

6mm^t조선용 프라이머 코팅강판의 CO₂레이저 용접성 (Ⅱ)

- 레이저 용접현상의 동적거동과 기공 및 증발입자의 조성 -

김 종 도* · 박 현 준**

*한국해양대학교 기관시스템공학부

**한국해양대학교 대학원

The Weldability of 6mm^t Primer-coated Steel for Shipbuilding Using CO₂ Laser (Ⅱ) - Dynamic Behavior of Laser Welding Phenomenon and Composition of Porosity and Vaporized-particle -

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

It has been reported that good quality weld beads are not easily obtained during the CO₂ CW laser welding of primer coated plate. However, by introducing a small gap clearance in the lap position, the zinc vapor can escape through it and sound weld beads can be acquired. Therefore, this study examines for keyhole behavior by observing the laser-induced plasma and investigates the relation between keyhole behavior and formation of weld defect.

Laser-induced plasma has accompanied with the vaporizing pressure of zinc ejecting from keyhole to surface of primer coated plate. This dynamic behavior of plasma was very unstable and this instability was closely related to the unstable motion of keyhole during laser welding.

As a result of observing the composition of porosity, much of Zn element was found from inner surface of porosity. But Zn was not found from the dimple structure fractured at the weld metal. By analyzing of vaporizing element in laser welding, a component ratio of Zn was decreased by introducing a small gap clearance. Therefore we can prove that the major cause of porosity is the vaporization of primer in lap position.

Mechanism of porosity-formation is that the primer vaporized from the lap position accelerates dynamic behavior of the key hole and the bubble separated from the key hole is trapped in the solidification boundary and remains as porosity.

*Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received March 7, 2006)

Key Words : CO₂ Laser welding, Primer-coated steel, Laser induced plasma, Porosity, Keyhole, Gap clearance

1. 서 론

최근 조선관련 업계에서는 해양환경에 적합한 표면처리 강판의 적용을 검토하고 있으며, 선박 등 대형수송 기기의 고속화 및 절전에너지화 문제와 더불어 경량화가 크게 부각됨에 따라 종래의 골재와 판에 의한 용접

구조로부터 레이저를 이용한 박판 집합체 용접구조로의 전환을 고려하고 있는 추세이다. 그러나, 표면처리강판의 레이저 용접의 경우 코팅성분의 낮은 비점에 기인하여 스패터 및 기공 등의 많은 용접결함을 발생시키며, 또한 재료 및 용접열원의 특성상 용접품질의 제어에 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 조선용 프라이머 코팅강판(primer

coated-steel) AH36의 CO₂레이저 용접시 유기 플라즈마 및 키흔 등의 용접현상에 대한 고속도 관찰과 재료학적 분석에 의하여 스패터 현상을 비롯한 키흔과 기공 등의 형성메카니즘을 규명함으로써 용접결함 발생과 방지에 대한 근본적인 대안책을 제시하고자 하였다. 키흔과 유기 플라즈마의 거동은 모재로부터 증발하는 합금원소의 동적거동을 반영하고 있으므로, 유기 플라즈마의 거동에 대한 분석결과는 용접금속의 용융특성에 미치는 정성적인 프라이머의 거동분석에 매우 유효하게 이용될 수 있다. 또한 이 분석결과는 금속재료적인 측면 및 키흔의 동적 거동에 관한 계측결과와 연계하여 프라이머의 거동에 대한 메카니즘을 추정하였다.

본 연구결과는 장기적으로 용접결과를 감시하는 In-process의 기반지식이 될 수 있을 것이다¹⁾.

2. 실험방법

2.1 레이저 유기 플라즈마와 스패터의 거동관찰

레이저 용접 중 재료 표면에 발생하는 유기 플라즈마와 스패터의 거동을 고속도 카메라에 의해 가시화하여 관찰하였으며, Fig. 1에 그 계측 시스템의 모식도를 나타내었다. 본 계측에 이용한 고속도 카메라는 Digital color CCD sensor's scanning type을 채용하고 있으며, 최고 촬영속도는 10,000 FPS, 최소 shutter time은 50 μ s이다.

레이저 용접현상의 계측시의 각도는 40°로 하여 유기 플라즈마의 동적 거동과 용융지로부터 비산하는 스패터(spatte, 날림입자)의 거동을 동시에 관찰하였다.

2.2 프라이머 코팅강판에 대한 용접현상의 재료학적 분석

프라이머 코팅강판의 레이저 용접시 기공의 발생이

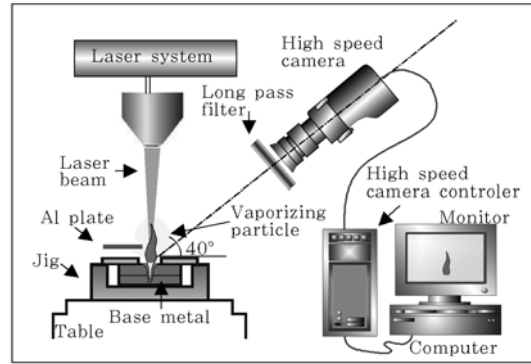


Fig. 1 Schematic experimental setup for observation of laser-induced plasma and spatter

용이한 겹치기 용접(Lap welding)조건에서 시험편을 채취하고, 용접금속부를 강제 과단하여 노출된 기공내벽을 SEM으로 관찰하였다. 또한 기공 표면 및 개재물 등의 EDX분석을 통하여 기공을 이루는 주된 성분을 조사하였다. 또한 용접조건에 따라 증발물질을 포집하여 성분비를 비교·분석함으로써 기공의 주된 형성원인을 규명하고자 하였다.

