

재분포된 용접잔류응력이 충격흡수에너지에 미치는 영향

양 조 예* · 이 영 석*†

*중앙대학교 기계공학부

Effect of the welding residual stress redistribution on impact absorption energy

Zhaorui Yang* and Youngseog Lee*†

*Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

†Corresponding author : ysl@cau.ac.kr

(Received January 7, 2015 ; Accepted February 24, 2015)

Abstract

Evaluation of fracture toughness of welded structures has a significant influence on the structural design. However the residual stresses is redistributed while the welded structures is cut for preparing specimens. This study investigated an effect of the welding residual stress redistribution on the impact absorption energy of Charpy specimen. SA516Gr70 steel plate by at the flux cored arc welding (FCAW) and gas tungsten arc welding(GTAW) was cutting. Specimens for Charpy impact testing were taken from the welded plate. Two material removal mechanisms (wire cutting and water jet) were used to make the specimens. Welding residual stress and redistribution residual stress were measured using the XRD (X-Ray Diffraction) method. The amount of redistribution of residual stress depends on the different material removal mechanism. Redistribution of residual stress of reduced the impact absorption energy by 15%.

Key Words : Welding, Residual stress, Redistributed, Absorption energy

1. 서 론

용접 과정은 국부적인 급열, 냉각을 동반하기 때문에 용접부 주변에 잔류응력이 발생하게 된다. 용접부에 발생한 잔류응력(이하 용접잔류응력)은 용접된 구조물의 피로강도를 저하시키거나, 응력부식을 유발하여 미세균열 진전이 용이해 진다. 따라서 용접된 구조물의 안전성을 조사하기 위한 용접잔류응력의 분포 및 크기를 측정해야 한다.

용접된 구조물의 크기가 작을 경우, 그 구조물 전체를 가열로에 넣어 어닐링(Annealing) 열처리를 통해 용접 잔류응력을 거의 완벽하게 제거 할 수 있다. 용접된 구조물의 크기가 클 경우, 가열로에 넣어 어닐링(Annealing) 열처리를 할 수 없다. 즉 이와 같은 경우 용접된 구조물의 안정성을 조사해야 한다. 안정성 조사를 위해 구조물의 용접부에서 시편을 절취하여 용접잔류응력 분포

및 크기를 측정해야 한다. 하지만 대형 구조물의 용접부에서 시편을 절취하는 과정에서 용접부에 에너지가 전달되기 때문에 시편의 용접잔류응력 분포 및 크기가 변하게 된다¹⁻⁵⁾.

본 연구에서는 이러한 용접잔류응력 분포 및 크기 변화를 ‘잔류응력 재분포’ 라고 부른다. 따라서 용접된 대형 구조물의 안전성을 면밀하게 조사하기 위해서는 시편 절취과정에서 재분포되는 잔류응력과 용접잔류응력(즉, 초기 잔류응력)을 비교/분석 할 필요성이 있다.

최근에 연구자들이 기계가공에 의한 용접부 잔류응력 재분포에 관한 연구에 많이 주목하고 있다. Michael B. Prime 등은 25.4mm 두께의 알루미늄 평판의 마찰용접을 수행한 후 용접된 판 중심부에서 시편을 절취했다⁶⁾. 그들은 중성자 회절법을 사용해서 절취된 시편의 잔류응력을 측정해서 용접잔류응력과 비교했다. 재분포된 인장 잔류응력이 초기 용접 인장 잔류응력보다 10MPa (25%) 감소된다고 보고하였다. 이것은 용접된 판 시편

의 단면 폭(305mm)이 절취된 시편의 단면 폭(160mm)보다 2.4배 이상 크지 않기 때문이다. 따라서 대형 구조물의 용접부에서 시편을 절취하는 경우 St.Venant's 특성거리(St.Venant's characteristic distances)는 St.Venant's 이론⁷⁾을 적용하여 용접 단면 폭을 선택해 계산해야 한다. J Altenkirch 등⁸⁾ 연구자들은 용접부 길이와 시편 절단 폭의 비율에 따라 잔류응력 재분포 변화에 관한 연구를 수행했다. 그들의 연구는 두께가 3, 4, 12mm이고 길이가 40~1000mm인 강판을 이용하여 hybrid laser-MIG, pulsed-MIG, FSW (Friction Stir Welding) 용접을 수행했다. 용접된 평판에서 용접방향의 수직방향과 용접 단면방향으로 절단했다. 절단 간격은 용접 길이에 따라 비율적으로 증가하였다. X-Ray 회절법을 사용하여 절단된 시편의 잔류응력을 측정하였다. 절단으로 인해 재분포된 잔류응력과 초기 용접잔류응력을 비교하여 커팅에 의해 재분포된 잔류응력의 완화식을 산출하였다. Wenchun Jiang 등⁹⁾은 시편을 용접한 후 용접방향의 중심횡단면부터 양쪽 대칭적인 10, 150, 300mm 간격으로 시편을 절단했다. 절단된 시편의 길이 방향과 폭 방향의 응력 완화상태를 측정하였다. 열영향부(HAZ)의 잔류응력이 절단에 의해 가장 많이 완화된다고 한다. 또한 유한요소해석결과를 이용하여 절단 크기에 관한 응력완화관계식을 산출하였다. 하지만 이들의 연구^{6,8,9)}는 커팅 방법에 따른 잔류응력 재분포와 충격흡수 에너지 변화를 측정하지 않았다.

