

# 6mm<sup>t</sup>조선용 Primer코팅강판의 CO<sub>2</sub>레이저 용접성 (II)

- 레이저 용접현상의 동적거동과 기공 및 증발입자의 조성 -

## The Weldability of 6mm<sup>t</sup> Primer-coated Steel for Shipbuilding Using CO<sub>2</sub> Laser (II)

- Dynamic Behavior of Laser Welding Phenomenon and composition of porosity and vaporized-particle -

김 종도\* · 박 현준\*\* · 이 종봉\*\*\*

\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

\*\* 한국해양대학교 대학원

\*\*\* POSCO 기술연구소

### 1. 서 론

본 연구에서는 조선용 primer코팅강판 AH36의 CO<sub>2</sub>레이저 용접시 유기 플라즈마 및 킨홀등의 용접현상에 대한 고속도 관찰과 재료학적 분석에 의하여 스패터 현상을 비롯한 킨홀과 기공 등의 형성메카니즘을 규명함으로써 용접결함 발생과 방지에 대한 근본적이 대안책을 제시하고자 하였다. 킨홀과 유기 플라즈마의 거동은 모재로부터 증발하는 합금원소의 동적거동을 반영하고 있으므로, 유기 플라즈마의 거동에 대한 분석결과는 용접금속의 용융특성에 미치는 정성적인 primer의 거동분석에 매우 유효하게 이용될 수 있다. 또한 이 분석결과는 금속재료적인 측면 및 킨홀의 동적 거동에 관한 계측결과와 연계하여 primer거동에 대한 메카니즘을 추정하였다.

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

### 2. 실험방법

#### 2.1 레이저 유기 플라즈마와 스패터의 거동관찰

레이저 용접 중 재료 표면에 발생하는 유기 플

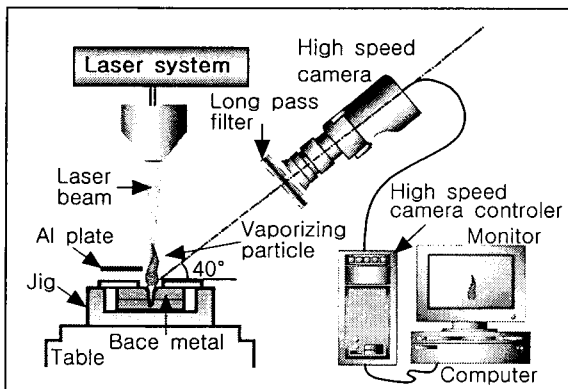


Fig. 1 Schematic experimental setup for observation of laser-induced plasma and spatter

라즈마와 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 $\mu$ s이다.

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

#### 2.2 Primer 코팅강판에 대한 용접현상의 재료학적 분석

Primer코팅강판의 레이저 용접시 기공의 발생이 용이한 Lap welding조건에서 얻어진 용접금속부를 강제 파단하여 노출된 기공내벽을 SEM으로 관찰하고, 기공표면 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 primer의 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 킨홀 용접현상의 고속도 계측

레이저 용접 중 재료내부에서 형성되는 킨홀과 기공의 동적거동을 X-선 투과 영상시스템을 이용하여 관찰하였으며, 그 장치의 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 계측시스템은 X-선관, 이미지 증폭기(II ; Image Intensifier), 영상처리장치, CCD와 비디오 고속도 카메라 시스템 및 시험편의 이동테이블 부분으로 구성되어 있으며, X-선 방호막으로 실드되어 있다. 본 실험에서 사용한 시험편의 폭은 X-선의 투과량을 고려하여 3mm로 하고

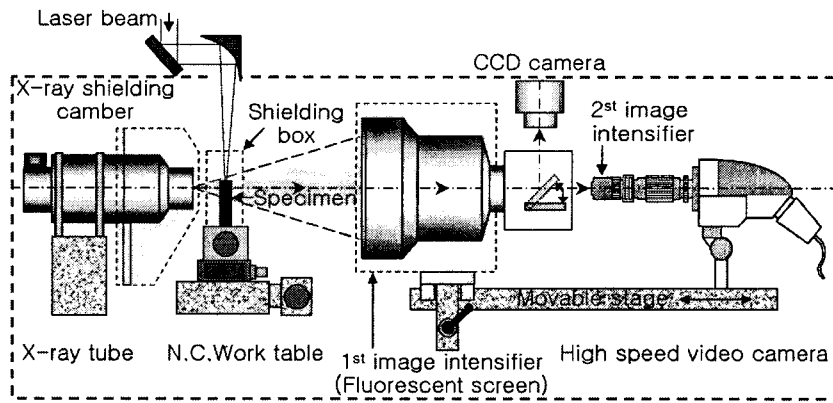


Fig. 2 Schematic arrangement of X-ray transmission imaging system for observation of keyhole and porosity in laser welding

X-선 초점은  $50\mu\text{m}$  또는  $250\mu\text{m}$ 를 사용하였다.