증발원소 포집용 기관으로서 모재 및 프라이머의 조성과는 다른 알루미늄 합금판 A6061을 사용하였으며, 동일한 레이저 빔 조사조건에서 4회 반복 용접하여 분석에 필요한 충분한 양을 포집하였다.

2.3 X-선 투과 영상시스템을 이용한 키흔 용접현상의 고속도 계측

레이저 용접 중 재료내부에서 형성되는 키흔과 기공의 동적거동을 X-선 투과 영상시스템을 이용하여 관찰하였으며, 그 장치의 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 계측시스템은 X-선관, 이미지 증폭기(I.I : Image Intensifier), 영상처리장치, CCD와 비디오 고속도 카메라 시스템 및 시험편의 이동테이블 부분으로 구성되

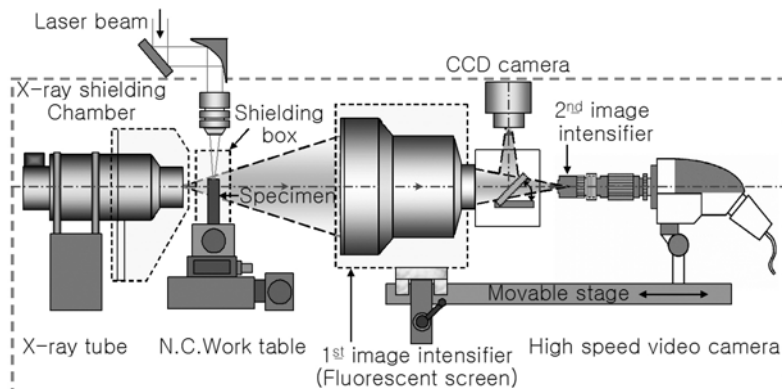


Fig. 2 Schematic arrangement of X-ray transmission imaging system for observation of keyhole and porosity in laser welding

어 있으며, X-선 방호막으로 실드되어 있다. 본 실험에서 사용한 시험편의 폭은 X-선의 투과량을 고려하여 3mm로 하고 X-선 초점은 50 μ m 또는 250 μ m를 사용하였다.

본 실험에 사용된 레이저 장치는 최대출력 50kW의 3축 직교형 CO₂ 레이저로서, 레이저빔의 모드는 링 모드이며 초점거리(*f*)는 381mm이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저 유기 플라즈마와 스패터의 거동

프라이머 코팅강판의 겹치기 용접시 겹침부위에 코팅된 프라이머의 증발에 기인하여 기공과 스패터가 발생하며, 적절한 갭 간극(gap clearance)을 유지함으로써 건전한 비드를 얻을 수 있음을 제1보에서 보고하였다²⁾. 본 실험에서는 레이저 조사시에 유기하는 플라즈마의 거동을 관찰함으로써 키흔의 거동을 추정하고 스패터에 의한 비드결함 형성과 상호관련성을 규명하고자 하였다.

용접시 용융금속 내에 형성된 키흔에서의 과도적인 증발현상은 재료표면으로 분출되는 증발압력에 의해 수반되며, 이 증발현상은 시험편 표면에 형성되는 플라즈마와 스패터의 발생거동에도 영향을 미치게 된다. 그 결과 용접비드는 험핑비드(humping bead) 등 여러 형태의 결함을 가지게 된다. 따라서 용융금속 내의 상황을 반영하는 플라즈마와 스패터의 발생거동을 가시화하여 관찰함으로써 용접결함의 발생여부 및 그 정도를 예상할 수 있다¹⁾.

3.1.1 비드 용접의 경우

프라이머 코팅강판의 용접에 있어서 기공과 스패터가 거의 발생하지 않는 비드 용접(bead welding)의 완전

용입조건에서 플라즈마의 거동을 관찰하였다. 이는 겹치기 용접시에 많은 스패터를 수반하는 용접현상과 비교하기 위한 기초자료를 얻기 위해 수행되었다.

