

조선용 Zn-riched Primer코팅강판의 CO₂ 레이저 용접성(II)

-기홀 용접현상의 고속도 관찰-

The Weldability of Zn-riched Coating Steel for Shipbuilding by CO₂ Laser(II)

-High Speed Observation of Keyhole Welding Phenomenon-

한국해양대학교 기관시스템공학부 김종도

한국해양대학교 대학원 박현준

한국해양대학교 선박전자기계공학부 오진석

I. 서론

최근 조선관련 업계에서는 해양환경에 적합한 표면처리 강판의 적용을 검토하고 있으며, 선박 등 대형수송기기의 고속화 및 절전에너지화 문제와 더불어 경량화가 크게 부각됨에 따라 종래의 골재와 판에 의한 용접구조로부터 레이저를 이용한 박판 집합체 용접구조로의 전환을 고려하고 있는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 조선용 Zn-riched primer코팅강판 AH36의 CO₂레이저 용접시 유기 플라즈마 및 키홀등의 용접현상에 대한 고속도 관찰과 재료학적 분석에 의하여 스패터 현상을 비롯한 키홀과 기공 등의 형성메카니즘을 규명함으로써 용접결합 발생과 방지에 대한 근본적이 대책을 제시하고자 하였다. 키홀과 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 키홀의 동적 거동에 관한 계측결과와 연계하여 primer거동에 대한 메카니즘을 추정하였다.

II. 사용재료 및 실험방법

(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(spatter, 날림입자)의 거동을 동시에 관찰하였다.

(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.

(3) X-선 투과 영상시스템을 이용한 키홀 용접현상의 고속도 계측

레이저 용접 중 재료내부에서 형성되는 키홀과 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

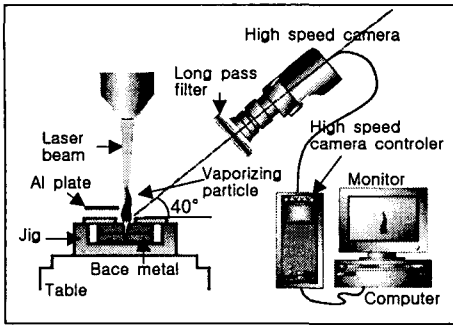


Fig. 1 Schematic experimental setup for observation of laser-induced plasma and spatter

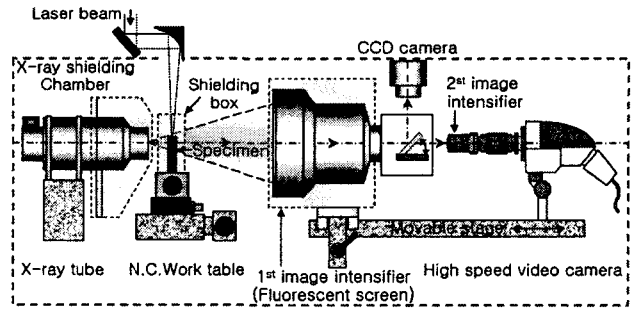


Fig. 2 Schematic arrangement of X-ray transmission imaging system for observation of keyhole and porosity in laser welding

구성되어 있으며, X-선 방호막으로 실드되어 있다. 본 실험에서 사용한 시험편의 폭은 X-선의 투과량을 고려하여 3mm로 하고 X-선 초점은 $50\mu\text{m}$ 또는 $250\mu\text{m}$ 를 사용하였다.

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

III. 실험 결과 및 고찰

(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 보고하였다¹⁾. 본 실험에서는 레이저 조사시에 유기하는 플라즈마의 거동을 관찰함으로써 키홀의 거동을 추정하고 스패터에 의한 비드결함 형성과 상호관련성을 규명하고자 하였다.

용융액의 비산현상은 용융금속내의 과도적인 증발현상에 의해 키홀로부터 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.

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 용융기로부터 용액의 비산을 초래한다. 비산하는 스패터의 동적거동에 대한 고속도 계측결과로부터 알 수 있듯이 유기플라즈마가 키홀로부터 시험편의 표면으로 분출하듯이 팽창 또는 성장할 때 키홀 주변에 형성되어 있는 용액을 같이 들어올려 스패터를 비산시키게 되는데, 이때 키홀주변으로부터 비산되는 스패터는 다량으로 분출되어 용접진행방향의 반대측으로 뿌러지듯이 흘러 보내게 된다. 이 결과 용접금속의 비드에는 humping비드가 형성되며 그 내부에는 과도적인 키홀의 움직임에 따라 다량의 기공이 남게 되는 것이다.

