

박판 CO₂ 레이저 빔 용접과 소재접합일체성형에 관한 연구

이 희 석*, 배 동 호**

A Study on the CO₂ Laser Beam Welding of Thin Steel Sheets and Tailor Welded Blank

H. S. Lee*, D. H. Bae**

ABSTRACT

For the purpose of establishing laser welding condition(laser power, welding speed and beam focus) and of evaluating tailor welded blank for three kinds of thin steel sheets of SPCC, SK5M and SUS304 using in the thin plate structure such as automobile, train and so on. Their CO₂ laser weldability were primarily tested under various welding condition. SPCC and SUS304 thin sheets showed good weldability under some welding condition. But, high carbon steel sheet SK5M needs heat treatment after welding to obtain higher tensile strength and ductility of the welded joint. And next, tested tailor welded blank through deep drawing about each specimen butt-welded by obtained reasonable and available laser welding condition. Butt-welded specimens were not nearly broken at weld bead. However, base material were ruptured in the direction of circumference. The forming depths by tailor welded blank were SPCC+SPCC=22~25mm, SUS304+SUS304=25~43mm and SK5M+SK5M=13~17mm.

1. 서 론

최근 차세대 재료가공기술로서 관심과 기대가 집중되고 있는 레이저용접기술은 재료용접분야에서도 재래적인 용접 기술상의 문제들을 개선시킬 가능성을 보이고 있다. 그러나, 아직까지 레이저용접기술은 극히 초보적인 단계로서 용접 방법과 재질에 따른 합리적인 용접조건들이 표준화 되어 있지 않고, 레이저 용접품질에 중요한 영향을 미치는 용접 결합과 변형등에 대해서도 개선되어야 할 과제가 많은 실정이기 때문에, 앞으로 레이저 용접기술개발과 용접품질향상을 위해 많은 연구들이 이루어져야 할 것이다.^{[1]-[8]}

한편, 이상의 레이저용접기술이 재료접합수단으로서 도입됨과 더불어, 최근에는 자동차, 항공기, 전자공업분야등에서는 생산성 제고를 위해 레이저 용접된 소재를 목적에 맞추어 프레스(press)성형하는 소재접합일체성형(tailor welded blank, tailored blank)기술에 대한 관심이 국내·외에서 상당히 높아지고 있는 상황이며, 특히 자동차 산업의 경우는 종래의 차체 생산방식이 분할방식과 일체방식으로 이원화되어 각각의 장단점이 존재하였으나, 소재접합일체성형기술을 도입함으로써 이들의 장점을 살린 생산이 가능하게 되었다.

그러나, 소재접합일체성형에 있어서는 프레스 성형중에 용접부가 파단되면, 재료가 과다하게 소모될 뿐만 아니라, 프레스가공기의 가동률을 떨어뜨리기 때문에 확실한 용접품질(성형성)이 보장되어야 할 전제조건과 프레스 다이(press die)형상에 따른 최적의 소재형상설계 및 성형기구(blank mechanism)에 대한 이해가 선행되어야 한다.^{[9]-[10]}

따라서, 본 연구에서는 이러한 점들에 유의하여 소재접합 일체성형에 대한 기초연구를 위해 먼저 동종 박판재료간의 레이저용접에 대한 용접품질을 평가하고 이로부터 얻어진 최적 용접조건으로 시편을 제작하여, 단면의 형상이 원형인 프레스 다이에 의한 딥 드로잉(deep drawing) 성형성을 평가하였다.

2. 동종 박판재의 CO₂ 레이저 빔 용접

2.1 용접재료

본 연구에 사용된 용접재료는 자동차 및 철도차량 등에 많이 이용되고 있는 냉간압인 강판(SPCC), 고탄소 강판(SK5M) 및 스테인레스 강판(SUS304) 으로서, 두께는 공히 t=1.0mm이며, 화학적 성분과 기계적 성질 및 열적특성은

Tables 1, 2, 3과 같다.

맞대기 용접을 위한 판재의 크기는 300^L×300^W×1.0^tmm로 절단하였고, 판재의 길이 방향은 재료의 압연방향과 일치하도록 하였다. 그리고, 용접시 재료 용접부의 접촉이 불량해지면 레이저광 누설로 용접이 되지 않거나 용접이 불량해지는 경우가 많으므로, 이를 방지하기 위해서 재료 절단시 발생된 변형을 교정하기 위하여 레벨링머신으로 평판의 평면도를 0.3mm 이내로 하고, 절단면은 밀링가공하여 재료의 폭이 150±0.2mm 이내가 되도록 하였다. 특히 재료표면이 청결치 못할 경우 용접이 불량해지는 것을 방지하기 위하여 용접부를 아세톤으로 세척한 후 용접하였다.