Fig. 3은 비드 용접의 완전용입조건에서 얻어진 비드 형상과 유기플라즈마의 거동을 나타낸다. 실험 결과, 프라이머의 표면코팅여부에 관계없이 완전용입조건에서는 기공이나 스패터가 존재하지 않는 미려한 비드형상을 보이고 있었으며, 이것은 유기 플라즈마와 스패터의 동적거동에도 잘 반영되어 있었다. 측정된 유기플라즈마는 키흔로부터 분출되는 프라이머의 증발압력에 의해 다소 흔들리는 거동을 보이고 있으나 용액의 거동에 의해 들어올려지거나 일시적인 소광상태를 보이는 등의 격렬한 움직임은 관찰되지 않았다. 프라이머 코팅강판의 경우 용액으로부터 비산하는 스패터가 다수 관찰되었으나 용접금속의 비드에 영향을 줄 정도는 아니었다. 이것은 용접시 발생하는 프라이머의 증발압력이 재료가 관통되어 형성된 키흔을 통로로 하여 소실되기 때문이라고 판단된다. 즉, 완전용입조건의 비드용접에서는 겹치기용접에 비하여 안정된 거동을 보이고 있었다.

3.1.2 겹치기 용접의 경우

Fig. 4는 프라이머 코팅강판의 겹치기 용접시 갭 간극의 유무에 따른 비드형상과 유기플라즈마 및 스패터의 비산거동을 나타낸다. 스패터의 비산거동을 관찰함에 있어서는 700nm 이상의 적외관만을 투과할 수 있는 Long pass filter를 사용하였다. 본 실험에서는 스패터가 발생하는 시기와 발생 메카니즘을 규명하고자 하였다.

Fig. 4(a)는 갭 간극을 두지 않은 경우로서 비드단면에는 심한 험핑(humping)현상을 보이며 그 내부에는 겹침위치를 따라 다량의 기공이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 용접현상은 프라이머의 급속한 증발에

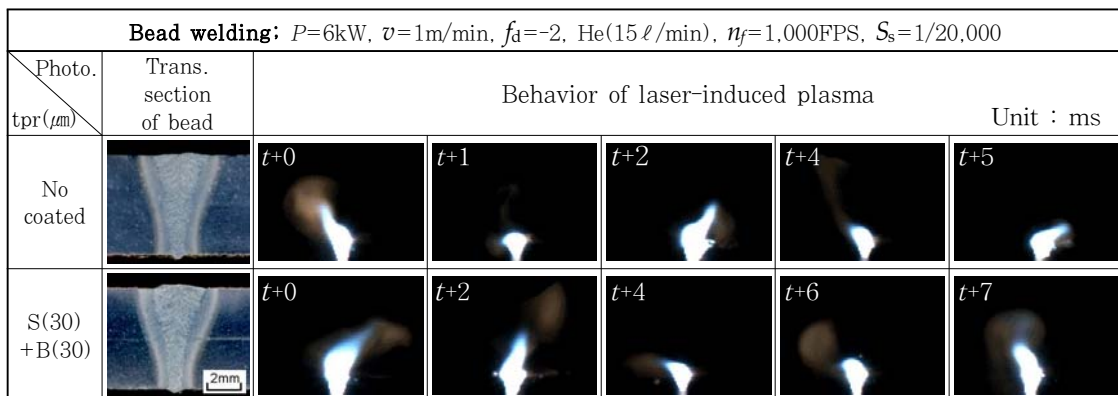


Fig. 3 High speed photographs of laser-induced plasma and spatter in bead welding

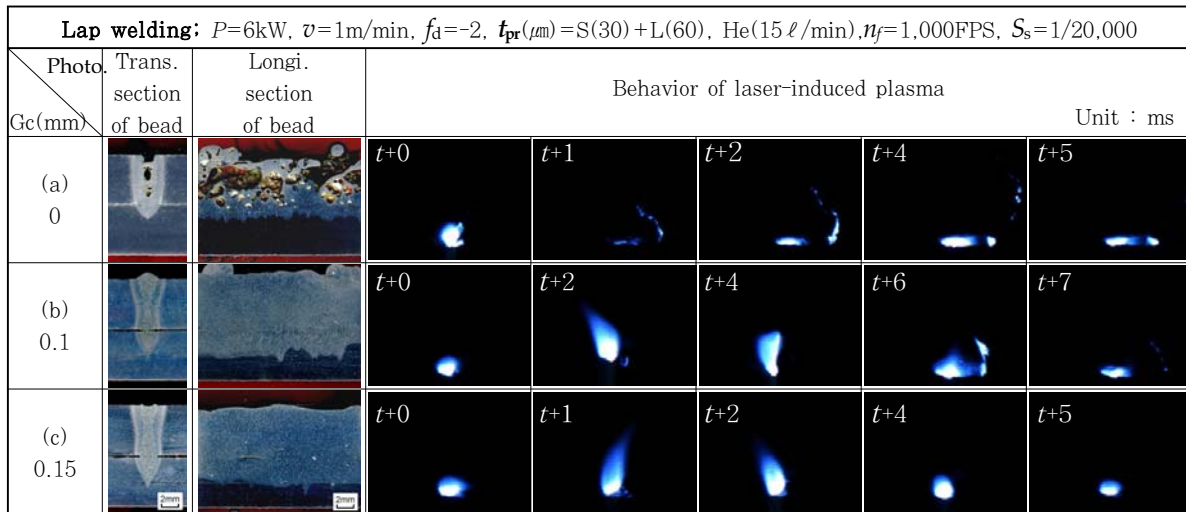


Fig. 4 High speed photographs of laser-induced plasma and spatter in lap welding

의해 과도적으로 발생되며 용융지로부터 용액의 비산을 초래한다. 비산하는 스패터의 동적거동에 대한 고속도 계측결과로부터 알 수 있듯이 유기플라즈마가 키홀로부터 시험편의 표면으로 분출하듯이 팽창 할 때 키홀 주변에 형성되어 있는 용액을 함께 들어올려 스패터를 비산시키게 되는데, 이때 키홀 주변으로 다량으로 분출되는 스패터는 용접진행방향의 반대측으로 뿌러지듯이 흘러 보내게 된다. 그 결과 용접금속에는 험핑비드가 형성되며 그 내부에는 과도적인 키홀의 움직임에 따라 다량의 기공이 남게 되는 것이다.

