

극후물재 용접부 내부잔류응력 측정기술 및 특성

박 정 응* · 안 규 백** † · 우 완 측***

*조선대학교 토목공학과

**조선대학교 선박해양공학과

***한국원자력연구원 중성자과학연구부

**Characteristic and Measurement Technology of Inner Welding Residual Stresses
in Thick Steel Structures**

Jeong-ung Park*, Gyu-baek An** † and Wanchuck Woo***

*Dept. of Civil Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

***KAERI, Neutron Science Division, Daedeok-daero, Daejeon 34057, Korea

†Corresponding author : gyubaekan@chosun.ac.kr

(Received March 9, 2016 ; Revised March 28, 2016 ; Accepted April 14, 2016)

Abstract

Recent keywords of the heavy industries are large-scale structure and productivity. Especially, the sizes of the commercial vessels and the offshore structures have been gradually increased to deliver goods and explore or produce oil and natural gas in the Arctic. High heat input welding processes such as electro gas welding (EGW) have been widely used for welding thick steel plates with flux-cored arc welding (FCAW), especially in the shipbuilding industries. Because high heat input welding may cause the detrimental effects on the fracture toughness of the welded joint and the heat affected zone, it is essential to obtain the sufficient toughness of welded joint. There are well known that the fracture toughness like CTOD, CVN, and KIC were very important factors in order to secure the safety of the structures. Furthermore, the welding residual stress should be considered to estimate the unstable fracture in both EGW and FCAW. However, there are no references on the welding residual stress distribution of EGW and FCAW with thick steel plates. Therefore the welding residual stresses were very important elements to evaluate the safety of the welded structure. Based on the measurement results, the characteristics of residual stress distribution through thickness were compared between one-pass electron gas welding and multi-pass flux-cored arc welding. The longitudinal residual stress in the multi-pass flux-cored arc welding is tensile through all thicknesses in the welding fusion zone. Meanwhile, longitudinal residual stress of EGW is tensile on both surfaces and compressive at the inside of the plate. The magnitude of residual stresses by electron gas welding is lower than that by flux-cored arc welding.

Key Words : Welding residual stress, Thick steel plate, Heat input, Fracture toughness

1. 서 론

현대산업의 키워드는 대형화와 생산성이라고 할 수 있다. 특히, 조선의 경우는 많은 물량을 한번에 운송하기 위하여 선박의 크기를 대형화 하고 있으며, 해양구

조물은 극지와 같은 생산이 어려운 환경에서의 oil & gas 를 채굴하기 위한 노력이 증가 하고 있다. 이러한 산업에는 주로 고성능을 갖는 강재가 사용되고 있으며, 엄격하게 요구되는 조건을 만족 시켜야 한다. 한편, 조선산업의 사례에서 보면, 컨테이너선의 경우는 운송비용의 절감을 위하여 그 크기가 최근 19,200 TEU (Twenty-

foot Equivalent Unit)까지 증가 하였다¹⁾. 이러한 대형선박의 건조를 위해서는 기존에 사용되었던 강재와는 다른 고강도 극후물재의 강재가 요구 되고 있다²⁾. 예를 들면, 컨테이너선에서는 선박의 구조설계상 상부 구조물인 Hatch side coaming 부에 가장 두꺼운 고강도의 강재가 적용되는데, 현재까지 세계적으로 개발된 조선용 강재는 고강도강인 항복강도가 460MPa급 (EH47) 이고, 두께는 90mm 이상 이다. 이처럼 고강도 극후물 강재가 대형용접구조물에 적용될 때 강재 두께의 증가와 함께 불안전파괴의 발생 가능성도 함께 증가 하게 된다.

