

연구논문

6mm^t조선용 프라이머 코팅강판의 CO₂레이저 용접성(I)

- 프라이머 코팅조건과 갭 간극의 영향 -

김 종 도* · 박 현 준**

*한국해양대학교 기관시스템공학부

**한국해양대학교 대학원

The Weldability of 6mm^t Primer-coated Steel for Shipbuilding by CO₂ Laser(I)

- Effects of Primer Coating Condition and Gap Clearance -

Jong-Do Kim* and Hyun-Joon Park**

*Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

Abstract

Recently the application of laser welding technology has been considered to shipbuilding structure. However, when this technology is applied to primer coated steel, good quality weld beads are not easily obtained. Because the primer-coated layer caused the spatter, humping bead and porosity which are main part of the welding defect attributed to the powerful vaporizing pressure of zinc. So we performed experiment with objectives of understanding spatter and porosity formation mechanism and producing sound weld beads in 6mm^t primer coated steels by a CO₂ CW laser. The effects of welding parameters; defocused distance, welding speed, coated thickness and coated position; were investigated in the bead shape and penetration depth on bead and lap welding. Alternative idea was suggested to suspend the welding defect by giving a reasonable gap clearance for primer coated thickness.

The zinc of primer has a boiling point that is lower than melting point of steel. Zinc vapor builds up at the interface between the two sheets and this tends to deteriorate the quality of the weld by ejecting weld material from lap position or leaving porosity. Significant effects of primer coated position was lap side rather than surface. Therefore introducing a small gap clearance in the lap position, the zinc vapor could escape through it and sound weld beads can be acquired. In conclusion, formation and suspension mechanism of the welding defects was suggested by controlling the factors.

* Corresponding author : jdkim@mail.hhu.ac.kr

(Received May 16, 2005)

Key Words : CO₂ laser welding, Primer-coated steel, Lap welding, Porosity, Spatter, Gap clearance

1. 서 론

최근, 선박 등의 대형수송기기의 고속화 및 절전에너지화 문제와 더불어 경량화에 관심이 집중되고 있다. 이로 인해, 종래의 골재와 판에 의한 용접구조로부터 Honeycomb plate나 Corrugated plate 등을 이용한

구조로 그 전환이 이루어지고 있는 단계에 있다. 이러한 박판 접합체를 용접구조로 만드는 경우 주로 겹치기 이음(lap joint)형태로 용접하게 되는데, 아크열원에 의한 용접은 용접변형 및 용접속도의 문제로 부적절함에 따라 레이저 열원의 채택이 각국에서 앞다투어 검토되고 있다¹⁻¹²⁾. 국내의 대형 조선소 또한 이러한 세계적인 추세에 부응하여 레이저의 적용을 검토하는 단계

에 이르렀으며 가까운 시일 내에 가시화가 이루어질 것으로 기대된다.

레이저 용접기술은 고정도(高精度)의 고속·저입열 용접에 따른 용접지배인자의 제어가 어려우며, 특히 프라이머 코팅강판(primer-coated steel)의 경우에는 모재에 비해 코팅성분의 낮은 비점(boiling point) 때문에 합금원소의 증발거동과 모재의 용융거동, 그리고 기공 등의 결합형성기구가 일반 강재와 상이하여 그 메카니즘 이해와 용접품질 제어가 어렵기 때문에 용접시 균열과 기공결함 등의 많은 문제점을 안고 있었다^[13-17].

한편 국내에 발표된 프라이머 코팅강판의 레이저용접에 관한 논문^[18-20]은 3mm^t 이내의 자동차용 박판에 관한 내용이 대부분이며 박판의 경우 주로 관통(완전용입)용접이 이루어짐에 따라 비교적 후판의 경우에 비하여 용접현상에 많은 차이점을 보이는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 해양부식환경이라는 특이한 조건 하에서 국내 조선업계가 우선적으로 그 적용을 고려하게 될 조선용 구조용강인 AH36의 프라이머 코팅강판(6mm^t)에 대하여, CO₂ CW레이저 빔 열원을 적용하여 용접을 수행하였다. 용접시 프라이머의 코팅두께 및 위치 등의 변수를 다양하게 변화시키는 실험을 통하여 스파터(spatter) 현상과 기공 등의 용접결함에 대한 발생 메카니즘을 규명하고, 용접결함에 대한 대안책으로써 캡간극을 도입하여 캡간극의 변화에 따른 용접성을 평가하고 결함방지 메카니즘에 대하여 연구하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 레이저 용접용 재료는 Zn-riched 프라이머가 코팅된 조선용 구조용강 AH36으로 두께는 6mm^t이며, 그 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 프라이머 표면코팅막의 두께는 15μm와 30μm의 2종류를 사용하였다. 레이저 용접성에 미치는 프라이머 코팅조건의 영향을 비교·검토하기 위하여 비드 용접(bead welding) 및 겹치기 용접(lap welding)법을 적용하고, 시험편의 프라이머 성분을 제거하거나 표면 및 겹침(lap)부위의 코팅두께를 다양하게 변화시켰다. Table 2에 AH36의 주된 원소인 Fe와 프라이머 코팅층의 주요 성분인 Zn에 대한 물리적 성질을 비교하여 나타내

Table 1 Chemical compositions of primer-coated steels

Element Material	C	Si	Mn	P	S	Fe
AH36 (6mm ^t)	0.16	0.40	1.44	0.023	0.005	bal.