2.2 용접장치 및 용접조건

용접장치는 스위스 바이스트로닉(Bystronic)사에서 제작한 모델명 바이스타 3015의 CO₂ 레이저용접기를 사용하였으며, 사양은 정격출력 2.8 kW, 출력파는 연속파(cw)이고,빔(beam) 특성은 (TEM00+TEM01) Mode, 용접속도(welding speed)는 0~50 m/min 이다.

용접시 용융금속의 산화(oxidation)와 질소(N₂)를 방지하고, 플라즈마에 의한 레이저광의 흡수와 산란을 억제하기 위해서 알곤 가스(Ar gas)를 30 l/min로 유출시켰으며, 용접시 시편설치의 편의성과 용접변형을 방지하기 위해 별도의 용접용 지그(jig)를 설계·제작하여 설치하였다.

레이저 용접조건중 레이저 용접성에 영향을 미치는 인자는 레이저출력, 용접속도, 레이저 빔 초점위치 및 조사위치 등을 들 수 있는데, 이들은 서로 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에, 충분한 용입과 높은 접합강도를 얻기 위해서는 재료에 따른 체계적이고 통일된 용접조건 설정이 필요하

다. 본 연구에서는 두께가 1.0mm인 SPCC, SUS304 및 SK5M 박판재의 동종재간 CO₂ 레이저 용접성을 평가하여 적절한 용접조건을 얻고자, 용접조건들중 특히 생산성과 용접품질을 결정하는 주요인자인 레이저출력, 용접속도를 변수로 하였다. 즉, SPCC와 SUS304의 초기용접조건은 레이저 출력을 2.3~2.8kW, 용접속도를 4~10m/min로 하고, 고탄소강인 SK5M도 레이저 출력을 2.0~2.8kW, 용접속도를 2~8m/min로 하였다.

그리고, 레이저 빔 초점위치는 용입깊이(penetration depth)에 관계되나 박판 맞대기용접의 경우 용접속도가 일정하고 레이저출력이 2.0~3.2kW와 초점위치 f=-3.0~+1.0mm에서는 용입깊이에 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있다. 따라서,

Table 1 Chemical compositions of materials

Material	Chemical composition (%)										
	C	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	P	S	Si	Ti
SPCC	0.1	-	-	-	-	0.5	0.0	0.0	0.0	-	-
	2	-	-	-	-	3	4	5	-	-	
SUS304	0.0	18.	-	-	-	1.0	8.5	0.0	0.0	0.5	-
	1	1	-	-	-	3	4	3	1	7	-
SK5M	0.8	-	-	-	-	0.4	-	0.0	0.0	0.2	-
	4	-	-	-	-	4	-	2	1	4	-

Table 2 Mechanical properties of materials

Material	Thickness (mm)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
SPCC	1.0	157.8	288.1	25	112
SUS304	1.0	288.1	681.1	62	155.5
SK5M	1.0	466.5	585.0	21	177

Table 3 Thermal characteristics of materials

Material	Phase transformation temperature	Melting temperature	Density	Specific heat	Thermal conductivity (30°C)	Volume coefficient of expansion (30~1030°C)
	°C	°C	Kg/m ³	Kj/kg·°C	Cal/cm·°C	1/°C × 10 ⁶
SPCC	dp727	1539	7.850	0.102	0.145	11.74
SUS304	1050	1510	7.865	0.46	0.038	17.30
SK5M	730~750	1490	7.830	-	0.103	10.84

본 연구에서는 초점의 위치를 용접하고자 하는 재료위 표면(f=0.0mm)에 두고 용접하였으며, 단, 용접성이 좋지않은 고탄소강 SK5M을 용접함에 있어서는 초점의 위치를 재료표면과 표면하(f=-0.5mm)로 변화시켜 이들의 영향을 검토하였다. 그리고, 레이저 빔의 조사위치는 세가지 재료 공히 시편의 접합부 중앙에 두고 용접하였다.

이상의 초기용접조건에 의해 용접된 시편들에 대한 용접부 계면관찰과 정적 인장시험을 통하여 적절한 용접조건을 얻고자 하였다.