본 실험에 사용된 레이저 장치는 최대출력 50kW의 3축 직교형 CO<sub>2</sub> 레이저로서, 레이저빔의 모드는 링 모드이며 초점거리( $f$ )는 381mm이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 레이저 유기 플라즈마와 스패터의 거동

Primer코팅 강판의 Lap welding시 Lap 부위에 코팅된 primer의 증발에 기인하여 기공과 스패터가 발생하며, 적절한 gap 간극을 유지함으로써 건전한 비드를 얻을 수 있음을 제1보에서 이미 보고하였다<sup>1)</sup>. 이 실험에서는 레이저 조사시에 유기하는 플라즈마의 거동을 관찰함으로써 키흐의 거동을 추정하고 스패터에 의한 비드결함 형성과 상호관련성을 규명하고자 하였다.

용융액의 비산현상은 용융금속내의 과도적인 증발현상에 의해 키흐로부터 재료표면으로 분출되는 합금원소의 증발압력에 의해 수반되며, 그 결과 용접비드는 험핑비드 등 여러 형태의 결함을 가지게 된다. 이 과도적인 증발현상은 시험편 표면에 형성되는 플라즈마와 스패터의 발생 거동에 영향을 미치게 된다. 따라서 용융금속 내의 상황을 반영하는 플라즈마와 스패터의 발생거동을 가시화하여 관찰함으로써 용접결함의 발생여부 및 그 정도를 예상할 수 있다.

##### 3.1.1 Bead welding의 경우

Primer 코팅강판의 용접에 있어서 기공과 스패터가 거의 발생하지 않는 Bead welding의 완전 용입조건에서 플라즈마의 거동을 관찰하였다. 이는 Lap welding시에 많은 스패터를 수반하는 용접현상과 비교하기 위한 기초자료를 얻기 위해 수행되었다.

Bead welding의 경우, primer의 표면코팅여부에 관계없이 완전용입조건에서는 기공이나 스패터가 존재하지 않는 미려한 비드형상을 보이고 있었으며, 이것은 유기 플라즈마와 스패터의 동적 거동에도 잘 반영되어 있었다. 용액으로부터 비산하는 스패터는 primer코팅강판의 경우 다수 관찰되었으나 용접금속의 비드에 영향을 줄 정도는 아니었다.

즉, Bead welding에서는 타의 용접법에 비하여 안정된 거동을 보이고 있었다.

##### 3.1.2 Lap welding의 경우

###### (1) Primer 코팅의 영향

Primer코팅강판의 Lap welding시 스패터가 다량으로 발생하여 humping비드가 형성되어 있는 비드형상과 그 때의 유기플라즈마 및 스패터의 비산거동을 Fig. 3(a)에 나타낸다. 스패터의 비산거동을 관찰함에 있어서는 적외광의 Long pass filter를 사용하였다. 본 실험에서는 스패터가 발생하는 시기와 발생 메카니즘을 규명하고자 하였다.

Fig. 3(a)로부터, 비드단면에는 심한 humping현상을 보이며 그 내부에는 Lap위치를 따라서 다량의 기공이 형성되었음을 알 수 있다. 이러한 용접현상은 primer의 급속한 증발에 의해 과도적으로 발생되며 용융지로부터 용액의 비산을 초래한다. 비산하는 스패터의 동적거동에 대한 고속도 측정결과로부터 알 수 있듯이 유기플라즈마가 키흐로부터 시험편의 표면으로 분출하듯이 팽창 또는 성장할 때 키흐 주변에 형성되어 있는 용액을 같이 들어올려 스패터를 비산시키게 되는데, 이때 키흐주변으로부터 비산되는 스패터는 다량으로 분출되어 용접 진행방향의 반대측으로 뿌려지듯이 흘러 보내게 된다. 이 결과 용접금속의 비드에는 humping비드가 형성되며 그 내부에는 과도적인 키흐의 움적임에

**Lap welding;**  $P=6kW$ ,  $v=1m/min$ ,  $f_d=-2$ ,  $t_{pr}(\mu m)=S(30)+L(60)$ , He(15 l /min),  $n_f=1,000FPS$ ,  $S_s=1/20,000$

Photo $G_c(mm)$	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Behavior of laser-induced plasma					Unit : ms
			$t+0$	$t+1$	$t+2$	$t+4$	$t+5$	
(a) 0								
(b) 0.1								
(c) 0.15								

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

따라 다량의 기공이 남게 되는 것이다.

