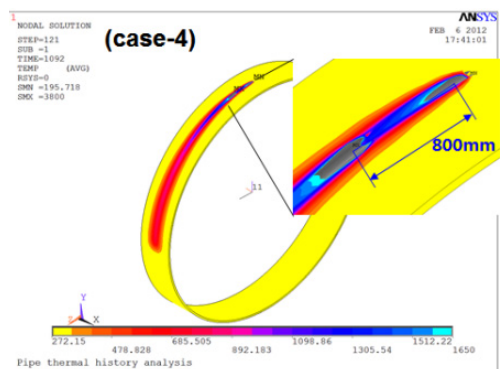


Fig. 19 Temperature profile of case-4(400mm)

고 온도가 2300°K임을 확인할 수 있었다.

Fig. 14~15는 극간거리가 400mm와 800mm 경우의 열전달 해석 결과를 나타낸다. 400mm의 경우와 800mm 경우에서는 후행토치의 최고 온도가 2200°K임을 확인하였다. 100mm부터 400mm까지는 꾸준히 후행토치온도가 증가함을 확인하였으나, 800mm부터는 후행토치의 온도가 감소하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 충분한 쿨링타임(cooling time)으로 일정시간 이상 쿨링(cooling)이후 부터는 후행토치의 열원공급 효율에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 16~19은 각 해석 조건별 용접 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 각각의 그림에 나타난 것과 같이 선행토치와 후행토치의 용융풀의 차이를 시각적으로 확인할 수 있으며, 극간거리(electrode distance)가 멀어질수록 용융풀의 간격이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 극간거리가 멀어질수록 선행토치의 용접이후 지속적으로 대류, 복사에 의한 열손실의 발생으로 용융풀의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 열-탄소성 해석

열-탄소성해석을 통해 용접부 주변의 잔류응력 분포 상태를 확인하였다. 축 방향 및 원주 방향 잔류응력을 확인하기 위해 파이프 외면과 내면에서 잔류응력을 측정하였다. Fig. 20~21

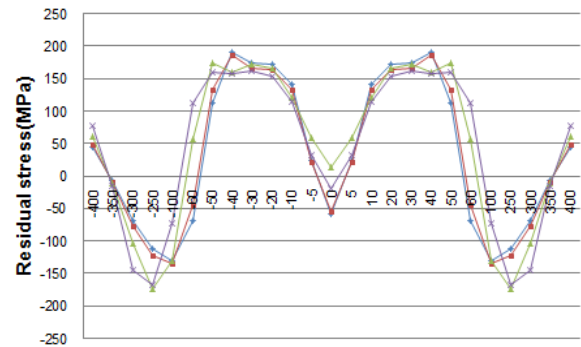


Fig. 20 Residual axial stress on their circumferential pipe(Outer surface)

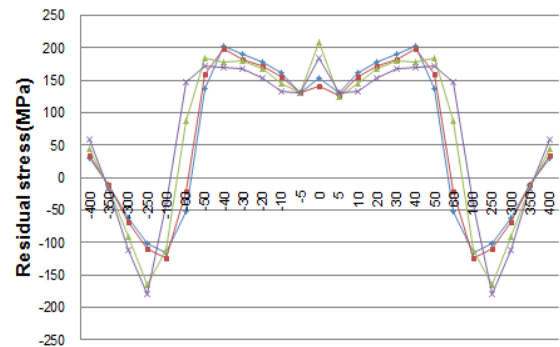


Fig. 21 Residual axial stress on their circumferential pipe(Inner surface)

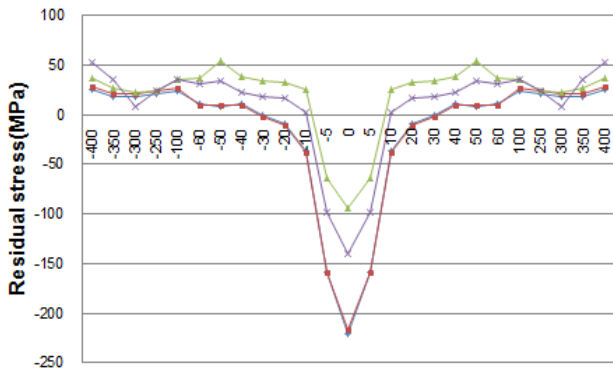


Fig. 22 Residual hoop stress on the circumferential pipe(Outer surface)

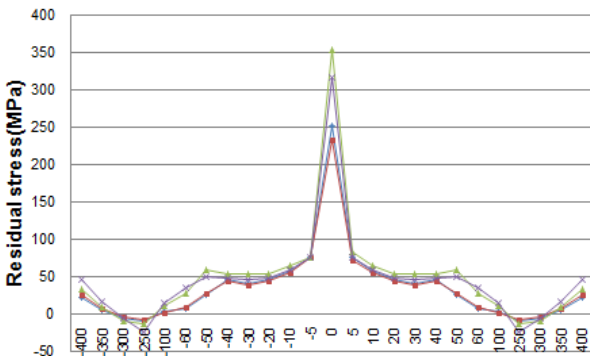


Fig. 23 Residual hoop stress on the circumferential pipe(Inner surface)

은 파이프 내외부표면의 축 방향 잔류응력 분포상태를 나타낸 것이다. 용접선 주변 약 50mm까지는 case 1,2가 잔류응력의 크기가 높음을 확인하였다. 용접선에서 100mm 이상 떨어진 위치부터는 case 3,4가 다른 경우에 비해 잔류응력의 크기가 높음을 확인하였다. 파이프 내면의 축 방향 잔류응력을 측정할 결과 외면 잔류응력과 마찬가지로 용접선 근처에서는 case 1,2가 높은 크기를 나타내고 있으며, 용접선에서 멀어질수록 case 3,4의 잔류응력이 높음을 확인하였다. Fig. 22~23는 파이프 내외부표면의 원주 방향 잔류응력 분포상태를 나타낸 것이다. 원주 방향 잔류응력 분포확인 결과, case 3,4의 경우, 허용응력 이상의 잔류응력이 용접선 주변에서 나타났다.