따라서 본 연구는 커팅 방법에 따른 용접 잔류응력 재분포가 샤르피 충격흡수 에너지에 미치는 영향을 연구하였다. 용접방법은 FCAW(Flux Cored Arc Welding)와 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)를 선택하였다. 사용한 용접 소재는 SA516Gr.70 이고 용접된 강판에서 시편을 절취하기 위해 Wire cutting 및 Water jet 커팅법을 사용하였다. 커팅한 시편을 ASTM규격에 따라 샤르피(Charpy) 시편으로 다시 가공하였다. 각 단계 (커팅 및 밀링) 마다 재분포된 잔류응력이 측정되

었다. 샤르피 충격실험을 수행해서 잔류응력 재분포가 충격흡수에너지에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실 험

2.1 용 접

본 연구에서 사용하는 강판 재료가 압력용기, 발전소에 많이 사용하는 SA516Gr. 70 이다. 강판의 두께는 14mm이고 길이는 150mm이다 (Fig. 1). 용가재는 FCAW인 경우 AWS규격에 따라 보호 기체가 75%Ar25%CO₂를 사용하고 용접봉은 E91T1-B3를 선택하였다. GTAW에서 용착금속은 ER70S-2를 사용하였다. 모재와 용가재의 화학성분과 기계적 성질은 Table 1에서 나타낸다.

FCAW와 GTAW는 모두 맞대기 용접방식으로 V자형 groove를 사용하였다. Groove 사이간격은 4mm이고 groove angle는 30도였다. 강판의 고정은 4개의 모서리를 구속시켰다. 또한 용접 시작과 끝부분의 입열 불균일을 방지하기 위해 판의 양끝부분이 50mm 길이의 용접 보조대를 부착하였다. 강판 고정 및 보조대 부착 작업에서 생성된 잔류응력을 제거하기 위해 강판을

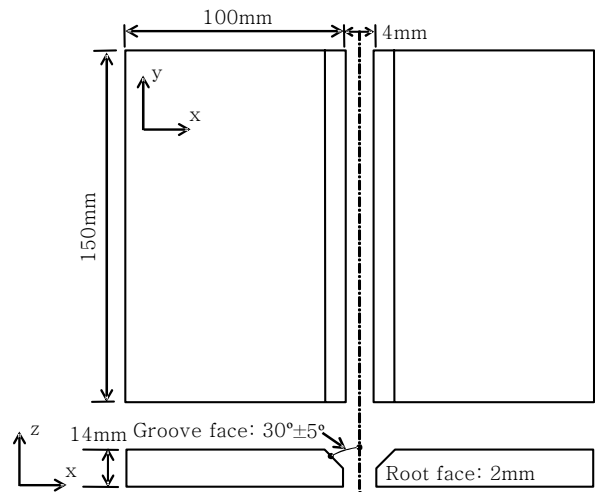


Fig. 1 Weld plate showing dimension and location of the Temperature measurement

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of the base material and weld material

	Materials	Typical chemical compositions			UTS	Yield strength	Elongation
		C	Si	Mn	N/mm ²	N/mm ²	%
Base metal	SA516Gr.70	~0.28	0.15~0.4	0.85~1.2	485~620	260~	17~
Weld metal	E91T1-B3(FCAW)	~0.08	~0.62	~0.54	~726	604	19
	ER70S-2(GTAW)	~0.07	0.4~0.7	0.9~1.4	540	410	25

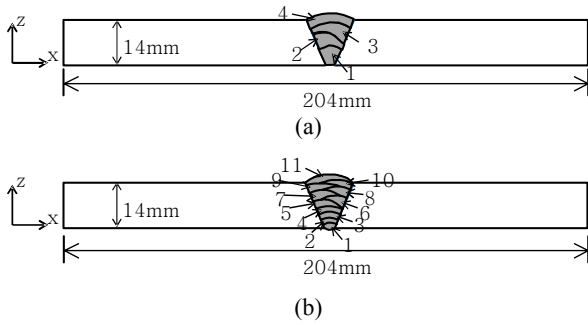


Fig. 2 Weld bead position of (a) Flux cored arc welding and (b) Gas tungsten arc welding

400°C 예열 후 자연상태에서 상온까지 냉각시켰다. 각 방법에 따른 용접 파라미터(parameter)는 다음 Tabel 2와 같다. 용접 비드(weld bead) 위치는 다음 Fig. 2에서 나타낸다. FCAW 용접은 4패스(Fig. 2(a))로 용접했고 용접 패스(weld pass) 측간온도는 160-200°C을 유지하였다. 같은 용접 측간 온도로 11패(Fig. 2(b))의 GTAW 용접을 수행했다.

2.2 잔류응력 측정

본 연구에서 용접 시편과 커팅된 시편의 잔류응력 측정은 XRD(X-Ray Diffraction) 법¹⁰⁾을 이용하여 측정했다. 잔류응력이 생긴 재료는 결정 구조가 변형되며 격자면 간격 변화한다. XRD법은 변형으로 인한 격자면 간격의 피크(peak) 값을 측정하여 잔류응력을 계산하는 것이다. 결정구조 계면간격 변화를 통해서 변형률을 얻을 수 있다. 다음 식(1)과 같다.

