

Steering Gear 모듈화를 위한 일체형 Rack Housing의 공정에 관한 연구 [I] - 열원에 따른 SAE1020강의 용접특성 -

김종도† · 이창제*

(원고접수일 : 2007년 월 일, 심사완료일 : 2007년 월 일)

A Study on Processing of Monolithic Rack Housing for Modular Steering Gear [I] - The Weldability of SAE1020 Steel by Different Heat Sources -

Jong-Do Kim† · Chang-Je Lee*

Abstract : General metal welding occurs distortion. Also, reducing distortion is required much cost. Therefore, the purpose of this study is optimization of welding conditions to reduce distortion in welding of monolithic rack housing for modular steering gear. Firstly, heat source for welding was chosen arc and laser. Secondly, it investigated optimizing welding conditions in bead welding by arc and laser heat source, and welding conditions in fillet welding was optimized with welding shapes. Finally, it was measured temperature distribution of welds by infrared camera and angle distortion in fillet welding. As a result, laser welding was superior to arc welding on distortion.

Key words : SAE1020 steel(SAE1020강), MIG welding(MIG용접), Laser welding(레이저용접), Temperature distribution(온도분포), Welding distortion(용접변형)

1. 서 론

기계부품의 제작 시 수반되는 용접작업은 제품에 변형을 초래하며, 이러한 용접작업에 의한 변형은 재료의 종류, 제품의 형상, 가공프로세스에 따른 그 변형정도가 상이하어 규격화된 작업모형을 만들기 어렵다.^[1] 따라서, 제품에 따라 설계나 구조가 변경될 때마다 지그(jig)의 변경, 불량률의 발생 및

추가공정 등으로 인한 런닝코스트(running cost)의 상승을 초래하고 있다.^[2]

이에 본 연구에서는 자동차 조향장치의 일부인 steering gear housing제조에 특화된 적절한 용접조건과 변형방지 기술개발에 따른 지그의 간소화, 작업효율의 증가에 따른 코스트다운(cost down) 및 제품의 품질향상과 고정밀도 제품의 생산기술 확보를 위한 전용시스템의 개발 및 대체 프

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail:jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253

* 한국해양대학교 대학원

로세스의 개발과 용접조건의 최적화에 연구의 목적을 두고 있다.

따라서 1보에서는 열원에 따른 재료의 용접성 및 변형정도를 분석하고, 2보에서는 이를 바탕으로 제작된 전용시스템 및 일체형 rack housing에 대해서 논하도록 하겠다.

우선 본보에서는 개발될 일체형 rack housing의 주 재료인 SAE1020강을 대상으로 하여 아크용접 열원과 재료와의 상관관계를 규명하고, 저입열·저변형의 용접이 가능한 Nd:YAG레이저용접을 도입하여 이들의 적정 조건을 제시하고자 하였다.^[2]

이를 위해 비드용접(bead welding)을 통한 재료와 열원간의 상호관계를 분석하고, 이를 바탕으로 일체형 rack housing과 유사한 용접형태인 필릿용접(fillet welding)을 통해 용접조건의 최적화를 꾀하고자 하였다. 또한, 아크와 Nd:YAG레이저의 필릿용접 후 용접부의 열분포를 적외선 카메라를 이용하여 측정하였으며, 적외선 촬영에서 만들어진 시편의 각변형량(angular distortion)을 조사하여, 용접조건의 타당성과 열원에 따른 변형정도를 비교·평가하였다.^[4-6]

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 재료는 질삭성과 내마모성이 뛰어난 기계구조용강재 SAE1020강이다. SAE10xx강은 일반적인 경질용 탄소강으로써 망간(Mn)이 최대 1.00%까지 첨가된다. Table 1은 실험에 사용된 SAE1020강의 화학적 조성을 나타낸다.

실험에서 사용한 시편은 비드용접시 150mm×45mm×4.2mm^t, 필릿용접시에는 150mm×45mm×3.5mm^t의 크기로 각각 재단하여 실험을 행하였다.

Table 1 Chemical compositions of SAE1020 steel

Element Material	C	Si	Mn	P	S	Fe
SAE1020	0.19	0.2	0.39	0.015	0.008	bal.

