한국해양공학회지 제25권 제6호, pp 66-71, 2011년 12월 (ISSN 1225-0767)

압입시험기를 이용한 후판용접재의 잔류응력 분포에 관한 연구

허선철*** · 김귀남* · 이종석* · 박철홍** · 박준성** · 박원조***
*경상대학교 정밀기계공학과 대학원
**한국폴리텍 I 대학
***경상대학교 에너지기계공학과

Study on Residual Stress Distribution in Thick Plate Welded Material Using Indentation Equipment

Sun-Chul Huh**, Gwi-Nam Kim*, Joun-Sung Park*, Jong-Seok Lee and Won-Jo Park**
*Department of Precision Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea
**Department of Green Energy Mechanic, campus in Je-ju, Korea Polytechnic, Jeju, Korea
***Department of Energy and Mechanical Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

KEY WORDS: AIS3000 압입시험기, Heat affected zone(HAZ) 열영향부, Residual stress 잔류응력 , X-ray diffractometry(XRD) X선 회절분석기, Electron prove micro analyzer(EPMA) 전자탐침미세분석기, Thick plate welded material 후판용접재

ABSTRACT: *Recently, the production of shipbuilding and offshore plant industries, with a trend toward large structures, has led to an increased use of high strength ultra-thick plates. The use of ultra-thick plates increases the welding tasks, and the welding process generates distortion and residual stress in the weldment because of the rapid heating and cooling. Welding distortion and residual stress in the welded structure resulte in many troubles such as deformation and life deterioration. In particular, the welding residual stress has an important effect on welding deformation, fatigue, buckling strength, brittleness, etc. The purpose of this study was to evaluate the residual stress at a multi-pass weldment using an experimental method for EH36 high-tension steel. In this experimental method, AIS3000 was used to measure the residual stress of a welded part, HAZ,and base metal; EPMA and XRD were used to study the material properties.*

1. 서 론

오늘날 기술의 발전으로 각종 화학플랜트, 원자로, 항공, 자동차, 산업기기를 비롯하여 운반선과 대형구조물 등이 대형화 되어감에 따라 컨테이너 선박, 해양플랜트 등에서 높은 강도를 가지는 용접재가 요구되고 있다. 용접구조물의 경우 용접 과정 중에 가열과 냉각이 반복됨에 따라 잔류응력이 발생하고, 그 결과 국부적인 좌굴과 취성파괴, 피로강도에 영향을 주게 된다(Bang et al., 2010).

용접에서는 가열과 냉각의 반복으로 인하여 불균일하게 냉각됨으로써 부위마다 냉각속도가 달라 수축과 변형이 생기고, 필연적으로 잔류응력이 발생하고 있다. 이러한 용접잔류응력은 용착금속이나 모재의 균열 등의 저온 균열의 원인이 됨과 동시에 취성파괴, 부식파손 및 좌굴 등을 유발시키는 원인이 되어 구조물의 안정성을 현격하게 손상시키고 구조물의 변형과 수명에도 큰 영향을 미친다. 따라서 용접수행 전에 용접부에 발생하는 열적 거동 및 용접잔류응력을 정도 높게 예측할 필요가 있다(Bang et al., 2003).

지금까지 용접구조물의 잔류응력 측정에는 주로 X-선 법, 중성자회절법, 스트레인게이지법 등이 많이 수행되었으나, 이는 표면 상태나, 측정 조건에 따라 변동 폭이 큰 것이 사실이다. 그러나 비파괴 계장화 압입시험기법은 잔류응력의 측정시 재현성이 우수한 것으로 보고 되고 있다(Jang et al., 2002).

또한, 기존 용접잔류응력평가에 대한 논문들은 대부분 용접부 표면부의 잔류응력에 대한 평가나 표면부의 x, y 방향에 대한 잔류응력을 분포, 두께에 따른 잔류응력 분포에 대한 연구가 대부분이다(김준형 등, 2009; Shin et al., 2010; 김현수 등, 2009; Bang and Go 2009).

본 논문에서는 고장력강 EH36강을 사용하여 용접 후 잔류응력특성을 분석하기 위해 압입시험에 의해 잔류응력을 측정하였고, 용접부 표면부와 내부의 잔류응력 변화를 알아보기 위해 표면에서 깊이 방향으로의 잔류응력 분포를 측정하였다. 용접 구조물의 잔류응력 분포 특성은 AIS3000 장비를 사용하여 용접부의 잔류응력 및 국부적인 물성치를 측정하고, EPMA(Electron probe micro analyzer), XRD(X-ray diffractometry)를 사용하여 국소부위의 조직적 특성을 연구하였다.

