

보호가스에 따른 Tailored Blank 레이저 용접성 평가에 관한 연구

Effects of Shielding Gas Types on CO₂ Laser Weldability

정봉근, 유순영*, 박인수*, 이창희

B. G. Chung, S. Y. Yoo*, I. S. Park*, C. H. Lee

한양대학교 금속공학과, 철강공정 및 응용연구소, *대우자동차 생산기술연구소

(1998년 6월 25일 받음)

Abstract

This study includes the effects of shielding gas types on CO₂ Laser weldability of low carbon automotive galvanized steel. The types of shielding gas evaluated are He, CO₂, Ar, N₂, 50%Ar+50%N₂. The weld penetration, strength, formability(Erichsen test) of Laser weld are found to be strongly dependent upon the types of shielding gas used. Further, the maximum travel speed and flow rate to form a keyhole weld is also dependent upon types of shielding gas. The ability of shielding gas in removing plasma plume and thus increasing weld penetration is believed to be closely related with ionization/dissociation potential, which determine the period of plasma formation and disappearance. Further, thermal conductivity and reactivity of gas with molten pool also give strong effect on penetration and porosity formation which in turn affect on the formability and strength.

Key words : Tailored Blank(TB), D/To, strength ratio(SR), Erichsen test, fracture ratio(FR), shielding gas, SCFH, lath martensite, bainitic ferrite, ICHAZ

1. 서론

두께가 다른 둘 이상의 part를 재단사가 재단하듯 만들 수 있다는 의미인 Tailored Blank(TB)는 1985년 Thyssen Stahl AG에 의해서 Audi 100의 floor pan에 처음으로 적용되었다. TB는 자동차 panel의 프레스 성형에 있어서 절단한 판재를 용접하여 하나의 결합소재로 일체화(integration)시켜 프레스 성형하는 기술로, 기존의 자동차 디자인은 판재를 절단하고 성형한 후에 spot 용접을 했는데 반해, TB는 판재를 절단(Blanking)하고 용접(Welding)한 후에 성형(Stamping)을 하는 새로운 기술이다¹. TB는 Spot 용접, 레이저 용접, Mash Seam 용접, Induction 용접, Electron Beam 용접으로도 가능하지만 주로 Mash Seam 용접과 레이저 용접을 사용한다. 자동차 차체용 프레스 소재는 용접부가 좁고 깊어야 하며, 열영향부(HAZ)가 작아 재료의 비틀림이 적어야 하고 외관이 양호하고 강도 및 성형성이 모재와 비슷하며 자동화가 가능하

여 생산성이 향상되는 등의 조건을 만족하는 레이저로 용접을 하는 것이 바람직하여 근래에는 Mash Seam 용접 보다는 레이저 용접을 TB 제조에 있어 많이 사용하고 있는 실정이다². TB는 일체화된 형태로 작업을 하므로 강도와 내식성이 좋아지고, 생산성 및 정밀도가 향상되며, 부품수가 감소되고, Scrap를 재활용할 수 있으며, 두께가 다른 판재를 용접할 수 있어 기존 Spot 용접에서 필요한 보강재(Reinforcement)를 제거시키므로 생산 공정이 단순해지고 또한 최근 자동차 제조업체에서 가장 주목받고 있는 차체를 경량화시킬 수 있어 1980년대 후반부터 국내는 물론 세계 유수의 자동차 회사들이 개발에 박차를 가하고 있다³. 이러한 특성을 지닌 TB는 전 세계 선진 자동차 업체의 경우 차체 여러 부위에 이미 적용되어 생산되고 있으며 그 적용부위도 더욱 다양화되고 있는 추세인 반면, 국내 자동차 업체의 경우 개발의 필요성은 인정하고 있으나 아직까지 차체에 실용화되지 못하고 있는 실정이다. 또한 김기철

⁷⁸⁾, D.H. Abbott⁸⁾ 등 국내외 많은 연구자들이 보호가스를 변화시켜가며 고속 카메라(high speed camera)로 레이저 용접성을 평가하였는데 보호가스의 다양한 형태와 플라즈마 형상 및 발생주기 등에 관한 연구를 수행하였다. 하지만 이들 연구에서는 일부 보호가스를 사용할때의 단순한 플라즈마 거동만을 관찰하였고 실제 용접부의 평가가 미흡하였다.

본 논문에서는 실제 자동차 차체 강판에 사용되는 1.5mm 아연도금강판을 He, CO₂, Ar+N₂, N₂, Ar 형태의 보호가스(shielding gas)와 flow rate 등의 레이저 공정변수를 변화시켜 동종두께의 용접을 행하여 고풍력 레이저 용접성을 평가하였고, 광학 현미경과 주사 전자현미경(SEM) 으로부터 용접부의 야금학적 성질을 고찰하였다.

2 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 양면에 45g/m²의 아연이 용융도금된 1.5mm 두께의 자동차용 저탄소 아연도금강판이다. 이들 재료의 화학성분은 습식분석을 통하여 table 1과 같이 얻었다. 정밀 절단기를 이용하여 burr가 생기지 않도록 절단한 500mm×100mm 시편을 지그에 물려 CO₂ 레이저로 맞대기 용접을 행하였다.

composition	C	Si	Mn	P	S	Fe	Zn
specimen	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)
1.5mm galvanized steel	0.0032	0.0020	0.0650	0.0090	0.0080	bal.	45/45

Table 1. Chemical compositions of automotive low carbon steels.