2.2 실험방법

실험에는 인버터형 MIG와 CW Nd:YAG레이저를 열원으로 사용하였으며, 우선 재료와 열원간의 기초물성을 파악하기 위해 비드용접을 실시한 후, 이를 바탕으로 일체형 rack housing의 용접부와 유사한 필릿용접을 실시하여 MIG와 레이저의 용접특성을 조사하여 적절한 지배인자를 도출하였다.

다음으로 MIG와 레이저용접시 온도분포를 측정하기 위해 필릿용접시 적외선 카메라를 사용하여 용접직후의 온도를 측정한 후, 용접부의 온도분포를 추적하고 이때의 필릿용접부의 각변형량을 측정하여 용접변형에 가장 적절한 조건을 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열원에 따른 용접특성

3.1.1 비드용접특성

MIG용접은 기존의 생산공정에 적용되고 있는 열원으로써, 연속적인 용접이 가능한 스탠다드아크(standard arc)와 단속적 용접인 펄스아크(pulse arc)의 두 가지로 분석하였다.

스탠다드아크와 펄스아크용접시의 용접전류(A), 용접전압(V) 및 다이내믹 그리고 용접속도(v)에 따른 용접특성변화의 조사에서 용접전류와 용접속도는 용접성에 많은 영향을 미칠 것으로 판단되지만, 용접전압 및 다이내믹 인자는 조건변화에 따라 별다른 차이를 보이지 않았다. 용접전압과 다이내믹은 용접부의 외관에만 영향을 미치는 것으로 판단되기 때문에, 스탠다드아크와 펄스아크에 의한 두 용접모드의 비교는 용접전류와 용접속도만을 주 용접인자로서 분석하였다.

Fig. 1은 스탠다드아크와 펄스아크의 용접전류변화에 따른 용접특성을 비교한 것이다. 전류증가에 따른 비드폭(W_b)의 증가는 현저했으며, 스탠다드아크보다 펄스아크가 평균 약 2,193 μ m정도 크게 증가하는 모습을 보였다. 뒷살높이(H_e)는 스탠다드아크나 펄스아크 모두 비슷한 높이를 가지고 증가했으며, 증가정도는 완만하였다. 전류증가에 따

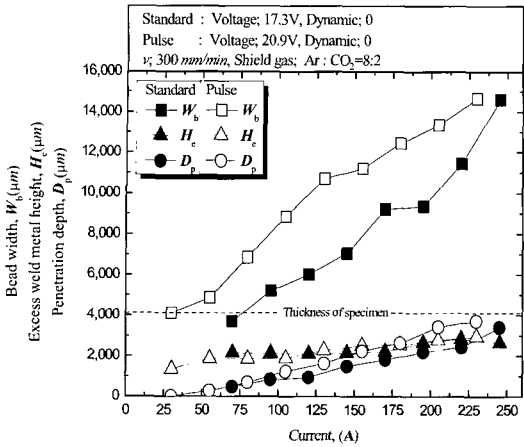


Fig. 1 Comparison with welding current of standard arc and pulse arc

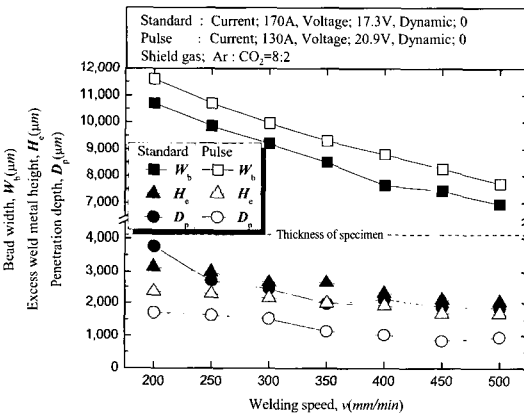


Fig. 2 Comparison with welding speed of standard arc and pulse arc

른 용입깊이(D_p) 변화는 스탠다드아크와 펄스아크 모두 증가하고 있으나, 80A부터는 오히려 펄스아크가 더 깊은 용입을 보였다.

Fig. 2는 스탠다드아크와 펄스아크의 용접속도 변화에 따른 용접특성을 비교한 것이다. 용접속도 증가에 따라 비드폭, 덧살의 높이 및 용입깊이는 모두 비슷하게 감소하고 있으며, 스탠다드아크 용접이 펄스아크 용접에 비해 용입깊이가 다소 크게 감소하였다.