최근의 산업동향에 맞게 고강도 극후물재의 적용은 피할 수 없는 현실이므로 제조비용의 절감을 위해서는 효율적인 용접프로세스를 적용하는 것이 중요하다. 그러므로, 대입열용접인 Electro Gas arc Welding(EGW)은 Flux-Cored Arc Welding (FCAW)과 함께 높은 용접입열을 이용하여 생산성을 향상 시킬 수 있기 때문에 특히 조선산업에서 널리 이용되고 있다. 이처럼 대입열이 적용되는 경우는 금속 및 용접 열 영향부의 인성에 악영향을 일으킬 수 있기 때문에, 용접부의 인성을 충분히 확보하는 것은 필수적이다. 물론 파괴안전성 평가에 있어서 CTOD, CVN 및 K_{IC} 같은 파괴인성 인자는 용접 구조물의 안전성을 평가하기 위한 매우 중요한 수단으로 잘 알려져 있다. 또한, FCAW, EGW 와 같은 용접프로세스에 의한 이음부에서 불안정 파괴를 평가할 때 용접 잔류 응력은 반드시 고려되어야 하는 인자중의 하나이다. 특히, 두께가 50mm 이상의 극후물재에 대한 용접프로세스별 용접잔류응력에 관한 연구는 거의 없는 상태이다.

최근 Inoue는 강재의 두께가 65mm 이상이 되면 불안전파괴의 원인이 되는 취성균열이 용접부에서 발생하여 계속 직진 전파하게 되어 불안전 파괴가 발생되며, 두께가 65mm 이하의 강재에서는 용접부에서 발생된 취성균열이 모재로 진행 되어서 모재의 성능이 우수하면 불안전파괴를 정지 시킬 수 있다고 주장하고 있다. 즉, 강재의 두께가 용접이음부의 불안전파괴의 주요 원인이라고 보고하고 있다⁵⁾. 그러나, 강재의 두께만이 원인이 되어서 용접부에서 발생하는 취성균열의 전파경로가 변화 된다고 하는 주장은 그 근거가 명확하지 못하다.

안규백 등^{6,7)}은 불안전파괴의 원인이 되는 인자를 찾기 위하여 다양한 두께에 대하여 대입열과 소입열 용접 프로세스를 적용하여 대형파괴시험을 실시하였다. 또한, 용접프로세스별 용접부의 잔류응력분포를 측정하여서 잔류응력이 불안전파괴에 미치는 영향에 대하여 규명하였다. 그들은 연구를 통하여 불안전파괴 시 발생하는 균

열의 전파경로는 용접입열에 따른 잔류응력의 변화가 크게 작용하고 있음을 규명하였으며, 특히 두께방향으로 분포하는 잔류응력은 균열전파 경로에 큰 영향을 미치고 있음을 파악 하였다. 하지만, 종래의 용접 잔류 응력에 관한 연구는 유한요소해석에 의한 용접잔류의 영향에 미치는 입열조건의 영향 (시료 크기, 모양, 경계 조건)을 분석하기 위한 용접잔류응력의 예측을 위하여 시험 및 분석 방법을 개발하는데 중점을 두고 연구가 진행 되었다³⁾. 특히, 파이프라인과 같은 특수 산업에서의 잔류응력해석 방법을 두께 30mm 정도의 강재를 가지고 연구를 수행 하였다⁴⁾. 용접 이음에서의 불안전파괴의 원인이 될 수 있는 가장 취약한 부분에 대한 용접 잔류응력 조사를 통한 연구결과가 필요하다. 뿐만 아니라, 용접잔류응력에 관한 연구는 10년 전에 두께가 30mm 인 강재를 가지고 단지 용접부 표면에서 이루어진 연구가 대부분 이라고 할 수 있다. 그 당시에는 많은 산업분야의 구조물이 후판을 사용하지 않아 두께 30mm의 용접부 잔류응력 해석으로도 충분했지만, 최근의 산업에서는 강구조물의 대형화에 따라 적용되는 강재 또한 극후물화되고 있는 추세이므로 현대산업에서 적용되는 강재에 대한 용접 잔류응력 분포에 대한 보다 상세한 검토가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 두께 70mm 강판에 대해 대입열과 소입열 용접에 의한 용접잔류응력 분포를 고유변형도법을 이용하여 측정하였다. 그리고 입열량에 따른 잔류응력의 분포특성을 고찰하였다.

2. 후판의 내부 잔류응력 측정방법

2.1 내부 잔류응력 측정법

종래의 연구자들은 단지 표면에서의 용접잔류응력에만 관심을 갖고 측정을 하였다. 최근에는 강구조물의 대형화에 따라서 적용강재의 극후물화가 급속하게 이루어지고 있으므로 다양한 산업분야에서 극후물재가 사용되고 있다. 그러므로 이러한 산업의 요구에 대응하기 위하여 극후물재 용접부의 내부 용접잔류응력의 분석 및 측정이 필요하다.