본 실험은 출력을 6kW로 하고 시편 표면위에 초점을 고정시키며 용접진행 방향의 전방에서 시편 표면과의 각도를 20°로 고정하여 보호가스를 불어주면서 4m/min의 용접속도로 보호가스 형태(He, CO₂, 50%Ar+50%N₂, N₂, Ar)와 가스 flow rate를 변화시켜 레이저 용접을 행하였다. 그리고 Fig. 1처럼 용접부의 단면을 통하여 용입비(D/To)를 측정하였는데, D/To는 모재의 두께에 대한 용입깊이로 측정하였다.

용접부의 인장강도와 연신율, strength ratio(SR)를 알아보기 위하여 인장시험을 행하였고, 인장시편은 ASTM subsize type E8M-93 소형판상으로 제작하였으며, 용접부를 시편방향과 수직하게 놓아 실험을 하였다. 또한 SR은

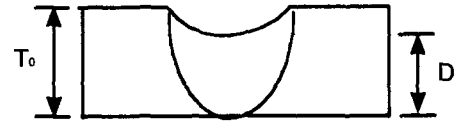


Fig. 1. Schematic diagram of the D/To measurement.

용접부의 인장강도를 모재의 인장강도로 나눈 값으로 하였다. 기존 차체 design과는 다르게 TB 공정에서는 용접된 시편의 성형성이 가장 중요하게 작용하는데, 용접부의 성형성을 평가하기 위하여 가장 보편적인 방법인 Erichsen 실험을 실시하였다. Erichsen 실험은 Fig. 2처럼 Roell Amsler 사양을 사용하여 용접 중심부와 용접시작과 끝부위에서 50mm 떨어진 부위에서 시편을 80mm×80mm로 제작한 후 용접부의 중심선을 지름이 25.4mm인 ball위에 올려놓고 20mm/min의 속도로 ball을 올려서 시편 표면에 파단이 일어날때까지 시행하였다.

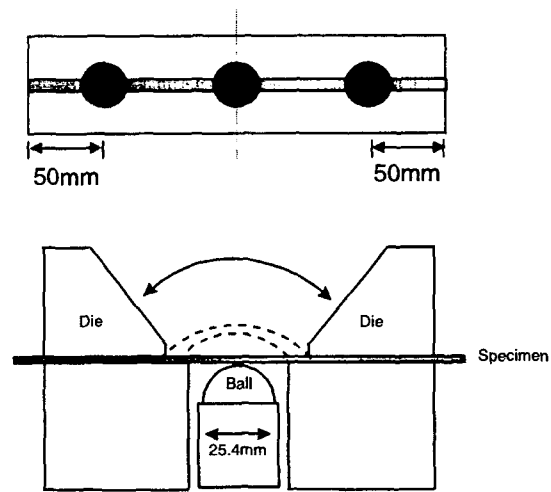


Fig. 2. Ball positions and schematics diagram of the Erichsen test.

파단이 일어났을때 cup의 높이를 기록하여 각 용접조건당 세 부위의 Erichsen 값의 평균치를 구하고, 이를 모재 파단시 cup 높이와의 비율로 나타내었다. 이 값을 "Fractureratio(FR)" 이라고 정의하였다. 즉,

$$\text{Fracture ratio (\%)} = \frac{\text{용접부의 파단높이}}{\text{모재의 파단높이}} \times 100$$

또한, 파단의 위치와 형태를 각 조건마다 기록하였으며, 파단의 형태에 따라 Fig. 3과 Table 2처럼 A, B, C, D의 4

가지로 분류하였다

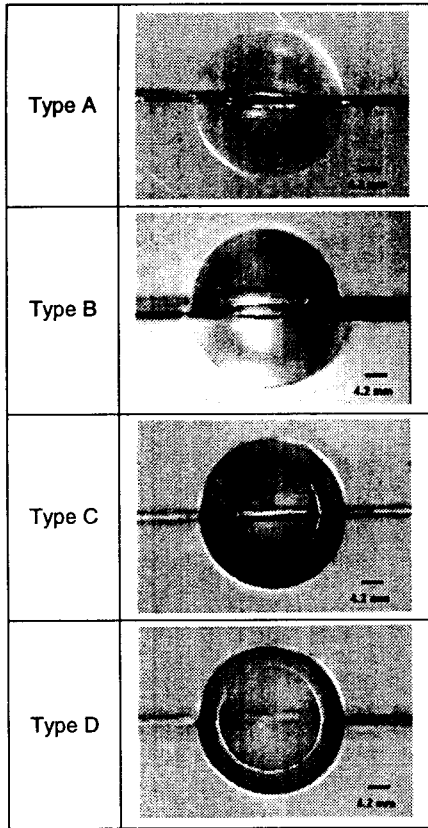


Fig. 3. Classification of fracture morphologies in the Erichsen test.

Type	Fracture Morphology
A	Interface separation
B	HAZ Crack in the thinner sheets
C	Crack across the weld metal
D	Crack following the ball mark

Table 2. Classification of fracture morphology.

3. 결과 및 고찰

3.1 용입성

Fig. 4는 보호가스와 D/To, SR, FR의 상관관계를 보여주는데 그림에서 보여주는 두 개의 점선은 본 연구자들이 다량의 실험실과 현장 적용실험을 통하여 확보한 적정 용접조건 criteria를 나타내는 것으로서 1.5mm 동종두께

용접에서는 D/To가 0.8이고, SR이 1일때 TB 적용시 용접부의 파단이 없었다. Fig. 4에서 보여주다시피 He, CO₂, Ar+N₂, N₂ 가스는 용입성(D/To) 측면에서는 적정 criteria를 만족하였으나 Ar 가스는 만족하지 못하였다.