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \tag{1}$$

여기서 d는 시편에 잔류응력이 있는 상태의 격자면 간격, d₀는 잔류응력 없는 상태의 격자면 간격이다. XRD 측정할 때 X-Ray 투사선은 시편 표면의 수직방향(z-축)과 일치시킨다. 그 다음 응력방향(σ_{xx}, σ_{yy})을 향하게 일정한 각도로 회전시킨다. 각 위치의 격자면 간격을 측정해서 Hookel법칙을 이용하여 응력을 구할 수 있다. 따라서 측정방향에 따라 각 방향의 응력 텐서(stress

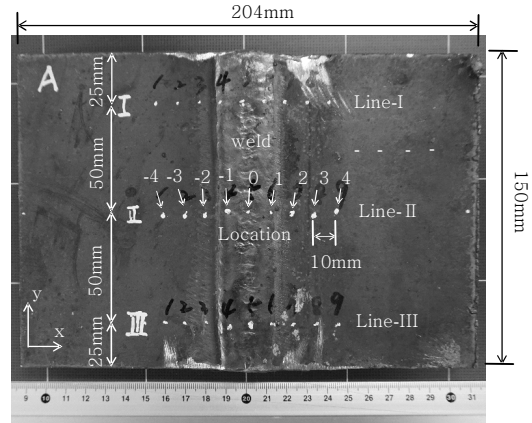


Fig. 3 The welding residual stress measurement location

tensor)를 얻을 수 있다.

XRD 측정장비는 Stresstech group에서 만든 XSTRESS-3000를 사용하였다. 측정 전압은 20KV, 전류는 2mA이다. 잔류응력 측정방향은 단면 방향(σ_{xx})과 용접 길이 방향(σ_{yy})을 측정했다. 단면방향(x-축)으로 용접부 중심선 기준에 9개의 측정위치(locations)를 선정했고 용접 시작과 끝, 그리고 가운데 3라인(fig. 3)으로 측정했다.

2.3 용접된 강판에서 시편 절취

용접된 강판에서 시편을 와이어 커팅(wire cutting)과 워터 젯 커팅(water jet cutting)으로 절취한다. 시편 절취 크기는 샤프피 시편 크기 기준으로 커팅했고 위치는 용접 라인 중심으로 모재까지 절취하였다. Fig. 4는 용접된 판에서 시편을 절취 한 모습이다.

와이어 커팅에 사용된 와이어 직경은 0.2mm이었고 gap사이즈는 0.4mm 였다. 커팅 전압이 100V, 전류는 30A, 와이어 장력(wire tension)은 20N이다. 모재의 절단 속도는 0.05mm/s이고, 용접부 절단 속도는 0.03mm/s이다. 와이어 커팅 기계는 일본 SODICK회사에서 제작된 Wirecut EDM AP200L를 사용했다. Fig. 4(a)는 와이어 커팅으로 시편 절취 후 용접 가판 모습이다.

워터 젯 커팅가공에서 상용한 노즐 지름(cutting gab)

Table 2 Welding condition

	Average current [A]	Average voltage [V]	Weir diameter [mm]	Welding speed [mm/s]
FCAW	220	24	1.6	5~6
GTAW	200	17	2	1.4~1.6

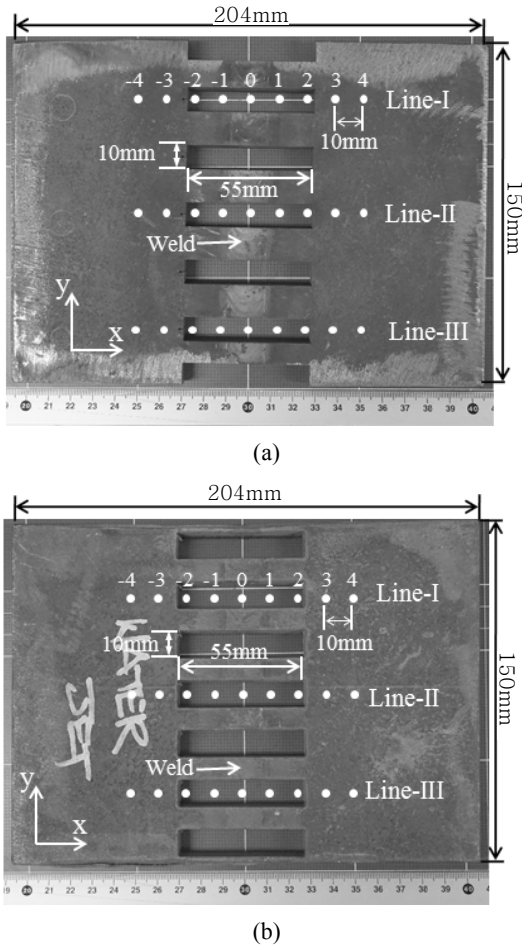


Fig. 4 The welded plate of the wire cutting and waterjet

은 0.5mm이고 분사 수압은 38MPa이다. 워터 제트 커팅의 재료연마 흐름률은 680g/min, 커팅 속도는 100mm/min이다. 워터 제트 커팅된 강판 모습은 Fig. 4(b)에서 보여준다. 워터 제트 커팅은 한국 비씨 워터제트(B.C waterjet) 회사에서 제작된 BC-1212 커팅 장비를 사용했다. 또한 강판에서 시편 절취한 후 ASTM E23-07a 규격에 따라 샤르피 시편으로 정밀(finishing) 가공을 하였다.