Fig. 4 (b) 및 Fig. 4 (c)는 갭 간극(G_c)을 0.1mm 및 0.15mm로 하였을 때 얻어진 용접금속의 비드형상과 유기플라즈마 및 스패터의 비산거동을 관찰한 결과이다. 겹침부위로부터 증발하는 프라이머의 압력을 갭 간극을 통하여 배출시킴으로서 스패터 현상을 억제 또는 방지하여 건전한 용접결과를 얻게 되는 과정에서 플라즈마의 거동을 계측하였다.

적정한 갭 간극을 유지한 경우(b,c)에는 갭 간극을 두지 않을 때의 결과(a)와 비교하여 상당히 안정된 용접비드를 보이고 있으며 이러한 현상은 용접 중 유기된 플라즈마와 스패터의 거동에도 잘 반영되어 있다. 즉, 유기플라즈마의 격렬한 움직임은 다소 완화되었고 스패터의 비산현상도 다수 관찰되기는 하나 비산되는 힘이 약화된 듯 용접진행 방향의 후부로 뿌러지는 시간과 거리가 상대적으로 길지 않다. 특히, $G_c=0.15$ 인 경우 동일한 코팅조건에 대해서는 가장 건전한 용접비드를 얻을 수 있었으며¹⁾ 이 때의 고속도 계측 결과에서도 상당히 안정된 거동을 보였다.

3.2 프라이머의 증발거동에 대한 재료학적 분석

3.2.1 용접금속내 기공의 조성

Fig. 5는 겹침부에 위치한 기공을 강제 파단하여 노출된 기공의 내벽 SEM사진과 EDX분석 결과를 나타

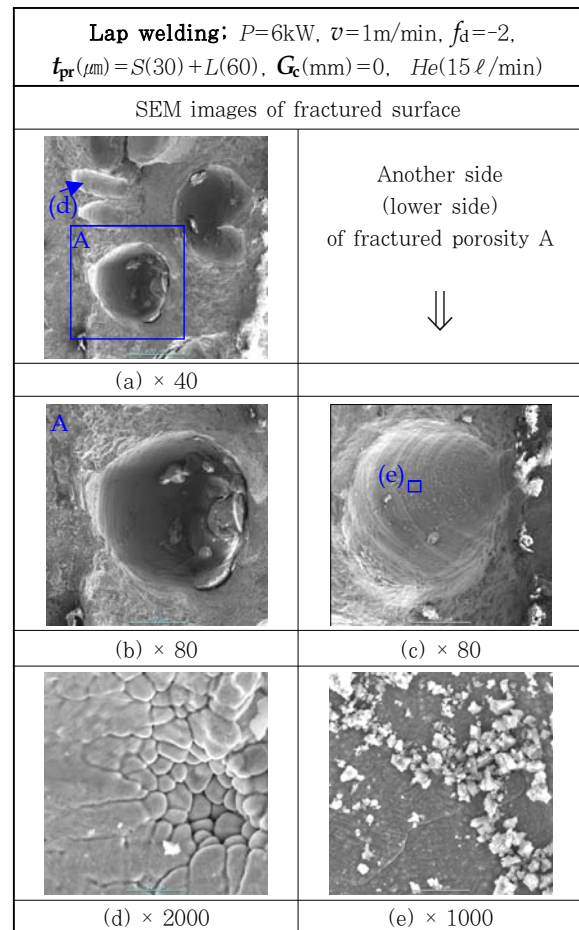


Fig. 5 SEM Photos and EDX analyses of porosity

내고 있다. SEM사진의 (a)는 강제 파단된 겹침부의 단면을 보이고 있으며, (b)는 A의 기공을 확대한 사진, 그리고 (c)는 그 반대쪽의 기공내벽 형상을 보이고 있는데, (b)와 (c)는 마치 조개껍질을 벌려놓은 듯한 형상과 유사하다. (d)는 기공내벽의 셀상 덴드라이트 응고조직을, (e)는 기공 내벽에 부착되어 있는 개재물을 각각 보이고 있다. Fig. 5(c)의 기공에 대하여 EDX면 분석한 결과를 Fig. 6에 나타낸다. (a)는 기공의 Grey image를 나타내며, (b), (c) 및 (d)는 Fe, Zn 및 Si의 기공 내 성분분포를 나타낸다. 또한 Fig. 7은 강제 파단된 딴플구조(Dimple structure)와 기공 내벽 및 개재물의 EDX분석 결과를 나타낸다.