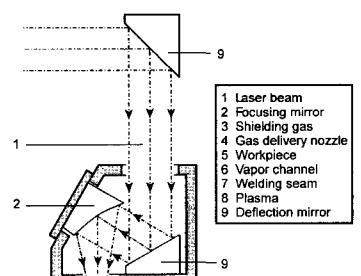
Table 2 Physical properties of Fe and Zn

physical constant Element	Density (kg/m ³)	Melting point (K)	Boiling point (K)	Thermal conductivity J/(m·K)(473K)	Reflectivity (%) R[1.06μm]
Fe	7,870	1,808	3,027	61.74	65
Zn	7,130	692	1,176	105	49

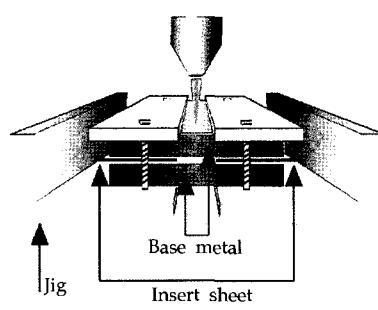
었다. Zn의 비점(boiling point)이 Fe의 융점(melting point)보다 낮은 것을 알 수 있는데, 이러한 물성적 차이로 인하여 스파터나 기공이 용이하게 생성될 것으로 판단된다.

2.2 CO₂ 레이저 용접장치와 실험방법

본 연구에 사용된 레이저 용접열원은, 최대출력 6kW의 RF 여기방식 고속축류형(fast axial flow) CO₂ 레이저이다. 동축 실드가스 노즐(coaxial shield gas nozzle)을 사용하여 15 l/min의 He으로 용접부를 실드하였다. 그리고 본 장치에는 용접부에서 비산하는 스파터로부터 광학계를 보호하기 위하여 cross jet을 적용하고 있다. Fig. 1은 CO₂ 레이저 장치와 캡간극의 영향을 조사하기 위하여 STS304 박판(0.05~0.35 mm^t insert sheet)의 삽입에 의한 실험의 모식도를 각각 보여주고 있다. 용접변형에 의한 캡간극의 변화를 없애기 위해 볼트를 사용하여 동일한 힘으로 지그에



(a) CO₂ laser



(b) Jig

Fig. 1 CO₂ laser and schematic illustration of jig

고정하였다. 단면관찰용 시험편은, 비드가 안정적으로 얹어지는 레이저빔 조사 후 30mm진행된 시점에서 횡단면(transverse section)을, 그리고 연속하여 용접진 행방향으로 18mm의 종단면(longitudinal section)을 각각 채취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 프라이머 코팅강판에 대한 집광 광학계의 비초점 거리변화에 따른 용접특성

집광빔에 의한 재료의 용입특성을 검토하기 위하여 재료의 형상특성과 프라이머의 증발에 의한 영향을 받지 않는 비드 용접 조건에서 비코팅 강판을 선정하여 비초점거리(f_d : 레이저빔의 초점위치가 모재표면의 아래에 있는 경우를 음(-)의 값으로 하고, 위에 있는 경우를 양(+)의 값으로 한다.)변화에 따른 용융깊이의 변화를 조사하였다. 그 결과를 Fig. 2에 나타내며, 그림상에 표기한 용융깊이는 비드의 스파이킹 현상에 따른 깊이변화의 오차를 줄이기 위해 2.2절에서 언급한 18mm의 비드 종단면에서 계측한 평균값을 사용하였다. Fig. 2로부터, 양(+)과 음(-)의 비초점거리 변화가 커짐에 따라 용융깊이는 얕아지며 비드폭은 다소 넓어지는 경향을 보이고 있다. 특히 용융깊이는 양(+)의 비초점거리보다는 음(-)의 값에서 상대적으로 넓은 범위에서 깊게 나타나는 비드천이 현상(bead transition)을 보여주고 있다.

겹치기 용접의 경우에도 이와 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, $f_d = -2\text{mm}$ 의 위치에서 가장 깊은 용입을 보이며 전반적으로 양(+)의 값보다 음(-)의 비초점거리에서 깊게 나타났다.