이러한 극후물재에 대한 용접잔류응력의 측정법에는 대표적으로 다음과 같이 3가지, ① 비파괴적인방법(X-ray⁸⁾, synchrotron S-ray, neutrons^{9,10)}, Magnetic, Ultrasonic), ② 중간파괴적인방법(center-hole, ring core, deep-hole drilling^{1,12)}), ③ 파괴적인방법(contour, inherent^{13,14)}, slitting)로 분류할 수 있다.

Fig. 1은 측정방법에 따른 용접잔류응력을 측정 가능한 두께범위를 보여주고 있다. 주로 표면에서의 잔류응력

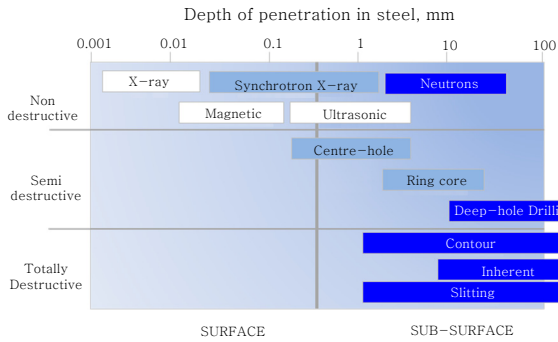


Fig. 1 Residual stress measurement methods

측정에 쉽게 적용할 수 있는 X-ray 방법, hole drilling 방법은 표면에 국한되고 있으며, 본 연구에서 관심있는 극후물체의 내부의 잔류응력을 측정할 수 있는 방법으로 neutrons, deep-hole drilling, 고유변형도, 그리고 contour method 정도라고 할 수 있다. 각각의 잔류응력 측정법의 위에서 언급한 것과 같이 파괴적인 방법에서 비파괴적인 방법을 모두 포함하고 있어, 서로의 장단점을 잘 상호보완 할 수 있을 것으로 판단 된다. 본 연구에서는 고유변형도법에 의해 내부잔류응력을 측정하였다.

2.2 고유변형도 이론

용접에 의해 발생하는 고유변형은 일반적으로 용접부 근방에서 발생하고, 그 범위는 용접열에 의해 열탄소성이력을 받는 영역에서 발생된다. 고유변형은 2가지로 분류할 수 있는데 구조물의 변형을 유발시키나 잔류응력을 발생시키지 않은 비유효 고유변형(ineffective inherent strains)과 잔류응력을 유발시키는 유효고유변형(effective inherent strains) (여기서는 이후 “고유변형”이라 함)으로 나누어진다.

고유변형 $\{\epsilon^*\}$ 과 그 고유변형에 의해 탄성체의 임의 위치에 발생하는 탄성변형 $\{\epsilon\}$ 사이에는 식(1)과 같은 관계가 성립된다. 또한 응력 $\{\sigma\}$ 과 고유변형 $\{\epsilon^*\}$ 사이에는 식(2)와 같은 관계가 성립된다¹⁵⁾.

$$\{\epsilon\} = [H^*] \{\epsilon^*\} \tag{1}$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} = [D][H^*] \{\epsilon^*\} \tag{2}$$

여기서 $\{\epsilon\}$: 탄성변형, $\{\epsilon^*\}$: 고유변형, $\{\sigma\}$: 응력, $[H^*]$: 탄성응답매트릭스(elastic response matrix), $[D]$: 탄성응력-변형매트릭스(elastic stress-strain matrix)이다.

고유변형이 분포하는 영역과 크기는 절단과정에서 새로운 소성변형이 발생되지 않으면 변화하지 않으므로

다음과 같이 추정할 수 있다.

먼저, 시험체에 존재하는 탄성변형을 측정하기 위해 미리 스트레인 게이지를 부착하고 이를 절단하여 해방시켜 가능한 많은 탄성변형 $\{\epsilon_m\}$ 를 측정한다. 이 탄성변형은 다양한 측정오차가 혼입될 가능성이 있으므로, 식(3)로부터 다음과 같은 측정방정식을 유도할 수 있다.

$$\{\epsilon_m\} - [H^*] \{\epsilon^*\} = \{V\} \tag{3}$$

여기서 $\{\epsilon^*\}$: 고유변형의 최확치(most probable values of inherent strain), $\{V\}$: 오차(residuals)이다.