② Gap 간극의 영향

Lap welding시에 gap간극을 두어 lap부위로부터 증발하는 primer의 압력을 배출시킴으로서 스패터 현상을 억제 또는 방지하여 건전한 용접결과를 얻게 되는 과정에서 플라즈마의 거동을 계측하였다. Primer코

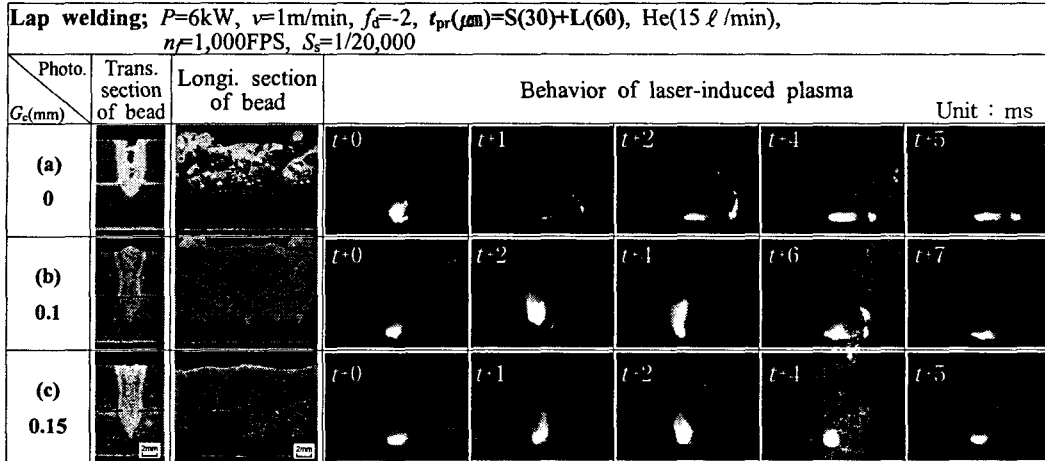


Fig. 3 High speed photographs of laser-induced plasma and spatter in lap welding

팅강판에 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 약화된 듯 용접진행 방향의 후부로 뿌려지는 시간과 거리가 상대적으로 길지 않다.

(2) Primer의 증발거동에 대한 재료학적 분석

① 용접금속내 기공의 조성

Fig. 4는 lap부에 위치한 기공을 강제 파단하여 노출된 기공의 내벽 SEM사진과 EDX분석 결과를 나타낸다. SEM사진의 (a)는 기공의 한쪽 단면을 보이고 있으며, (b)~(d)는 기공 내벽에 대한 각 원소별 EDX면분석 결과를 나타내고 있다. 또한, 기공 내벽 및 기공 내 개재물의 EDX분석 결과를 우측에 나타내었다.

기공 내벽의 전체에 걸쳐서 AH36의 주된 합금원소인 Fe원소가 다량으로 검출되는 가운데 primer성분인 Zn과 Si성분도 다수 관찰된다. 특히 기공내의 개재물에는 Zn성분이 최대 85%에 이르고 있다. 그리고