지금까지 스탠다드아크와 펄스아크와의 비교를 통하여 동일 용접조건하에서는 펄스아크가 스탠다드아크에 비해 보다 작은 용접전류값으로 더 깊은 용입과 넓은 비드폭을 갖는다는 것을 알 수 있었

다. 또한 펄스아크 용접시 아크 휴지구간은 냉각시간으로 작용할 수 있기 때문에 상대적으로 입열이 작다. 따라서 펄스아크 용접이 변형의 제어에도 많은 이점이 있을 것으로 기대된다.

CW Nd:YAG레이저의 비드용접은 주요 가공인자인 비초점거리(f_d , defocused distance), 출력(P) 및 용접속도(v)에 따른 용입특성을 검토하였다.

우선 비초점거리 변화에 따른 용입깊이 변화를 조사하였다. 레이저용접은 키홀이 형성되는 조건에서 실험을 실시하여 초점거리의 변화에 따른 용입특성을 관찰하였다. Fig. 3은 비초점거리변화에 따른 용입특성을 나타낸 것으로, 플러스(+)와 마이너스(-)의 비초점으로 각각 8mm의 거리를 2mm간격으로 실험하였다.

용입깊이의 변화는 초점에서 벗어날수록 급격하게 감소하였으며, 플러스(+)와 마이너스(-)의 비초점 모두 약 4mm근방에서 어스펙트비(aspect ratio)가 역전되면서 열전도형 용접으로 전환되었다. 비드폭은 초점에서 멀어질수록 넓어지는 경향을 보였으며, 초점에서 다시 비드폭이 다소 넓어지는 경향을 나타냈는데, 이는 광학계의 특성으로 판단된다.

이와 같은 집광범의 용입특성을 고려할 때, 레이저용접시 용입깊이를 우선적으로 고려하면 초점에서 용접하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

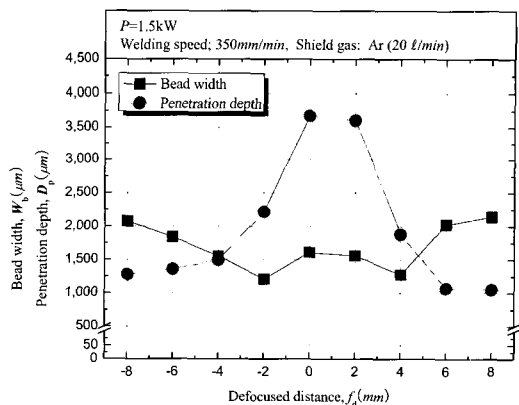
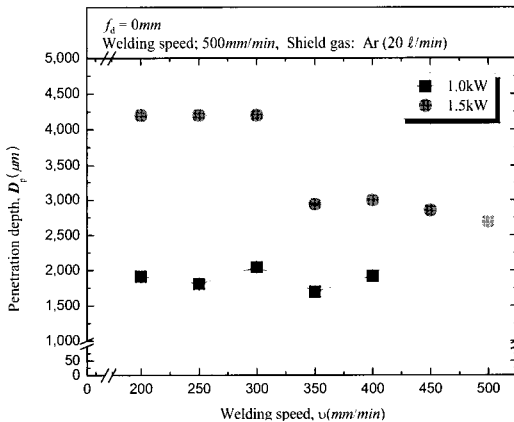


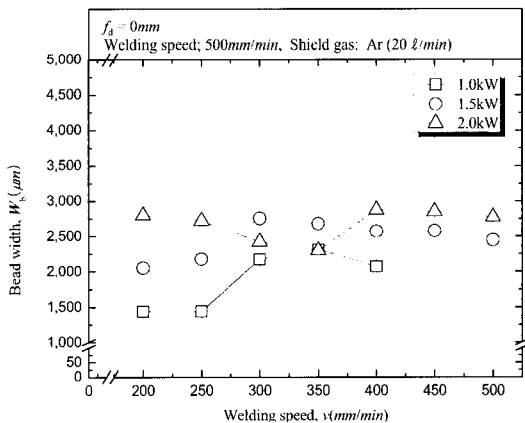
Fig. 3 Penetration properties with the focal distance (f_d) in bead welding

출력 및 용접속도 변화에 따른 용입특성은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 출력을 1.0kW에서 2.0kW까지 0.5kW간격으로 하였으며, 용접속도는 200mm/min에서 500mm/min까지 50mm/min의 간격으로 실험하였다.