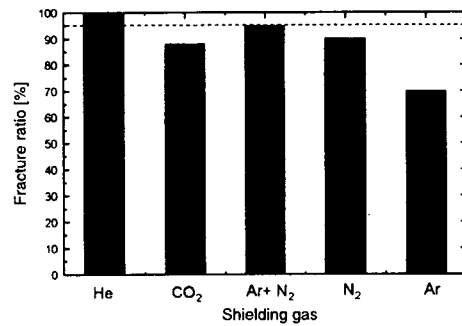
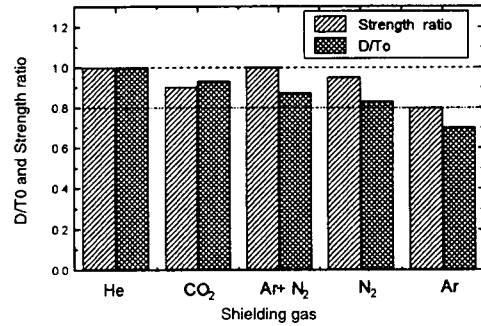


Fig. 4. Relationship between D/To, strength ratio, fracture ratio and shielding gas.

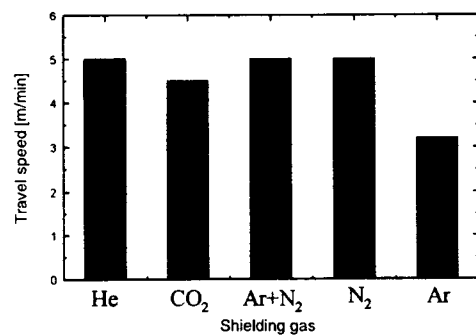


Fig. 5. Maximum travel speed for keyhole welding.

Fig. 5는 보호가스 별로의 최고 허용 Keyhole 용접이 가능한 용접속도와 flow rate를 보여주는데 Ar 가스가 3.2m/min으로 허용 용접속도가 가장 느렸으며 200 SCFH (square cubic ft per hour) flow rate양도 가장 많음에도 불구하고 심용입은 일어나지 않았다. 이와 같이 보호가스에

따라 용입성의 차이가 나는 가장 근본적인 이유는 레이저와 재료의 상호작용에 의하여 필연적으로 발생하는 플라즈마와 보호가스의 제거 능력 및 레이저 빔과의 반응 등에 기인하고 있다.

3.2. 성형성

Erichsen 실험으로 성형성을 알아본 결과 Fig. 4의 하단부 그림에서 처럼 He, Ar+N₂ 가스는 95% FR의 적정 criteria를 만족하였으며 다른 가스들에 비해 상대적으로 좋은 성형성을 보였다. 그러나 CO₂, N₂ 가스는 용접부 내부에 기공이 존재하여 성형성이 안 좋았으며, Ar 가스는 플라즈마의 영향으로 인해 심용입이 일어나지 않아 성형성이 극히 나쁜것으로 나타났다. 또한 Erichsen 파단형태의 경우 CO₂, N₂, Ar가스는 C 형태인 반면 He, Ar+N₂ 가스는 D 형태이었다. 그러므로 고출력 레이저 용접에서 용접성을 고려한 보호가스의 순서 He > Ar+N₂ > N₂ > CO₂ > Ar이었으며 이중에서 용입성과 성형성을 만족하는 보호가스는 He과 Ar+N₂ 가스임이 확인되었다

3.3. 보호가스의 영향

레이저 용접에서 보호가스(shielding gas)의 역할은 플라즈마(plasma)를 억제하고 대기중으로부터 용융금속의 산화를 방지하고 스패터(spatter)로부터 광학계를 보호할 목적으로 사용한다⁹⁾. 고밀도로 집속된 레이저 빔이 모재에 닿으면 모재가 용융되고 기화되어 모재 위에서 플라즈마를 형성하고 모재는 높은 수증기압에 의해 용융금속을 밖으로 밀면서 키홀(keyhole)을 형성하게 된다. 플라즈마는 철이온, 보호가스 이온 그리고 수증기와 전자들로 구성되어 있는데 이런 플라즈마가 형성되면 레이저 빔을 흡수, 산란시켜 모재로 레이저 빔을 못 들어오게 하여 심용입(full penetration)이 일어나지 않게 된다. 그러므로 반드시 보호가스를 이용하여 플라즈마를 제거해 주어야 한다. 철의 이온화 포텐셜(ionization potential)은 7.83eV로 작아서 레이저 빔이 조사되면 철이 철이온(Fe²⁺)으로 먼저 이온화되어 플라즈마를 형성한다. 그러면 플라즈마를 제거하기 위해 보호가스를 불어주지만 보호가스가 플라즈마를 제거하기도 하고 또한 보호가스 자신도 이온화 포텐셜을 가지고 있어 자신이 직접 이온화가 되어 플라즈마를 형성하게 된다. 그리하여, 국내외에서 고속 카메라로 얻은 플라즈마

연구⁷⁻⁹⁾ 결과처럼 철이 이온화되고 나서 보호가스가 이온화되는 간격으로 인해 플라즈마가 생성-성장-소멸 주기의 과정을 거치게 되는데, 이는 철과 보호가스의 이온화 포텐셜 차이에 의하여 포텐셜 차이가 크면 클수록 즉 플라즈마 주기가 길면 길수록, 그 주기 사이에서는 플라즈마가 없어서 레이저 빔이 그대로 모재로 들어오게 되어 용입이 커지는 것으로 사료되어진다. Table. 3은 보호가스들의 이온화 포텐셜, 열전도도, 해리(dissociation) 포텐셜, 원자질량을 나타내었다

	He	Ar	CO ₂	N ₂	Ar+N ₂	Fe	Zn
Ionization potential(eV)	24.5	15.76	13.79	14.54	15.15	7.83	0.793
Dissociation potential(eV)			5.5	10			
Thermal conductivity (W/mK)	0.1381	0.0159	0.0138	0.0234	0.0197		
Atomic weight(g/mol)	4	39.95	44	28	67.95	55.85	65.37

Table. 3. Characteristic properties of the laser shielding gases.