이상의 실험결과로부터 $f_d(\text{mm}) = -2$ 의 위치가 비드의 건전성 확보 측면에서 가장 유리한 것으로 판단되어 이하의 실험에서는 $f_d(\text{mm})$ 를 -2로 공히 적용하였다.

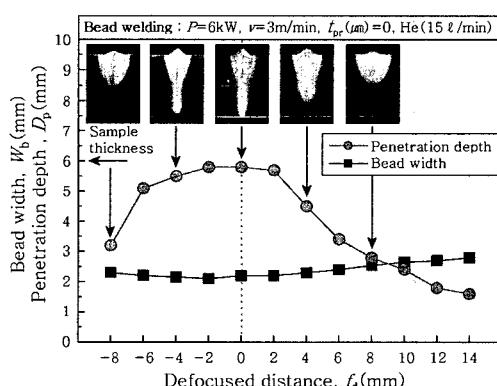


Fig. 2 Penetration depth and front bead width as function of defocused distance

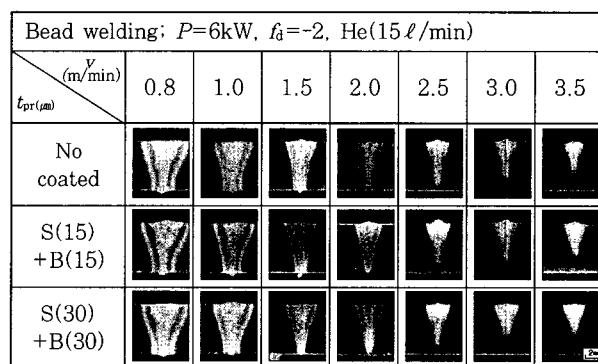
3.2 용접속도 및 프라이머 코팅조건에 따른 용접특성

3.2.1 비드 용접(Bead welding)

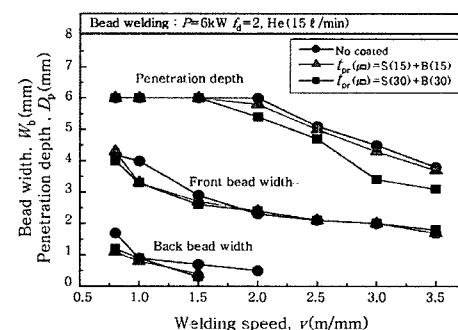
비드 용접에 있어서 용접속도와 프라이머 코팅두께(t_{pr})에 따른 용입깊이(D_p) 및 전·후면 비드폭(W_b)의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 여기에서 그림 중에 표시한 $t_{pr}(\mu\text{m}) = S(15) + B(15)$ 의 의미는 시험편의 표면(surface)과 후면(bottom)에 프라이머가 각각 15μm씩 코팅되어 있음을 나타낸다. 각 프라이머 코팅조건에서 용접속도(v)가 증가함에 따라 용입깊이는 얕아지면서 비드폭 또한 감소하고 있다. 코팅조건에 따라 약간의 차이는 있으나 1.0m/min이하의 용접속도에서 완전용입이 이루어지며, 1.5m/min이상의 용접속도에서는 부분적으로 완전용입이 이루어짐에 따라 키홀 하부에서 다량의 기공결함이 발생하였다. 또한 시험편 표면의 프라이머 코팅두께가 증가함에 따라서 용입깊이는 얕아지는 경향을 보이고 있는데, 이것은 용접시 다량의 프라이머가 증발함에 따라서 레이저빔 에너지가 시험편 내부로의 유입이 감소한데 기인한 것으로 판단된다.

3.2.2 겹치기 용접(lap welding)

겹치기 용접의 경우, 전술한 비드 용접의 경우와는 달리 겹침 부위의 영향이 현저하게 나타나므로서 용접현상에 많은 차이를 보였다. 특히, 겹침 부위에 존재하



(a) Transverse section of bead



(b) Variation of penetration depth

Fig. 3 Penetration depth and bead width as function of weld speed and primer coated thickness