용입깊이의 변화는 Fig. 5(a)에서와 같이 1.0kW의 경우에는 속도에 관계없이 용입은 모두 약 2,000 μ m였으며, 1.5kW의 경우에는 300mm/min 이하에서는 모두 완전용입되었고, 350mm/min부터 500mm/min까지는 약 3,000 μ m에서 2,700 μ m까지 서서히 감소하였다. 또한 그래프에는 나타나지 않았지만 2.0kW에서는 모두 완전용입용접이 되었다.



(a) Penetration depth, D_p (μ m)



(b) Bead width, W_b (μ m)

Fig. 4 Penetration properties with power (P) and welding speed(v) in bead welding

비드폭은 1.0kW와 1.5kW의 경우 300~350mm/min에서 그 증가폭이 포화되었으며, 2.0kW에서는 약 2,700 μ m로 거의 균일한 값을 보였으며, 이는 관통용접의 영향으로 사료된다. 따라서 rack housing의 두께 및 형상을 고려하여 출력은 1.5kW, 용접속도는 500mm/min을 선정하였다.

3.1.1 필릿용접특성

필릿용접은 일체형 rack housing과 유사한 형상으로 실제 적용을 위한 용접조건을 도출하는데 이용하였다. 각 열원의 용접조건은 비드용접시의 조건을 바탕으로 선정하였다.

우선, MIG 필릿용접은 용접시 입열의 정도를 고려하여 펄스아크로 선정하였으며, 이때 용접전류는 40A에서 120A까지 증가시키고, 용접속도는 300mm/min에서 450 mm/min으로 증가시키면서 필릿용접을 진행하였다.

Fig. 5는 필릿용접시 용접전류(A)와 용접속도(v)변화에 따른 비드폭(W_b), 각장(L_l), 목두께(T_t) 및 접합길이(L_j)의 변화를 나타내고 있다.

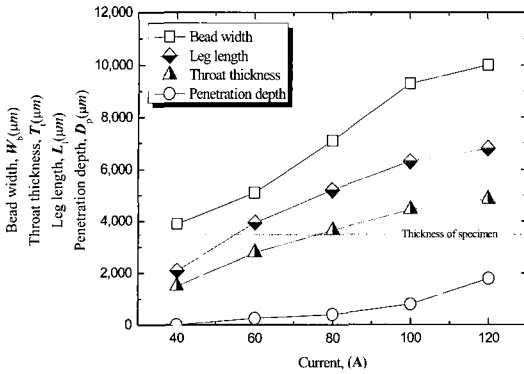
일반적으로 필릿용접의 최소 각장길이는 다음식에 의해 구해진다.

$$S = 1.3 \sqrt{t}$$

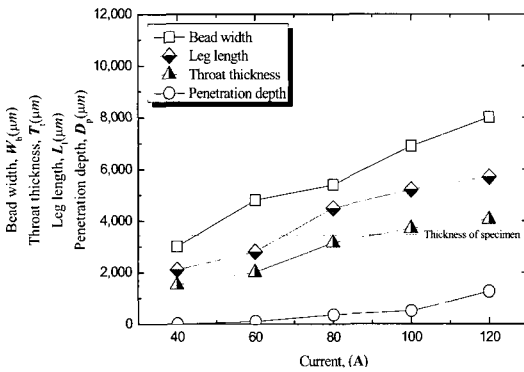
S : 각장, t : 판 두께

이 식에 의하면 $S = 1.3 \sqrt{3.5}$ 로 각장의 최소 길이는 2.432mm이상의 길이를 가져야한다. 이를 기준으로 펄스아크 필릿용접시 최소 2.432mm이상의 각장은 용접속도에 관계없이 60A이상의 전류에서부터 각장의 최소기준값을 넘어섰으며, 전류증가에 따라 완만하게 증가하였다.

비드폭, 목두께 및 접합길어도 용접전류 증가에 따라 완만하게 증가하였으며, 용접속도에 따른 변화는 크지 않아서 변형의 제어를 위한 용접속도의 증가는 실험값 범위내에서는 빠른 것이 유리할 것으로 판단된다. 특히 접합길이는 용접속도에 관계없이 60A이상부터 나타나기 시작하였다. 그러나 60A부터 적절한 각장길이와 접합길이가 형성되기 시작하더라도 종종 언더컷과 같은 결함이 발견되므로 펄스아크의 실제 적용시에는 용접전류를 80A 이상으로 하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 80A



(a) $v=300\text{mm/min}$



(b) $v=450\text{mm/min}$

Fig. 5 Welding properties with welding current(A) and speed(v) in MIG fillet welding

이상에서는 건전한 비드가 형성되는 것을 단면관찰 결과로부터 확인하였다.