실험 결과, 겹침부위에는 많은 기공이 형성되어 있었으며 열영향부위로부터 부풀려진 듯한 형상을 하고 있었다. 또한 기공의 조성을 분석한 결과, 내벽의 전체에 걸쳐서 AH36의 주된 합금원소인 Fe가 다량으로 검출되는 가운데 프라이머 성분인 Zn도 다수 관찰되었다. 특히 기공내의 개재물에는 Zn성분이 최대 85%에 이르고 있었으며, O의 성분이 함께 검출된 점으로부터 이들 원소들은 산화물을 형성하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 기공이 아닌 용접금속부가 강제 파단된 딴플구조에서는 Zn성분이 전혀 검출되지 않았다.

또한, Fig. 8의 용융경계면에서의 EDX면분석 결과로부터 확인할 수 있듯이 기공과 인접한 열영향부에서는 다량의 Zn성분이 검출되었다.

이상의 결과로부터, 프라이머 코팅강판의 레이저 용접시 기공의 발생원인은 주로 겹침부위로부터 프라이머의 증발에 기인하고 있음을 간접적으로 입증하고 있다.

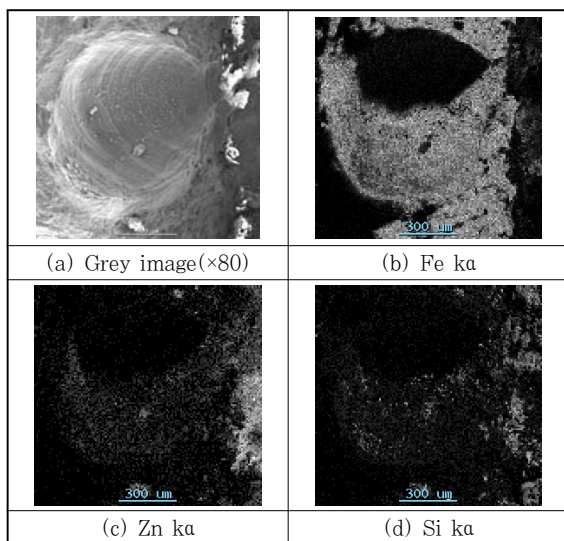


Fig. 6 Results of EDX area analyses in porosity

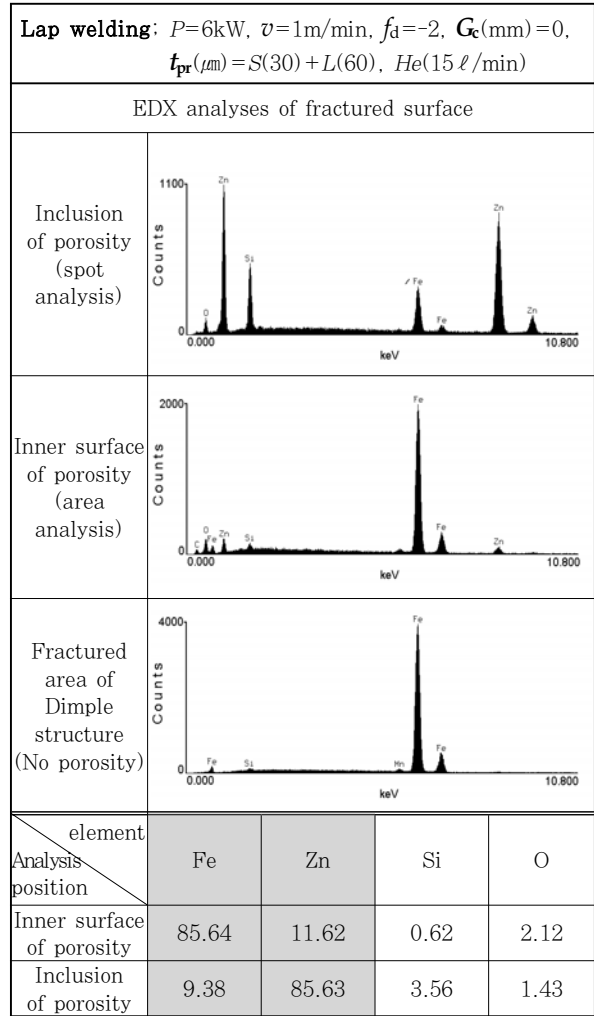


Fig. 7 EDX analyses of porosity (Unit : wet%)