2.3 정적 인장강도 평가

2.3.1 시편 및 실험장치

맞대기 레이저 용접(butt-laser welding)한 박판재의 정적 인장강도 평가용 시편은 300^L×300^W×1.0^tmm의 용접이음판재를 용접선에 수직한 방향으로 절단하여 KS B0801-13호 규격에 의거 제작하였으며, 시편의 크기 및 형상은 Fig.1과 같다.

본 실험에 사용된 인장시험기는 경도정밀에서 제작한 2ton용량의 전자식 인장시험기를 사용하였으며, 부하속도는 용접이음부의 접합강도를 충분히 파악하기 위하여 5mm/min의 저속으로 하여 시편에 인장력을 가했다.

경도측정장치는 Matsuzawa Seiki Co.에서 제작한 Micro Hardness Tester (DMH-II)로서, 하중 500g, 측정간격은 0.2mm로하여 실험하였다.

그리고 용접부의 계면과 열영향부 및 모재부의 금속조직 관찰을 위해 배율 400배인 Microscope(Olympus)를 사용하여 조직사진을 촬영하였으며, 시편의 부식액은 SK5M, SPCC경우 nital 2% (알코올 100ml, 질산 2ml) 혼합액으로, SUS304는 양수(염산:질산=3:1 혼합액)로 하였다.

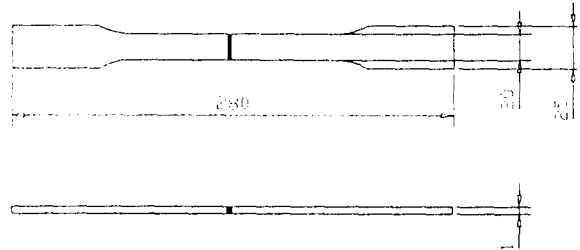


Fig. 1 Configuration of tensile test specimen

2.3.2 실험결과 및 고찰

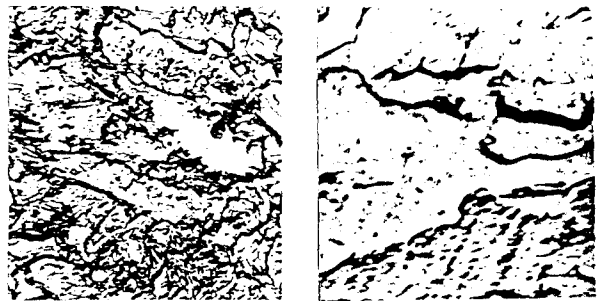
1) 냉간압연 강판(SPCC sheet)의 동종재간 용접

Photo.1은 두께 1.0mm의 냉간압연 고장력강판인 SPCC판재를 2.2절의 초기용접조건으로 맞대기 용접한 시편의 용접 금속부, 열영향부(HAZ) 및 모재부에 대한 미세조직사진이며, Fig.2는 정적인장시험결과이고, Fig.3은 각 시편에 대한 용접부의 경도측정 결과관 비교하여 나타난 것이다.

SPCC판재의 용접bead 폭은 현미경 관찰결과와 경도분포 측정결과로부터 약 0.9mm정도이고, 용접bead의 두께는 모재와 동일한 1.0mm이었으며, Photo.1 (C)에서 열영향부는 레이저 용접시 급가열·급냉각으로 인한 마르텐사이트(martensite) 조직이 비교적 적은 폭으로 형성되었으나, 모재에 비해 조직이 조대해졌음을 관찰할 수 있었다.

Fig.2로부터 두께 1.0mm의 SPCC판재의 표면(f=0.0mm)에 레이저 빔 초점을 두고 용접하는 경우, 용접속도가 6~8m/min 범위에서 레이저 출력이 증가할수록 정적인장강도는 증가하나, 레이저출력 2.8kW에서 용접속도의 영향은 뚜렷하지 않다.

이상으로부터, 레이저출력 2.8kW, 용접속도 6~8m/min에서 정적인장강도는 280~300MPa정도이다.