따라서 MIG용접에서는 용접성과 입열량을 고려하여 펄스아크용접으로 용접전류 80A, 용접전압 20.9V, 다이내믹은 0, 그리고 용접속도는 300mm/min의 조건을 선정하였다

CW Nd:YAG레이저 용접조건은 비초점거리 0mm, 출력 1.5kW 그리고 용접속도 500mm/min이었다. 레이저 필릿용접의 주요인자인 조사빔의 입사각(α)과 필릿 루트(fillet root)부의 간격(I)에 대한 용접특성을 검토하였다. 실험시 모재와 집광광학계 헤드의 각도(α)는 18deg에서 45deg까지 3deg씩 변화시켰다. 그리고 필릿 루트부와 빔스폿과의 간격(I)은 0 μm 에서 1.400 μm 까지 200 μm 씩 증가시키며 용접을 실시하였다.

Fig. 6에 나타낸 비드의외관 및 단면사진에서와 같이 깊은 용입에 비해 접합길이는 매우 짧았으며, 또한 깊은 용입에 의해 용입부 하단에 기공등이 잔류하게 되었다. 그러나 조사각이 작아짐에 따라 용입부의 하단이 필릿 이음부로 차츰 이동하고 필릿의 이음부는 갭(gap)으로 작용하여 증발금속의 방출을 원활히 함으로써 기공과 같은 결함이 제어되었다.

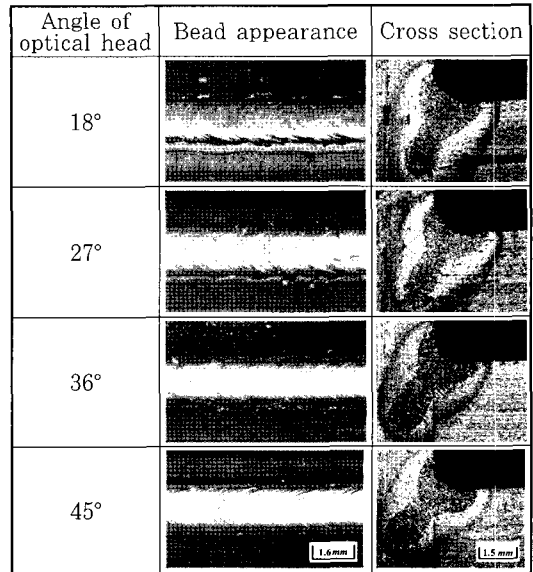


Fig. 6 Penetration shape and bead appearance with irradiation angle of laser beam

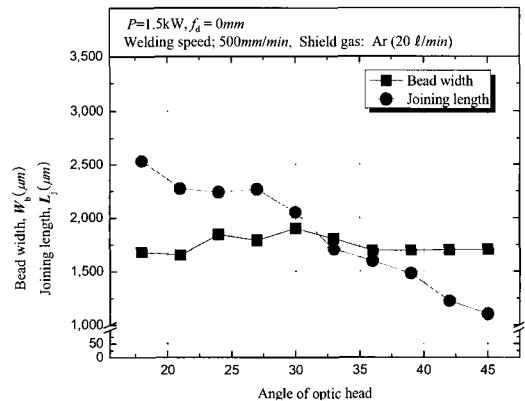


Fig. 7 Penetration depth and bead width with irradiation angle of laser beam

Fig. 7에 나타난 것과 같이 조사각이 30deg일 때부터 접합길이가 비드폭보다 커졌으며, 18°에서 최대 약 2,500 μ m의 접합길이를 얻었다. 그러나 비드의 외관이 불안정해지는 모습을 보임에 따라, 약 2,300 μ m의 접합길이를 보이는 21deg에서 27deg의 중간값인 24deg를 조사각으로 선정하였다.

다음으로 레이저빔의 조사위치를 필릿의 루트부에서 200 μ m간격으로 1,400 μ m까지 변화시키면서 레이저용접을 행하였다. Fig. 8에는 필릿 루트부와 레이저빔 조사위치와의 거리변화에 따른 비드의외관 및 단면형상을 나타내고, Fig. 9에는 용입특성을 보이고 있다.