절취된 시편의 재분포된 잔류응력 측정오차를 줄이기 위해 표면처리를 수행하였다. 시편 표면 처리는 SiC (#800, #2000) 페이퍼(paper)를 사용하여 기계식 연마를 한다. 연마한 후 5% HNO₃+95% methanol를 이용해서 40초 동안 시편 표면을 에칭(etching)했다¹¹⁾. 이러한 공정을 통해 시편표면 재질이 약 0.06mm를 소모하게 된다. 처리된 시편 표면 상태는 다음 Fig. 5에서 나타낸다.

2.4 샤르피 실험

ASTM 시험규격¹²⁾에 따라 가공된 시편을 이용하여

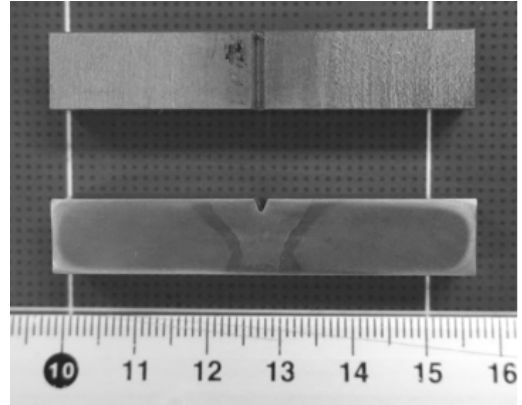


Fig. 5 The charpy test specimen surface of the etching treatment

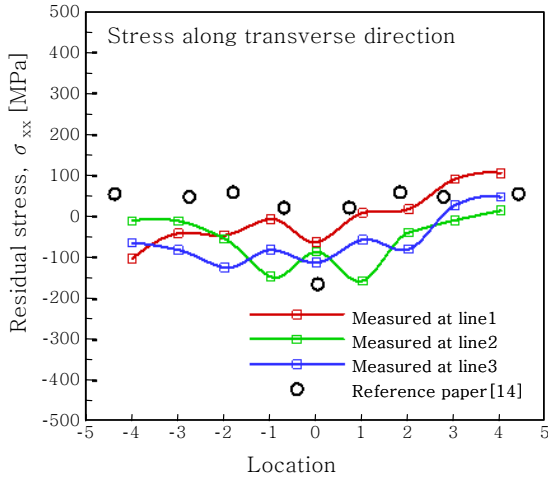
샤르피 충격 실험을 수행했다. 시편이 절취 위치 및 가공 방법으로 분리하여 동일한 하중 조건에서 실험을 진행했다. 또한 샤르피 실험은 상온에서만 실험했다.

3. 결과 및 토의

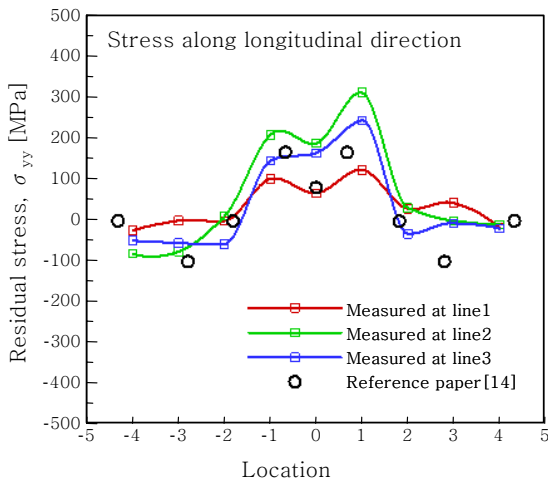
3.1 용접잔류응력

본 연구에서 용접 잔류응력은 X-방향 (용접방향과 수직) 과 Y-방향 (용접방향)으로 각 라인을 따라 9개 위치에서 측정한다. 라인에 대한 설명은 Fig. 3에 상세히 표시되어 있다. 여기서 측정된 잔류응력은 용접 및 냉각을 거친 강판의 표면에서 측정한 잔류응력이다. 즉 초기잔류응력을 의미한다. 용접 시작과 끝부분의 입열 불균일로 인해 라인1과 3을 따라 측정한 잔류응력의 크기 및 분포는 라인2에서 측정한 잔류응력의 크기 및 분포와는 약간 다르다. Fig. 6는 GTAW용접법으로 용접된 시편에서 측정한 잔류응력결과이다. Fig. 6(a)을 보면 라인2번을 따라 측정한 용접 단면방향 잔류응력분포는 Nur Syahroni등의 연구¹³⁾ 이론적 결과와 근사하다. 용접 입열에 의해 용접부의 팽창은 시편 X-축 방향이 구속되어 있으므로 용접부에 압축잔류응력이 생기고 모재로 향하면서 경계조건에 의해 인장 잔류응력으로 변환다. 또한 Fig. 6(b)는 용접방향의 잔류응력을 나타낸 것이다. 용접부에 인장 잔류응력이 분포되었다. 잔류응력이 용접부에서 HAZ(heat affected zone)방향으로 인장에서 압축으로 변화된다. 특히 HAZ근처에 응력 값이 극히 떨어진다. 이것은 용접부와 모재 사이에 냉각에 의한 강한 수축 때문이다.