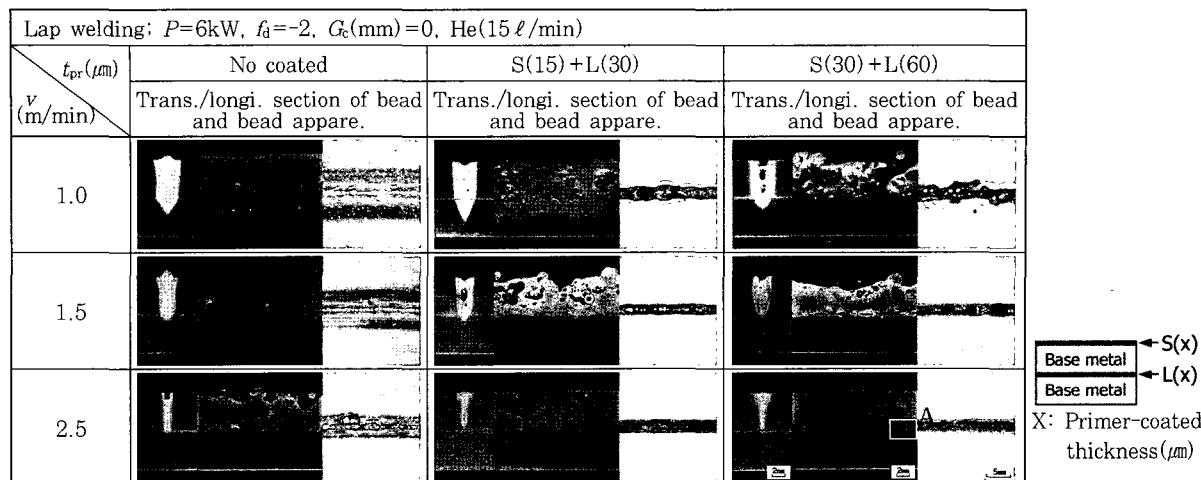


Fig. 4 Variation of bead shape by weld speed and primer coated thickness

는 프라이머는 기공의 발생경향에 지대한 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

Fig. 4에 겹침기 용접시 겹침 부위에 별도의 갭 간극을 두지 않은 상태($G_c=0$)에서, 프라이머의 코팅두께(t_{pr})별 용접속도에 따라 형성된 용접비드의 횡단면, 종단면 및 전면비드의 형상을 나타내었다. 그럼 중 t_{pr} (μm) = S(15) + L(30)은 시험편의 표면(surface) 및 겹침(lap) 부위에 프라이머가 15 μm 및 30 μm 씩 코팅되어 있음을 나타낸다. Fig. 5는 Fig. 4의 A부분을 확대한 사진으로써 겹침 부위로부터 발생하는 기공의 전형적인 예를 보여주고 있다.

실험 결과로부터, 용접속도가 증가함에 따라 용입깊이가 얕아지며, 비드폭은 좁아지는 경향을 보였다. 특히 이러한 현상은 키홀의 하부 선단이 겹침 부위에 닿을 정도의 용접속도에서 스파터의 발생량이 두드러지게 증가하여 심한 협평비드(humping bead)가 형성된다는 것이다. 이것은 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 겹침 부위로부터 기공이 다량으로 발생되며, 코팅강판의 경우 낮

은 비점을 가진 프라이머의 증발에 기인하여 이러한 현상은 더욱 현저하게 발생하게 되는 것으로 사려된다.

3.3 프라이머 코팅위치 및 코팅두께에 따른 용접특성 비교

“시험편의 표면(S)”, “겹침 부위(L)”, 그리고 “표면과 겹침 부위 양측(S+L)”의 제각기 다른 프라이머 코팅위치에서, 코팅두께를 15 μm 에서 30 μm 로 증가시켰을 때의 용입특성을 비교하고 기공과 스파터의 발생여부에 미치는 지배정도를 검토하였다. Fig. 6은 프라이머 코팅위치 및 두께에 따른 횡단면, 종단면 및 비드외관 사진을 나타내고 있으며, 기공 및 스파터의 발생면적 비율을 막대그래프로서 함께 표현하고 있다. 기공의 발생면적 비율(P_{ar})은 비드의 종단면에서 용입면적에 대한 기공면적의 비율이며, 스파터 발생면적 비율(S_{ar})은 용입면적에 대하여 스파터로 인해 손실된 면적의 비율로 정의하였다.

겹침 부위(L)에만 코팅되어 있는 경우 15 μm 의 코팅조건에서는 협평(humping)현상이 일어나지 않았으나, 30 μm 로 코팅두께를 증가시킬 경우 심한 스파터를 수반하며 다량의 기공과 협평비드가 발생하였다. 반면 표면(S)에만 코팅되어 있는 경우에는 용입형상에 큰 차이를 찾아볼 수 없었다. 그러나 시험편의 표면과 겹침 부위의 양측(S+L)에 코팅된 경우에는 15 μm 의 코팅조건에서도 스파터에 의한 협평비드가 형성되었으며 30 μm 로 코팅두께를 증가시키게 되면 스파터 현상이 더욱 더 심하게 발생하고 있음을 알 수 있었다. 이 결과로부터, 표면부에 코팅된 프라이머는 용융금속에 유입되기 전에 많은 에너지를 흡수하여 대부분 대기 중으로 증발하는 반면, 겹침 부위의 프라이머는 용융금속으로 직접 유입