(2) Gap 간극의 영향

Lap welding시에 Gap간극을 두어 Lap부위로 부터 증발하는 primer의 압력을 배출시킴으로서 스패터 현상을 억제 또는 방지하여 건전한 용접 결과를 얻게 되는 과정에서 플라즈마의 거동을 계측하였다. Primer코팅강판에 대하여 Gap간극 ( $G_c$ )을 0.1mm와 0.15mm로 하였을 때 얻어진 용접금속의 비드형상 및 유기플라즈마와 스패터의 비산거동을 Fig. 3의 (b)와 (c)에 나타내었다.

Gap간극을 두지 않을 때의 결과와 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 약화

된 듯 용접진행 방향의 후부로 뿌려지는 시간과 거리가 상대적으로 길지 않다.

3.2 Primer의 증발거동에 대한 재료학적 분석

3.2.1 용접금속내 기공의 조성

Fig. 4는 Lap부에 위치한 기공을 강제 파단하여 노출된 기공의 내벽 SEM사진과 EDX분석 결과를 나타내고 있다. SEM사진의 (a)는 기공의 하부를, 그리고 (b)는 그 반대위치인 상부의 기공내벽 형상을 각각 보이고 있는데, 마치 조개껍질을 벌려놓은 듯한 형상과 유사하다. (c)는 기공 내벽의 개재물을, (d)는 기공내벽의 셀상 텐드라이트 응고조직을 보이고 있으며, 기공 내벽 및 개재물의 EDX분석 결과를 우측에 나타내었다.

실험 결과로부터, 기공 내벽의 전체에 걸쳐서 AH36의 주된 합금원소인 Fe원소가 다량으로 검

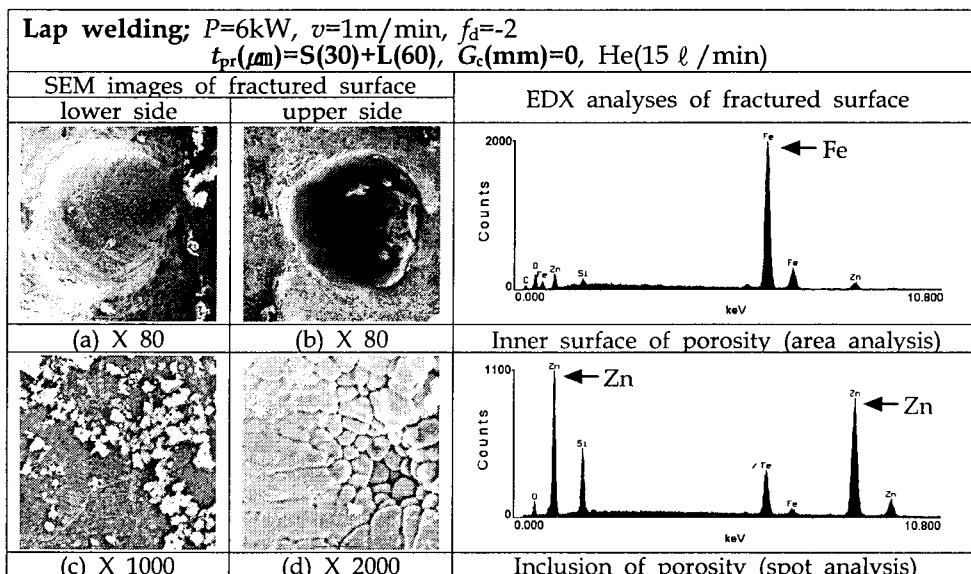


Fig. 4 Photographs of SEM and results of EDX analyses in porosity

출되는 가운데 primer 성분인 Zn과 Si 성분도 다수 관찰된다. 특히 기공내의 개재물에는 Zn 성분이 최대 85%에 이르고 있다. 또한 O의 성분이 검출된 점으로부터 이들 원소들은 산화물을 형성하고 있음을 알 수 있다. 그러나 기공이 아닌 용접금속 부가 강제 파단된 딴플구조(Dimple structure)에서는 Zn 성분이 전혀 검출되지 않았으며, 기공과 인접한 열영향부에는 다량의 Zn과 Si가 검출되었다. 또한 기공이 열영향부의 두 방향에서 풍선을 불러 부풀린 듯한 형상을 하고 있는 것으로부터 이러한 기공은 열영향부에서 다량의 primer가 증발 공급되어 이루어진 것임을 짐작할 수 있다.