Fig. 7은 FCAW용접 강판에서 측정한 잔류응력 결과이다. Fig. 6와 같은 방법으로 잔류응력을 측정하였다. Fig. 7(a)는 용접부 단면방향(X-축)의 잔류응력



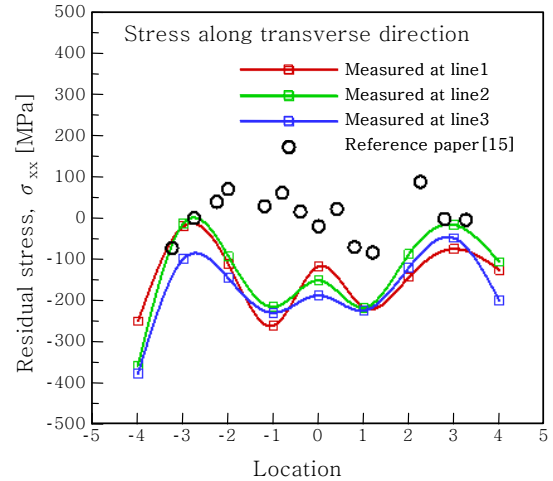
(a)



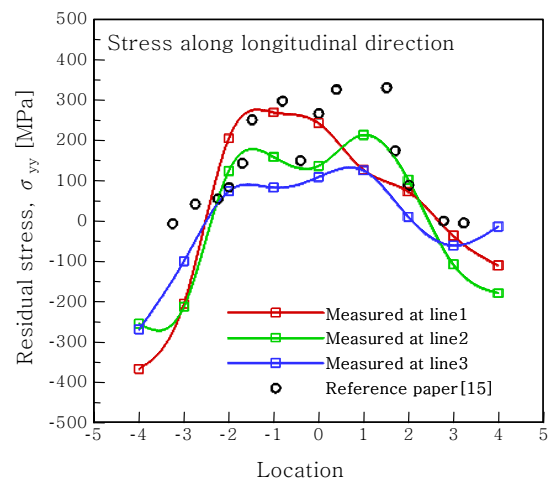
(b)

Fig. 6 Residual stress distribution of GTAW

분포결과이고 Fig. 7(b)는 용접방향(Y-축)의 잔류응력 결과이다. FCAW의 잔류응력 분포 경향은 GTAW와 비슷하게 나타난다. 그러나 FCAW의 X-축과 Y-축 방향 잔류응력이 모두 GTAW보다 기복이 심한 것으로 보인다. 이것은 FCAW에서 사용된 용착 금속의 항복강도와 인장강도가 GTAW보다 약 35% 높고 FCAW 용접속도(5~6mm/s)도 GTAW 용접속도(1.4~1.6mm/s)보다 빠르기 때문이다. Y축-방향의 용접부 최대 잔류응력 값은 GTAW(324MPa)가 FCAW (278MPa)보다 약 14%가 크게 나타낸다. 그 이유는 GTAW 용접패스 수(11pass)가 FCAW (4pass)보다 많고 총 입열량이 크기 때문이다. 본 연구는 저탄소강을 사용하여 GTAW, FCAW 용접을 수행한 기준연구^{14,15)}와 비교하였다. Deng Dean¹⁴⁾ 등의 연구에서는 Cr-Mo 강종을 사용해서 불활성 가스 용접인 GTAW와 GMAW(Gas metal arc welding)을 같이 사용하여 용접을 수행했다. Paradowska, A¹⁵⁾ 등의 연구는 저탄소강을 선택하여 FCAW



(a)



(b)

Fig. 7 Residual stress distribution of FCAW [13]=>[15]

용접을 수행했다. 본 연구에서 측정한 잔류응력 결과 (Fig. 6, Fig. 7)와 연구^{14,15)}의 연구 결과는 비슷하게 나타났다. 따라서 본 연구에서 사용한 용접 변수와 잔류응력 측정방법이 신뢰성을 갖는다고 판단된다.

3.2 시편 절취 후 잔류응력 재분포

용접된 판에서 시편을 채취하는 과정에서 용접잔류응력 (초기잔류응력)은 재분포 하게 된다. 용접 강판에서의 절단 위치는 Fig. 4에서 표시된 위치와 같다. 잔류응력 재분포 측정라인은 초기 용접잔류응력 측정과 같은 라인에서 절단된 시편에서 측정하였다. 절단된 시편 X-축 방향 길이는 55mm이기 때문에 절단된 시편의 측정위치(location)는 -2위치에서 2위치까지 있다. (측정위치는 Fig. 3 에서 표기됨).