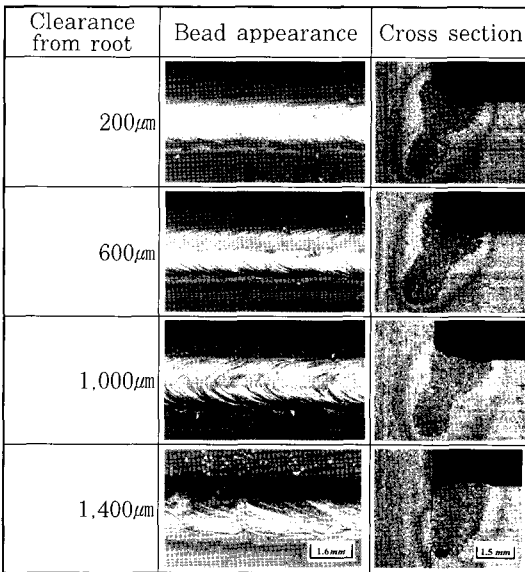


Fig. 8 Penetration shape and bead appearance according to clearance from fillet root in laser welding

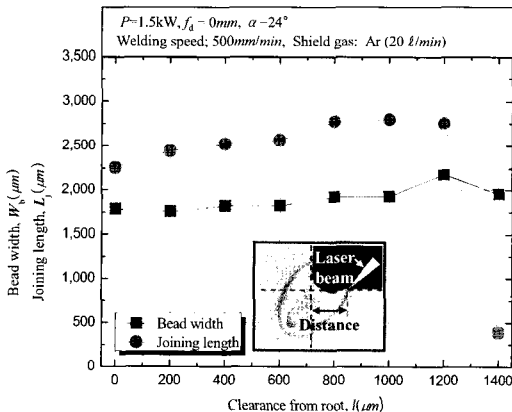


Fig. 9 Penetration properties according to clearance from fillet root in laser welding

필릿 루트부와 레이저빔의 조사간격이 증가할수록 접합길이가 증가하다가 1,200 μ m에서 최대가 된 후 급격하게 감소하였으며, 간격이 1,200 μ m를 벗어나면 용접비드가 필릿의 루트를 벗어나기 시작하였다. 때문에 경제값인 1,200 μ m보다 비슷한 접합길이를 갖는 800 μ m에서 1,200 μ m사이의 중간값인 1,000 μ m를 선정하였다.

이상의 결과로부터, CW 레이저의 필릿용접시 CW 레이저빔의 조사각도는 24deg, 루트부와 빔스폿과의 간격은 1,000 μ m에서 가장 적절한 필릿용접 조건을 얻을 수 있었다.

3.2 용접시의 온도분포 및 변형특성

3.2.1 아크용접시의 특성

MIG 필릿용접시의 변형정도를 측정하기위해 펄스아크에서 용접전류 80A, 용접전압 20.9V, 다이 나믹은 0 그리고 용접속도 300mm/min의 조건에서, 필릿용접부를 5분간 적외선 촬영하여 용접부의 최고온도와 열영향부(HAZ)의 평균온도를 측정하였다.

Fig. 10에 나타난 것과 같이, MIG용접시 넓은 열영향부를 형성하며 큰 입열이 가해지는 것을 알 수 있다. (a)의 용접종료 직후의 사진에서는 용접부와 열영향부 전체에 걸쳐 높은 온도를 유지하고 있는 것이 관찰되었으며, (b)~(c)에서는 용접후 용접부와 열영향부가 시간이 지남에 따라 열평형상태가 되었다. 따라서 용접부와 열영향부의 온도차 및 그 범위가 넓을수록 용접부와 모재의 온도구배는 더 커지고 변형에 민감해질 것으로 사료된다.

Table 2 Angular distortion in MIG fillet welding

Distortion	Measuring method	Before welding	After welding	Angular distortion
Average				
Measured Value	Original fillet angle	89.3801	88.8559	0.5242
	Distortion as fillet angle of 90°	-0.6199	-1.1441	

적외선 촬영 후 시편의 각변형량 측정결과를 Table 2에 나타낸다. 총 5개의 시편을 제작하여 측정한 후 그 값을 평균하였다. MIG용접전 가용