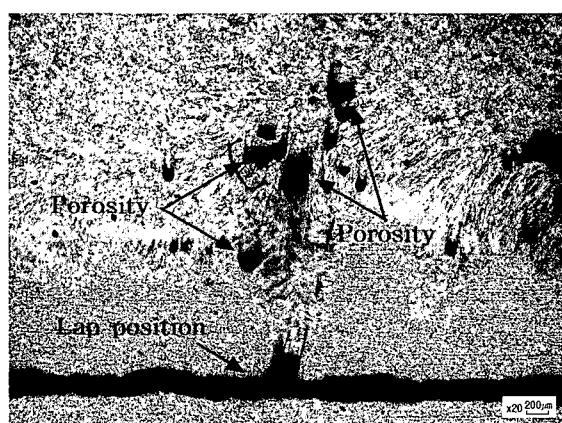


Fig. 5 Example of porosity formation in lap position (A of Fig. 4)

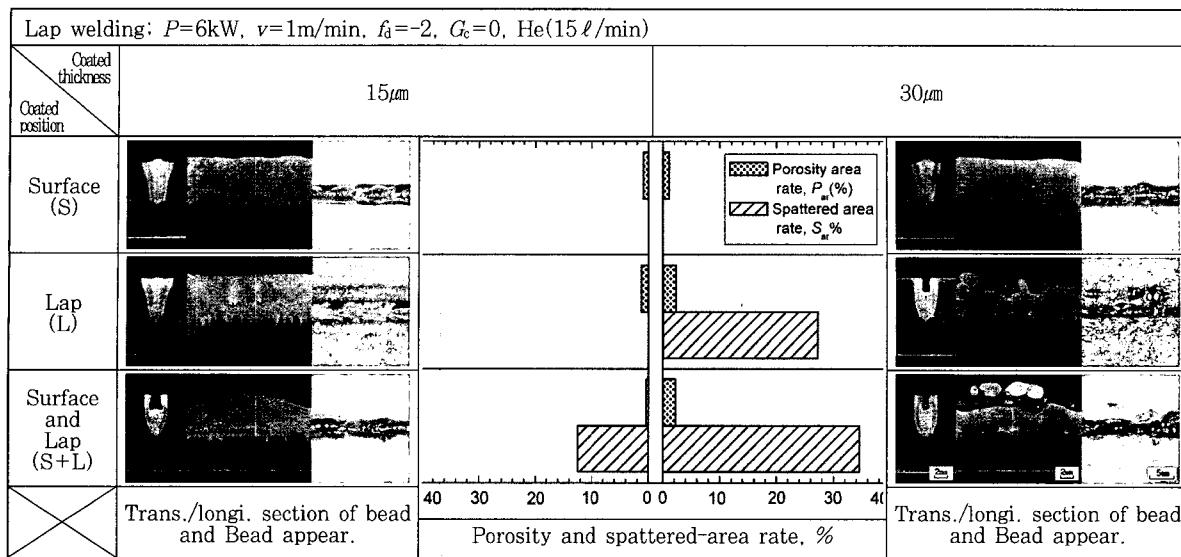


Fig. 6 Effect of primer-coated position and thickness on weld-defect formation

되기 때문에 기공과 스파터의 발생거동에 지대한 영향을 미치는 주 인자임을 알 수 있었다. 또한 표면과 겹침 부위의 양측에 코팅된 경우 이러한 현상은 더욱 가속화됨을 확인할 수 있었다.

3.4 겹치기 용접에 있어서 용접특성에 미치는 갭 간극 및 프라이머 코팅조건의 영향

지금까지의 실험결과에서 겹치기 용접시 기공과 스파터발생의 주된 지배인자는 겹침 부위에 코팅된 프라이머의 증발에 의한 것임을 확인하였다. 따라서, 본 실험에서는 겹침 부위에 형성하는 프라이머의 증발압력을 누출시키기 위하여 갭 간극을 둠으로서 용융금속에 미치는 영향을 최소화 하였다.

갭 간극에 따른 기공과 스파터의 발생면적 비율을 Fig. 7 및 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 발생면적 비율의 정의를 각 그림의 그래프 좌측 상단에 도시하였다. 비드횡단면의 표면 험평여부, 종단면에서의 험평정