절단된 시편의 잔류응력 재분포 측정방법은 초기 용접잔류응력 측정과 같은 XRD방법을 사용하였다. Fig. 8

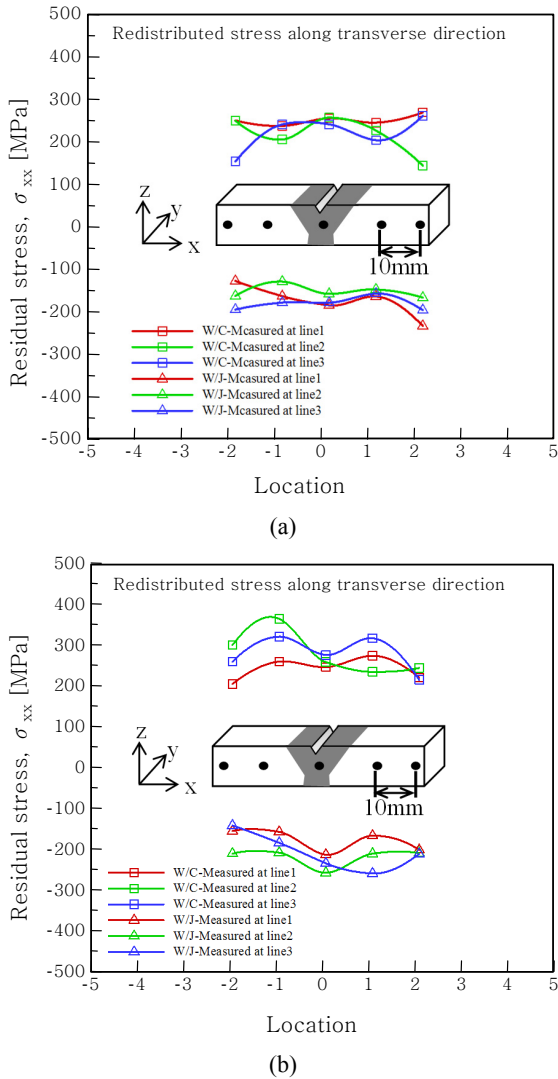


Fig. 8 Residual stress redistribution of the Charpy test specimen

은 용접된 강판에서 W/C(Wire cutting)과 W/J(water jet)으로 절단된 시편 잔류응력 재분포 측정결과이다. Fig. 8(a)는 GTAW용접 강판에서 절단된 시편의 재분포된 측정결과 이고 Fig. 8(b)는 FCAW용접 강판에서 절단된 시편의 잔류응력 재분포 측정결과 이다. 절취 방법 (water jet or wire cutting)에 따라 잔류응력 재분포 패턴(pattern)은 많이 달라지는 것을 볼 수 있다.

GTAW 용접된 강판이 W/J으로 절단하게 되면 X-축 용접 단면방향 잔류응력 재분포는 여전히 압축 잔류응력으로 분포되어 있다. W/C으로 절단된 시편의 용접부 잔류응력 재분포는 초기 용접 압축잔류응력에서 인장잔류응력으로 변한다. FCAW용접인 경우 강판에서 절단된 시편에서 측정된 잔류응력이 GTAW용접과 같은 재분포 경향을 갖고 있다. W/C 가공인 경우 초기 무응력 상태의 시편가공 후 표면에 인장응력을 생긴 것

은 V. Garcia Navas 등¹⁶⁾의 연구결과에서 보여준다. 따라서 FCAW용접 강판에서 W/C 가공된 시편의 잔류응력 재분포는 초기-155MPa의 압축잔류응력에서 인장잔류응력(255MPa)으로 변하게 된다. 또는 W/J 가공인 경우 가공된 시편표면에서 압축잔류응력이 생긴다¹⁷⁾. 그래서 FCAW용접 강판은 W/J가공된 시편에서 측정된 표면잔류응력은 -155MPa에서 -225까지 약 45%를 증가하는 것으로 재분포하게 된다.

3.3 충격 흡수에너지

잔류응력 재분포된 시편을 이용하여 ASME SEC. II SA370: 2010규격에 따라 샤르피 실험을 수행하였다. 다음 Fig. 9는 용접방법과 절단방법 별 가공된 시편의 샤르피 충격흡수에너지 측정 결과이다. 같은 용접방법의 관점에서 보면 W/J으로 절단된 시편의 충격흡수에너지(FCAW인 경우225J, GTAW인 경우175J)가 W/C으로 절단된 시편의 충격흡수에너지(FCAW인 경우180J, GTAW인 경우144J)보다 평균 약 25% 정도 크게 나타난다. 또는 용접방법이 다른 경우를 보면 W/C로 절단된 시편의 충격흡수에너지는 FCAW가 180J이고 GTAW는 144J이다. FCAW용접은 GTAW보다 20% 크게 나타난다. 마찬가지로 W/J 절단인 경우 FCAW시편의 흡수충격에너지(225J)가 GTAW시편의 흡수충격에너지(175J)보다 약 28.5%를 증가했다. 따라서 FCAW용접된 시편의 충격흡수에너지가 더 우수한다. 이것은 FCAW용접에서 사용된 용가재(weld metal)가 GTAW용접에 사용한 용가재보다 기계적 성능이 좋은 것으로 보인다. 또는 W/C보다 W/J으로 절단된 시편의 충격흡수에너지가 우수한다.