3.2.2 증발입자의 조성

Lap welding시 primer코팅두께 및 Gap간극의 유무와 크기의 조건에 따라 증발물질을 포집하여 그 성분을 분석하고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Composition of vaporizing particles

G <sub>c</sub> (mm)	Element t <sub>pr</sub> (μm)	Fe	Zn	Si	Mn	O
		0	S(15)+L(30)	18.83	71.98	0.75
	S(30)+L(60)	3.30	92.15	1.16	0.90	2.48
0.2	S(15)+L(30)	49.48	35.38	0.42	11.28	3.49
	S(30)+L(60)	36.86	50.91	0.85	8.44	2.94

Gap간극을 두지 않았을 경우 포집된 증발원소의 조성비는 primer코팅두께에 따라 Zn이 약 70~90wt%를 점유하며 산화물을 형성하고 있음을 알 수 있다. 그런데 Gap간극을 0.2mm로 두게 될 경우 primer의 주성분인 Zn의 증발조성은 15 μm표면코팅의 경우 약 35 wt%, 30 μm코팅의 경우 약 50 wt%로 감소하고 있음을 확인하였다. 즉 Gap간극을 두게 됨으로서 시험편의 표면으로 증발하는 합금원소 및 primer의 조성비율에도 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

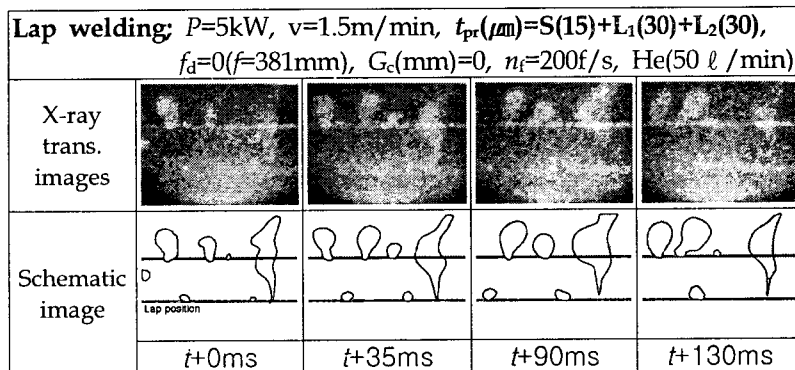


Fig. 5 X-ray transmission images of kyehole and bubbles or porosity during CW CO<sub>2</sub> laser lap welding of primer-coated steel

3.3 Lap welding에서의 키홀과 기공의 형성 메커니즘

이 실험에서는 여러 용접조건에서 재료내부에 형성되는 키홀의 거동을 X-선 투과 영상시스템을 이용하여 직접 관찰하고 기공의 형성메커니즘에 대한 명확한 규명을 꾀하고자 하였다.

Fig. 5는 primer코팅강판의 Lap welding시 키홀 및 기공의 형성거동에 대한 계측 레를 나타낸다. 가시효과를 높이기 위하여 아래에 모식도와 함께 나타내었다. Lap부위로부터 증발한 primer는 레이저빔 열원이 지나간 후에도 잔류열에 의하여 증발이 계속 이루어짐으로서 기공이 더욱 커지는 특이한 거동을 보이고 있다.

이와 같은 기공의 형성 메커니즘을 Fig. 6에 개략도로 나타내었다. 그림의 하부는 키홀용접이 이루어지는 시험편의 측면에서 본 것이며, 상부그림은 하부그림의 평면도에 해당하는 것으로 기공의 형성메커니즘을 입체적으로 표현하고자 하였다. 즉 키홀이 재료내부에 형성되어 진행하게 되면 용접진행방향의 앞부분에 위치한 Lap부위로부터 증발한 primer가 키홀에 함입되면서 키홀을 통하여 소실되기도 하며, 소실되는 가운데 키홀을 부풀리게 하여 불완전한 동적 거동을 가속화시키게 된다. 또한 빔 열원이 지나간 후에도 재료속의 잔류열 만으로도 primer는 증발을 계속 하여 기공의 성장을 촉진시키게 된다. 이때 기공의 성장방향은 상대적으로 성장하기 쉬운 고온영역의 빔축을 향하여 팽창하게 되는 것이다.

참고문헌: 1. 박현준·김중도 외: 기계의 날 선포 및 2002년도 기계관련 산학연합심포지엄(대한용접학회편), 177-182

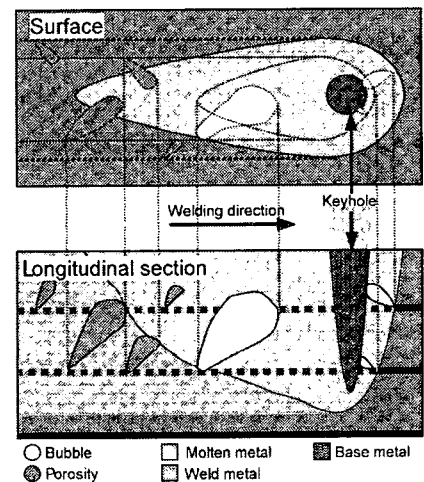


Fig. 6 Porosity formation mechanism in lap welding of primer-coated steel