교신저자 박원조 : 경상남도 통영시 천대국치길 38, 055-772-9111, wjpark@gnu.ac.kr

2. 용접 방법

2.1 실험 방법

용접시 200×300×40mm 크기의 강판 두장을 맞대기 용접을 하여 용접한 후 워트젯(Water jet)으로 시험편을 채취하였다. Fig. 1은 판재를 용접한 후의 시험편 채취모양을 나타내고 있고 Fig. 2는 시편을 채취한 후의 용접단면을 나타내고 있다. 실험재료는 선박용 강판으로 사용되는 40mm의 후판 EH36강재를 사용하였다. 용접적층은 모두 5개로서 V형 맞대기 용접을 수행하였다. 이때 각 적층 별로 적용된 용접방법과 전류전압은 Table 1에 정리하였다.

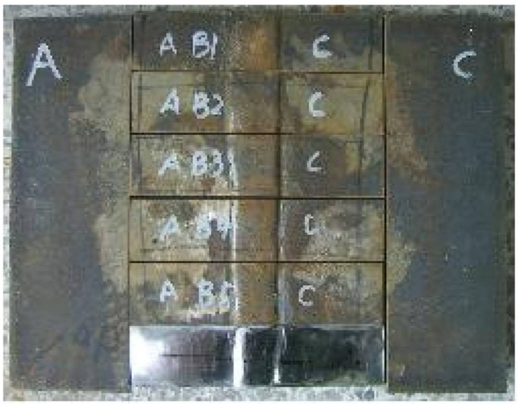


Fig. 1 Configuration of welded specimen

Fig. 2 Cross section of welded specimen

Table 1 Welding condition of welded specimen

Number of pass	Weding machine	Voltage	Current	Welding time (Sec)
1	TIG		160A	90Sec
2	CO_2	25V	220A	130Sec
3	CO_2	26V	250A	135Sec
4	CO_2	26V	250A	140Sec
5	CO_2	26V	250A	150Sec

시험편의 강도측정 및 잔류응력 측정은 Fig. 3과 같은 AIS 3000의 측정장비를 사용하였으며 이 장비는 기존의 압입시험법을 응용한 시험법으로 2002년 KS B0950의 "금속재료의 계장화 압입시험-압입물성평가", KS B0951의 "철강용접부의 계장화압입시험-잔류응력측정"으로 규정 된 시험법이다(Jang et al., 2002).