(a) weld metal(x500)

(b) HAZ (x500)



(c) base metal (x500)

Photo.1 Micrographs of butt weldment between SPCC and SPCC

(t=1.0mm, laser power=2.8kW, welding speed=6m/min, position of beam focus f=0.0mm, beam alignment=0.0mm)

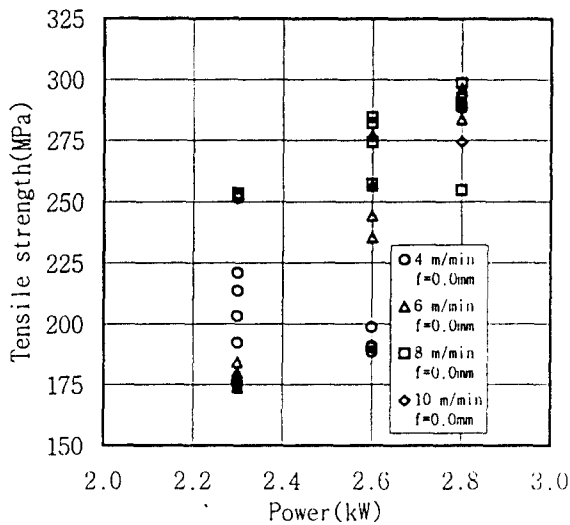
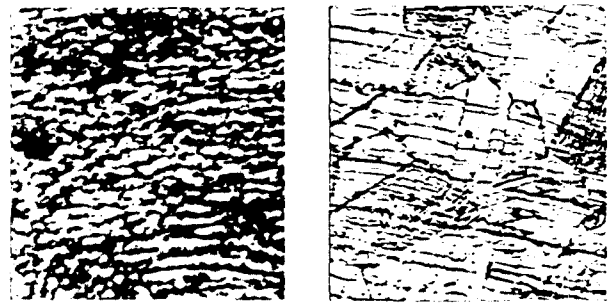


Fig.2 Relation of tensile strength and laser power (SPCC+SPCC, position of beam focus f=0.0mm, beam alignment=0.0mm)



(a) weld metal(x500)

(b) HAZ (x500)



(c) base metal (x500)

Photo.2 Micrographs of butt weldment between SUS304 and SUS300

(t=0.0mm, laser power=2.8kW, welding speed=4m/min, position of beam focus f=0.0mm, beam alignment=0.0mm)

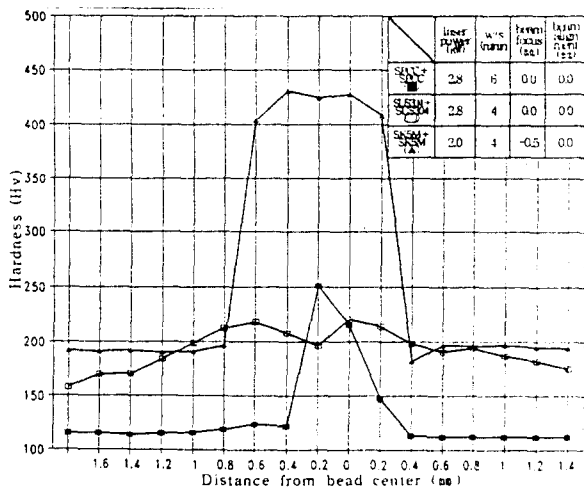


Fig.3 Hardness distribution of weldment of each specimens

2) 스테인레스 강판(SUS304 sheet)의 동종재간 용접

Photo.2는 두께 1.0mm의 SUS304판재를 2.2절의 용접조건으로 맞대기 용접한 시편의 용접금속부, 열영향부(HAZ) 및 모재부에 대한 미세조직사진이며, Fig.4는 정적 인장시험 결과이고, 용접부의 경도측정 결과는 Fig.3과 같다.

SUS304강판은 열전도도(conductivity)가 낮기 때문에 열영향부의 범위가 비교적 크며, 용접bead폭은 현미경 관찰과 경도분포 측정결과로부터 2.2mm정도이고, 용접bead두께는 용접중 고밀도(high density)의 레이저 빔 에너지에 의한 Key-hole의 영향으로 모재보다 적은 0.7mm이었다.

Fig.4로부터 두께 1.0mm인 SUS304판재의 표면(f=0.0mm)에 레이저 빔 초점을 두고 용접하는 경우, 용접속도가 4m/min 범위에서 레이저 출력이 증가할 수록 정적인장강도는 증가하나, 용접속도가 6~8m/min 범위에서는 감소하는 경향을 나타냈고, 레이저출력이 2.3~2.8kW에서 용접속도의 영향은 뚜렷하지 않다. 이상의 결과로부터, 대체로 레이저출력 2.8kW 범위에서 용접속도 4m/min로 용접하는 경우 정적인장강도가 가장 크며, 그 값은 550~620MPa 정도이다.