고유변형의 최확치 $\{\epsilon^*\}$ 는 최소자승법으로부터 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\{\epsilon^*\} = (([H^*]^T [H^*])^{-1} [H^*]^T \{\epsilon_m\}) \tag{4}$$

구해진 고유변형의 최확치 $\{\epsilon^*\}$ 을 식(4)의 $\{\epsilon^*\}$ 으로 치환하면 응력의 최확치 $\{\sigma\}$ 은 식(5)와 같이 기술할 수 있다. 구해진 식(5)를 이용한 탄성해석을 실시하면 전체구조물의 잔류응력을 예측할 수 있다.

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} = [D][H^*] \{\epsilon^*\} \tag{5}$$

2.3 고유변형도 실험

Fig. 2는 EGW Single-pass 용접과 FCAW Multi-pass 용접프로세스에 의해 제작된 맞대기 용접시험편을 보여주고 있다. 시험편의 크기는 길이 600mm, 폭 600mm이고 두께는 70mm이다. 다층 FCAW 용접은 총 60패스, 21층 용접을 실시하였고, EGW 용접은 두께 70mm의 맞대기 용접부를 양 표면에 백킹재를 부착하고 one pass로 용접을 하였다. 사용된 모재와 용접의 물성치는 조선용 YP 390MPa급강 고장력강, EH40-grade 강재이며, 이 강재의 기계적 성질은 Table 1에 보여주고 있다. EGW 용접과 FCAW 용접조건은 table 2와

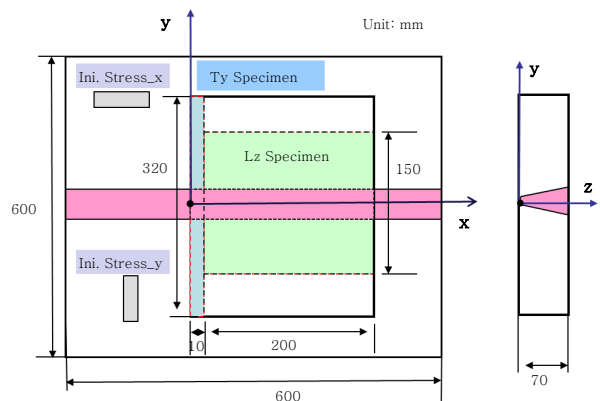


Fig. 2 Dimension of specimen

Table 1 Properties of base and consumable metal

Material	YP(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
EH40-grade	390	530	21
Consumables	570	610	19

Table 2 Welding condition

Welding Process	Current	Voltage	Speed	Heat input	No. of Pass/Layer
EGW	400A	41V	3.8CPM	55kJ/mm	1/1
FCAW	255A	32V	30CPM	15~17kJ/cm	60/21

같다. 한편, 용접잔류응력에 대한 측정 및 평가는 단부의 영향이 없는 용접중양부에 대해 실시하였다.

초기응력의 측정은 용접부로 충분히 떨어져 있는 곳에서 용접선방향과 폭방향에 대해 측정하였다. 고유변형도법을 위한 탄성변형의 측정을 위해 Fig. 2의 본 시험체(600×600×70mm)로부터 1차 절단을 실시하여 Ty와 Lz 시험체를 채취한 후, Fig. 3과 같은 순서로 방전절단(EDM cutting)과 절단면에 스트레인 게이지의 부착을 반복하여 탄성변형을 측정하였다. 그리고 측정된 탄성변형을 식 (4)를 이용해서 고유변형을 계산하였다. 본 시험편과 같이 용접선이 충분히 긴 경우 전단성분의 고유변형은 작을 것으로 가정하여 용접선방향의 고유변형 ϵ_x^* 과 용접선 직각방향의 고유변형 ϵ_y^* , 두께방향의 고유변형 ϵ_z^* 만 존재하는 것으로 가정하였다.