He을 보호가스로 사용하였을 경우 이온화 포텐셜은 24.5eV로 매우 커서 이온화를 억제시켜 플라즈마를 억제시키고, 또한 열전도도가 보호가스들 중에서 제일 좋아 Fig. 4에서 처럼 D/To는 크게 증가하였으며 이에 따라 100% FR을 얻었다. 이는 헬륨가스가 철의 이온화 포텐셜보다 매우 커서 플라즈마 생성-성장-소멸 주기가 길어지게 되어 심용입이 가능하게 되었기 때문이다. D.H.Abbott⁹⁾는 Fig. 6처럼 He, CO₂, Ar 가스의 플라즈마 형상을 얻었는데, 헬륨 사용시 플라즈마 형성은 용접부 표면 위로 매우

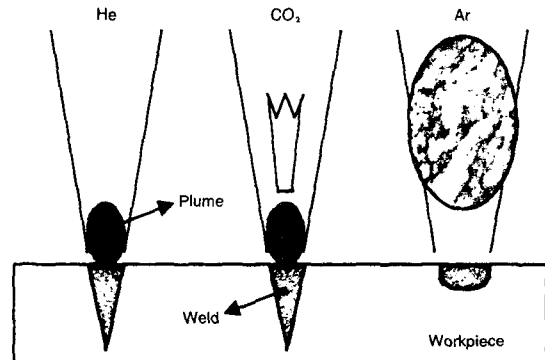


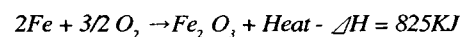
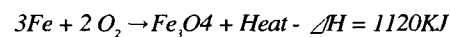
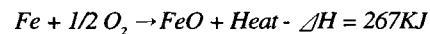
Fig. 6. Schematics of plasma plume formation for shielding gases.⁹⁾

작은 달걀(oval) 형태의 플라즈마가 형성되어 Fig. 5에서 처럼 85 SCFH(40 l/min)의 작은 flow rate로도 플라즈마 제어가 가능하리라 사료된다. 그러므로 고출력 레이저 용접에서 용입성과 성형성을 만족하므로 가장 최적의 보호 가스로 판단되었다.

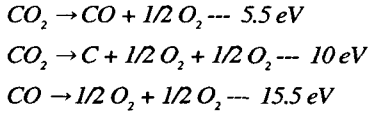
Ar을 보호가스로 사용할 경우, 15.76eV로 이온화 포텐셜은 보호가스 중에서 He 다음의 두번째로 크나, 열전도도가 헬륨의 1/10이다. Mark Faerber⁶⁾에 의하면 출력을 증가시키면 Ar 가스 사용시 용입은 증가하다가 임계 출력치에 달하면 급격히 감소하게 되는데 이는 저출력에서는 플라즈마가 작게 형성되었다가 임계 출력치를 지나 고출력으로 가면 플라즈마가 Fig. 6에서 처럼 크게 형성되어 용입이 급격히 감소한다는 연구를 발표하였다. 고출력 레이저 용접에서 Ar 가스는 철과 이온화 포텐셜 차이가 많이 나는데도 불구하고 심용입이 안되는데 이는 무겁고 불활성 가스인 Ar이 원자상태로 이온화 되어 용접부 표면의 상당히 위에서 매우 크게 응집되어 형성되므로 상당량의 레이저 빔이 모재로 흡수되는 것을 막아 Fig. 4에서 처럼 D/To, SR, FR의 적정 용접조건을 만족하지 못하게 되므로 심용입이 이루어지지 못하고 성형성도 안 좋아지게 되는 것으로 판단된다. 그리하여 용접속도도 Fig. 5처럼 3.2m/min으로 낮추고 flow rate를 200 SCFH(94 l/min)로 많이 하여 큰 플라즈마를 제거해야 하지만 flow rate를 크게 해도 재료 표면위의 높은 곳에서 플라즈마가 형성되므로 이를 39.9 g/mol의 무거운 Ar 가스로 완전히 제거하기가 어렵다. 또한 플라즈마가 레이저 빔을 반사시켜 스패터를 많이 튀게하므로 불이 자주 발생하며, 이로 인해 용접부 비드 표면도 안 좋아지고 용접조건 잡기도 어려워 제형성도 없어지게 되며, 심용입도 안 일어나 고출력 레이저 용접에서는 가장 부적합한 보호가스임을 알 수 있었다. 하지만, 명심해야 할 사항은 본 연구에서는 6kW의 고출력을 사용하였기 때문에 Ar의 용입량이 작게 나타났지만 상기의 Faerber⁶⁾의 실험결과 같이 상대적으로 작은 출력(약 4kW 이하)일 경우에는 Ar가스의 플라즈마 크기가 작아 깊은 용입을 얻을 수 있다는 것이다. 이 결과로부터 예상할 수 있는 중요한 사실은 플라즈마 제거를 위하여 보호가스를 사용할 때 보호가스 종류에 따라 blowing 각도 및 위치가 달라야 한다는 것이다. 예를들면 He과 같이 플라즈마의 형성위치가 표면 바로위인 경우 보호가스 blowing 위치가

표면과의 각도가 작아도 플라즈마를 쉽게 제거할 수 있으나 Ar과 같이 표면의 상당히 위에서 형성될 때는 blowing 각도가 상대적으로 커야지만 효과적으로 플라즈마를 제거할 수 있다. 이것에 관한 자세한 연구는 본 연구자들이 계속 진행하고 있다.