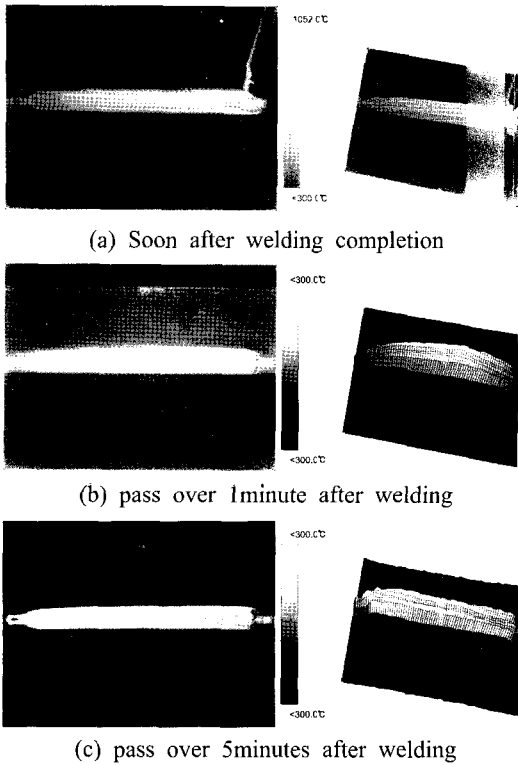


Fig. 10 Photo and 3D image of infrared rays observation in MIG fillet welding

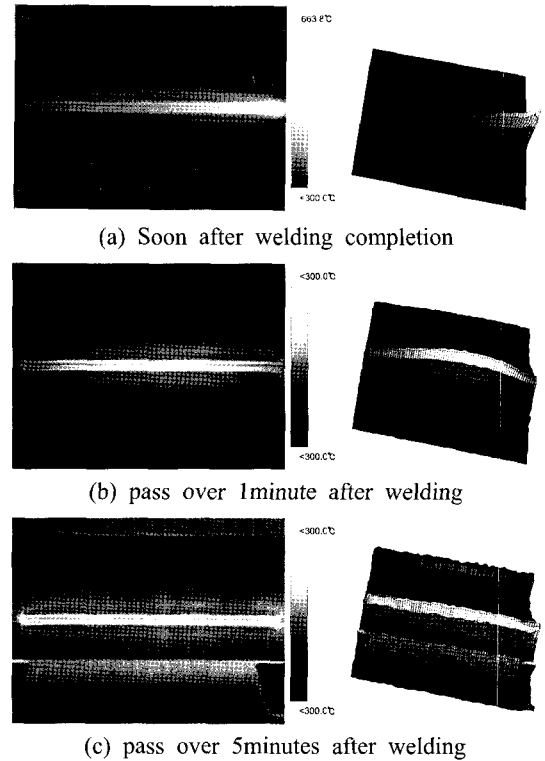


Fig. 11 Photo and 3D image of infrared rays observation in CW laser fillet welding

접된 상태의 필릿각도는 약 89.3801deg였으며, 용접 후에는 약 88.8559deg로 변형되었다. 이때의 평균 각변형량은 0.5242deg였다.

3.2.2 레이저용접시의 특성

CW Nd:YAG레이저 필릿용접시의 변형정도를 측정하기위해 레이저출력 1.5kW, 비초점거리 0mm, 그리고 용접속도 500mm/min의 조건에서 용접부를 MIG용접과 동일하게 측정하였다.

Fig. 11에 나타낸 것과 같이 CW 레이저용접은 MIG용접에 비하여 매우 작은 열영향부를 나타냈다. 또한 MIG용접대비 용접부나 열영향부가 매우 작고 입열이 집중되고 있음을 알 수 있다. (b)~(c)에서 보듯이, 용접후 용접부와 열영향부의 온도는 MIG용접에 비해 그 온도가 낮고 범위 또한 매우 좁게 나타났다. 따라서 용접부와 열영향부의 온도차 및 그 온도구배는 매우 작아 용접변형을 억제하는데 유리할 것으로 판단된다.

Table 3 Angular distortion in CW laser fillet welding

Distortion Average	Measuring method	Before welding	After welding	Angular distortion
		Measure d Value	Original fillet angle	
	Distortion as fillet angle of 90°	-0.2787	-0.7008	

적외선 촬영 후 시편의 각변형량 측정결과를 Table 3에 나타내었으며, 상술(上述)한 결과와 동일하게 평균값으로 평가하였다. CW 레이저 용접전 가용접된 상태의 필릿각도는 약 89.7213deg였으며, 용접 후에는 약 89.2992deg로 변형되었다. 이때의 평균 각변형량은 0.4220deg로 작은 값을 나타냈다.