본 시험체로부터 Fig. 2와 같이 Lz 시험편과 Ty 시험편을 절단하여 분리하면, 절단시 새로운 고유변형이 발생하지 않으면 Lz 시험편과 Ty 시험편의 고유변형은 본래의 시험체의 고유변형 분포와 같다. 따라서 Lz 시험편으로부터 두께방향으로 절단된 각 시험편으로부터 용접선 방향의 탄성변형(계측변형)을 측정하여 이것을 이용하여 용접선방향의 고유변형을 계산할 수 있다. 또한 Ty 시험편으로부터 폭방향과 두께방향의 탄성변형을 측정하였다. 2개의 시험편으로부터 측정된 고유변형을 탄성 2차원 평면변형(plane deformation)문제로 해석하여 3차원 용접잔류응력을 계산하였다.

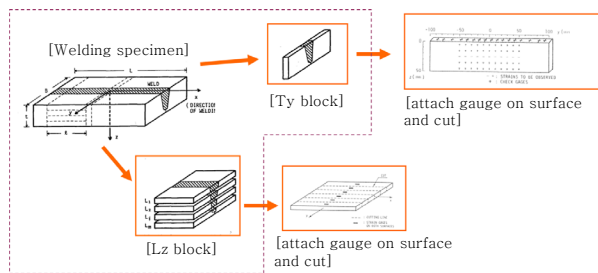


Fig. 3 Cutting process of inherent strain and residual stress

3. 입열량에 따른 내부잔류응력의 특성

용접잔류응력의 분포와 크기는 부재의 두께, 개선형상, 프로세스 등에 영향을 받는다. 따라서 용접방법에 따른 잔류응력을 정확히 예측 및 측정하여 피로 및 취성파괴 평가에 적용되어야 한다. 여기서는 고유변형도법에 의해 측정된 다층 FCAW용접과 Single pass EG 용접에 의한 잔류응력 분포를 비교하고자 한다.

Fig. 4은 폭방향으로 y=5, 60mm에서 용접선방향의 잔류응력을 보여주고 있다. 용접부의 잔류응력은 용접프로세스에 의해 확연히 차이를 보여주고 있다. 다층 FCAW용접인 경우 root부로부터 최종 층으로 올라감에 따라 먼저 용접된 부분으로부터 구속에 의해 잔류응력이 점점 더 커지는 경향을 보여주고 있다. 한편, EG용접은 두께중양을 중심으로 대칭을 이루고 있으며, 그 분포형상은 양 표면에서 인장응력이, 내부에서는 영에 가까운 응력이 존재하고 있다. 이것은 one pass 용접 후 두께 방향의 거의 동일한 온도분포가 내부보다는 표면에서 열전달이 크게 발생하기 때문이다. 이러한 잔류응력의 큰 차이는 구조물의 피로 및 파괴를 평가할 때 2차응력으로 작용하는 잔류응력성분에 큰 영향을 준다. 한편, 용접부로부터 60mm 떨어진 부분의 잔류응력은

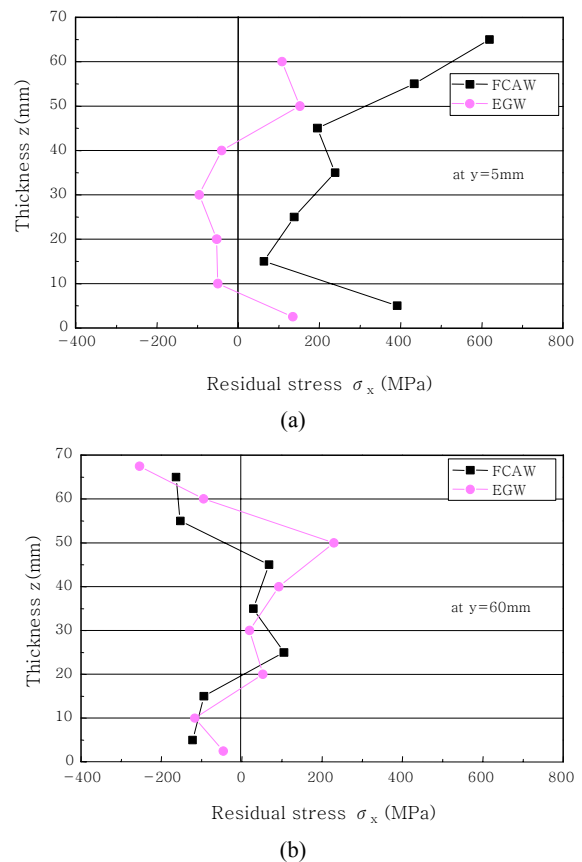


Fig. 4 Residual stress in welding directions (a) at x=300mm, y=5mm (b) at x=300mm, y=60mm

용접프로세스에 의해 약간의 차이를 보여주고 있으나 초기잔류응력의 영향을 받아 초기잔류응력의 형태와 유사하게 발생하였다.