CO₂ 가스 사용시 플라즈마는 Fig. 6처럼 두 부분으로 나뉘어지는 것으로 알려져 있다⁷⁾. 상부 플라즈마는 하부 플라즈마위에 플라즈마가 죽 길게 형성되는데 그 이유는 자세히 알려져 있지 않으나 이는 철의 이온화 포텐셜(7.83eV)보다 CO₂ 가스가 CO 가스와 산소가스로 해리되는 해리 포텐셜이 5.5eV로 낮아서 상부 플라즈마는 주로 CO 가스의 이온으로 이루어지며 하부 플라즈마는 재료 표면 바로위에 달걀 형태로 생기는데 이는 He 사용시 플라즈마의 크기와 같으며 이러한 하부 플라즈마는 CO₂의 이온화 포텐셜인 13.79eV에 의해 형성된 탄소, 산소 이온들에 의한 플라즈마로 철의 이온화 포텐셜과의 차이가 5.96eV으로 플라즈마 주기가 보호가스들 중에서 제일 짧아 플라즈마가 많이 형성된 것으로 예상되어진다. CO₂의 열전도도는 Ar과 비슷하나, 이온화 포텐셜은 알곤보다 작은데도 불구하고 Fig. 4에서 처럼 CO₂의 D/To가 Ar보다 큰 이유는 레이저 용접의 고온상태에서 CO₂ 분자가 CO 가스와 산소가스로 해리되는데, 철의 이온화 포텐셜인 7.83eV보다 해리 포텐셜이 5.5eV로 작아서 철이 이온화 되기전에 CO₂ 가스가 먼저 해리된다. 그리하여 용융금속과 반응하는 CO₂ 가스가 용융금속 내부로 CO가스와 산소가스가 침투하게 되어 용융금속 내부로 침투된 산소가스는 철과 반응하여 아래 세 가지 형태의 방정식의 발열반응을 일으켜 헬륨 사용시 D/To의 90%에 이르는 용입을 얻을 수 있었다.



그리하여 Ar가스보다 CO₂ 가스 사용시 용입이 크게 발생하게 된다. 고온에서 CO₂ 가스는 CO가스와 산소가스로 해리되기 쉬운데 이에 해당하는 해리 포텐셜은 다음과 같다.



하지만 CO₂를 보호가스로 사용할때는 높은 용입량에도 불구하고 기공을 형성하는 단점을 가지고 있는데, CO₂ 가스 사용할 경우 용융금속내에 존재하는 원소는 Fe, C 등이 고플라즈마에 존재하는 원소는 CO₂, CO, O 등이어서 용융금속에 용해된 탄소와 대기중에서 흡수된 산소가 반응하여 CO 가스를 형성하여 기공이 된다. 이러한 과정으로 얻어진 CO 가스는 용융금속이 응고할때 결정립계 및 주상정 입계에서 불균일(heterogeneous)하게 핵생성을 이루며, 이 과정에서 응고속도가 CO 가스 ejection 속도보다 빠르면 CO 가스가 trap되어 기공을 형성하게 된다. Fig. 7은 CO₂로 보호가스를 사용할 경우 root에 형성된 기공의 모습을 보여주고 있다.

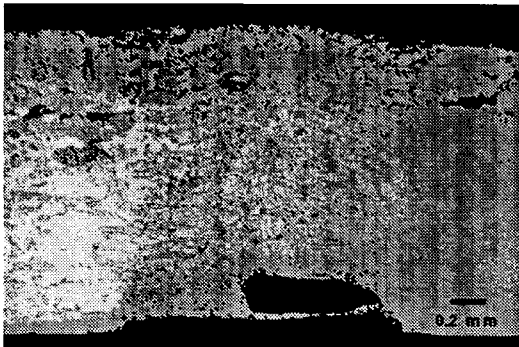


Fig. 7. Weld metal porosity in the CO₂ shielding gas weld.

N₂를 보호가스로 사용할 경우, 질소는 금속과 반응하는 가스로서 이온화 포텐셜이 14.54eV이며, 철과의 포텐셜 차이는 6.71eV로서 플라즈마 주기가 짧으나 CO₂ 가스보다 길다. 질소가스의 플라즈마는 질소가스도 고온에서 해리되므로 CO₂ 가스 모양과 비슷하고 플라즈마 주기가 짧다. 또한 Ar 가스 사용시 보다 용입이 크게 나타나는데 이는 불활성 가스인 Ar과 다르게 N₂가 반응가스로서 용융금속 내부로 침투하여 반응하므로 질소자체에 의한 플라즈마 형성이 Ar에 비해 작기 때문으로 예상되지만 용융금속과 반응하므로써 CO₂ 가스처럼 내부에 기공이 발생하게 되었다. 용접과정중 철에 대한 질소원자의 용해도는 0.001wt% 이하이지만 N₂는 반응가스로서 10eV의 해

리포텐셜을 가지는 N₂ → 2[N]으로 잘 분해되어 용융금속 내부로 침투하므로 질화물, 공기중의 산소와 결합하여 산화물, 질소분자, 산소분자 형태의 기공으로 존재한다. He, Ar가스는 불활성 가스로서 용융금속과 반응하지 않아 기공이 존재하지 않은 반면, 반응가스인 CO₂와 N₂를 보호가스로 사용하면 Fig. 4처럼 D/To는 적정 용접조건을 만족하였으나 용융금속 내부에 기공이 존재하여 SR과 FR는 적정 용접조건을 만족하지 못하였다.