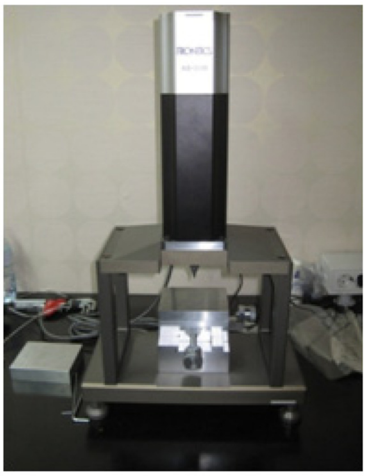


Fig. 3 Indentation equipment for residual stress measurement

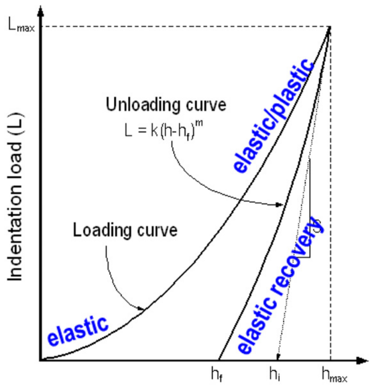


Fig. 4 Typical indentation load-depth curves for elastic-plastic

Fig. 4는 압입시험의 원리를 나타내는 것으로 구형압입시 재료는 압입하중이 증가함에 따라 그림과 같이 탄성, 탄소성, 완전소성의 3단계를 거치게 되며 압입자와 시편의 평균접촉압력은 압입하중이 증가함에 따라 증가하게 된다. 따라서 구형압입의 경우 압입깊이가 증가함에 따라 재료의 변형이 증가하여 압입하중-변위곡선으로부터 일축인장에서 얻어지는 유동특성을 유도할 수 있게 된다. 구형압입자를 이용하여 시편에 하중을 가했을 때 압입자와 시편이 접촉하고 있는 깊이를 h_c라고 정의하면 통상 보통의 소재들은 그림과 같이 탄소성 반응을 보이게 되며 이 경우 탄성회복에 해당하는 하중제거 곡선의 이론적인 분석을 통해 접촉깊이 hc를 구하게 된다, 또한 압입하중 초기곡선의 초기부분에서 접선의 기울기는 재료의 강성에 해당하며, 이 하중의 0까지 외삽한 지점은 hi로 정의하고 이러한 이론적 근거를 바탕으로 압입시험기의 계산수식에 따라 강도 및 잔류응력을 구하게 된다(Jang et al., 2002).

Fig. 5는 강도측정을 위한 시험편의 단면 및 시험장치를 나타내고 Fig. 6은 잔류응력 측정 위치를 나타내고 있다. 그림에서 측정 위치는 모재의 물성치와 경도를 측정하여 참고 데이터로 하고 용접 후 상면과 측면, 상면으로부터 깊이방향 5mm 간격으로 외아어 커팅한 표면을 각각 측정하였다. 또한, 측정 위치를

3mm 이상을 띄워서 측정함으로써 측정한 압입자가 이웃한 압입량에 영향을 미치지 못하도록 하였으며, 두께가 40mm로 양면 맞대기용접을 하였기 때문에 2분의 1만 측정하였다.

(a) welded specimen (b) Indentation equipment for measurement

Fig. 5 Configuration of specimen and equipment

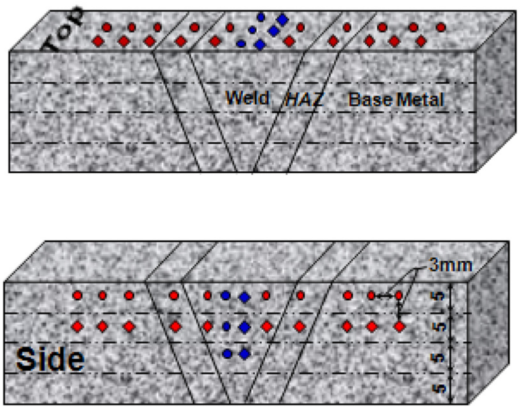


Fig. 6 Measurement positions for strength and residual stress

3. 결과 및 고찰

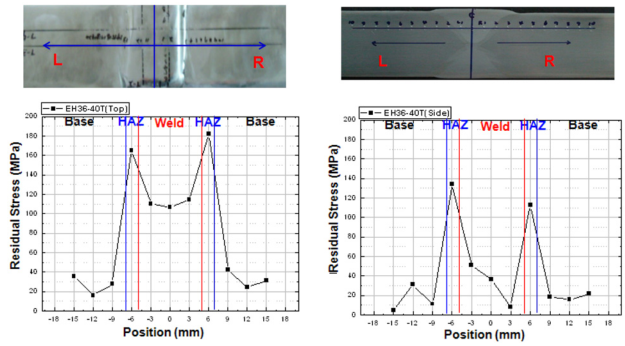
AIS3000을 사용하여 용접부의 강도를 측정한 결과는 Table 2와 같다. 측정결과에서 모재에 비해 용접부의 항복강도, 인장강도 경도값이 각각 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 용접부의 경우 모재가 용융되면서 급냉에 의해서 용접부가 응고되기 때문에 용접부의 조직이 치밀해지고 이에 따라 경도 및 강도가 증가하는 것으로 생각하며 이는 기존의 다른 연구들과도 잘 일치하고 있다(정천영 등, 2010). Table 3은 표면에서 깊이 방향으로 각 5mm식 증가하면서 절단한 표면에 대해 측정한 강도 결과로서 table에서 보면 깊이가 증가하면서 5, 10, 15mm 깊이에서는 강도 및 경도가 유사한 경향을 보였으나 깊이가 20mm 지점에서는 가장 높은 강도와 경도값을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 2 Mechanical properties of base and weld part

position	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	HV [MPa]
Base	294.13	637.67	208
Weld	344.9	748.7	234