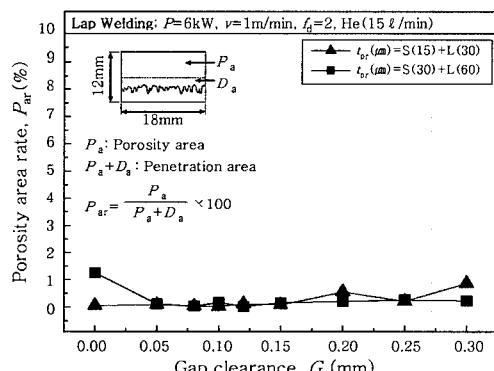


Fig. 7 Porosity area rate by gap clearance in primer coated steels

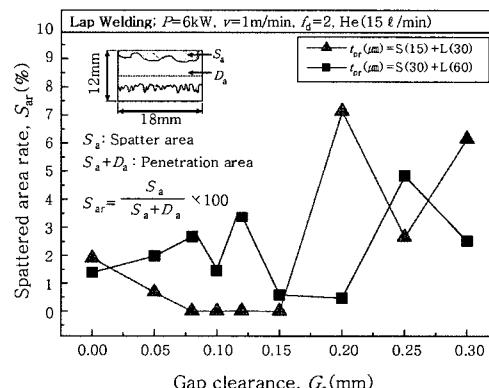


Fig. 8 Spatter area rate by gap clearance in primer coated steels

도와 기공의 발생경향, 전면비드의 외관을 면밀히 분석해본 결과, $t_{pr}(\mu\text{m}) = S(15) + L(30)$ 의 경우에는 갭 간극이 0.08mm 및 0.10mm에서, $t_{pr}(\mu\text{m}) = S(30) + L(60)$ 의 경우에는 갭 간극이 0.15mm 및 0.20mm에서 험평비드 및 기공 등의 결함이 적고 표면비드는 미려한 전반적으로 양호한 것을 알 수 있었다. 그러나 그 이상의 과도한 갭 간극을 둘 경우에는 심한 스파터 발생 등으로 험평비드가 형성되었다. 이것은 용액의 일부가 스파터 및 갭 간극을 통해 소실한데 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 9에 15μm 및 30μm의 프라이머 코팅조건에서 얻어진 겹치기 용접결과를 매크로 조직사진과 더불어 결함의 발생 상황을 비교하여 나타내었다. 갭 간극(G_c)이 0인 경우 비코팅 강판에 비하여 15μm 및 30μm의 코팅조건에서 다양한 기공과 스파터가 발생되는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 프라이머 코팅두께에 따라 적정한 갭 간극을 유지한 경우에는 미려한 비드

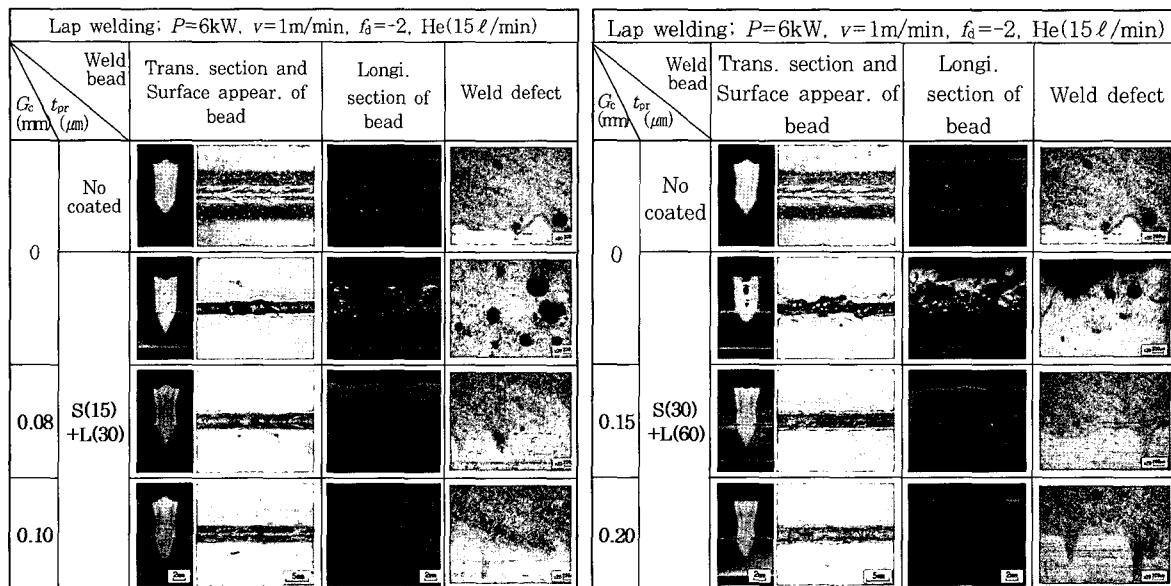
(a) t_{pr} (μm) = S(15) + L(30) (b) t_{pr} (μm) = S(30) + L(60)

Fig. 9 Effect of gap clearance and coated condition in lap welding on primer coated steels

외관과 기공 및 스파터가 거의 발생하지 않은 양호한 용접비드를 보이고 있다. 이것은 강의 주된 원소인 Fe의 용접보다 낮은 비점을 가진 프라이머의 증발압력을 캡 간극을 통하여 완화시켜 줌으로서 용융금속내로 유입되는 기공의 공급원을 차단하고 스파터의 발생원인을 제거한 결과라고 판단된다.