Ar+N₂ 가스를 보호가스로 사용할 경우 Ar+N₂는 이온화 포텐셜이 15.76eV의 불활성 가스인 Ar과 14.54eV의 반응가스인 N₂를 50:50으로 혼합하여 혼합가스를 만들었다. 그리하여 대략 이온화 포텐셜은 15.15eV로 철과 7.32eV 차이를 가져 He, Ar 다음으로 플라즈마 주기를 지니게 된다. Ar+N₂ 가스를 사용하면 플라즈마 생성-성장-소멸 주기가 순수 Ar사용시 보다 짧으며, N₂가 반응가스로 해리되기도 하여 플라즈마를 형성하기도 하지만 용해된 질소가스가 용융금속 내부로 침투하여 반응하므로 플라즈마 크기가 작아지게 되어 용입이 커지게 되고, 순수 N₂ 사용시 반응가스로서 용융금속과 반응하여 기공을 형성하였던 것을 Ar+N₂의 혼합가스를 사용하여 용융금속 내부의 기공 발생 확률을 낮추어야 금속적 결합을 없앨 수 있는 것으로 사료되어진다. 그리하여 Fig. 4처럼 용입성과 성형성에 있어서 매우 우수하므로 He를 보호가스로 사용하는 경우 다음으로 고풍력 레이저 용접에서 좋은 보호가스이었다.

3.4. 아금학적 고찰

Fig. 8은 레이저 용접시 완전용입이 형성된 조건에서의

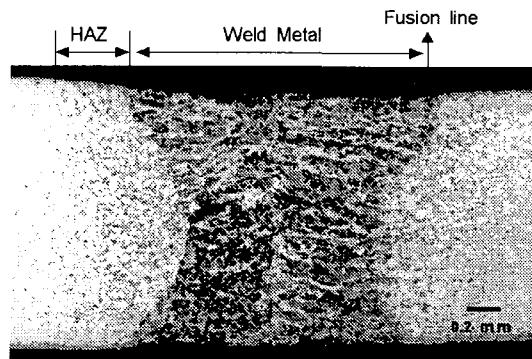


Fig. 8. Macrostructure of the 1.5mm similar thickness steel weld.

1.5mm 동종두께 아연도금강판 용접부의 전형적인 거시조직을 보여주는데, 조직은 크게 용융금속(weld metal), 열영향부(HAZ), 모재의 세 부분으로 나뉘어지며 용접부는 용융선(fusion line)에서 용접 중심부로 수직하게 적층 성장을 하였다.

모재는 25 μ m의 결정립 크기를 지닌 등축 페라이트와 균대균데 결정립 코너에 검게 보이는 미세한 펄라이트로 구성되어 있으며, 열영향부는 Fig. 9처럼 모재에서 용융선으로 갈수록 도달된 최고 온도에 따라 intercritical HAZ(ICHAAZ), fine grained HAZ(FGHAZ), coarse grained HAZ(CGHAZ)의 세 부분으로 형성되었다.

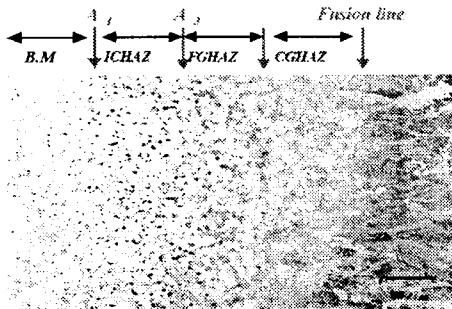


Fig. 9. HAZ macrostructure in the 1.5mm similar thickness weld.

Fig. 10은 ICHAZ 영역의 미세조직을 보여주는데, ICHAZ는 A_1 , A_3 사이에서 최고 가열 온도(peak temperature)에 크게 영향을 받는다⁸⁾. 그리하여 A_1 (723 $^{\circ}$ C)과 A_3 (900 $^{\circ}$ C) 사이에서 최고 가열 온도를 받으면 생기는데, 가열시 페라이트와 펄라이트 입계에 오스테나이트가 생성되어 펄라이트 결정립 내부로 오스테나이트가 성장하

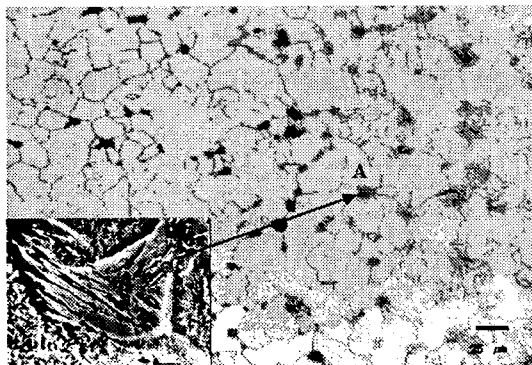


Fig. 10. ICHAZ microstructure in the 1.5mm similar thickness weld.

여 들어가 페라이트와 잔류 탄화물이 존재하는 불균질 오스테나이트를 형성하게 된다.