Table 3 Mechanical properties along the depth in weld part

Depth	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	HV [MPa]
5mm	330.6	717.3	227.4
10mm	321.5	694.2	218.6
15mm	331.6	720.6	233.9
20mm	395.8	862.8	393.9



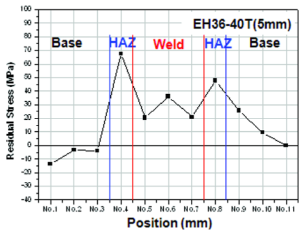
(a) top (b) side

Fig. 7 Residual stress distribution on the top surface and side surface

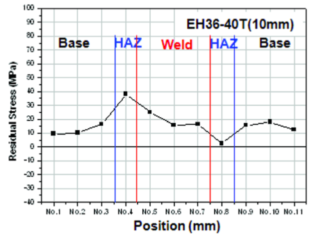
Fig. 7은 용접재의 용접부 표면과 시험편의 옆면에 대해서 잔류응력을 측정한 위치의 사진과 잔류응력 측정 결과를 나타내고 있다. 그림에서 (a)는 표면부위의 잔류응력을 측정한 결과를 나타내는 것으로 열영향부에서 최대인장잔류응력을 나타내고 용접부, 모재순으로 나타나며 용접 경계부에서 멀어짐에 따라 잔류응력이 0에 가까워지는 것을 알 수 있다. 이러한 잔류응력분포 경향은 기존의 연구(Chang et al., 2004)들과도 잘 일치하고 있다. 그림(b)는 옆면에 대해서 잔류응력을 측정한 결과를 나타내고 있는 것으로 열영향부에서 최대값을 나타내고 있으며 잔류응력 분포 경향은 표면부의 잔류응력 분포와도 유사하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 표면과 옆면의 잔류응력 분포값의 절대값을 비교하면 표면부의 잔류응력의 절대값이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 옆면의 경우 실제 용접시에는 용접부 내면에 위치하고 있고, 표면은 자유표면이기 때문에 실제 용접시에 용접열에 의한 용융 후 냉각시 수축의 정도가 표면부가 크고 이에 따라 열열향부의 소성구속값이 크기 때문에 표면부의 잔류응력값의 크기가 크다고 생각한다.

Fig. 8은 표면부에서 5mm의 두께 만큼을 절단한 후에 표면부와 동일한 위치에서 잔류응력을 측정한 결과를 나타낸다. 그림에서 표면부에서 깊이 방향으로 깊이가 증가 할 수 록 잔류응력의 크기가 줄어들고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 깊이가 15mm, 20mm에서는 잔류응력의 분포가 경향성이 거의 없어지고 0에 가깝게 분포한다는 것을 알 수 있다. 이는 깊이 방향으로 절단시 응력의 이완과 재분포가 일어나 실제 내부에 있는 잔류응력이 낮게 평가 된 것으로 생각한다. 또한, 실제 표면의 경우는 평면응력상태이고, 일정깊이에서는 평면변형율 상태이기 때문에 응

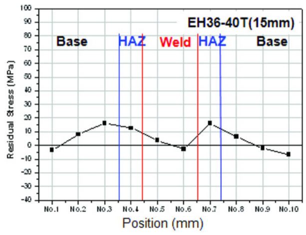
력값이 0에 가까워진다고 생각되며 또한 이러한 결과는 실제 잔류응력으로 인한 내구성의 문제는 실구조물에서 표면의 최대 인장잔류응력의 영향으로 강도가 감소하기 때문에 표면의 최대 인장잔류응력의 크기가 강도저하를 불러온다는 기존의 연구결과들과도 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다(이해우 등, 2008).