FEM을 이용한 Tandem 용접부 열전달 특성 및 잔류응력 분포에 대한 해석 결과 선행행 토치의 거리가 증가할수록 잔류응력의 크기 또한 증가함을 알 수 있다. 이는 Tandem SAW의 특성상 선행토치 용접이후 모재의 온도분포 상태에 따라 모재의 응력분포가 달라짐을 나타낸다. 본 연구 결과는 모재의 예열 정도와 잔류응력 관계를 유추할 수 있으며, 결론적으로 선행토치의 용접이후 용융된 상태의 모재에서 후행토치 용접이 시작 되는 것이 용접부의 기계적 측면에서 가장이상적인 공정이라 할 수 있다.

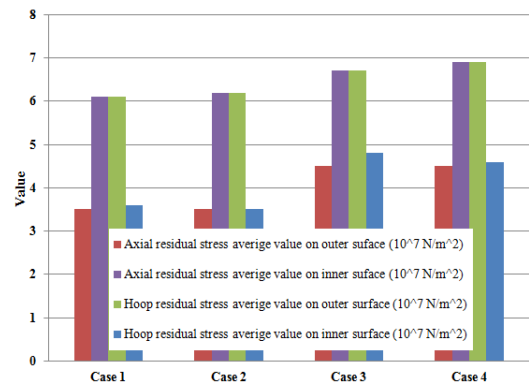


Fig. 24 Summary of simulated results

4. 결론

본 연구는 Tandem SAW 공정을 이용하는 풍력 타워부분의 열전달 분포 및 잔류응력 특성을 고찰하는데 집중되었다. 또한, 선행토치의 용접이후 모재의 상태에 따라 용접부의 기계적 특성을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 선행행 토치 간격에 따라 후행토치 용접부의 모재상태가 변화함을 확인하고 4가지 모재상태에 따른 용접부 주변 잔류응력 분포 상태를 FEM 해석을 통해 확인하였으며, 100mm의 경우에만 하나의 용융풀 형성함을 확인하였다.
- (2) 극간거리가 증가함에 따라 후행토치 용접부 온도가 꾸준히 감소함을 확인하였으나, 800mm부터는 온도가 감소하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 충분한 쿨링타임(cooling time)으로 일정시간 이상 쿨링(cooling)이후 부터는 후행토치의 열원공급 효율에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.
- (3) 선행토치 용접이후 모재의 상태가 용융상태, 오스테나이트+용융상태(case-1, case-2)일 때 용접부 주변에서 잔류응력이 높게 분포 되었으며, 오스테나이트+시멘타이트, 펠라이트+시멘타이트(case-3, case-4)일 때 용접부에서 100mm 떨어진 곳에서 잔류응력분포가 높은 것으로 나타났다.

References

- (1) Song, W. H., Seo, D. H., and Yoo J. Y., 2009, "Development Trend Of Linepipe Steel And It's Weldability," *Journal of KWJS*, Vol. 27, No. 1 pp. 34~48.
- (2) Han, H. S., Park, J., Bang, J., Lee, J. R., and Kim, D., 1997, *Research for 2MW Wind Turbine Tower Shell Design Optimization*, Iljinsa, Korea.
- (3) Entradas (Atom), n.d., viewed 11 February 2009,

- <<http://arcosumergido2009.blogspot.kr>>
- (4) Seo, Y., Koh J., Kim, N. H., and Oh, S. Y., 2004, "Effect of Heat Input on the Mechanical Properties of SA508 Class 3 Steel we Weldments with Submerged Arc Welding," *Journal of KWJS*, Vol. 22, No. 5, pp. 432~439.
- (5) Lee, C. H., and Chang, K. H., 2007, "Three-Dimensional Finite Element Simulation of Residual Stresses in Circumferential Wels of Steel Pipe Including Pipe Diameter Effects," *Journal of Material Science & Engineering-A*, Vol. 10, No. 4, pp. 215~222.
- (6) Ko, J. B., and Park, H. S., 2008, "A Study on the Analysis of the Thermal Stress and Residual Stress in Process of STS304 TIG Welding," *Journal of KSMTE*, Vol. 17, No. 5, pp. 1~8.
- (7) Lee, S. Y., and Yun, B. S., 2001, "Heat Transfer Analysis of Friction Welding of A2024 to SM45C," *Journal of KSMTE*, Vol. 10, No. 1, pp. 65~70.
- (8) Oh, S. Y., and Min, T. G., 2004, "The Study on Residual Stress of Laser Weldment for the Heterogeneous Materials," *Journal of KSMTE*, Vol. 13, No. 3, pp. 119~125.
- (9) ANSYS, 2005, *ANSYS User's Manual Version 10.0*, ANSYS Inc.