이를 생각하면 오스테나이트가 변태를 하는데, 이때 오스테나이트 내부의 Fe_3C 가 완전히 용융되지 않은 상태로 내부에 존재하게 되며 일부 용융된 Fe_3C 에 의해 오스테나이트의 탄소함량은 모재에 비해 상당히 높게 되어 이것이 급속냉각에 의해 일부는 Fig. 10. A처럼 마르텐사이트나 베이니틱 페라이트와 같은 저온 변태상들을 형성하게 되었다. A_3 이상의 온도인 약 1000 $^{\circ}$ C에서 형성된 FGHAZ 지역은 A_3 이상의 온도로 가열시 ICHAZ에 비해 더욱 많은 Fe_3C 가 용융되었으나 아직도 일부의 탄화물이 존재하게 된다. 또한 오스테나이트가 생성되고 성장할 시간적 여유가 있고 약 1000 $^{\circ}$ C의 상대적으로 낮은 최고 가열 온도 때문에 미세한 결정립 크기를 가지며 탄소의 확산이 잘 이루어지지 않아 일부 지역에서는 탄소함량이 모재에 비해 높게 된다. 그리고 미세한 결정립에 의해 오스테나이트의 핵 생성 위치가 많아져 냉각시 마르텐사이트와 베이니틱 페라이트 등의 저온 변태상과 일부의 페라이트, 펄라이트가 형성된다. 그리고 1530 $^{\circ}$ C의 용융선 바로 아래 온도에서 형성된 CGHAZ 지역은 가열 온도가 용융선에 접근하므로 균질하고 조대한 오스테나이트가 형성된다. 오스테나이트가 조대화되므로 핵 생성 위치가 작게 되고 냉각속도가 매우 빠르기 때문에 저탄소의 저온 변태상들의 생성될 수도 있을 것으로 사료되어진다. 급속 냉각으로 인하여 용융금속은 Fig. 11처럼 크게 래스 마르텐사이트(lath martensite), 베이니틱 페라이트(bainitic ferrite)의 조직으로 분류된다. 래스가 서로 얽혀있는 Fig. 11.(A)는 오스테나이트가 변태할때 냉각속도가 너무 빨라 전위밀도가 상당히 높은 래스 마르텐사이트로 존재하게 되며, 래스가 한 방향으로 길게 늘어져있는 Fig. 11.(B)는 래스 입계에 흰색으로 보이는 탄화물들이 놓여 있는 베이니틱 페라이트를 형

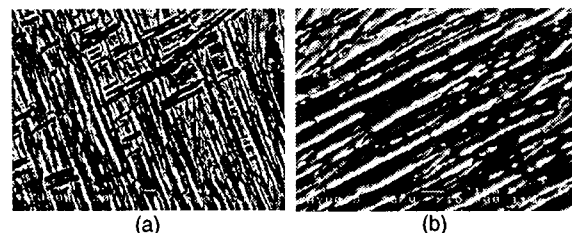


Fig. 11. Lath martensite(A), bainitic ferrite(B) in the weld metal.

성하였다.

래스 마르텐사이트와 베이니틱 페라이트를 구분하기 위해 래스 폭과 25g 미세하중에서의 경도값으로 두 조직을 분류하였다. 두 조직의 고배율 SEM사진은 비슷하였으나, 래스 마르텐사이트는 래스 폭이 0.3/μm이고 베이니틱 페라이트의 경우 래스 폭이 0.6/μm이었다. 또한 미세경도값도 래스 마르텐사이트는 240Hv이고 베이니틱 페라이트는 200 Hv로 차이가 난다. Fig. 12는 용융금속, 열영향부, 모재의 조직에 따른 경도 값을 알아보기 위하여 250g 하중으로 용접 중심부로부터 0.1mm 간격으로 용접부 위치 변화에 따른 경도 변화를 보여주며 Fig. 13은 10g의 하중을 주었을때 Fig. 12의 열영향부에서 위치 변화에 따라 형성된 저온 변태상 즉, 용접전 펄라이트가 존재하던 지역의 경도분포를 보여준다.

Fig. 12는 모재의 경도 값은 100Hv이었는데 열영향부와 용융금속은 미세하고 저온 변태상의 형성에 의해

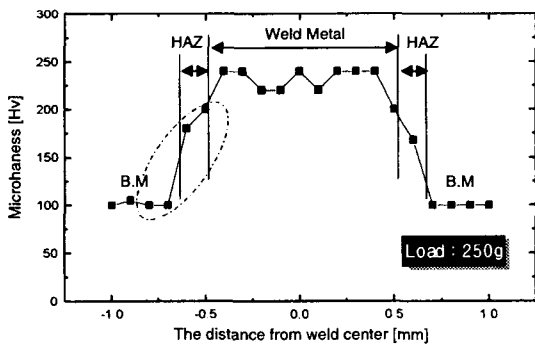


Fig. 12. The microhardness profiles in the 1.5mm similar thickness weld.

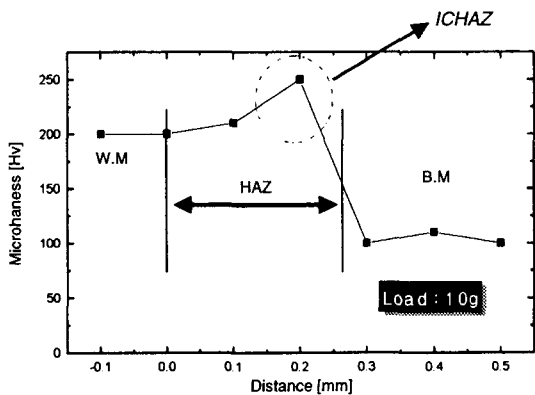


Fig. 13. The microhardness profile of prior pearlite island in the HAZ.