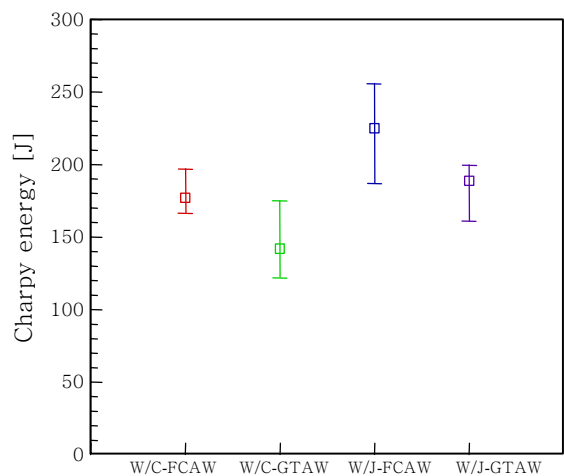
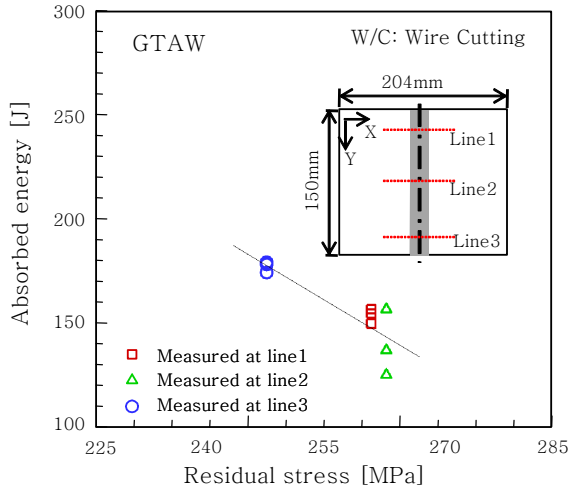
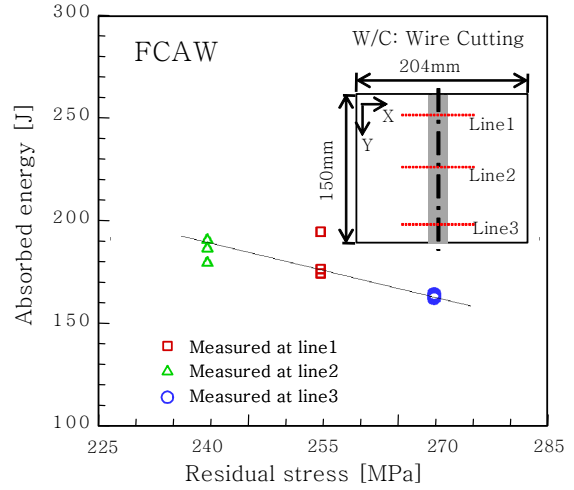


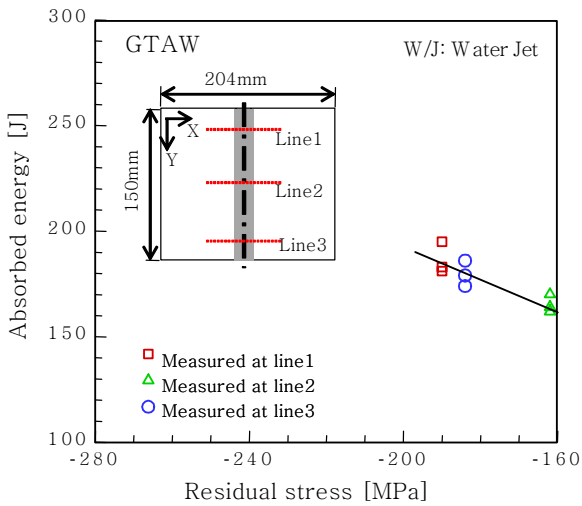
Fig. 9 The impact absorbed energy of the welding and cutting



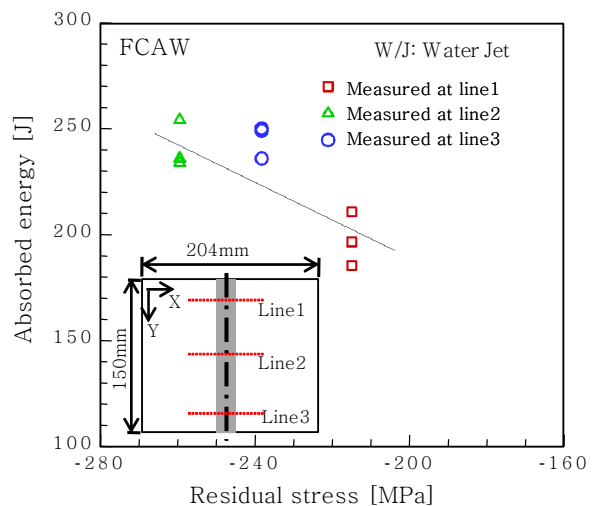
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 10 The relationship for residual stress redistribution and absorbed energy of GTAW

Fig. 11 The relationship for residual stress redistribution and absorbed energy of FCAW

Fig. 10은 재분포된 잔류응력에 따른 시편 충격흡수 에너지 결과이다. Fig. 10(a)는 GTAW용접 강판을 W/J으로 가공하여 잔류응력 재분포에 따른 충격흡수 에너지이다. Fig. 10(b)는 GTAW용접 강판을 W/C으로 가공하여 재분포된 잔류응력에 따른 충격 흡수에너지 변화이다. Fig. 10(a)에서 재분포된 잔류응력이 240MPa에서 260MPa까지 증가하면서 충격흡수에너지는 약 14% (25J)정도 떨어진다. Fig. 11(a)도 재분포된 잔류응력이 240MPa에서 270MPa까지 증가하면서 충격흡수에너지는 약 12%(22J) 감소한다. 반면에 압축잔류응력 재분포인 경우에 Fig. 11(b)는 잔류응력이 -190MPa에서 -162MPa까지 감소하면서 충격흡수에너지도 9.7%(18J) 감소한다. 따라서 표면 압축 잔류응력이 충격흡수 에너지를 증가시키는 영향보다 인장 잔류응력이 충격흡수 에너지를 감소시키는 영향이 더욱 크게 미치는 것을 볼

수 있다. 또한 이러한 재분포 된 잔류응력을 보면 W/J 방법으로 절단된 샤프피 시편의 충격흡수에너지가 더 우수하다고 볼 수 있다.