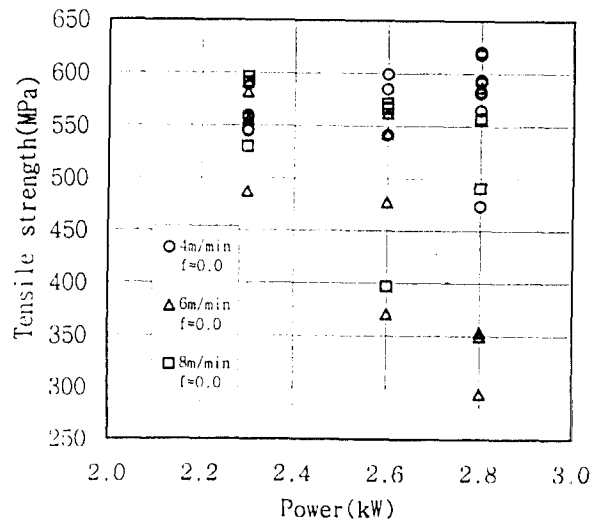


Fig.4 Relation of tensile strength and laser power (SUS304+SUS304, position of beam focus f=0.0mm, beam alignment=0.0mm)

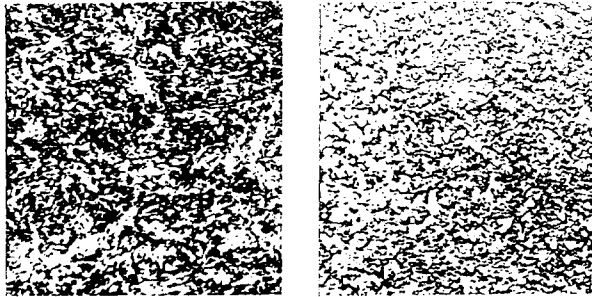
3) 고탄소강판(SK5M sheet)의 동종재간 용접

Photo.3은 두께 1.0mm인 고탄소강판 SK5M을 2.2절의 초기 용접조건으로 맞대기 용접한 시편의 용접금속부, 열영향부(HAZ) 및 모재부의 미세조직이며, Fig.5는 정적인장시험 결과이고, 용접부의 경도분포 측정 결과는 Fig.3과 같다.

고탄소강인 SK5M을 출력범위 2.8kW 이상에서 용접하는 경우, 용접후 냉각에 의한 재결정과정에서 균열이 심하게 발생하여 정상적인 용접이 되지 않았으며, 이를 개선하기

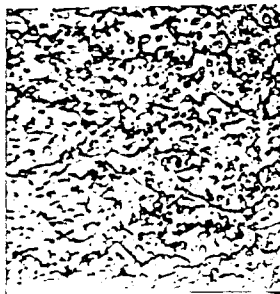
위해 레이저 빔 출력을 2.6kW이하로 줄여서 용접한 결과, 접합은 되나 용접면에 탄화물이 석출하여 취화됨으로서 접합강도가 아주 낮았다.

따라서, 본 연구에서는 SK5M은 적당한 열처리에 의해 인장강도와 연성(ductility)이 증가하는 성질이 있음에 유의하여, 출력범위 2.0~2.6kW로 용접한 후 450~500℃에서 90분이 넘는 열처리하여 인장시험한 결과 Fig.5와 같은 성질



(a) weld metal(x500)

(b) HAZ (x500)



(c) base metal (x500)

Photo.3 Micrographs of butt weldment between SK5M and SK5M

(t=1.0mm, laser power=2.0kW, welding speed=4m/min, position of beam focus f=-0.5mm, beam alignment=0.0mm)

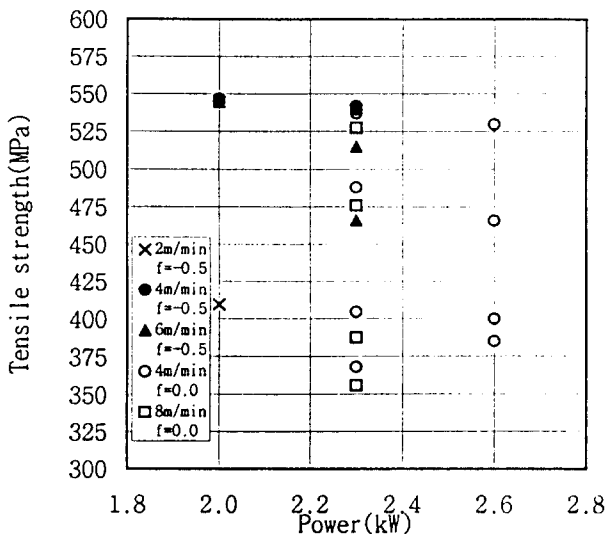


Fig.5 Relation of tensile strength and laser power (SK5M+SK5M, position of beam focus f=0.0mm, beam alignment=0.0mm)