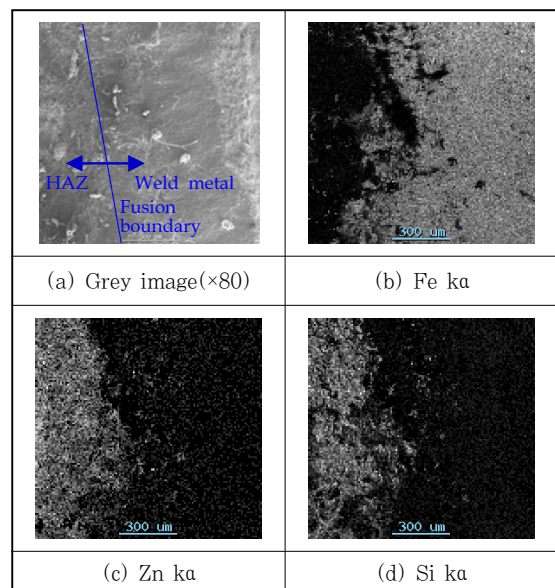


Fig. 8 Results of EDX area analyses in fusion boundary of lap side

3.2.2 증발입자의 조성

Fig. 9는 겹치기 용접시 프라이머 코팅두께 및 겹 간극의 유무와 크기의 조건에 따라 증발물질을 포집하여 그 성분을 E..DX로 분석한 결과이다.

겹 간극을 두지 않았을 경우 포집된 증발원소의 조성비는 프라이머 코팅두께에 따라 Zn이 약 70~90wt%를 점유하며 산화물을 형성하고 있음을 알 수 있다. 그러나 겹 간극을 0.2mm로 두게 될 경우 프라이머의 주 성분인 Zn의 증발조성은 15 μ m표면코팅의 경우 약 35 wt%, 30 μ m코팅의 경우 약 50 wt%로 감소하고 있음을 확인하였다. 즉 겹 간극을 두게 됨으로서 시험편의 표면으로 증발하는 합금원소 및 프라이머의 조성비율에도 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

3.2.3 용융금속의 비드표면에 형성되는 부유물 질의 성분분석

Laser-용접시 비드표면에 관찰되는 부유물질에 대하여 성분조사를 함으로서 그 발생원인과 비드형성과정에 미치는 영향을 검토하였다.

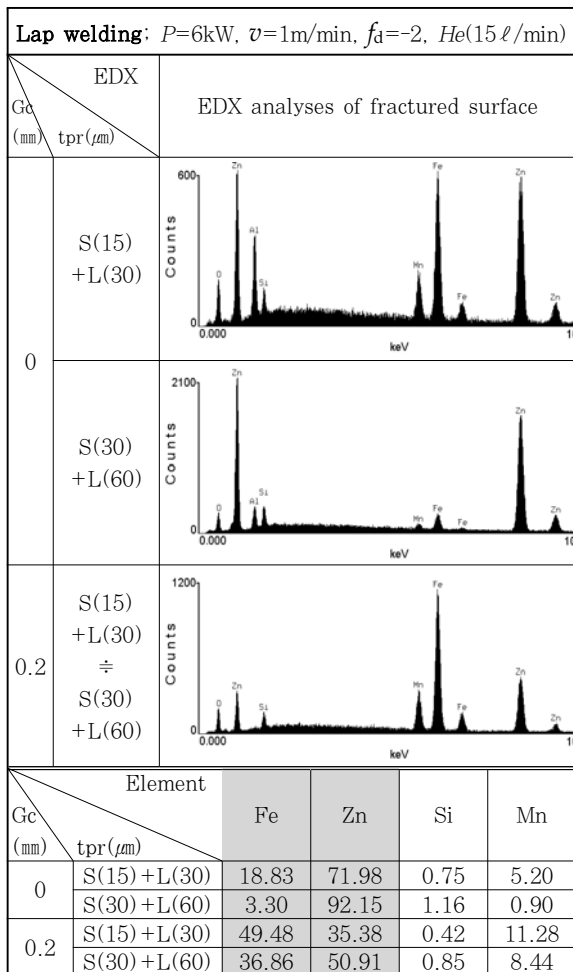


Fig. 9 EDX analyses of vaporizing particles

Fig. 10의 비드외관에서 보듯이, 비드표면에 얼룩무늬 형태의 부유물인 ①과 ②가 관찰되며, 용융경계면인 비드엣지(edge)부분을 따라서 비드 양쪽 방향에서 길게 형성되어 있다. 그리고 (b)에는 (a)의 A영역을 확대 표현한 SEM사진으로서 용융경계면에서의 비드외관을 나타낸다. 열영향부로 보여지는 변색부위가 모재와 용접금속사이에서 일정면적을 가지며 비드를 따라 형성되어 있다.

①과 ②의 부유물에 대한 EDX분석결과를 Fig. 10의 아래에 보여주고 있는데, 이 부유물질은 Zn성분과 관련성이 적은 여러 원소들과의 산화화합물인 것을 알 수 있다. ③의 열영향부위에서 다량의 Zn성분이 검출되는 EDX분석결과와는 많은 대조를 이루고 있다.

이와 같은 결과로부터, 레이저 용접시에 비드상에 형성되는 부유물질은 프라이머의 주된 성분인 Zn과는 관련성이 적은 산화화합물이며, 레이저 용접성에 미치는 영향은 고려하지 않아도 될 것으로 판단되었다.