각변형량을 MIG용접 기준으로 환산해 보면, CW 레이저는 80.5%의 편차를 보였다. 따라서 변형제어의 측면에서는 레이저 열원이 유리한 것으로 사료된다.

4. 결 론

후 기

일체형 rack housing 용접을 위한 SAE1020강의 기초물성 조사 및 열원에 따른 용접변형의 정도를 다음에 정리한다.

(1) SAE1020강의 비드용접시 MIG용접의 경우 스탠다드아크가 펄스아크에 비해 큰입열을 재료에 가한 반면, 용접전류가 80A 이상이 되면 펄스아크가 스탠다드아크보다 더 깊은 용입과 넓은 비드폭을 형성하였다. 또한 용접에 따른 열영향은 펄스아크가 스탠다드아크보다 적어, 용접변형의 제어관점에서 펄스아크가 더 유리한 것으로 판단된다.

(2) CW Nd:YAG레이저의 비드용접시 비조점거리(f_d) 0, 레이저출력(P) 1.5kW, 그리고 용접속도(v) 500 mm/min에서 양호한 용접결과가 얻어졌다.

(3) 일체형 rack housing과 유사한 필릿용접을 통하여 각 열원별 용접조건을 조사한 결과, MIG용접에서 안정된 접합길이를 가지는 용접부를 얻기 위해서, 펄스아크는 80A 이상의 용접전류가 요구되었다. 또한 용접속도에 따른 변형정도는 완만하여 변형의 제어를 위해 용접속도를 일정정도 증가시켜도 용접특성에 큰 변화를 미치지 않을 것으로 판단된다.

(4) CW Nd:YAG레이저의 필릿용접에서는 비드용접에서 얻어진 조건을 바탕으로 빔조사각(α) 24deg, 필릿 루트부와의 간극(I)은 1,000 μ m일 때 가장 깊은 접합길이를 얻을 수 있었다.

(5) 열원에 따른 변형을 평가하기 위해 적외선 촬영과 필릿용접시의 각변형을 조사하였다. MIG용접에서는 열영향부가 넓고 용접부와의 온도구배가 크게 나타났다. 또한 각변형량 또한 타 열원에 비해 크게 측정되었다. CW Nd:YAG레이저는 MIG용접에 비해서 상대적으로 작은 입열과 각변형량이 측정되었다. 따라서, 생산성 및 변형정도를 고려한다면 CW 레이저가 MIG용접에 비해 rack housing의 용접에 더 적합할 것으로 사료된다.

본 연구는 산업자원부 지역산업중점기술개발사업(과제번호:10018271)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Shigetomo Matusi, "Control of Weld Distortion in Thin-skin Welded Structure", JWS, Vol.52, No.5, pp. 58-66, 1983
- [2] Okumoto, Y. and Matsuzaki, S., "Study of Accuracy Control of Hull Structure", Journal of Ship Production, Vol.10, No.1, pp. 51-58, 1994
- [3] 김종도, 이창제, 강운주, "자동차용 모듈식 Steering Gear Housing 제조시의 용접변형에 관한 연구(I)", 대한용접학회, 2006년 춘계 학술발표대회 논문집, pp. 53-55
- [4] 김종도, 이창제, 강운주, "자동차용 모듈식 Steering Gear Housing 제조시의 용접변형에 관한 연구(II)", 대한용접학회, 2006년 추계 학술발표대회 논문집, pp. 152-154
- [5] 김종도, 이창제, 강운주, "열원에 따른 일체형 Steering Gear Housing의 변형개선에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회, 후기논문집, 2006, pp. 181-182
- [6] 김종도, 이창제, 강운주, "Nd:YAG레이저를 이용한 일체형 Steering Gear Housing의 제조에 관한 연구", 대한기계학회, 부산지부 2006년도 추계학술대회 논문집, pp. 59-64

저 자 소 개



김중도 (金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산기공공학과 응용고온공학 코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 사업이사겸 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템 공학부 교수, 당학회 편집이사, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 해석



이창제 (李昶濟)

1977년 7월생, 2000년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2006년 한국해양대학교 기관시스템공학과 재료전공(공학석사), 2006년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학과 박사과정, 관심분야 : 레이저용접, 레이저가공시의 실시간 모니터링