인장강도를 얻을 수 있었다. 정적인장강도에 미치는 용접조건인 영향은 레이저 빔 초점위치가 재료표면과 표면하 0.5mm에 두었을 경우 공히 용접속도가 4~6m/min범위에서 레이저 출력이 증가할수록 정적인장강도가 떨어지며, 초점위치의 영향은 뚜렷하지 않다. 그리고, Photo.3과 Fig.3으로부터, 용접부는 마르텐사이트(martensite)조직을 형성하고 있고, 용접 bead의 폭은 1.7mm(열영향부 포함)이며, bead두께는 용접중 고밀도(high density)의 레이저 빔 에너지에 의한 Key-hole의 영향으로 모재보다 적은 0.75mm이었다.

이상으로부터, 두께 1.0mm의 SK5M을 레이저 용접하는 경우, 용접조건은 레이저 출력=2.0~2.3kW, 용접속도=4~6 m/min, 레이저 빔 초점위치 f=-0.5~0.0mm로 제한될 수 있으나 용접후 적절한 열처리가 필요하며, 이상의 용접조건중 특히 용접속도가 4m/min에서 비교적 높은 인장강도 값을 나타내고, 그 값은 약 550MPa정도이다.

3 소재접합 일체성형성 평가

3.1 시편

소재접합 일체성형을 위해 CO₂ 레이저 빔 용접한 시편재료는 2.1절과 같다.

용접조건은 초기용접조건으로 용접된 시편들의 용접성과 정적인장시험결과에 대한 고찰을 통해 Table 4와 같이 설정하여 용접하였으며, 딥 드로잉(deep drawing)을 위한 시편의 형상은 Fig.6과 같다.

본 실험에서는 성형장치에 설치된 시편에 균일한 가압력이 분포하도록 시편을 원형으로 절단 가공하였고, 특히 딥 드로잉에 의한 용접부의 성형성을 파악하기 위하여 용접선의 위치를 Fig. 6에서 d=0.0mm(center), d=20.0mm, d=40.0mm(punch edge)로 하여 실험하였다.

Table 4 CO₂ laser welding condition for tailor welded blank

specimen	Welding condition				Limit forming depth of each specimen(mm)		
	Laser power (kW)	Welding speed (m/min)	position of beam focus (mm)	Beam alignment (mm)	d=0.0 (mm)	d=20.0 (mm)	d=40.0 (mm)
SPCC +SPCC	2.8	8	0.0	0.0	22	24	25
SUS304 +SUS304	2.8	4	0.0	0.0	25	43	40
SK5M +SK5M	2.0	4	-0.5	0.0	13	14	17

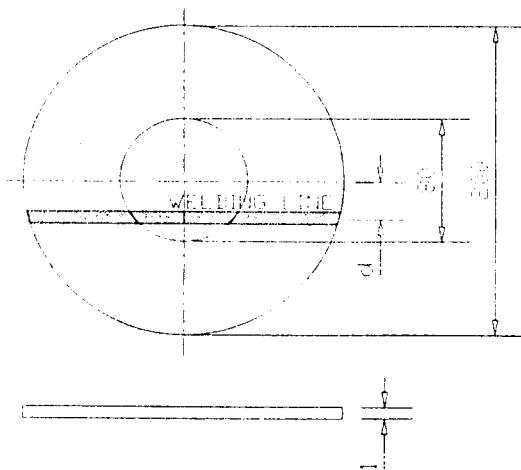


Fig.6 Configuration of deep drawing specimen and position of weld line

3.2 실험장치 및 실험방법

뮌 드로잉을 위한 실험장치는 만능시험기(Simadzu Co.)에 제작·설치하였으며, 뮌 드로잉을 위한 펀치(punch)와 다이(die)의 형상은 Fig.7과 같이 원형으로 하였다. 성형중에 펀치와 다이 사이의 시편이 마찰에 의해서 파단되는 것을 방지하기 위하여 펀치와 다이간의 여유간격을 2.0mm로 하고, 윤활제는 사용하지 않았다.