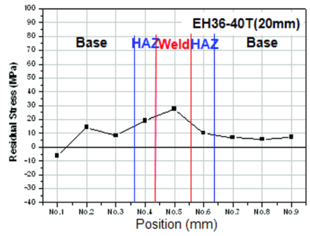
(a) 5 mm from the surface



(b) 10 mm from the surface



(c) 15 mm from the surface



(d) 20 mm from the surface

Fig. 8 Residual stress distribution along the depth direction

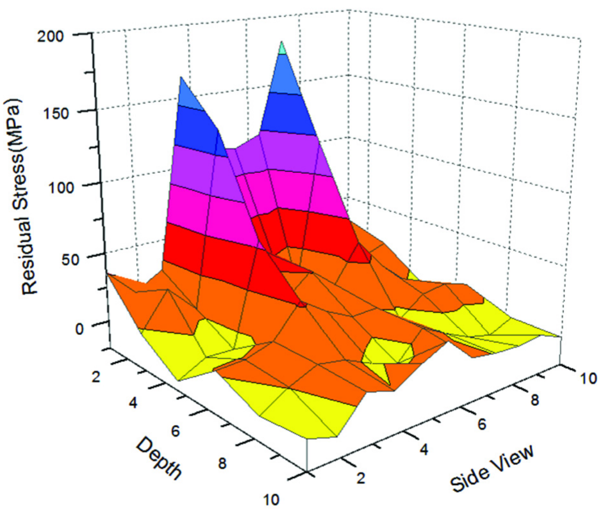


Fig. 9 Residual stress distribution welded material (3D dimension)

Fig. 9는 표면부의 잔류응력과 깊이방향으로의 잔류응력의 크기를 3차원으로 정리한 결과로서 그림에서 보면 표면부에서 최대인장잔류응력이 발생하고, 깊이가 증가함에 따라 점점 감소한다는 것을 알 수 있으며 또한 측면에서 보면 용접부에서 최대인장잔류응력을 나타내고 용접경계부에서 멀어짐에 따라 0에 가까워진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 용접 후 용접부, 열영향부, 모재부의 조직을 나타내고 있다. 그림에서 보면 결정입자가 가장 작으면서도 조밀한 곳은 열영향부였으며, 용접부, 모재 순으로 관찰 되었다. 성분 분석한 결과 열처리에 의해 강도를 대폭 향상시켰기 때문에 조직이 치밀하게 보이며, 모재의 경우 미세한 페라이트(Ferrite)와 펄라이트(Pearlite) 2상 조직으로 나타나고 있으나, 열영향부의 경우 용접부 경계는 용접 중 가열에 의해 펄라이트를 구성하고 있는 시멘타이트의 일부가 구상화함과 동시에 펄라이트 일부는 오스테나이트로 변태하기 때문에 모재에 비해 펄라이트의 변화가 현저하다.