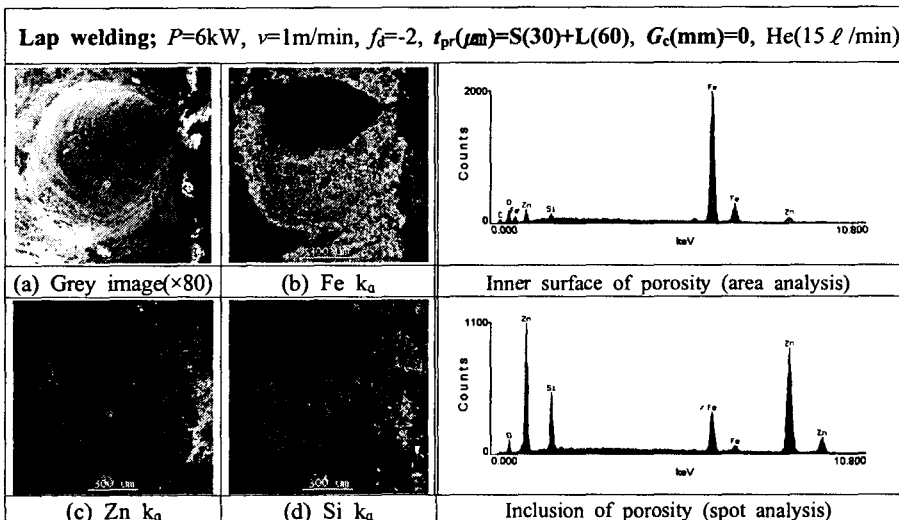


Fig. 4 Results of EDX analyses in porosity

O의 성분도 함께 검출된 점으로부터 이들 원소들은 산화물을 형성하고 있음을 알 수 있다. 그러나 기공이 아닌 용접금속부가 강제 파단된 딩플구조(Dimple structure)에서는 Zn성분이 전혀 검출되지 않았으며, 기공과 인접한 열영향부에는 다량의 Zn과 Si가 검출되었다. 또한 기공이 열영향부에서 붙어 부풀린 듯한 형상을 하고 있는 것으로부터 이러한 기공은 열영향부에서 다량의 primer가 증발 공급되어 이루어진 것으로 판단할 수 있다.

② 증발입자의 조성

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

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 μ m표면코팅의 경우 약 35 wt%, 30 μ m코팅의 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.

Table 1 Composition of vaporizing particles

G _c (mm)	Element t _{pr} (μ m)	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

(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. 재료내부에 형성되는 키홀은 시간의 경과와 더불어 매우 불규칙한 거동을 보이고 있으며, Primer의 급속한 증발로 키홀 전체가 부풀린 상태로 형성되어 있다. 키홀 내의 증발된 합금원소 및 primer의 영향으로 부풀린 부분이 위아래로 움직이는 가운데 lap부위로부터 높은 압력의 증발현상이 가세하게 되면 키홀의 가운데 부분은 더욱 팽창하여 그 일부가 키홀로부터 떨어져 나가 기공으로 잔존하게 되는 것을 관찰할 수 있다.

이와 같은 기공의 형성 메커니즘 정리해 보면, 키홀이 재료내부에 형성되어 진행하게 될 때 용접진행 방향의 앞부분에 위치한 lap부위로부터 증발한 primer가 키홀에 합입되면서 키홀을 통하여 소실되기도 하며, 소실되는 가운데 키홀을 부풀리게 하여 불완전한 동적 거동을 가속화시키게 된다. 또한 빔 열원이 지나간 후에도 재료속의 잔류열만으로도 primer는 증발을 계속 하여 기공의 성장을 촉진시키게 된다. 이 때 기공의 성장방향은 상대적으로 성장하기 쉬운 고온영역의 빔 축을 향하여 팽창하게 되는 것이다.

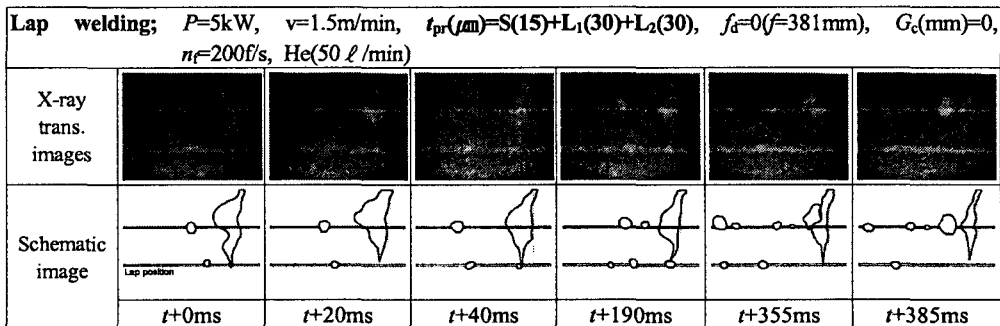


Fig. 5 X-ray transmission images of keyhole and bubbles or porosity during CW CO₂ laser lap welding of primer-coated steel

참고문헌 1. 김 종도, 박 현준, 오 진석 : 조선용 Zn-riched Primer코팅강판의 CO₂ 레이저 용접성(I)-코팅조건과 갭간극의 영향, 한국레이저가공학회 춘계학술발표대회 논문개요집, 18~21