160~240Hv으로 모재보다 2배정도 크게 나타난 것을 보여주며, Fig. 13에 주어진 용접전 펄라이트가 존재하는 지역에서의 경도변화는 용융선을 지나 모재로 갈수록 경도값이 증가하다가 ICHAZ 지역에서 상대적으로 높은 탄소함량을 가진 저온 변태상들이 존재하므로 최대 경도값인 250Hv를 갖다가 모재로 갈수록 급격히 경도값이 떨어지는 것을 보여주고 있다.

4. 결론

보호가스에 따른 고출력 레이저 용접성을 평가할 수 있었으며, 야금학적 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고출력 레이저 용접에서 He과 Ar+N₂ 가스가 가장 최적적인 보호가스이며, Ar 가스는 가장 나쁜 보호가스로 판단되었다.

	He	CO ₂	Ar+N ₂	N ₂	Ar
Penetration	Good	Good	Good	Good	Bad
Formability	Good	Bad	Good	Bad	Bad
Total	Best	Bad	Best	Bad	Worst

(2) 레이저 용접의 특성은 사용된 보호가스에 따라 큰 차이가 났으며, 이들의 영향은 가스자체의 특성(이온화/해리 포텐셜, 열전도도, 무게 등)에 의해 결정되는 플라즈마의 크기 및 형상에 크게 영향을 받았다.

(3) 성형성을 평가하는 Erichsen 실험으로부터 1.5mm 동중두께의 경우 A 파단형태는 용접불량이었으며, C 파단 형태는 Ar, CO₂, N₂를 보호가스로 사용하였을 경우에 발생하였고, D 파단은 He, Ar+N₂를 보호가스로 사용할때 나타났다.

(4) 용융금속은 래스 마르텐사이트, 베이니틱 페라이트로 구성되었으며 ICHAZ에서는 탄화물의 부분 용융에 의해 마르텐사이트, 베이니틱 페라이트와 같은 저온 변태상들이 존재하였다.

참고문헌

1. 정봉근, 이창희, 저탄소 자동차용 강판의 레이저 용접성 평가에 관한 연구, 한국레이저가공학회 춘계학술발표대회, (1998)

2. Wilfried Prange, Tailored Blank, ULSAB SEMINAR Seoul Motor Show '97
3. W Prange, H Schmitz, Tailored Blank : A Material for New Ways Design, ISATA, p.342-349
4. P.A. HILTON, EU 194 in the United Kingdom, p.1127-1147, (1995)
5. Ming F. Shi, Ken M. Pickett, Formability Issues in the Application of Tailor Blank Sheets, SAE 930278, p.27-34
6. Mark Faerber, The Position of The Laser Welding Gas Supply Nozzle is The Crux, Body assembly & manufacturing IBEC '97, p.14-16
7. 김기철, 이기호, 이목영, 테일러드 블랭크용 박판 강재의 레이저 용접성(D), 대한용접학회지, vol.16-1, p.77-87, (1998)
8. K. C. Kim, E. P. Yoon, Observation of laser induced plasma during welding of steel plate, Proc. of the joining of Materials, JOM 7, p.307-314, (1996)
9. D. H. Abbott, C. E. Albright, CO₂ shielding gas effects in laser welding mild steel, Journal of laser application, No.6, p69-80, (1994)
10. E. Beyer, K. Behler, G. Herziger, Plasma absorption effects in welding with CO₂ lasers, SPIE vol.10 (1998) p.84-95
11. M. Faerber, Gases for increased productivity of laser processing, OQE 27, p.1449-1455, (1995)
12. Mark G. Faerber, Comparing shielding gases for laser welding, Industrial laser review, september, (1996)
13. Sindo Kou, Welding metallurgy, John wiley & Sons, p.129-139, (1987)
14. Kenneth Easterling, Introduction to the physical metallurgy of welding, Butter-worth, p.49-73, (1983)
15. W. Kurz, D. J. Fisher, Fundamental of solidification, Trans Tech publication, p.140, (1989)
16. Kimikazu Ikemoto, Yuji Niimi, Takao Iwai, Press Forming of Laser Weld Blank, 日本溶接學會誌, vol.10, p.196-199, (1992)
17. James T. Luxon, David E. Parker, Industrial laser and their application, Prentice-Hall, p.136-144, (1985)
18. Christoper Dawes. CEng, Laser welding, McGraw-Hill, p5, 10-14, 87, (1992)
19. W.M. Steen, Laser in manufacturing seminar, AILU, UK, (1997)
20. 김도훈, 레이저 가공학, 경문사, p.129-132, (1990)
21. Richard L. Little, Welding and welding technology, McGraw-Hill, p.309-318
22. John Heyden, Klas Nilson, Industrial laser handbook, p.161-166
23. Bob Irving, Blank Welding Forces Automakers to Sit Up and Take Notice, Welding J., p.39-45, (1991)
24. Claus BAGGER, Isamu MIYAMOTO, Process Behavior during High Power CO₂ Laser Welding of Zinc Coated Steel, proceeding of LAMP '92, p.553-558
25. J.K. Baysore, M.S. Williamson, Laser Beam Welding and Formability of Tailored Blanks, Welding J., p.345-351, (1995)
26. 한유희, 레이저 가공기술, KIMM, p.26-27, 42-45, 47-48
27. William M. Steen, Laser material processing, Springer-Verlag, p.46-50, (1991)
28. M. M. Schwartz, Metals joining manual, McGraw-Hill, p.1-37, (1979)
29. H. E. Pattee, Technology advances in welding and other joining processes, Springer-Verlag, p.26-35, (1982)
30. D. J. Meuleman, F. L. Cheng, The Effect of Zinc Coatings on the Formability of Automotive Sheet Steels, SAE 840370
31. W. Prange, Application of laser beam welded sheet metal, SAE 890853, p.751-762