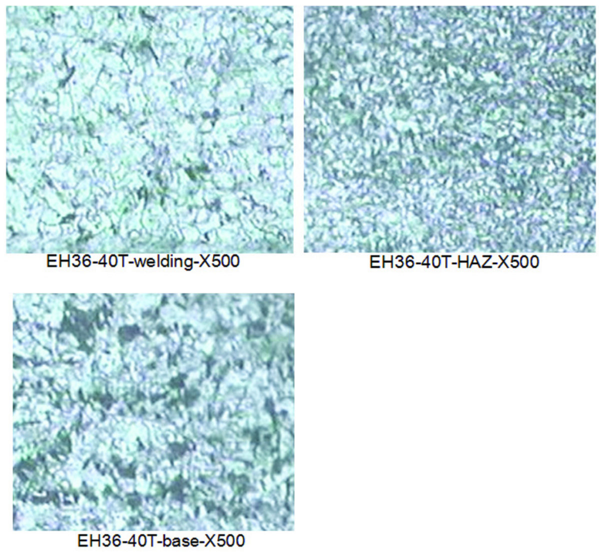


Fig. 10 Surface microstructure of welded materials

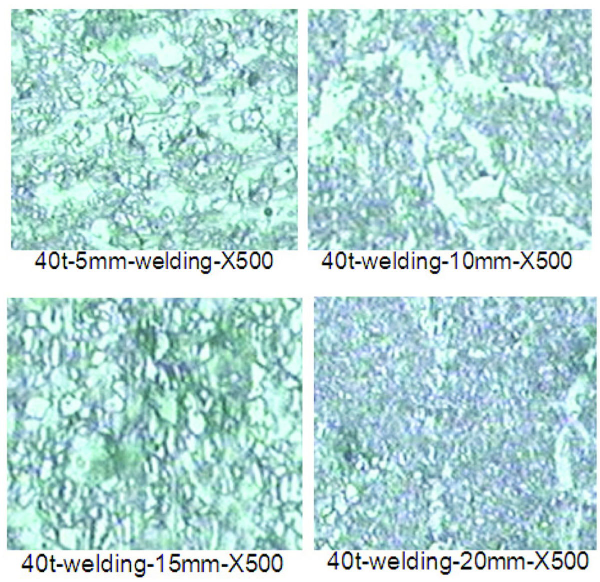
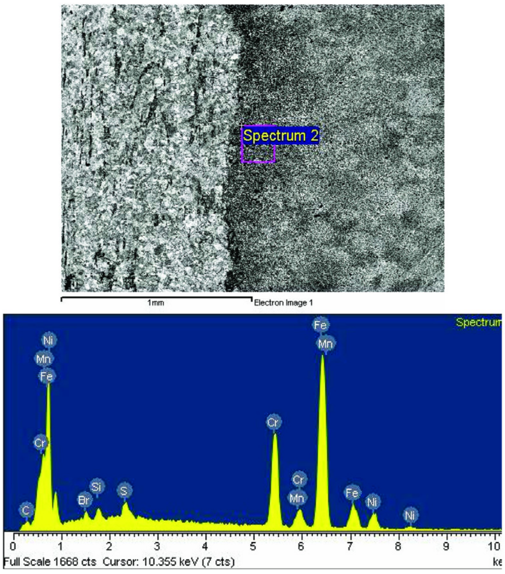


Fig. 11 Microstructure along the depth in welded part

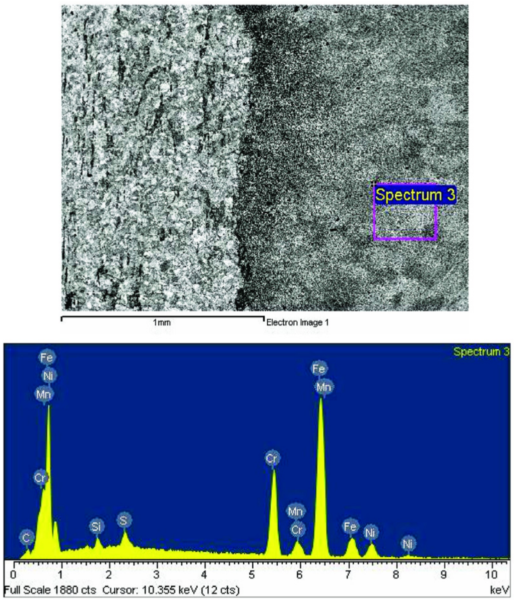
이때 형성되는 조직은 변태전의 오스테나이트 결정립 지름에 의존하고 결정립 지름이 조악한 경우에는 조직이 조악하게 되고 미세한 경우에는 거기에 대응한 조직이 된다. 이 때문에 경계부는 용접입열에 의해 조직도 담금질과 유사한 조악한 조직으로 형성된 것으로 보인다. Fig. 11은 깊이방향 절단한 후 각각 열영향부와 용접부의 금속조직사진을 나타내고 있다. 깊이방향으로

갈수록 용접조직이 치밀해지는 것을 확인 할 수 있으며 이 결과는 열영향부 용접부 모두 동일한 결과를 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.



C	Si	Mn	Fe
0.18	0.73	1.67	95.59

Fig. 12 Results of conponent analysis in HAZ part



C	Si	Mn	Fe
0.18	0.57	1.13	95.54

Fig. 13 Results of conponent analysis in welded part

Fig. 12, 13 및 Fig. 14는 용접재 각 부위의 성분분석과 EPMA 결과를 나타내고 있다. 그림에서 용접부의 성분분석 결과 각 부위의 성분분석 결과는 기존 규격의 범위를 잘 만족하고 있다는 것을 알 수 있다. EH36강에 대한 결정격자 구조는 체심입방 결정의 [111], [200]을 나타내고 있으며 실제 용접 입열에 의해 성분의 양 및 분포는 변하였으나 결정격자 구조는 동일한 결과를 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