이상의 실험결과로 부터, 겹치기 용접시 용접결함의 발생 메카니즘과 캡 간극의 효과를 Fig. 10에 도식화 하여 나타내었다. Fig. 10(a)는 겹침 부위에 코팅된 프라이머의 증발에 기인하여 스파터 및 기공결함이 발생되는 메카니즘을 설명하고 있다. 즉 Fe의 용접보다 낮은 비점을 가진 Zn성분이 겹침 부위로부터 다양으로 증발하게 되고 용액중에 부상하여 표면 밖으로 빠져나온으로써 스파터가 비산하게 되며 그 결과 험평비드가 형성된다. 또한 증발원소와 불안정한 키홀의 거동에 의

해 형성된 기공이 부상도중 용융금속의 응고벽에 트랩되어 잔류하게 된다.

Fig. 10(b)는 겹침 부위에 적정한 캡 간극을 둘 경우 전전한 용접결과를 얻을 수 있었던 메카니즘을 설명하는 것으로서, 용접결합의 근본적인 원인을 제공하던 프라이머 증발원소와 그 압력이 캡 간극을 통하여 누출됨으로써 용융금속 내부로의 유입이 방지되어 전전한 용접비드가 형성되는 것이다.

4. 결 론

CW CO₂ 레이저 열원을 이용한 6mm^t 조선용 프라이머 코팅강 AH36의 겹치기 용접시, 용접특성에 미치는 프라이머의 코팅두께, 코팅위치 및 캡 간극의 영향에 대하여 검토한 결과를 다음에 정리한다.

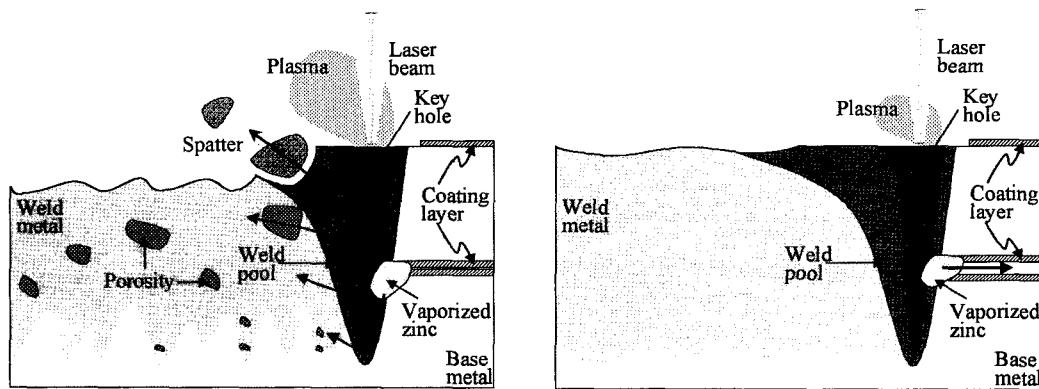


Fig. 10 Formation mechanism of weld defects by Zn and gap-effect in lap welding on primer coated steels

1) 접광빔에 의한 재료의 용접특성을 검토하기 위해 비코팅 강판에서 비드 용접을 행하여 용융깊이의 변화를 조사한 결과 양(+)과 음(-)의 비초점거리 변화가 커짐에 따라 용입깊이는 얕아지며 비드폭은 다소 넓어졌다. 겹치기 용접의 경우도 이와 유사한 결과를 얻었으며 $f_d(\text{mm}) = -2$ 의 위치에서 가장 깊은 용입을 보였다.

2) 비코팅강판 및 $15\mu\text{m}$ 와 $30\mu\text{m}$ 의 프라이머로 각각 코팅된 강판에 대하여 용접속도(v)를 변화시켜 비드 용접을 행한 결과, 용접속도(v)가 증가함에 따라 용입깊이는 얕아지면서 비드폭도 감소하였다. 또한 코팅두께가 증가할수록 용입깊이는 얕아지는 경향을 보였다.

3) 겹치기 용접시 용입깊이와 비드폭의 변화는 비드 용접의 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 키홀의 하부 선단이 겹침 부위에 닿을 정도 이상의 용입깊이를 얻는 조건에서는 겹침 부위로부터 증발한 프라이머가 유입되어 다량의 기공과 스패터가 발생하였으며 코팅두께가 증가할수록 그 경향은 더욱더 현저하게 나타났다.

4) 겹치기 용접시 코팅위치(표면, 겹침 부위, 표면과 겹침 부위)와 코팅두께($15\mu\text{m}$ 와 $30\mu\text{m}$)를 변화시켜 실험한 결과, 표면보다는 겹침 부위의 코팅조건에서 그 양이 증가함에 따라 스패터와 기공이 다량으로 발생하였으며, 양측 모두 코팅된 경우는 그 발생정도가 더욱 심해졌다. 즉 겹침 부위에 코팅된 프라이머는 용접결함 발생에 지배적인 역할을 하였다.