Fig. 5는 폭방향으로 $y=5$, 60mm에서 용접선 직각 방향의 잔류응력을 보여주고 있다. 용접부($y=5$ mm)의 잔류응력은 용접프로세스에 의해 확연히 차이를 보여주고 있다. 다층 FCA용접인 경우 두께 중앙부에서 200MPa의 압축잔류응력이, 양 표면에는 200MPa의 인장잔류응력이 발생하였다. 한편, EG용접은 두께방향으로 모두 약 100MPa의 인장잔류응력이 거의 일정하게 발생하였다. 이러한 잔류응력의 분포는 용접선 직각방향으로 외적하중이 작용하는경우, FCA용접의 잔류응력은 압축과 인장응력이 발생하고 있으므로 외적하중에 의한 효과가 서로 상쇄될 수 있다. 반면, EG용접의 잔류응력은 모두 인장잔류응력이 발생하고 있어 외적하중에 중첩하여 구조물에 불리한 하중으로 작용할 수 있는 것을 의미한다. 따라서 EG용접의 용접부 안전성평가지 2차응력인 잔류응력에 대한 고려가 필수적이라 할 수 있다. 한편, 용접부로부터 60mm 떨어진 부분의 잔류응력은 용접프로세스에 의해 약간의 차이를 보여주고 있

으나 초기잔류응력의 영향을 받아 초기잔류응력의 형태와 유사하게 발생하였다.

이상으로부터 용접잔류응력의 크기 및 분포는 용접프로세스에 의해 다양한 형태로 나타나고, 용접부의 안전성 평가시 용접프로세스에 의한 잔류응력분포를 고려해야 평가되어야 한다.

4. 결 론

두께 70mm 강판을 다층 FCA용접과 Single Pass EG용접을 실시하여 고유변형도법을 이용하여 잔류응력을 측정하였다. 이러한 측정결과를 바탕으로 용접프로세스에 의한 잔류응력의 분포특성을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1) 내부잔류응력을 측정할 수 있는 고유변형도법을 적용하여 두께 70mm의 잔류응력을 측정하였다.

2) 용접부에서 다층 FCA용접과 Single Pass EG용접에 의한 용접선방향의 잔류응력은 다층FCA용접은 모두 인장응력이 발생하였으며 특히 최종 용접부 근방에서 최고 잔류응력이 발생하였다. 반면, EG용접의 잔류응력은 내부에서는 거의 zero에 가까운 잔류응력이 발생하고 양 표면에서 FCA용접보다 작은 인장응력이 발생하였다. 용접부에서 일정거리 떨어진 곳에서는 초기응력의 영향을 받아 초기응력의 분포형상과 유사한 분포를 나타냈다.

3) 용접부에서 다층 FCA용접과 Single Pass EG용접에 의한 용접선 직각방향의 잔류응력은 다층FCA용접은 내부에서 압축응력이, 양 표면에서 인장응력이 발생하였으나, Single pass EG용접은 두께방향으로 모두 인장잔류응력이 발생하였다. 용접부에서 일정거리 떨어진 곳에서는 초기응력의 영향을 받아 초기응력의 분포형상과 유사한 분포를 나타냈다.