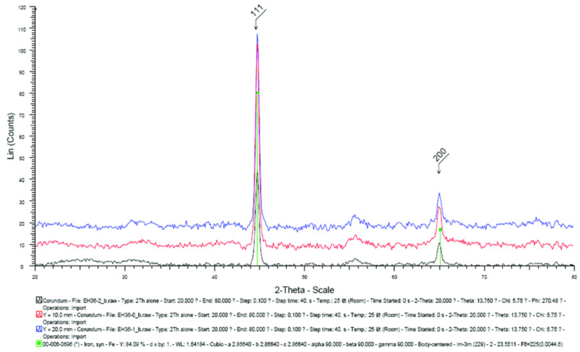


Fig. 14 XRD spectrum of welded part

5. 결 론

본 논문에서는 다층용접재에 대해서 용접 후 강도 평가와 용접 잔류응력 분포를 측정 및 예측하여 용접 구조물의 신뢰성 및 안정성을 확보하기 위한 실험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 계장화 된 압입 시험기로 측정한 용접재의 강도값은 EH36강의 모재값과 동일하게 나왔으며, 국부적인 용접부의 강도 값도 기존 발표 된 측정결과와도 유사하게 나타났으므로 신뢰성 있는 측정결과로 판단한다.

2) 깊이 방향으로 측정하였을 때 깊이가 깊어질수록 국부적인 경도값 및 인장강도 값은 증가하고 있다는 것을 알 수 있으며 잔류응력 값의 분포는 표면부가 가장 크다는 것을 알 수 있었다.

3) 잔류응력 분포는 표면부의 열영향부에서 가장 크게 나타났으며 열영향부에서 멀어짐에 따라 감소하고 있고, 깊이방향으로는 표면부에서 가장 크게 나타나고 깊이가 깊어짐에 따라 점점 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 깊이 방향의 잔류응력의 정량적 분포는 절단시 발생한 응력의 이완과 재분포에 의해 다소 과소 평가 된 것으로 생각한다.

4) 조직 관찰 결과 열영향부에서 가장 결정입자가 조밀하고 치밀하였고, 다음은 용접부와 모재 순서로 확인되었으며 이는 용접부의 강도 값의 크기와도 잘 일치한다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2010-0015199)와 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업(NO. 100121)의 지원을 받아 수행 된 연구결과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Bang, H.S. and Go, M.S. (2009). "A Study on Characteristics of Welding Residual Stress in EGW Welded Joints of High Strength Ultra Thick EH36-TMCP Steels for Container Ship", Journal of Advanced Engineering and Technology, Vol 2, No 3, pp 217-222.

Bang, H.S., Lee, Y.K., Kim, H.S. and Lee, K.J. (2010). "A Study of the Residual Stress Characteristics of FCAW Multi- Pass Butt Joint for an Ultra-Thick Plate" KSOE, Vol 24, No 2, pp 62-66.

Bang, H.S., Yoon, B.H., Kim, Y.P. and Rim, C.H. (2003). "Welding Residual Stress Distribution Characteristics of High Tensile Steel for Ship Structures in Laser Welding", Journal of the korean welding & joining society, pp 291-295.

Chang, K.H., Lee, C.A., Shin, Y.E., (2004), A Study on the High temperature tensile property and the Characteristics of residual stress in welds of high strength steels", Journal of KWS, Vol 22, No 4, August

Jang, J.I., Son, D.G., Choi, Y., Kwon, D.G., Park, S.K. and Kim, W.S., (2002), Application of Continuous Indentation Testing Method for Evaluation the Strength Performences of Weldment, Journal of KWS, Vol 20, No 22

Shin, S.B., Lee, D.J. and Park, D.H. (2010). "A Study on The Evaluation of Transverse Residual Stress at The Multi-pass FCA Butt Weldment Using FEA", Journal of KWJS, Vol 28, No 4, pp 380-386.

김준형, 방희선, 김창욱, 방한서 (2009). "외력작용시 극후판 EH-36-TMCP강 EGW용접부 잔류응력 및 노치선단부의 역학적 특성 고찰", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp 1677-1680.

김현수, 방희선, 장봉중, 방한서, (2009). "외력의 영향을 고려한 FCAW의 극후판 EH36-TMCP강의 용접부 및 노치부의 용접잔류응력에 관한 연구", 2009년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp 1667-1671.

이해우, 이동진, 강성원, (2008), "후판 용접부 횡균열 발생에 미치는 잔류응력의 영향", 대한용접·접합학회지, 제26권, 제4호, pp 41-43.

정천영, 손상훈, 손혜정, 공유식, 김선진, (2010). "해양구조물 강재의 다층 FCA용접에 의한 버트 용접부의 특성 및 피로균열 발생, 한국해양공학회 2010년도 추계학술대회 논문집, pp 353-356.

2011년 9월 7일 원고 접수
2011년 12월 6일 심사 완료
2011년 12월 23일 게재 확정