5) 겹치기 용접시 코팅두께가 S(15)+L(30)일 때는 0.08에서와 0.10mm, S(30)+L(60)일 때는 0.15에서와 0.20mm의 갭 간극을 두었을 때 용접결함이 없는 양호한 결과를 얻었다. 이것은 프라이머의 코팅두께에 따라 용접시의 증발량을 고려하여 적정한 갭 간극을 유지함으로서 프라이머의 증발압력을 방출시켜 용융금속내로의 유입을 방지한 결과이다.

6) 겹치기 용접시 갭간극을 두지 않을 경우, 겹침 부위로부터 발생되는 프라이머의 증발압력은 좁은 키홀을 통으로 급속히 빠져나옴으로서 스패터 및 험평비드를 발생시키며, 키홀의 불안정한 거동을 가속화시키는 가운데 키홀로부터 분리된 기공이 응고벽에 트랩되어 잔류하게 되는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 新美 友治, 夏見 文章 : CO₂ レーザ溶接の自動車ボディーへの応用, 第28回レーザ熱加工研究全論文集(1992), 171-184 (in Japanese)
- 泰山 正則, 高橋 通泰, 福井 部の耐食性及び諸特性, 第147回溶接冶金資料, 第157回溶接法資料, 第24高エネルギービーム資料(1997), (in Japanese)
- H. SIMIDZU, F. YOSHINO, S. KATAYAMA and A. MATSUNAWA : Pulsed Nd:YAG Laser Spot Welding

of Aluminum Alloys, Proceedings of LAMP'92, Nagaoka (June, 1992), 511-516

- I. NORRIS, T. HOULT, C. PETERS and P. WILEMAN : Material Processing with a 3kW Nd:YAG Laser, Proceedings of LAMP'92, Nagaoka(June, 1992), 489-494
- J. D. Kim and Y. S. Kim : The State of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding, The Korean welding society 18-4 (2000), 433-440 (in Korean)
- G. Marinoni, A. Maccagno, E. Rabino : Technical and economic comparison of laser technology with the conventional technologies for welding, Proc. 6th Int. Conf. Lasers in Manufacturing, (1989), 105-120
- PA Hilton : ND:YAG and CO₂ laser welding of complex geometries, ICALEO(2002)
- N. C. Sekhar, J. D. Russell, N. A. McPherson : Autogenous ND:YAG laser welding of 6mm thick dissimilar steels, ICALEO(2002)
- Hongping Gu, Robert Mueller : Hybrid welding of galvanized steel sheet, ICALEO(2002)
- G. S. Booth, D. S. Howse, A. C. Woloszyn, E. D. Howard : Applying laser-arc hybrid welding thchnology for land pipelines, IWC, (2002), 169-175
- Ulrich Dilthey, Hanno Keller : Laser arc hybrid welding, IWC, (2002), 162-168
- Se-Hwan Lee, Massood A. Rahimi, Charles E. Albright, Walter R. Lempert : Development of combind welding with an electric arc and low power CO laser, IWC, (2002), 176-180
- Hongping Gu : A new method of laser lap welding of zinc-coated steel sheet, ICALEO(2000), 1-6
- R. Akhter, M.M.Gualini : Mathematical Modeling of the Laser Spot Welding of Zinc Coated Steel in Lap Configuration, ICALEO(1998), 207-216
- J. Heyden, K. Nilsson and C. Magnusson : Laser welding of zinc coated steel, Proc. 6th Int. Conf. Lasers in Manufacturing, (1989), 93-104
- M. M. S. Gualini : Laser welding of zinc coated steels. An old problem with a possible solution, ICALEO, (2002)
- Katayama Seiji, Wu Yushen, Matsunawa Akira : Laser weldability of zinc-coated steels, ICALEO (2002)
- Jong Hyun Suh, To Hoon Kim, Byung Kil Yu, Kyoung Don Lee : A Study of Tailored Blank Welding between Mild Steel and Zn-coated Steel Sheets by CO₂ Laser Beam, The Journal of Korean Society of Laser Processing 1-1 (November, 1998), 4-10 (in Korean)
- J. Suh, Y.H. Han, J.O. Kim, S.H. Yoon : Laser Beam Welding and Formability of Zn-Coated Steel Plates, Proceeding of the 5th Symposium on Laser Materials Processing (October, 1994), 153-166 (in Korean)
- Kyoung Don Lee, Ki Young Park and Ju Gwan Kim : Effects of Gap and the Speed on the Lap-Joint CO₂ Laser Welding of Automotive Steel Sheet, Journal of the Korean Welding Society 20-4 (August, 2002), 510-515 (in Korean)