실험방법은 먼저 유압재킷으로 다이에 놓인 시편을 100 kg/cm²로 가압한후, 만능재료시험기에 설치된 펀치를 15m/min의 속도로 하강시켜 레이저 용접된 판재를 성형하였다. 성형하중은 시편이 파단될 때까지 계속해서 부하 하였으며, 파단되기까지의 성형깊이는 dial gage를 이용하여 만능재료시험기 cross head 이동거리로서 측정하였다.

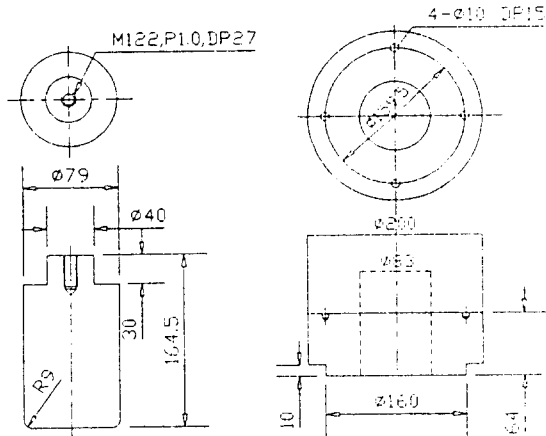


Fig.7 Configuration of punch and die for deep drawing

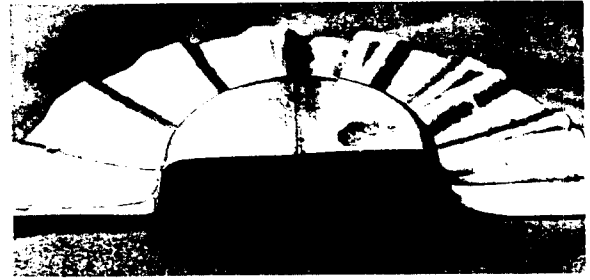


Photo.4 Conditions after deep drawing

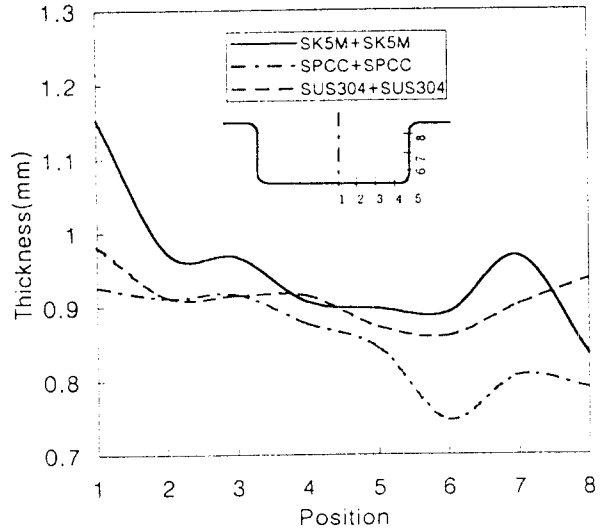


Fig.8 Thickness of each position formed by deep drawing test(d=0mm)

3.3 실험결과 및 고찰

Photo.4는 이상의 실험장치와 실험방법에 의해 뮌 드로잉이 완료된 후의 형상을 예로서 나타낸 것이며, Fig.8은 d=0mm인 시편을 뮌 드로잉 성형후 용접선에 수직인 방향으로 시편을 절단한 후, 판 두께를 point micrometer로 측정하여 성형부의 두께분포를 비교하여 도시한 것이다.

두께(t)가 1.0mm인 SPCC, SK5M, SUS304판재를 동종재간 CO₂ 레이저 빔 용접한 시편에 대해 용접선의 위치를 달리 하여 뮌 드로잉 성형한 결과 용접선의 위치에 관계없이 모재부가 원주방향으로 파단되는 경향을 보였으며, 파단되기까지 한계성형깊이는 Table 4와 같다.