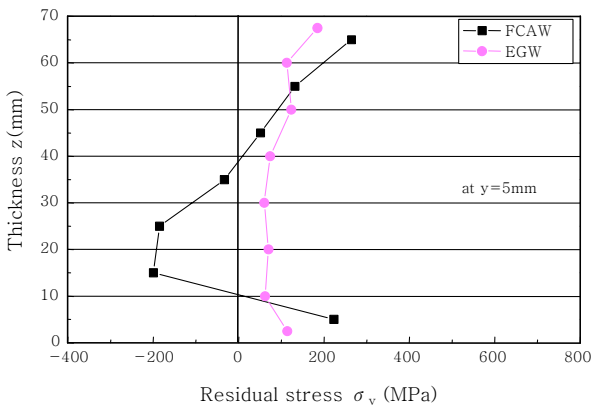
4) 용접부의 잔류응력의 분포로부터 용접선과 평행한 크랙이 있는 경우 EG용접부가 취약하고, 용접선에 직각인 크랙인 경우 FCA용접부가 취약할 것으로 판단된다. 따라서 용접부의 안전성을 평가시 용접프로세스에 의한 잔류응력의 분포를 정확히 고려하여 실시해야 한다.

후 기

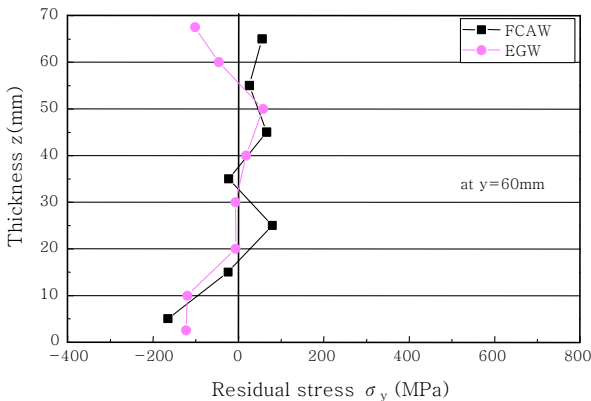
이 논문은 2012학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

1. K. Hirota, N. Takashi, T. Shingen, H. Yoshimi, T. Masuo.



(a)



(b)

Fig. 5 Residual stress in width directions (a) at $x=300$ mm, $y=5$ mm (b) at $x=300$ mm, $y=60$ mm

- Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.*, 44, 1, (2007)
2. Yamaguchi Y and Matsumoto T. *Design & Operation of Container Ships, UK*, 43 (2006)
 3. S.B. Shin, H.S.Kim, G.B. An and D. Olaf, *Iiw Doc. X-1784-2014*
 4. Shaopin Song, Pingsha Dong, *Iiw Doc. X-1788-2014*
 5. K. Inoue, T. Ishikawa, S. Imai, T. Koseki, K. Hirota, M. Tada, Y. Yamaguchi, T. Matsumoto and H. Yajima., *Proc 7st International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon*, 3322 (2007)
 6. G.B An, The proceedings of the Twenty-first (2011) international offshore and polar engineering conference, 2011 June 19-24, Maui
 7. G.B. AN, W. Woo, J.U. Park, *Int J fracture*, 185 (2014), 179
 8. M. Birkholz, C. Genzel, T. Jung, X-ray diffraction study on residual stress and preferred orientation in thin titanium films subjected to a high ion flux during deposition, *J. Appl. Phys.*, 96 (2004), 7202
 9. Woo W, Em V, Seong BS, Shin E, Mikula P, Joo J, Kang M. *J Appl Cryst*, 44 (2011), 747
 10. W. Woo, G.B. An, E.J. Kingston, A.T. DeWald, D.J. Smith, M.R. Hill, *Acta Mater*; 61 (2013), 3564
 11. George D, Kingston E, Smith DJ. *J Strain Anal Eng Des*, 37 (2002), 125
 12. Mahmoudi AH, Hossain S, Truman CE, Smith DJ, Pavier MJ. *Exp Mech.*, 49 (2009), 595
 13. Murakawa H, Luo Y, Ueda Y. Prediction of welding deformation and residual stress by elastic FEM based on inherent strain(first report) -mechanism of inherent strain production-. *Trans Soc Naval Arch Jpn*, 180 (1996), 739-51 (in Japanese)
 14. Jeong-Ung Park, GyuBaek An, Wan Chuck Woo, Jaehyok Choi, and NinshuMa, Comparison of Measured Residual Stress Distributions in Extra-Thick Butt Welds Joined by One-Pass EGW and Multipass FCAW, *Advances in Mechanical Engineering*, (2014), 1-11
 15. Ueda Y., Murakawa H., Ma N., Welding deformation and residual stress prevention, *Butterworth-Heinemann*, ISBN 978-0-12-394804-5, (2012), Elsevier