3.3 겹치기 용접에서의 키홀과 기공의 형성 메카니즘

키홀 용접현상에 관한 연구는³⁻¹³⁾, 키홀 현상이 용융 금속내부에서 아주 빠른 속도로 과도적으로 이루어지기 때문에 그 계측과 해석이 곤란하여 수많은 가정이나 가설 하에서 용입형상과 키홀의 거동에 관한 해석이 국한된 영역에서 이루어지고 있는 것이 현실이다. 따라서 용접결합의 형성메카니즘에 대해서는 불명확한 점이 많으며, 특히 프라이머 코팅강판에 대해서는 결과론적인 보고가 있는데 지나지 않는다.

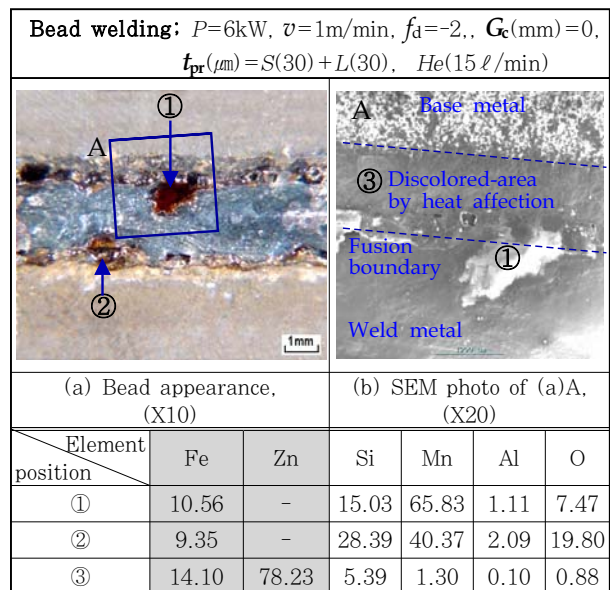


Fig. 10 EDX analyses of floating material

Lap welding: $P=5\text{kW}$, $v=1.5\text{m/min}$, $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L1(30)+L2(30)$, $f_d=0(f=381\text{mm})$, $G_c(\text{mm})=0$, $n_f=200\text{f/s}$, $He(50\ell/\text{min})$				
X-ray trans. images				
Schematic image				
	t+0ms	t+35ms	t+90ms	t+130ms

Fig. 11 X-ray transmission images of kyehole and bubbles or porosity during CW CO₂ laser lap welding of primer-coated steel

그러므로 본 실험에서는 재료내부에 형성되는 기공의 거동을 X-선 투과 영상시스템을 이용하여 직접 관찰하고 기공의 형성메커니즘에 대한 명확한 규명을 꾀하고자 하였다.

Fig. 11은 프라이머 코팅강판의 겹치기 용접시 기공 및 기공의 형성거동에 대한 계측 예를 나타낸다. 가시 효과를 높이기 위하여 아래에 모식도와 함께 나타내었다. 겹침부위로부터 증발한 프라이머에 의해 부풀려진 기공은 매우 불안정한 거동을 보이고 있으며, 레이저빔 열원이 지나간 후에도 잔류열에 의하여 증발이 계속 이루어짐으로서 기공이 더욱 커지는 특이한 거동을 보이고 있다.

이와 같은 기공의 형성 메커니즘을 Fig. 12에 개략도로 나타내었다. 그림의 하부는 기공용접이 이루어지

는 시험편의 측면에서 본 것이며, 상부 그림은 하부 그림의 평면도에 해당하는 것으로 기공의 형성메커니즘을 입체적으로 표현하고자 하였다. 기공이 재료내부에 형성되어 진행하게 되면 기공 전방에 위치한 겹침부위로부터 증발한 프라이머성분이 기공에 함입되면서 기공을 통하여 소실되기도 하며, 소실되는 가운데 기공을 부풀리게 하여 불완전한 동적 거동을 가속화시키게 된다. 이 때 기공로부터 분리된 버블(bubble)이 부상도중 응고벽에 트랩되면 기공으로 남게되기도 한다. 또한 빔 열원이 지나간 후에도 재료속의 잔류열만으로도 프라이머는 증발을 계속 하여 기공의 성장을 촉진시키게 된다. 이때 기공의 성장방향은 상대적으로 성장하기 쉬운 고온영역의 빔축을 향하여 팽창하게 되는 것이다.

4. 결 론

1) 프라이머 코팅강판의 레이저 용접(laser welding) 시 유기플라즈마의 거동을 관찰한 결과, 비드 용접의 완전용입 조건에서는 안정된 플라즈마의 거동을 보였다. 반면 겹치기 용접시 $G_c=0$ 인 경우에는 프라이머의 급속한 증발에 의해 용융지로부터 용액의 비산을 초래하였다. 그러나 프라이머의 코팅두께에 따라 적절한 갭간극을 유지한 경우에는 비교적 안정된 플라즈마의 거동을 보였으며 용액의 비산현상도 감소하였다.

2) 스파터의 발생 메커니즘은 플라즈마가 기공로부터 시험편의 표면으로 분출할 때 기공 주변에 형성되어 있는 용액을 같이 들어올려 스파터를 비산시키게 되며, 그 결과 심한 험핑비드를 형성시킨다.