4. 결 론

1) 용접 잔류응력이 시편 절취 방법에 따라 압축과 인장 잔류응력으로 재분포하게 된다. W/C방법으로 절취된 시편은 단면 방향 잔류응력은 압축잔류응력에서 인장으로 변화게 된다. 반면에 W/J방법으로 절취된 시편은 압축잔류응력은 그대로 압축잔류응력으로 재분포한다.

2) FCAW용접된 시편의 충격흡수에너지가 GTAW 용접된 시편의 충격흡수에너지보다 높다. 같은 용접방법에도 W/J으로 절취된 시편의 충격흡수에너지가 W/C 절취된 시편의 충격흡수에너지보다 높게 나타낸다. 즉

절취방법에 따라 샤르피 시편의 충격흡수에너지가 변한다.

3) 시편 표면에 압축잔류응력을 증가시켜 충격흡수 에너지를 높이는 것보다 표면 인장잔류응력을 감소시키는 것이 더욱 효과적이다. 설계자의 입장에서는 시편 표면에 적절히 압축잔류응력이 있는 상태에서 얻은 결과가 오히려 구조설계에 좋은 영향을 줄 수 있다.

References

- Sridhar B.R, Devanda G, Ramachandra K., Effect of Machining Parameters and Heat Treatment on the Residual Stress Distribution in Titanium Alloy IMI-834, *J Mater Process Technol*, 139 (2003), 628-634
- Ulutun D, Alaca EB, Lazoglu I.J., Analytical Modelling of Residual Stresses in Machining, *J Mater Process Technol*, 183 (2007), 77-87
- Dattoma V, Giorgi MD, Nobile R., On the Evolution of Welding Residual Stress after Milling and Cutting Machining, *Comput Struct*, 84 (2006), 1965-1976
- Hee-seon Bang, Han-Sur Bang, Ik-Hyun Oh, Jun-Hyung Kim, Analysis of welding residual stress redistributions on notched multi-pass FCA butt weldment, *Journal of KWJS*, 28 (2010), 86-91 (in Korean)
- Myoung-Soo Han, Welding simulation incorporating the mechanical relaxation due to melting, *Journal of KWJS*, 25 (2007), 22-26 (in Korean)
- Michael B. Prime, Thomas Gnauple-Herold, John A. Baumann, Richard J. Lederich, David M. Bowden, Robert J. Sebring,, Residual stress measurements in a thick, dissimilar aluminum alloy friction stir weld, *Acta Materialia*, 54 (2006), 4013-4021
- A. J. C. B. Saint-Venant, Memoire sur la Torsion des Prismes, *Mem. Divers Savants*, 14(1885), 233-560
- J Altenkirch, A Steuwer, MJ Peel, PJ Withers, The Extent of Relaxation of Weld Residual Stresses on Cutting out Cross-Weld Test-Pieces, *JCPDS-International center for diffraction data*, (2009), 593-607
- Wenchun Jiang, Wanchuck Woo, Gyu-Baek An, Jeong-Ung Park, Neutron diffraction and finite element modeling to study the weld residual stress relaxation induced by cutting, *Materials and Design*, 51 (2013), 415-420
- Vladimir Ivanovith Monin, Ricardo Tadeu Lopes, Sergio Noleto Turibus, Joao C. Payao Filho, Joaquim Teixeira de Assis, X-Ray diffraction technique applied to study of residual stresses after welding of duplex stainless steel plates, *Materials Research.*, 17 (2014), pp.64-69
- Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, *ASTM: E407-07*, (2011)
- Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, *ASTM: E23-07a*
- Nur Syahroni, Mas Irfan Purbawanto Hidayat, 3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stresses and Distortions, *Numerical Simulation-From Theory to Industry*, (2012), 583-606
- Deng Dean, Murakawa Hidekazu, Prediction of welding residual stress in multi-pass butt-welded modified 9Cr-1Mo steel pipe considering phase transformation effects, *Computational Materials Science*, 37 (2006), 209-219
- Paradowska. A., Price. J. W., Ibrahim. R., Finlayson.T., A neutron diffraction study of residual stress due to welding, *Journal of materials processing technology*, 164 (2005), 1099-1105
- V. Garcia Navas, I. Ferreres, J.A. Maranon, C. Garcia-Rosales, J. Gil Sevillano, Electro-discharge machining (EDM) versus hard turning and grinding-Comparison of residual stresses and surface integrity generated in AISI O1 tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 195 (2008),186-194.
- D. Arola, M. Ramulu, Material removal in abrasive waterjet machining of metals A residual stress analysis, *Wear*, 211 (1997), 302-310