Table 4로부터 SPCC+SPCC와 SUS304+SUS304의 경우는 용접선의 위치에 따라 차이는 있으나 대체로 양호한 성형성을 보였으며, SK5M+SK5M의 경우는 용접선이 시편의 중앙(d=0.0mm)에 위치했을 때 한계성형깊이가 13.0mm로 비교적 성형성이 좋지 않은 결과를 보였다. 이것은 SK5M재료자체가 고탄소강으로서 취성이 크기 때문에 용접부의 접합강도와 연성을 향상시키기 위해 용접후 열처리를 가하더라도 전체적인 변형률은 Fig.8에 나타내어진 바와 같이 SPCC와 SUS304에 비해 떨어지기 때문인 것으로 간주된다. 그러나, 본 실험결과 SK5M은 열처리에 의해 연성이 증가하는 성질을 가지고 있음을 이용해서 용접후 용접부 및 모재의 강도와 연성을 최대로 할 수 있는 조건으로 열처리한다면 레이저 용접에 의한 소재접합 일체성형은 개선될 수 있을 것으로 기대된다.

그리고, 용접선의 위치가 시편의 중앙에서 가장자리, 즉 Fig.6의 d=0.0mm에서 d=40.0mm로 이동될수록 성형깊이가 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 실질적으로 성형되는 범위 안에서 모재부가 용접부에 비해 변형률이 크고, 그리고 용접선이 중앙에서 가장자리로 이동할수록 용접선의 길이가 짧아져 결국 모재에 비해 변형률이 낮은 불인속 용접부의 민적이 감소하여 전체적인 변형률이 증가했기 때문으로 생각된다.

4. 결론

자동차, 철도차량 등의 구조용 재료로서 많이 사용되고 있는 냉간압연강판(SPCC), 스테인레스강판(SUS304) 및 고탄소강판(SK5M)의 동종재간 CO₂ 레이저용접과 용접된 판재의 소재접합 일체성형에 대한 기초연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 두께 t=1.0mm인 냉간압연강판(SPCC)의 동종재간 레이저용접은 레이저 빔 초점위치가 재료표면인 경우, 레이저출력 2.8kW, 용접속도 6~8m/min 범위에서 인장강도는 280~300MPa 정도이다.
- 2) 두께 t=1.0mm인 스테인레스강판(SUS304)의 동종재간 레이저용접은 레이저 빔 초점위치가 재료표면인 경우, 레이저출력 2.8kW, 용접속도 4m/min에서 인장강도는 약 550~620MPa 정도이다.
- 3) 두께 t=1.0mm인 고탄소강판(SK5M)의 동종재간 레이저용접은 용접후 열처리가 필요하며, 레이저 빔 초점위치를 재료표면하 0.5mm에 두고, 레이저출력 2.0~2.3kW, 용접속도 4m/min에서 용접후 450~500°C로 90분간 열처리한 경우, 인장강도는 550MPa 정도이다.
- 4) 동종재간 레이저용접된 SPCC+SPCC와 SUS304+SUS304 판재의 소재접합 일체성형은 비교적 양호하며, SK5M+SK5M은 용접후 열처리에 의해 성형성이 개선될 수 있다.
- 5) 소재접합 일체성형에 의한 최대성형깊이는 용접선의 위치에 관계없이 SPCC+SPCC=25(mm), SUS304+SUS304=43(mm) 및 SK5M+SK5M=17(mm)이다.

References

- 1) 宮崎, 宮澤, 村川, 吉岡, "レーザー加工技術", 産業圖書, 1992
- 2) 難波, "レーザーと加工", 共立出版, 1987

- 3) F.Brind, L.sabatier, D.kechemair and D.Gerbet, "Plasma Studies Co₂ Laser-Material Interaction Applications to Laser Welding" Proc. of the 7th ICALEO '88, 1988, PP.214~222
- 4) 佐藤, 石井, 八木, "CO₂レーザー加工技術" 日刊工業新聞社, 1992
- 5) Frederick F.Ling, "Laser Machining-Theory and Practice", Springer-Verlag, 1991
- 6) C.Albright, "High Speed Laser Welding Discontinuities", Procs. of the 7th ICALEO'88, 1988, PP.207~213
- 7) G.Velarde, E.Minguez and J.Manuel Perlado, "Laser Interaction with Matter", World Scientific, 1989
- 8) I.A Weeter, "Conference-Laser Welding, Machining and Materials Processing", USA, 1985, P.81
- 9) J.C.Mombo-Cristan, V.Lobring, W.Prange and A.Frings, "Tailored Welded Blanks: A New Alternative in Automobile Body Design", The Industrial Laser and book, 1992-1993 Edition, 1993, PP.89-102
- 10) "溶接技術", 日本溶接協会誌, Vol.42, 1994