3) 기공내벽의 조성을 분석한 결과 Fe성분과 함께 프라이머 성분인 Zn도 다수 검출되었으며, 특히 기공내의 개재물에는 많은 Zn성분이 검출되었다. 또한 기공이

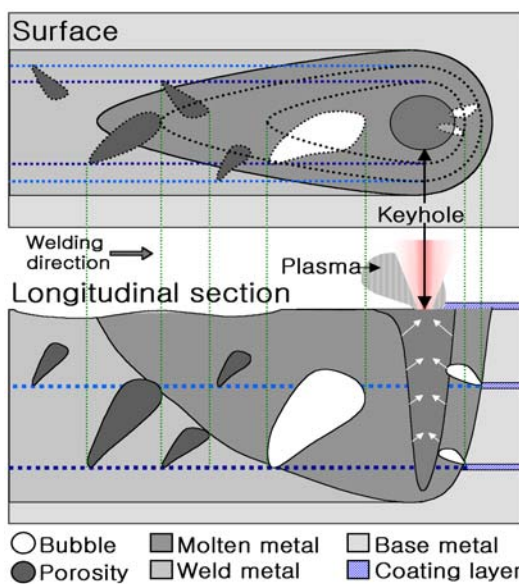


Fig. 12 Porosity formation mechanism in lap welding of primer-coated steel

열영향부에서 불어 부풀린 듯한 형상을 하고 있는 것으로부터 기공의 주된 발생원인은 프라이머의 증발에 기인한 것임을 확인하였다.

4) 증발하는 입자를 포집하여 그 조성을 분석한 결과, $G_c=0$ 의 경우에는 Zn이 70~90%를 점유하고 있었으며 $G_c=0.15$ 의 경우에는 35~50%로 현저하게 감소하였다.

5) 용접비드표면에 부유하는 물질의 조성을 분석한 결과, Zn성분과 관련이 없는 여러 원소들의 산화화합물이었다.

6) X-선 투과영상이미지의 관찰로부터 확인된 기공의 형성 메카니즘은 키홀이 재료내부에 형성되어 진행하게 될 때 겹침부위로부터 증발한 프라이머성분이 키홀의 동적거동을 가속화시키고, 키홀로부터 분리된 버블이 응고벽에 트랩되면 기공으로 잔류하게 된다. 이때 빔 열원이 지나간 후에도 잔류열만에 의하여도 프라이머의 증발이 계속되어 기공의 성장을 촉진시킨다.

참 고 문 헌

1. Jong-Do Kim : Fundamental Study on the Weld Defects and Its Real-time Monitoring Method, KWS (2002), 26-33
2. Hyun-Joon Park, Jong-Do Kim : The Weldability of 6mm^t Primer-coated Steel for Shipbuilding Using CO₂ Laser(I)-Effects of Primer Coating Condition and Gap Clearance, KWS (2002), 177-182
3. S. Tsukamoto, I. Kawaguchi, G. Arakane, T. Kamata & K. Maekawa : Suppression of Welding Defects in Deep Penetration CO₂ Laser Welding, ICAKEO (2000), 7-15
4. Y. MASUHIRO, Y. INABA and T. OHJI : Mathematical Modeling of Molten Pool in Laser Welding, Proceedings of LAMP 1992, Nagaoka (June, 1992), 381-384
5. J. Dowdn, R. Ducharme, P. Kapadia and A. Clucas : A Mathematical Model for the Penetration Depth in Welding with continuous CO₂ Laser, ICALEO (1994), 451-460
6. R. Ducharme, P. Kapadia, J.M. Dowden, K. Williams and W.M. Steen : An Integrated Mathematical Model for the Welding of Thick Sheets of Metal with a Continuous CO₂ Laser, ICALEO (1993), 97-105
7. Isamu Miyamoto, Takashi Inoue, Jay F. Tu, Kazuhiko One, Kaoru Adachi, Kanji Katada : Analysis of keyhole phenomenon based on BGR light emission in 20kW-class CO₂ laser welding, ICALEO (2002)
8. Takuomi MAIWA, Isamu MIYAMOTO and Kiyokazu MORI, : Properties of keyhole plasma in CO₂ Laser Welding, ICALEO'95, Laser Institute of America, (1995), 708-717
9. E. A. Metzbowler : Absorption in the Keyhole, ICALEO'97, (1997), Section G 16-25
10. D. A. V. Clucas, W. Steen, : A Mathematical Model of Laser Keyhole Welding Using a Pressure and Energy Balance at the Keyhole Walls, ICALEO'98, (1998), Section F 123-131
11. D. A. V. Clucas, R. Ducharme, P. D. Kapadia, J. M. Dowden and W. M. Steen, : A Mathematical Model of the Flow within the keyhole during Laser Welding, ICALEO'95 (1995), 989-998
12. Min Hyun Cho, Dave Farson : Control of laser weld keyhole dynamics by power modulation, IWC, (2002), 600-605
13. Jae Y. Lee, Sung H. Ko, Choong D. Yoo : Mechanism of keyhole formation and stationary laser welding, IWC, (2002), 644-649